

Värien nimeäminen ja luokittelu

Elina Räisänen

10.5.2004

Joensuun yliopisto
Tietojenkäsittelytiede
Pro gradu -tutkielma

Tiivistelmä

Perusväreiksi luokiteltavia värejä on värinnimeämiskokeiden perusteella havaittu olevan yksitoista. Nämä yleisinhimillisesti samanlaisina koetut värit ovat *punainen, vihreä, sininen, keltainen, ruskea, vaaleanpunainen, purppura, oranssi, valkoinen, musta* ja *harmaa*. Punainen on perusväreistä keskeisin, ja sen ympärille väriavaruuteen asettuvat ruskea, vaaleanpunainen, purppura ja oranssi. Sininen ja vihreä puolestaan esiintyvät väriavaruudessa suurina, jakamattomina alueina.

Ihmisen värihavaintojärjestelmä on rakentunut perusvärien ympärille ja värimuisti toimii perusväriluokkien kautta. Musta, valkoinen ja harmaa havaitaan oman akromaattisen havaintokanavansa kautta ja muut värit havaitaan puna-vihreän ja sini-keltaisen vastaväriparin kombinaatioiden avulla. Perusväriluokkiin kuuluvat värinäytteet nimetään nopeammin, johdonmukaisemmin ja yksimielisemmin kuin muut värit. Lähellä väriluokan keskusta olevat värit muistetaan parhaiten, ja luokan reunoilla olevat värit siirtyvät muistissa kohti luokan keskusta eli keskusalkiota. Keskusalkio on kyseisen väriluokan paras edustaja.

Tässä tutkielmassa selvitetään yleisten perusväriluokkien teoriaa ja sen tutkimiseksi järjestettyjä värinnimeämiskokeita. Värinnimeämiskokeissa löydettyjä väriluokkien keskusalkioita verrataan itseorganisoivalla kartalla ja ei-negatiivisella matriisihajotelmalla laskettuihin keskusalkioihin. Havaitaan, että laskennallisten menetelmien tuottamat keskusalkiot sijoittuvat väriavaruuteen värinnimeämiskokeiden väriluokkien keskusalkioita tasaisemmin. Ensisijaiset kromaattiset perusvärit eli punainen, vihreä, sininen ja keltainen asettuvat samoille alueille värinnimeämiskokeiden vastaavien väriluokkien kanssa, mutta muiden väriluokkien kohdalla vaihtelu on suurempaa. Ei-negatiivisen matriisihajotelman värikylläiset ja sävyltään puhtaat keskusalkiot muistuttavat värinnimeämiskokeiden tuloksia enemmän kuin itseorganisoivan kartan spektriltään tasaiset ja siten vähemmän värikylläiset ja sävyltään epäpuhtaat keskusalkiot.

Avainsanat: perusväri, väritermi, värinnimeäminen, värimuisti, itseorganisoiva kartta, ei-negatiivinen matriisihajotelma

Sisältö

1 Johdanto	1
1.1 Sanastoa	3
2 Väriavaruudet	5
2.1 Värin spektriesitys	5
2.2 Laskennalliset väriavaruudet	7
2.3 Munsellin värijärjestelmä	10
3 Ihmisen värinäköjärjestelmä	14
3.1 Silmän rakenne	14
3.1.1 Verkkokalvo	16
3.2 Värinäkömallien historiaa	19
3.3 Monitasoinen värinäkömalli	21
4 Yhdentoista perusvärin teoria	25
4.1 Värisanaston tutkimisen historiaa	25
4.2 Ehdot perusväritermeille	27
4.3 Värisanastojen alkuperäinen ryhmittely	29
4.4 Perusväriluokkien sisäinen rakenne	31
4.4.1 Ensi- ja toissijaiset perusvärit	32
4.5 Väriluokkien väliset erot	32
4.5.1 Yhdistelmäluokat	33
4.5.2 Johdannaisluokat	36
4.5.3 Perusvärien keskeisyyserot	37
5 Yleisten väriluokkien teorian ongelmia	38
5.1 Määritelmän ongelmallisuus	38
5.2 Yleisten kategorioiden olemassaolo	40
5.2.1 Kielellinen relativismi	40
5.2.2 Kielen vaikutus ajatteluun	42
5.3 Väriluokkiin liittyvät oletukset	44
5.4 Perusväritermien lukumäärä ja ilmestyminen sanastoon	46
5.5 Koejärjestelyt	47
5.6 Nykyinen tilanne	48

6	Väriinnimeämiskokeiden tuloksiin vaikuttavat seikat	50
6.1	Väriinnimeämiskokeiden tyypit	50
6.2	Erot kielen sisällä	53
6.2.1	Sukupuolten väliset erot	53
6.2.2	Ikäryhmien väliset erot	54
6.3	Värimuistin osuus värien nimeämisessä	55
6.3.1	Väriäistimuksen käsittely aivoissa	55
6.3.2	Koejärjestelyt värimuistin tutkimiseksi	58
7	Käytetyt laskennalliset ryhmittelymenetelmät ja tietokannat	60
7.1	Itseorganisoiva kartta	60
7.1.1	SOM_PAK-ohjelmapaketti ja ryhmittelyohjelma	62
7.2	Ei-negatiivinen matriisihajotelma	64
7.3	Farnsworth-Munsell 100 -värinäköttesti	67
7.4	Munsellin värikirjat	69
8	Keskusalkioiden sijainti väriavaruudessa	71
8.1	Perusvärien ominaisuudet	71
8.2	Väriinnimeämiskokeiden keskusalkiot	73
8.3	<i>Matte</i> -kirjan keskusalkiot	83
8.4	Kahdestoista perusväri?	89
9	Yhteenveto	92
	Lähteet	96

1 Johdanto

Normaalilla näkökyvyllä varustettu ihminen pystyy hyvissä valaistusolosuhteissa erottamaan hieman yli 2 miljoonaa värisävyä [43]. Englannin kielessä on yhteensä noin 400 erilaista termiä kuvailemaan värisävyä, mutta keskimääräisen kielenkäyttäjän sanasto on siitä vain 10 prosenttia, ja aktiivisessa jokapäiväisessä käytössä olevien termien määrä vielä vähemmän [55]. Ihmiset havaitsevat värisävyjen muutoksen jatkuvana esimerkiksi sateenkaarta katsoessaan, mutta silti värejä käsitellään kielen ja sitä kautta myös havainnon tasolla diskreetteinä väriluokkina. Sateenkaarta kuvaillessaan ihmiset käyttävätkin sellaisia väriavaruuden rajattuja alueita kuvaavia termejä kuin sininen, punainen ja keltainen.

Brent Berlin ja Paul Kay julkaisivat vuonna 1969 yhdentoista perusvärin teoriansa. Sitä varten he olivat tutkineet yhteensä 98 kielen väritermejä ja termien välisiä suhteita. Löytämiensä yhtäläisyyksien perusteella he esittivät oletuksensa kielestä riippumattomien perusvärien määrästä ja hierarkiasta, eli he esittivät myös järjestyksen, jossa perusvärien nimet ilmestyvät kieleen vähitellen kielen kehittyessä [3]. Löydetyt perusvärit ovat *punainen, vihreä, sininen, keltainen, ruskea, vaaleanpunainen, oranssi, purppura, musta, valkoinen* ja *harmaa*. Jos kielessä ei ole nimeä kaikille näistä perusväreistä, nimet puuttuvat Berlinin ja Kayn mukaan tietyssä järjestyksessä. Heidän mukaansa väriluokkien tulee kielestä riippumatta olla samankaltaisia, eli väriluokan tulee sijaita tietyllä alueella väriavaruudessa. Ainakaan luokat eivät Berlinin ja Kayn mukaan voi erota rajoittamattomasti kielten välillä, koska kaikkien ihmisten värinäön fysiologiset ominaisuudet ovat samanlaiset ja samanlainen havainto saa aikaan samankaltaiset luokat.

Berlinin ja Kayn näkökanta oli 1960-luvulla hyvin radikaali ja poikkesi täysin vallalla olleesta kielellisen relativismin ajattelutavasta, jonka mukaan kieli on havainnoinnin ensisijainen työkalu ja siten määrittää havainnot [57]. Koska eri maissa ihmiset puhuvat rakenteeltaan hyvin erilaisia kieliä, on heidän ajattelu- ja havainnointitapansakin erilainen. Semanttiset kategoriat, kuten väriluokat, voivat siten olla rajoittamattomasti erilaiset eri ihmisillä. Berlinin ja Kayn ajatusten mukainen yleisten väriluokkien teoria ja kielellisen relativismin teoria elävät edelleen rinnakkain erityisesti kulttuurisessa väritutkimuksessa.

Väriluokkien nimiä, rakennetta ja sijoittumista väriavaruuteen on tutkittu värinimeämiskokeilla jo 1800-luvulta alkaen [3]. Hyvin laajoja koesarjoja on suoritettu yleisten kategorioiden olemassaolon tutkimiseksi, eräänä esimerkkinä *World Color Survey*, WCS [29]. WCS:n värinimeämiskokeissa tutkittiin pienten kirjakielettömien kielten väriluokkia, koska oli esitetty väitteitä yhdentoista perusväritermin teorian toteutuvuudesta pelkästään länsimaisten kielten kohdalla [27]. Myös luonnonkansojen kirjakielettömien kielten väriluokat näyttäisivät noudattavan Berlinin ja Kayn oletusta.

Tässä tutkielmassa keskitytään Berlinin ja Kayn tutkimustulosten ohella Julia Sturgesin ja T. W. Allan Whitfieldin [53] vuonna 1995 julkaistun värinimeämiskokeen tulosten tutkimiseen. Heidän tuloksensa noudattelevat hyvin pitkälti Berlinin ja Kayn tuloksia, ja vahvistavat siten oletusta yhdestätoista perusväristä.

Tämän tutkielman tarkoitus on selvittää värinimeämiskokeiden taustalla olevaa yhdentoista perusvärin teoriaa sekä verrata kokeissa löydettyjä keskusalkioita itseorganisoivan kartan ja ei-negatiivisen matriisihajotelman avulla saatuihin keskusalkioihin. Itseorganisoivalla kartalla tehdyt laskut on suoritettu erikoistyössäni [48] toteuttamallani ohjelmalla. Ei-negatiivisen matriisihajotelman kohdalla käytössä on ollut Daniel D. Leen ja H. Sebastian Seungin [33] toteuttama ohjelma.

Laskennallisten keskusalkioiden sijoittumista väriavaruuteen verrataan värinimeämiskokeiden tuloksiin, jotta voitaisiin saada selville onko perusvärien erityisasemaan jokin kyseisten värien spektreihin liittyvä selitys. Mikäli lasketut perusvärit ovat samankaltaisia kuin värinimeämiskokeiden keskusalkiot, voidaan niiden olettaa olevan paitsi psykologisesti myös fysikaalisesti erilaisessa asemassa kuin muut. Väriluokkien rakennetta ei tutkielmassa analysoida, koska väriluokkien reunat vaihtelevat kielten välillä huomattavasti enemmän kuin luokkien keskusalkioiden sijainti väriavaruudessa.

Toinen syy keskusalkioihin keskittymiseen on itseorganisoivan kartan ja ei-negatiivisen matriisihajotelman ominaispiirteissä. Itseorganisoiva kartta ryhmittelymenetelmänä tuottaa myös väriluokat, joten sen avulla väriluokkien tutkiminen onnistuisi melko suoraviivaisesti. Ei-negatiivinen matriisihajotelma tiivistää tietokannan olennaisen tiedon kantavektoreilla esitettäväksi, mutta ei varsinaisesti ryhmittele tietokantaa mitenkään.

Ei-negatiivisen matriisihajotelman keskusvektorit erityisesti Munsellin *Matte*-värikirjalle [42] vastaavat melko hyvin värinimeämiskokeiden keskusalkioita. Itseorganisoivalla kartalla saadut keskusalkiot taas ovat muodoltaan tasaisempia, eivätkä siten väreinä yhtä puhtaita ja värikylläisiä kuin värinimeämiskokeiden tai ei-negatiivisen matriisihajotelman keskusalkiot. Itseorganisoivan kartan tuottamat keskusalkiot eivät siksi vastaa värinimeämiskokeiden keskusalkioita yhtä selkeästi. Perusväreistä punainen, vihreä, sininen ja keltainen ovat kuitenkin löydettävissä melko hyvin värinimeämiskokeiden väriluokkia vastaavina molemmissa tapauksissa. Muiden perusvärien kohdalla vaihtelua on enemmän.

Toisessa luvussa tutustutaan värin perusluonteeseen ja tutkielmassa käytettyihin värijärjestelmiin. Luvussa 3 selvitetään peruseriaatteet ihmisen värinäköjärjestelmästä koska ainakin osa perusväreistä saa erityisasemansa juuri värinäköjärjestelmän toiminnan kautta. Lyhyesti käydään läpi silmän rakenne sekä värinäkömallien historia ja nykyiset oletukset. Luvussa 4 esitellään Berlinin ja Kayn yhdentoista perusvärin teoria, selvitetään millä ehdoilla tietyt värien nimet ovat perusväritermejä ja millaisia perusvärien luokat ovat. Luvussa 5 selvitetään yhdentoista perusväritermin teoriaa kohtaan esitettyä kritiikkiä. Luvussa 6 paneudutaan erilaisiin värinimeämiskokeisiin sekä niiden tuloksiin vaikuttaviin seikkoihin. Luvussa 7 puolestaan esitellään itseorganisoiva kartta, ei-negatiivinen matriisihajotelma sekä luokittelussa käytetyt tietokannat ja värinäköttesti, jonka avulla tutkitaan itseorganisoivan kartan soveltuvuutta värispektrietokannan ryhmittelyyn. Keskusalkioiden sijoittuminen väriavaruuteen esitellään luvussa 8. Siinä verrataan värinimeämiskokeiden ja käytettyjen laskennallisten menetelmien tuloksia käyttäen sekä Munsellin värijärjestelmän merkintätapaa että kolmiulotteista CIE $L^*a^*b^*$ -väriavaruutta.

1.1 Sanastoa

ei-negatiivinen matriisihajotelma (non-negative matrix factorization)

menetelmä, jossa tietokanta esitetään kantavektoreiden avulla tiedon tiivistämiseksi [33]

itseorganisoiva kartta (self-organizing map) neuraalilaskennan menetelmä, jota voidaan käyttää mm. suuren tietomäärän ominaisuuksien kuvaamiseen ilman analyyttistä mallia [31]

johdonmukaisuus (consistency) väritermin käyttö on johdonmukaista, mikäli sama ihminen käyttää samaa termiä (lähes) aina samasta sävystä [3]

keskusalkio (focus, mon. foci) paras esimerkki kyseisestä väristä, näyte joka värinimeämiskokeissa useimmin valitaan kyseisen värin parhaaksi edustajaksi, luokan alkoiden prototyyppi [3]

kieellinen relativismi (linguistic relativism) paradigma, jonka mukaan kieli määrittää ihmisen havainnon ja maailmankuvan, ja siksi eri kieliä puhuvat ihmiset hahmottavat maailmaa radikaalisti (jopa yhteismitattomasti) erilaisilla tavoilla [35]

kromaattinen näyte heijastaa valkoisen valon eri aallonpituuksia erisuurella voimakkuudella ja saa aikaan havaittavan värisävyn [20]

metameria ilmiö, jossa spektriltään erilaiset näytteet havaitaan identtisinä [20]

monokromaattinen valo valoa, jossa energiaa on vain yhdellä aallonpituudella [20]

neutraali (akromaattinen) näyte heijastaa kaikkia valkoisen valon aallonpituuksia yhtä voimakkaasti, jolloin havaittava kohde on valkoinen, harmaa tai musta [20]

perusväri (basic color) väri, joka on yleisinhimillisesti samalla tavalla koettu ja psykologisesti merkittävä [3]

perusväritermi (basic color term) tietyn kielen sana perusvärille, esimerkiksi *punainen, red, röd*

psykologinen merkittävyys (psychological salience) väritermi on ihmisille psykologisesti merkittävä, mikäli se mainitaan ensimmäisten joukossa kun vastaaja saa luetella värejä vapaassa järjestyksessä ja sen käyttö on yksimielistä ja johdonmukaista [3]

valkoinen valo valoa, jossa kaikkien aallonpituuksien energiamäärä on yhtä suuri [20]

yksimielisyys (consensus) väritermin käyttö on yksimielistä, mikäli termin käyttö on samanlaista käyttäjistä riippumatta [3]

yleiset kategoriat (universal categories) paradigma, jonka mukaan havainto edeltää kieltä siten, että havainto määrittää kielen ja on kielestä riippumaton, yleisinhimillisesti samalla tavalla koettu, joten semanttiset luokat – kuten värit – eivät voi rajoittamattomasti erota kielten välillä [21]

2 Väriavaruudet

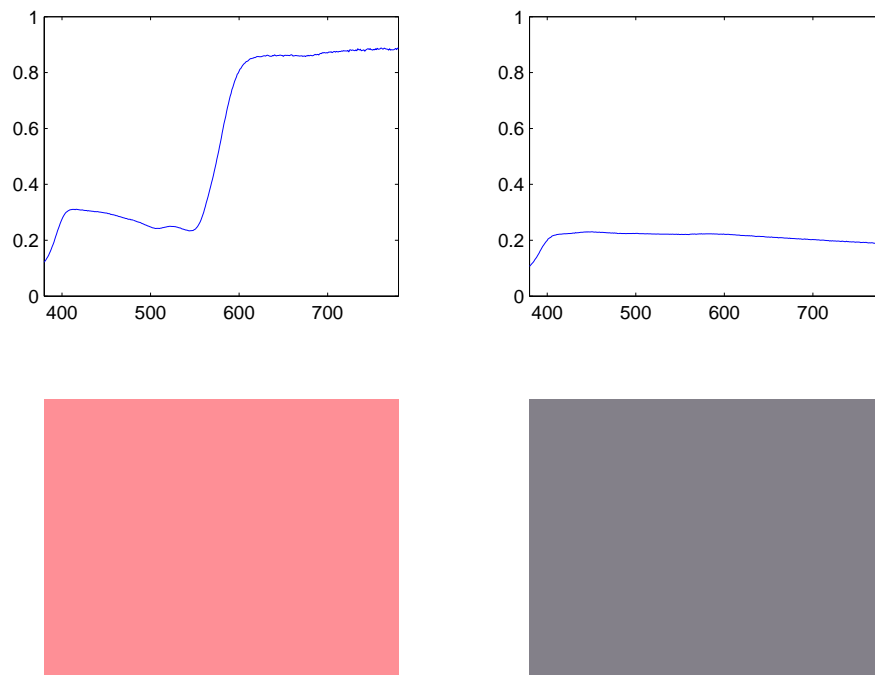
Väri on aistimus, joka syntyy ihmisen aivoissa silmään tulevan signaalin ja värinäköjärjestelmän toiminnan tuloksena [61]. Väriäistimus on aina subjektiivinen kokemus ja siksi se ei ole suoraan fysikaalisesti mitattavissa. Jotta väreistä voidaan keskustella yleisellä tasolla eikä vain yhden ihmisen kokemuksena, tarvitaan yhteinen sopimus värien esittämistavasta. Fysikaalisessa väritutkimuksessa värejä voidaan käsitellä esimerkiksi spektreinä eli tutkia energian jakautumista aallonpituuksittain. Tällöin havaittavien värien muodostumiseen vaikuttavat valonlähteen (valaistuksen) lisäksi kohteen pinnan optiset ominaisuudet. Näiden yhteisvaikutuksesta syntyy ympäristöstä silmään saapuva signaali, jota ihmisen värinäköjärjestelmä muokkaa ja koodaa aivoille aistittavaksi. Myös erilaisia pienempidimensioisia väriavaruuksia on otettu käyttöön, koska värien esittäminen spektrimuodossa on suuren datamäärän takia hankalaa ja ihmisen kannalta hyvin epäinformatiivista. Spektriavaruudessa värin esitysmuoto on mittausvasteiden matemaattiseen analyysiin perustuvaa ja funktioiden painokertoimien käsittely on implisiittistä, mittauksen muodostamaa. Pienempidimensioisissa väriavaruuksissa värin esitys puolestaan perustuu psykofyysiseen tietoon eli värinimeämiskokeiden tuloksiin. Tällöin funktioiden painokertoimet määrätään eksplisiittisesti värinvastaavuuskokeiden tulosten perusteella muodostettujen *värisovitusfunktioiden* (*color matching functions*) avulla [44].

2.1 Värin spektriesitys

Aistimuksena väri muodostuu silmään saapuvasta ärsykkeestä sekä silmän ja aivojen muodostaman monimutkaisen järjestelmän toiminnasta. Värillisestä kohteesta silmään saapuvan signaalin fysikaalisesti mitattava ominaisuus on kohteen heijastusspektri [20]. Valo heijastuu esineiden pinnasta enemmän tai vähemmän tasaisesti aallonpituuksien suhteen ja tämä saa aikaan kohteen havaittavan värin.

Mikäli kohde heijastaa valkoisen valon kaikkia aallonpituuksia yhtä voimakkaasti näyttää kohde valkoiselta, harmaalta tai mustalta riippuen heijastuksen voimakkuudesta. Tällaista väriä kutsutaan *neutraaliksi* tai *akromaattiseksi*. Valkoinen pinta heijastaa kaiken saapuvan säteilyn, harmaa siitä osan ja täysin musta pinta ei heijasta mitään. Jos toiset aallonpituudet heijastuvat muita voimakkaammin, havaitaan kohteella jokin värisävy ja kyseessä on *kromaattinen* väri. Kuvassa 1 on kahden värin spektrit ja RGB-

esitykset. Vasemmalla puolella on punainen väri, jonka spektrissä on pienempi nousu 400 nm kohdalla ja noin 600 nm kohdalla se nousee hyvin voimakkaasti. Tämä punainen siis heijastaa 600 nm alkaen aallonpituuksien säteilyn lähes kokonaan. Oikeanpuoleiset kuvat esittävät harmaata väriä ja spektrin tasaisuuden punaiseen verrattuna voi selvästi huomata. Näytteet on mitattu *Munsell Glossy* -värikirjasta [41] ja niiden aallonpituusalue on 380 - 780 nm. Kyseessä ovat heijastusspektrit ja arvo 0 vastaa 0 % ja arvo 1 vastaa 100% heijastusta.

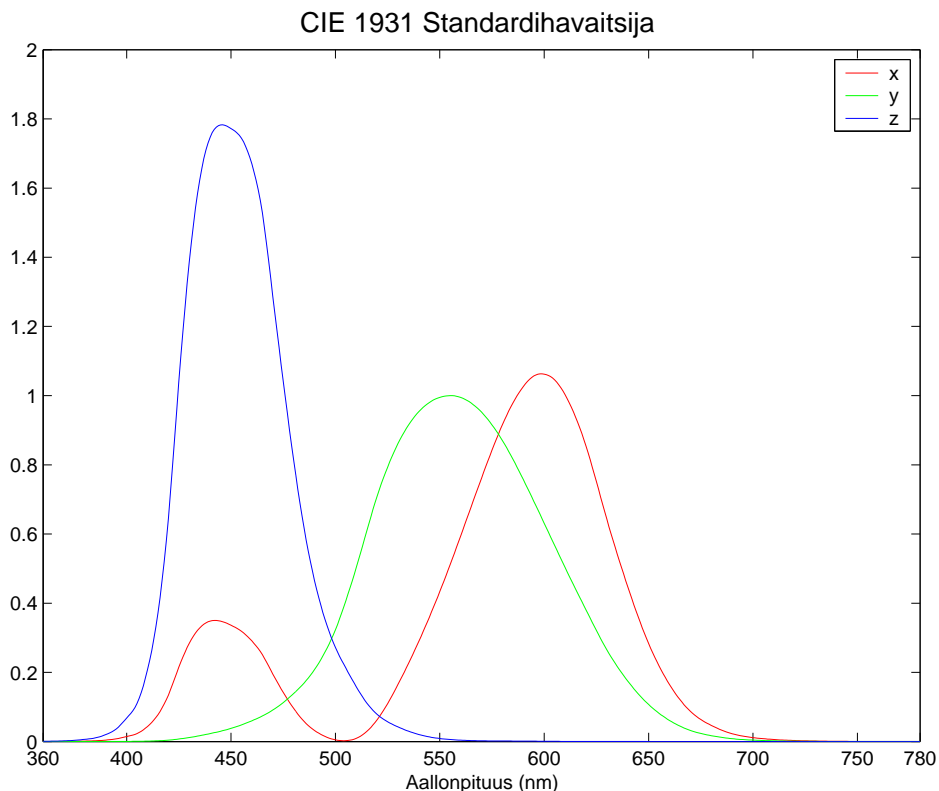


Kuva 1: Punaisen ja harmaan värin spektrit

Spektriesitys väreille on erittäin tarkka, mutta suuren tietomäärän takia vaikeasti hallittava. Ihmisen kannalta se ei myöskään ole erityisen havainnollinen tapa esittää värejä. Kun vaaditaan suurta esitystarkkuutta värejä toistettaessa tai verrattaessa, on se kuitenkin parempi kuin esimerkiksi värikoordinaatistoesitykset, joissa tietomäärä on puristettu muutaman muuttujan esitettäväksi. Spektrejä tutkimalla voidaan välttää *metamerian* kaltaisilta ongelmilta. Metameriset värit näyttävät samoilta, vaikka niiden spektrien energiajakaumat aallonpituuden suhteen voivatkin olla erilaiset [20]. Koska periaatteessa ääretön määrä spektrejä voi tuottaa ihmiselle samanlaisena havaittavan väriaistimuksen, on joissain tilanteissa, esimerkiksi laaduntarkkailussa, erittäin tärkeää tutkia nimen omaan spektrejä, ei ihmisen värihavaintoa tai värikoordinaatteja.

2.2 Laskennalliset väriavaruudet

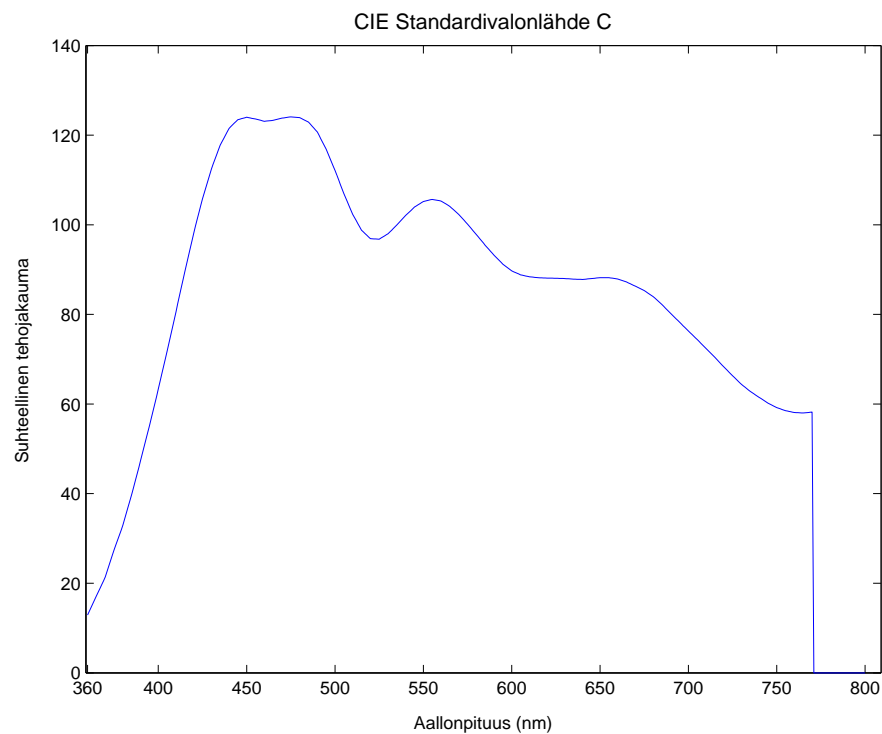
Koska värien esittäminen spektrimuodossa on suuren datamäärän takia hankalaa ja ihmisen kannalta hyvin epäinformatiivista, on otettu käyttöön erilaisia pienempi-dimensioisia väriavaruuksia. Väriavaruuksien ja -koordinaatistojen käyttäminen värien esittämiseen perustuu standardiin, jonka esitteli Kansainvälinen valaistuskomissio eli Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) vuonna 1931. Kyseessä on *CIE 1931 standardihavaintaja* (*CIE 1931 standard colorimetric observer*), joka todellisuudessa on vain taulukko värisovitusfunktioiden $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ ja $\bar{z}(\lambda)$ arvoja aallonpituusalueella 360 - 830 nm yhden nanometrin välein seitsemän merkitsevän numeron tarkkuudella [9]. Kuvassa 2 ovat nämä värisovitusfunktiot. CIE:n standardihavaintajaa on kritisoitu siitä, että se ei kaikilla aallonpituuksilla vastaa kovin hyvin ihmisten todellista keskimääräistä näkökykyä [9]. Koska CIE:n standardihavaintaja ei pyri maailman virheettömään esittämiseen, vaan on paremminkin yhteiseen sopimukseen perustuva asioiden esittämistapa yhteisen kielen luomiseksi, ei ongelma ole kovin suuri.



Kuva 2: CIE 1931 standardihavaintaja (värisovitusfunktiot)

Standardihavaintaja kuvaa sitä, kuinka ihmisen silmä painottaa siihen saapuvan signaalin eri aallonpituuksia. Syy metamerialian esiintymiseen on nimenomaan silmän käyttäytymisessä. Koska painofunktiot ovat suhteellisen teräväpiirteisiä, painottuvat tietyt osat spektristä huomattavasti muita voimakkaammin. Jos vähemmän painotetuissa osissa spektriä on pieniä eroja, ihminen ei niitä välttämättä erota. Jos erot osuvat kohtiin, joita painotetaan enemmän, kasvavat luonnollisesti myös havaittavien värien erot. Samasta syystä valonlähteen spektrillä on vaikutusta siihen, millaisina värit meille näyttävät.

Värisovitusfunktion lisäksi silmään saapuvaa signaalia painottaa omalla tavallaan myös valonlähde. Tässä tutkielmassa on kaikissa laskuissa käytetty CIE:n standardivalonlähdettä C, jonka spektrinen tehojakauma on esitetty kuvassa 3. Valonlähde C on kehitetty vastaamaan keskimääräistä päivänvalon tehojakaumaa ja se painottaa voimakkaammin sinisiä ja vihertäviä sävyjä.



Kuva 3: Standardivalonlähteen C spektrinen tehojakauma

Havaittava väri, havainnoitiinpa sitä silmällä tai jollakin muulla mittalaitteella, muodostuu kohteen pinnan optisten ominaisuuksien, valaistusolosuhteiden ja havaintajan ominaisuuksien yhteisvaikutuksesta kaavan 2.1 mukaan.

$$\nu_i = \int S(\lambda)\phi(\lambda)f_i(\lambda)d\lambda, \quad (2.1)$$

missä $S(\lambda)$ on valonlähteen spektrinen tehojakauma, $\phi(\lambda)$ kohteen pinnan heijastusspektri ja $f_i, i = 1, 2, 3 \dots$ detektorin herkkyysskäyrät.

Ihmissilmälle edellisen yhtälön mukainen kaava muodostaa *tristimulusarvot* [9] (kaavat 2.2 - 2.4). Niitä on yhteensä kolme, kullekin värivastaavussfunktiolle omansa.

$$X = k \int_{\lambda} \phi(\lambda)\bar{x}(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (2.2)$$

$$Y = k \int_{\lambda} \phi(\lambda)\bar{y}(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (2.3)$$

$$Z = k \int_{\lambda} \phi(\lambda)\bar{z}(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (2.4)$$

missä normitustekijä k on

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda}, \quad (2.5)$$

ja $\phi(\lambda)$ on värin spektri, $S(\lambda)$ valonlähteen spektrinen tehojakauma ja $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$ ja $\bar{z}(\lambda)$ ovat CIE:n standardihavaitsijan värisovitusfunktiot.

CIE $L^*a^*b^*$ -koordinaattien laskemiseksi tarvitaan spektrin tristimulusarvojen lisäksi myös referenssivalkoisen tristimulusarvot X_n, Y_n ja Z_n . Koordinaatit lasketaan erikseen korkeille (normaalia päivänvaloa vastaaville) ja matalille valaistustasoille [9]. Tässä tutkielmassa on käytetty normaalin valaistuksen kaavoja. Erottelu ilmenee kaavoista 2.9 ja 2.10.

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - 16 \quad (2.6)$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3} - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} \right] \quad (2.7)$$

$$b^* = 200 \left[f \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - f \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \quad (2.8)$$

$$f(\omega) = (\omega)^{1/3}, \quad \text{kun } \omega > 0.008856 \quad (2.9)$$

$$f(\omega) = 7,787(\omega) + \frac{16}{116}, \quad \text{kun } \omega \leq 0.008856, \quad (2.10)$$

missä ω on $\frac{Y}{Y_n}$, $\frac{X}{X_n}$ tai $\frac{Z}{Z_n}$ tapauksesta riippuen.

CIE L*a*b* -väriavaruutta käytetään myöhemmin tässä tutkielmassa värinimeämiskokeiden ja laskennallisten ryhmittelyjen tulosten erittämiseen. Havainnollisuuden parantamiseksi tuloksista esitetään spektrien lisäksi värikoordinaattiarvot kaksi- tai kolmiulotteisissa avaruuksissa sekä RGB-näytteet. Useissa tapauksissa käytetään lisäksi Munsellin värijärjestelmän mukaista esitystapaa.

2.3 Munsellin värijärjestelmä

Munsellin värijärjestelmän kehitti 1900-luvun alkupuolella taiteilija Albert H. Munsell, jonka tarkoituksena oli luoda systemaattinen ja yhdenmukainen esitys- ja nimeämiskäytäntö väreille – vähän samaan tapaan kuin musiikkia merkitään nuoteilla [20]. Hänen ideoimansa esitystapa eroaakin monista muista siinä, että jokaiselle värille on löydettävissä myös nimi, ei pelkästään värikoordinaatteja. Munsellin värijärjestelmä perustuu väriavaruuden jakamiseen (ihmisen kannalta) tasavälisesti värinäytteisiin. Näytteet identifioidaan kolmella muuttujalla *hue* (sävy), *chroma* (värikylläisyys) ja *value* (kirkkaus, vaaleus) [32]. Merkitseminen tapahtuu yhdistelmällä *H V/C* eli ensin ilmoitetaan sävyn kirjain-numerokoodi, jonka jälkeen tulevat kirkkaus- ja värikylläisyysarvo.

Kirkkausasteikko on kiinteä ja alin taso on musta (1) ja korkein valkoinen (10). Välissä on kahdeksan tasavälistä harmaata, tosin tasoja on jälkeenpäin lisätty myös perustasojen väliin tarkemman erottelukyvyn saamiseksi. Neutraaleille näytteille ilmoitetaan kirkkauden arvo normaalisti ja värikylläisyyden arvoksi nolla. Sävyä niillä ei luonnollisestikaan ole.

Sävyjen erottaminen perustuu väriympyrän jakamiseen sataan eri sävyyn, jotka muodostavat kymmenen lohkoa [32]. Sävyä merkitään kirjaimen ja numeron yhdistelmällä, jossa kirjain tai kirjaimet merkitsevät sävyn nimeä ja numero sävyn puhtautta. Puhtain (keskimmäinen) sävy on numero 5 ja arvoalue on 1-10. Esimerkiksi sävy 10*R* on sävyjen *R* (punainen) ja *YR* (kellapunainen) puolivälissä ja siitä seuraava sävy on koodinumeroiltaan 1*YR*. Yhdellä kirjaimella merkittäviä ensisijaisia sävyjä on viisi: punainen (*R*), keltainen (*Y*), vihreä (*G*), sininen (*B*) ja purppura (*P*). Yhdistämällä vierekkäiset ensisijaiset sävyt saadaan toissijainen sävy, joten eri sävyjä Munsellin järjestelmässä on kymmenen. Taulukossa 1 ovat eriteltyjen sävyjen Munsell-koodit ja nimet.

Taulukko 1: Munsellin värijärjestelmän sävyt

<i>R</i>	red	punainen
<i>YR</i>	yellow-red	kellapunainen
<i>Y</i>	yellow	keltainen
<i>GY</i>	green-yellow	kellanvihreä
<i>G</i>	green	vihreä
<i>BG</i>	blue-green	sinivihreä
<i>B</i>	blue	sininen
<i>PB</i>	purple-blue	sininen purppura
<i>P</i>	purple	purppura
<i>RP</i>	red-purple	punainen purppura

Värikylläisyys eli saturaatiotaso ilmoittaa näytteen etäisyyden neutraalista näytteestä, jolla on sama kirkkaus. Mitä kauempana näyte on neutraalista, sitä värikylläisempi se on. Värikylläisyydelle ei ole mitään absoluuttista maksimiarvoa kuten kirkkaudelle. Fluoresoiville väreille värikylläisyys voi olla jopa 30, tässä työssä käytettyjen värikirjojen maksimiarvot ovat 14 [42] ja 16 [41] punaisille ja kellanpunaisille väreille. Muille sävyille arvot ovat pienempiä.

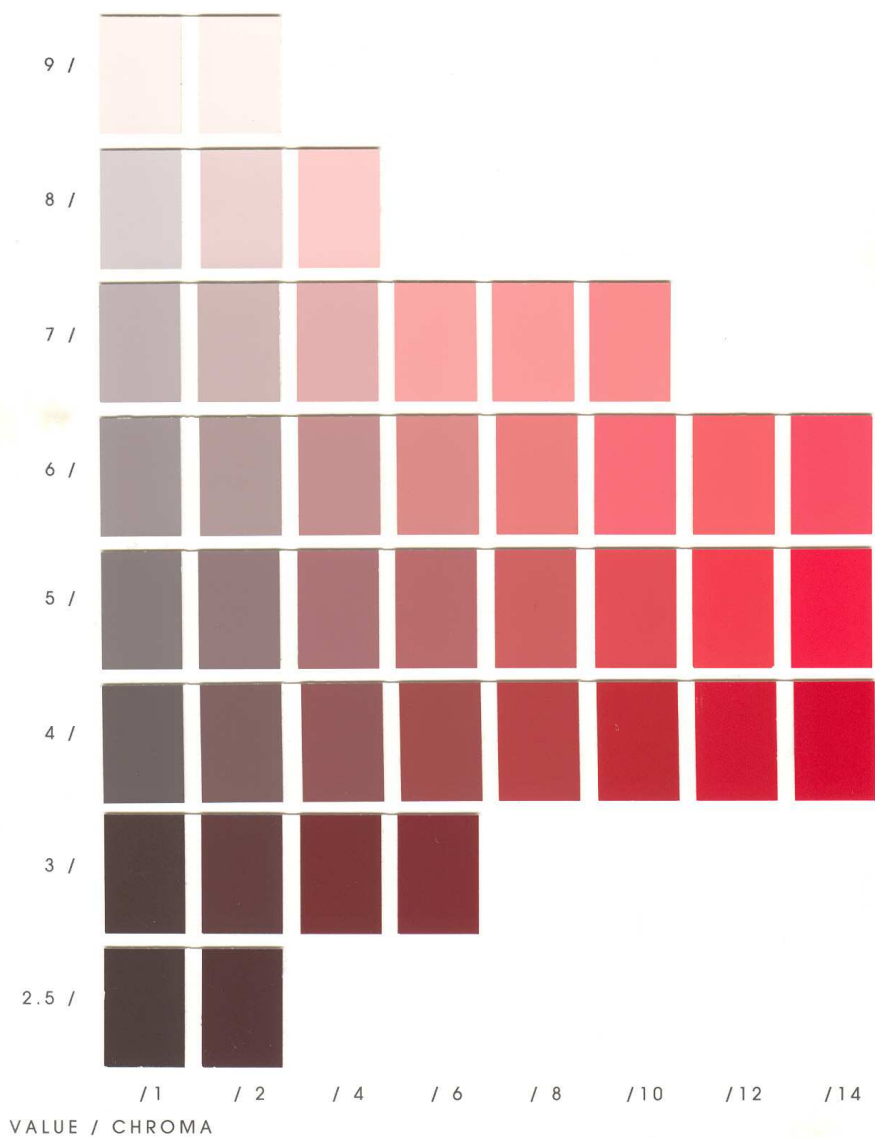
Munsellin värijärjestelmän näytteitä on käytetty värinnimeämiskokeissa jo 1950-luvulta saakka [3]. Se onkin vakiintunut usein käytettäväksi järjestelmäksi silloin kun kokeissa käytetään painoväriä näytteitä. Tästä syystä monet värinnimeämiskokeiden tulokset on ilmoitettu Munsellin merkintätapaa käyttäen. Myös tässä tutkielmassa sitä käytetään yhtenä tulostenesittämistapana laskennallisten värikordinaatistojen rinnal-

la. Muutokset CIE L*a*b* -koordinaatistoista Munsellin järjestelmään on tehty käyttämällä Internetistä¹ maksutta saatavan ohjelman *Munsell Conversion Software* versiota 6.4.

Kuvassa 4 on sivu Munsellin mattapintaisesta värikirjan [42] punaisesta väristä. Jokaisella sivulla olevat näytteet kuuluvat kaikki samaan värisävyyn (kuvan 4 tapauksessa R5 eli puhtain mahdollinen punainen), mutta värikylläisyys ja kirkkaus vaihtelevat. Sivulla olevin näytteiden määrä riippuu siitä, kuinka suurille puhtaus- ja kirkkaustasoille saakka värejä on saatavissa. Esimerkiksi keltainen väri on luonteeltaan hyvin vaalea, joten keltaisia näytteitä on enemmän sivun ylä- kuin alaosassa. Kuvassa värikylläisyys kasvaa oikealle mentäessä. Kyseisen punaisen näytteen suurin värikylläisyysarvo on 14, joka on samalla koko *Matte*-kirjan suurin arvo. Ylöspäin siirryttäessä kasvaa näytteen vaaleus, eli alimmat näytteet ovat jo melko lähellä mustaa ja ylimmät valkoista, erityisesti koska näille näytteille eivät värikylläisyysarvot ole kovin suuria.

¹Munsell Conversion Software V6.4 (haettu 16.2.2004)

<http://standards.gretagmacbeth.com/Munsell/Software/>



Kuva 4: Sivu Munsellin värikirjasta [42]

3 Ihmisen värinäköjärjestelmä

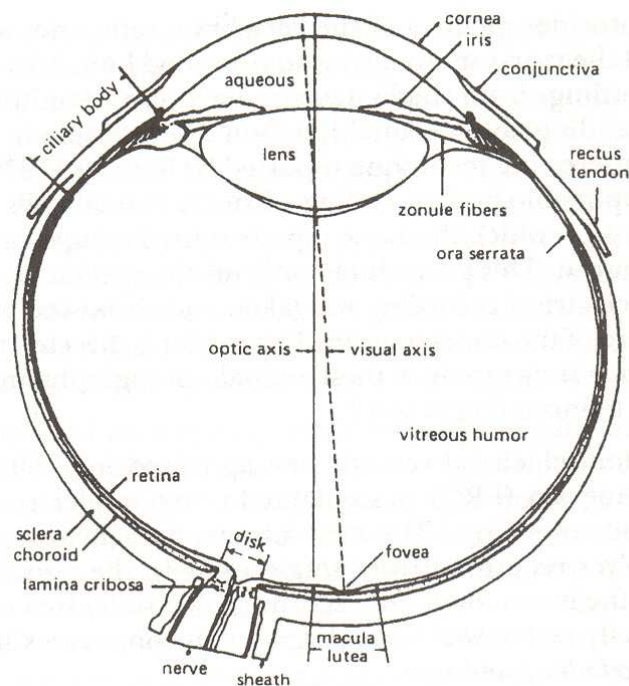
Ihmisen värinäköjärjestelmässä on kaksi osaa: puhtaasti optiikan lakien mukaan toimiva ulkoisen ärsykkeen määräämä osa ja retinatasolta alkava sisäinen osa, jonka toimintamekanismeja ei tarkkaan tunneta [61]. Näköhavainnon käsittelyyn liittyvät toiminnot ovat verkkokalvolta alkaen hyvin monimutkaisia ja aivoja kohti mentäessä monimutkaisuus vain kasvaa. Värinäkömallien avulla on pyritty selittämään kuinka värihavainnon käsittely aivoissa toimii. Vaikka siitä ei edelleenkään tarkkaa tietoa ole, pystyy monitasoinen värinäkömalli sitä jo melko hyvin selittämään.

3.1 Silmän rakenne

Ihmisen silmät ovat hyvin sijoittuneet toimintatarpeisiimme nähden. Ne sijaitsevat ruumiin yläosassa, josta näkökenttä ympäristöön on laaja ja matka aivoihin lyhyt. Tällöin hermoimpulssien välittäminen on nopeaa ja hermoradat hyvin suojatut. Myös silmät ovat hyvin suojattuina kallon luiden ja kudosten sisällä [20]. Itse silmä on luisessa silmäkuopassa sijaitseva, lähes pallonmuotoinen elin, jonka halkaisija on noin 25 mm [61]. Silmäkuoppa sekä silmää ympäröivät lihakset ja rasvakudos pitävät silmämunan paikoillaan ja suojattuna. Kuvassa 5 on silmän kaavakuva, johon on englanninkielisillä nimillä merkitty silmän tärkeimmät osat.

Silmämunan seinämän muodostaa kolme kerrosta: (1) *sarveiskalvo (cornea)*, (2) *kovakalvo (sclera)* ja (3) *suonikalvo (choroid)* [61]. Sarveiskalvo on läpinäkyvä, eikä siinä ole verisuonia. Säilyttääkseen läpinäkyvyytensä, sen täytyy olla koko ajan kostea. Kosteuttaminen tapahtuu räpyttelemällä silmiä säännöllisin väliajoin, jolloin silmäluomi levittää kyynelnesteen tasaisesti koko verkkokalvon alueelle. Silmän etuosassa sarveiskalvo on päällimmäinen kerros silmämunan seinämää, mutta takaosassa ulommaisena on läpinäkymätön kovakalvo. Kovakalvon sisäpuolella on suonikalvo, jossa on runsas verisuonitus [61].

Silmämunan pohjalla on sisimpänä *verkkokalvo (retina)* kun taas silmän etuosassa on *värikalvo (iris)*, jonka sisältämät pigmentit määräävät silmien värin. Jos pigmenttiä on vain vähän tai ei ollenkaan, näyttävät silmät sinisiltä ja jos sitä on runsaasti, ovat silmät ruskeat. Iiris ympäröi *mustuaista* eli pupillia (*pupil*), jonka aukon kokoa säätämällä värikalvo kontrolloi silmään saapuvan valon määrää. Pupillin laajuuteen vaikuttavat



Kuva 5: Silmän poikkileikkauksen kaavakuva [20]

sekä tahdonalaiset että tahdosta riippumattomat lihakset, jolloin silmä on paremmin suojattuna.

Värikalvon ja mustuaisen takana on *mykiö* eli linssi (*lens*), joka on monikerroksinen ja koostuu läpinäkyvistä säikeistä ja soluista [61]. Silmä mukautuu katsomaan lähelle mykiön ripustinlihasten avulla ja kun ihminen katsoo kauas, lihakset rentoutuvat. Ripustinlihasten kiristyessä mykiön muoto muuttuu kuperammaksi ja paksummaksi kuin lepotilassa [61]. Tämän mukautumisen avulla ihminen pystyy havaitsemaan selvästi eri etäisyyksillä olevia kohteita, vaikkakaan ei samanaikaisesti [20]. Mykiön etupuolella, sarveiskalvon ja mykiön välisessä *etukammiossa* (*anterior chamber*), on *kammionestettä* (*aqueous humor*), jonka tarkoitus on pitää silmän paine ympäröivää painetta suurempana. Kammioneste on erittäin puhdasta ja siinä on vain vähän proteiineja. Se muodostuu värikalvon ja *lasiaisen* (*vitreous humor*) välissä olevassa pienessä *takakammiossa* (*posterior chamber*).

Lasiainen on mykiön takana sijaitseva suuri ontelo, jonka täyttää hyytelömäinen lasiaineste. Silmään saapuva ulkoinen signaali kulkee siten sarveiskalvon ja etukammionesteen läpi, värikalvon aukosta linssin läpi ja lopulta lasiaisen läpi en-

nen kuin se saavuttaa silmänpohjan verkkokalvon, jossa sijaitsevat valoherkät solut. Verkkokalvolle saakka saapuva valo noudattaa tavanomaisia optiikan sääntöjä, mutta sen jälkeen toimitaan monimutkaisempien solutason sääntöjen mukaan.

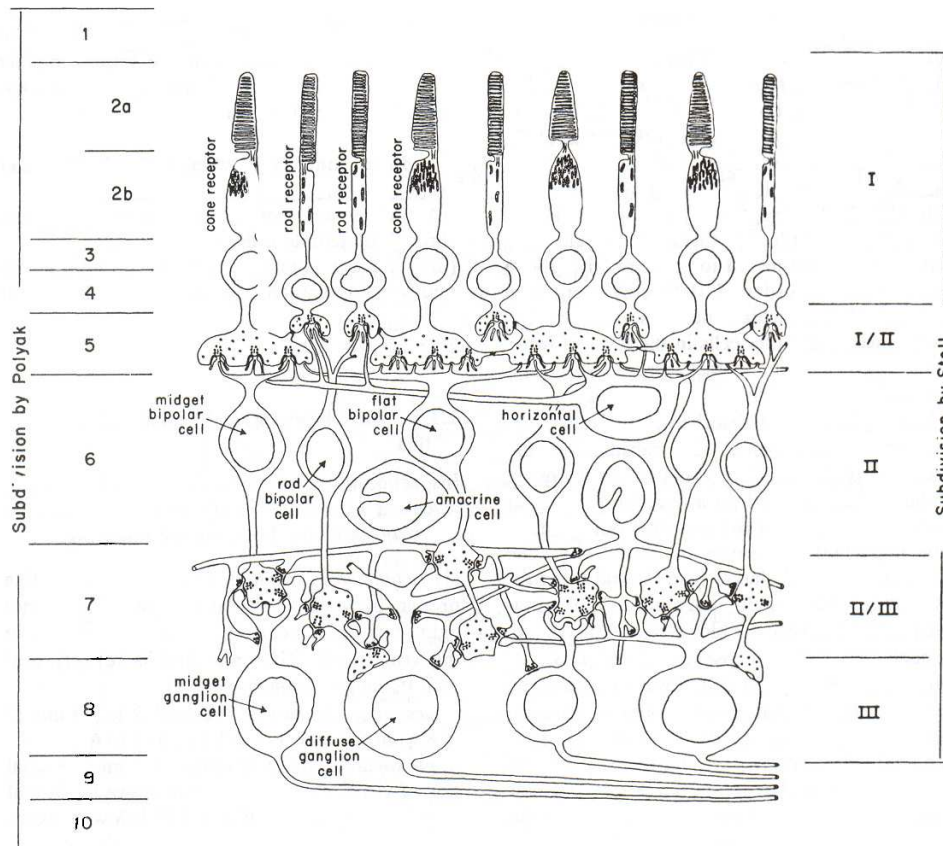
3.1.1 Verkkokalvo

Verkkokalvo on kehittynyt keskushermostosta ja koostuu reseptori-, hermo- ja tukisoluista. Sen pinta-ala on noin 1100 mm² ja hermosoluja tällä alueella on arviolta lähes 200 miljoonaa: reseptorisoluja eli *sauvasoluja (rods)* 110 - 125 miljoonaa ja *tappisoluja (cones)* 6-8 miljoonaa sekä muita hermosoluja noin miljoona [20], [61]. Verkkokalvon rakenne on kerroksellinen. Kaavakuva verkkokalvon rakenteesta (kuva 6) sisältää viisi kerrosta (roomalaiset numerot kuvan oikean reunan mukaan):

1. valoreseptorisolut eli *sauvat (rods)* ja *tapit (cones)* (I)
2. välittäjäsolut eli *bipolaari-, amakriini- ja horisontaalisolut* (II)
3. (ensimmäinen synapsitaso) yhdistää valoreseptori- ja välittäjäsolut (I/II)
4. *gangliosolut* (III)
5. (toinen synapsitaso) yhdistää välittäjä- ja gangliosolut (II/III)

Sauvojen ja tappien jakautuminen verkkokalvolla on hyvin epätasaista. Pelkistä tapeista koostuu verkkokalvon keskellä sijaitseva *keltatäplä (macula lutea)*, mutta muualla tappitiheys on huomattavasti sauvojen esiintymistiheyttä pienempi. Sauvojen määrä on suurimmillaan heti keltatäplän ulkopuolella ja vähenee melko tasaisesti kohti verkkokalvon reunoja [20]. Keltatäplän keskellä on tarkan näkemisen alue *fovea*, jossa sijaitsevat tapit ovat muita verkkokalvon reseptoreja pitempiä ja ohuempia. Kun muualla yhteen hermosoluun saattaa liittyä useita (verkkokalvon reunalla jopa satoja) reseptorisoluja, liittyy fovean alueella yhteen gangliosoluun vain yksi tappi [20].

Tapit välittävät muulle värinäköjärjestelmälle väritietoa ja sauvat pääasiassa valoisuus-tietoa [20]. Sauvojen on havaittu monimutkaisella tavalla tuottavan yhdessä tappien kanssa väritietoa, jolloin sauvojen tuottama väriaistimus on sininen [8]. Sauvojen toiminta perustuu *rodopsiini*-nimisen proteiinin toimintaan ja ne jatkavat toimintaansa myös silloin, kun valaistustaso laskee. Tapit puolestaan toimivat vain korkeammalla valaistustasolla. Tästä syystä ihmisen hämäräkö ei ole kovinkaan tarkka eikä hän



Kuva 6: Verkkokalvon poikkileikkauksen kaavakuva [61]

erota kovin hyvin värejä pimeässä [20]. Sauvojen vaikutuksesta hämärässä kaikki näyttää hieman sinertävältä [8].

Tappeja on vähintään kolmea erilaista tyyppiä, joista jokainen on herkistynyt eri aallonpituuksille. Näitä soluja kutsutaan *S-*, *M-* ja *L-tapeiksi*. Tappien toiminnan määräävien fopigmenttien toimintaa ei tunneta läheskään yhtä hyvin kuin sauvojen rodopsiin ja niiden herkkyyskäyrien maksimikohdistakin on useita arvioita. Lisäksi on havaittu, että osalla naisista on kahta erilaista tyyppiä olevia *M-* ja *L-tappeja* [4]. Näiden ihmisten värinerottelukyky on suurempi kuin muiden. Värihavainto on joka tapauksessa aina subjektiivinen, joten eri ihmisten havaintoja ei voida suoraan verrata toisiinsa.

Myös sauvasolut vaikuttavat värihavaintoon jonkin verran enemmän kuin aikaisemmin on ajateltu. Sauvat liittyvät värinäköjärjestelmän myöhäisemmällä tasolla yhteen kaikkien tappityyppien kanssa ja siten vaikuttavat väriäistimuksen syntyyn [8]. Sauvat ovat läsnä kaikkialla, mutta niiden vaikutus ei kaikissa tapauksissa ole yhtä voimakas-

ta: eri aallonpituuksille ja valaistustasoille sekä eri pituisille havaintoajoille sauvojen vaikutus on erilainen [8]. Tästä syystä sauvojen värinäön vaikutuksia on ollut vaikea tutkia.

Verkkokalvolla on reseptorisolujen lisäksi myös muita hermosoluja. Horisontaalisoluja on vähintään kahta erilaista tyyppiä. H1-solut liittävät yhteen tappeja ja sauvoja, kun H2-solut yhdistävät vain tappeja [20]. Vaikka siis tappien ja sauvojen toimintamekanismi ja merkitys värinäköjärjestelmälle on erilainen, eivät ne kuitenkaan toimi täysin toisista erillään. Horisontaalisolu liittyy yleensä seitsemään reseptorisoluun. Jokainen tappi on yhteydessä 2-4 horisontaalisoluun ja horisontaalisolujen tarkoituksena on todennäköisesti välittää tietoa tappien välillä, vaikka niiden tarkkaa toimintatapaa tai merkitystä ei tunneta [20].

Bipolaarisolut ovat reseptorisolujen välittämän tiedon pääväylä gangliosoluille. Bipolaarisoluja on kuutta eri tyyppiä ja jokaisella tyypillä on oma, toisista hieman poikkeava tehtävänsä. Tietyt bipolaarisolut liittyvät vain sauvoihin, toiset vain tiettyihin tappeihin [20]. Amakriinisolut muodostavat välittäjäsolujen kolmannen kerroksen horisontaali- ja bipolaarisolujen jälkeen. Niiden toimintaa säätelee lähinnä bipolaarisolujen toiminta, koska niillä ei ole samanlaisia pitkiä aksoneita kuin hermosoluilla tavallisesti on. Amakriinisoluja on useita kymmeniä erilaisia eikä kaikkia niiden toimintatapoja tunneta. Esimerkiksi amakriinisolut toimivat liittämällä yhteen tappien ja sauvojen bipolaarisoluja, joten viimeistään tällä tasolla sekä tapit että sauvat yhdistävät voimansa värien havaitsemiseksi [61]. Gangliosolut saavat siis amakriinisoluilta yhtäaikaista tietoa tappeilta ja sauvoilta, vaikka muualla näköjärjestelmässä nämä kaksi reseptorityyppiä toimivatkin lähinnä erikseen.

Gangliosolut välittävät verkkokalvolta tulevan ja välittäjäsolujen jo koodaaman tiedon aivojen näkökeskukseen näköhermon kautta [20]. Gangliosoluja on kahta tyyppiä, joista toisen hermopäätteet liittyvät vain yhteen välittäjäsoluun (*midget ganglion cell*) ja toisen hermopäätteet ovat hajaantuneet useamman välittäjän kesken (*diffuse ganglion cell*) [20]. Nämä erilaiset gangliosolut näkyvät kuvassa 6.

Kuva 6 osoittaa myös amakriinisolujen liittyvän vain bipolaarisolujen ja gangliosolujen liittymäkohtiin ja toimivan siten vain bipolaarisolujen kautta. Myös horisontaalisolujen toiminta reseptorien yhdistäjänä ilman yhteyttä muihin välittäjäsoluihin näkyy kuvasta.

3.2 Värinäkömallien historiaa

Värinäkömallit pyrkivät mallintamaan sitä ihmisen värinäköjärjestelmän osaa, jonka fysikaalista toimintaa ei tarkkaan tunneta. Erilaisia selitysmalleja ihmisillä on silmien toiminnalle ollut jo tuhansia vuosia. Selitysmallien kehittyessä vastaamaan yhä tarkemmin silmän todellista toimintaa mallit ovat monimutkaistuneet ja tarkentuneet. Yhteistä kaikille moderneille malleille on niiden pohjautuminen tappien herkkyyskäyriin, eli tappien kykyyn absorboida eri aallonpituuksia.

Kolmiväriteorioiden (trichromatic theory) perusajatuksena on, että kaikkia spektrin aallonpituuksia vastaavat värit on mahdollista muodostaa sekoittamalla kolmea perusväriä. Tämän perustella oletettiin, että silmissä on kolmenlaisia, toisistaan erillisiä fysiologisia havainto- ja käsittelymekanismeja: jokaiselle perusvärille omansa [20]. Kuuluisin kolmiväriteoria on Thomas Youngin alullepanema ja Hermann von Helmholtzin kehittämä ajatus, joka tunnetaan *Young-Helmholtz-kolmiväriteorian*a. Aikaisemminkin oli tosin esitetty arveluja fysiologiaan perustuvasta kolmiväriperiaatteesta [20].

Youngin edelleen paikkaansa pitävä oletus on valon aallonpituuden muutoksen jatkuvuus värispektrissä. Saman oletuksen teki aikanaan myös Isaac Newton tutkiessaan valon käyttäytymistä mm. prisman avulla [20]. Spektriä ei siten voi jakaa lopulliseen, äärelliseen määrään eri aallonpituuksia. Havaittu värisävy riippuu ensisijaisesti silmään saapuvan sähkömagneettisen säteilyn aikaansaamasta erilaisten reseptorityyppien aktivoimisesta, mikä ei sinällään todista mitään saapuvan signaalin värähtelyn muutoksen jatkuvuudesta tai epäjatkuvuudesta. Young-Helmholtz-kolmiväriteorian – kuten muidenkin modernien kolmiväriteorioiden – perustalla on siten ajatus, että jokainen kolmesta olemassaolevasta reseptorityypistä on herkistynyt omalle aallonpituusalueelleen, ei yksittäiselle aallonpituudelle, ja reagoi siten eri aallonpituuksiin erilaisella voimakkuudella. Teoria korvasi aikaisemmin esiintyneen rinnakkaisen ajatuksen, jonka mukaan kaikki verkkokalvon reseptorit (tai ”herkkyysalueet”) olisivat olemukseltaan samanlaisia, mutta reagoisivat kukin vain omaan tiettyyn aallonpituuksiensa [20].

Helmholtzin suurin panos kolmiväriteorian kehittämisessä oli reseptorien herkkyyskäyrien muodon hahmottelu [20]. Hän havaitsi, että kaikkien sävyjen muodostaminen kolmen reseptorityypin avulla on mahdollista vain, jos niiden herkkyyskäyrät ovat limittäiset ja osittain päällekkäiset, mutta maksimikohdiltaan erilliset. Nykyi-

nen käsitys herkkyysskäyrien muodosta on vuodelta 1931. Kyseiset värisovitusfunktiot on esitetty edellisessä luvussa kuvassa 2 sivulla 7. Helmholtz ei teoriassaan ottanut mitenkään kantaa verkkokalvon solujen toimintaan ja värien fysikaaliseen havaitsemisprosessiin vaan puhui vain ”perimmäisistä aistimuksista”.

Kolmea perusväriä vastaavien herkkyysskäyrien muodostamiseen Helmholtz käytti värinvastaavuuskokeita, joissa koehenkilöitä pyydettiin sekoittaman kolmea eriväristä valoa halutun värin aikaansaamiseksi [18]. Koehenkilö siis lisäsi tai vähensi kunkin monokromaattisen valon (perusvärin) määrää sekoituksessa halutun lopputuloksen saamiseksi. Perusvärejä vastaavat valot olivat aallonpituuksiltaan 420 nm, 560 nm ja 640 nm [18]. Näiden värinvastaavuuskokeiden perusteella tultiin tulokseen, että vähintään kolmea perusväriä tarvitaan kaikkien muiden muodostamiseen ja perusvärejä vastaavat aallonpituudet saivat olla mitä tahansa, kunhan ne olivat täysin erillisiä. Mitään kolmesta perusväristä ei saa olla mahdollista muodostaa kahta muuta sekoittamalla [18].

Modernina värinäkömallina kolmiväriteoria pystyy tyydyttävästi selittämään myös värisokeuden kaltaisia värinäön ongelmia. Koska verkkokalvon reseptoreja on kolmea eri lajia ja jokainen reseptoryyppi reagoi saapuvaan säteilyyn eri tavalla kuin toiset, johtuu kyvyttömyys havaita tai erottaa tiettyjä sävyjä niitä vastaavien reseptorien toimintahäiriöstä [20]. Kolmiväriteoria on nykyisiä värinäkömalleja yksinkertaisempi siinä, että se olettaa kaikille kolmelle reseptoryypille omat hermokanavansa lähtemään verkkokalvolta ja vasta myöhemmin nämä yhdistyisivät väriaistimukseksi [18].

Vastaväriteoria (opponent-color theory) pohjautuu kolmiväriteorialle, mutta selittää muutamia sen ilmeisiä puutteita kuten havainnon punaisen ja vihreän tai sinisen ja keltaisen väriaistimuksen yhdistymisen mahdottomuudesta. Teorian taustalla on siten ollut arkipäivän havainnointi, eivät pelkät fysikaaliset kokeet. Aikaisemmat värinäkömallit eivät mitenkään selittäneet sitä havaintoa, että ihminen ei koskaan voi havaita punertavaa vihreää tai sinertävää keltaista väriä [20]. Tai jos sekoittaa keltaista ja sinistä valoa saa aikaan valkoista, ei vihreää valoa. Vastaväriteoria laajentaa kolmiväriteoriaa selittämään myös kyseiset outoudet.

Vastaväriteorian kehitti 1800-luvun lopulla fysiologi Ewald Hering, jonka näkökulma väritutkimukseen oli huomattavasti keskittyneempi subjektiivisen väriaistimuksen tutkimiseen kuin esimerkiksi kolmiväriteoriaa tutkineilla fyysikoilla [20]. Perustan Heringin teorialle antaa havainto kahdesta vastaväriparista eli punaisen ja

vihreän sekä sinisen ja keltaisen muodostamista pareista. Hänen päättelynsä perustui täysin värikokemusten havainnointiin, ja vasta puoli vuosisataa myöhemmin ensimmäiset kokelliset tulokset ihmisen värinäköjärjestelmän toiminnasta antoivat viitteitä teorian taustalla olevasta fysiologiasta [20]. Hering oli kuitenkin sitä mieltä, että myös kolmiväriteorialla oli oma merkityksensä ja meni jopa niin pitkälle, että spekuloi näiden kahden rinnakkain elävän värinäkömallin yhdistämisestä [20]. Kolmiväriteoria selittäisi verkkokalvon toiminnan ja vastaväriteoria hermosolujen toiminnan verkkokalvon jälkeen. Nykyisen tietämyksen perusteella asia näyttää olevan juuri niin kuin Hering ennakoikin. Vyöhykkeisiin tai tasoihin perustuvat värinäkömallit ovat näiden kahden vanhemman mallin yhdistelmiä.

Koska vastaväriteorian kaksi vastaväriparia ovat toisistaan riippumattomat, on tämän teorian pohjalta ollut helppo muodostaa värikoordinaatistoja. Esimerkiksi CIE $L^*a^*b^*$ -koordinaatisto on sellainen, joka perustuu puna-viher- ja sini-kelta-akseleille, jolloin valkoinen sijaitsee origossa. Yleensä näitä koordinaatistoja on myös pyritty muokkaamaan siten, että väriero olisi kaikkialla koordinaatistossa ihmisen kannalta tasainen. Tämän toteuttaminen on kuitenkin huomattavan vaikeaa.

3.3 Monitasoinen värinäkömalli

Monitasoinen värinäkömalli (multi-stage color model) pyrkii selittämään – kuten kaikki mallit omana aikanaan – ihmisen monimutkaista värien havainnointikykyä niin suurella fysiologisella ja teoreettisella tarkkuudella kuin mahdollista. Toisin kuin edeltäjänsä, se koostuu useasta toiminnaltaan erilaisesta tasosta. Ensimmäinen on verkkokalvon taso, jossa käsitellään pääasiassa tappien toimintaa. Toisella tasolla verkkokalvon reseptorien ja hermosolujen yhteenliittymistä muodostuu kolme erilaista tiedonsiirtokanavaa, joista kaksi perustuu vastakohtaisuudelle. Kolmas kerros on aivo-kuorella tapahtuva saapuvan tiedon eriytyminen puna-viher- ja sini-kelta-akseleiksi sekä valoisuusakseliksi. Neljännellä tasolla yhdistetään vastakkaisten signaalien informaatio lopulliseksi näköhavainnoksi monimutkaisten valintasolujen avulla [12].

Ihmisen näköjärjestelmän mallintaminen on hankalaa, koska monien näkökyvyn ominaisuuksien mallintamismahdollisuudet algoritmisesti ovat rajallisia [12]. Osa rajoituksista johtuu fysiologisista seikoista, esimerkiksi hermoimpulssien paikkaan ja etäisyyteen liittyvistä ominaispiirteistä. Lisäksi *näköhermo (optic nerve)* ja erityisesti

näköhermoristi (optic chiasm) muodostavat hankalasti tutkittavan pullonkaulan hermoimpulssien ja siten näköhavainnon ja lopulta aistimuksen mallintamisessa [12]. Kaikki silmältä lähtevä informaatio kulkee näköhermoa pitkin, muita reittejä suoraan aivoihin ei ole.

Ensimmäiset useampitasoiset mallit kehitettiin niinkin myöhään kuin 1950-luvulla [12]. Sitä ennen värihavainnon tutkimisen suurin mielenkiinto liittyi retinatasolle ja mallit olivat siten yksitasoisia. Eräs ilmeinen syy on verkkokalvon jälkeisten prosessien tutkimisen vaikeus, mutta välttämättä tutkijoilla ei ollut edes mielenkiintoa perehtyä sauva- ja tappisolujen toimintaa epämääräisempään hermosolujen toimintaan [12]. Kaksitasoinen värinäkömalli alkoi syrjäyttää edeltäjiään kun havaittiin, että näköjärjestelmässä todellakin toimii vastakkaisuuteen perustuvia signaalikäytäviä. Kaksitasoiset mallit siis perustuvat verkkokalvon kolmeen tappisolutyyppiin ja niiden muodostamiin toisilleen vastakkaisiin tiedonsiirtoprosesseihin näköjärjestelmässä verkkokalvon jälkeen [12].

Monitasoisen värinäkömallin kaksi ensimmäistä tasoa ovat jo aikaisemmissa teorioissa esitetyt tasot. Sen lisäksi monitasoisissa mallissa selitetään edeltävien mallien ristiriitaisuuksia kolmannen ja neljännen tason avulla. Ongelmana kaksitasomalleissa on lyhyiden aallonpituuksien eli sinisen värin käyttäytyminen. Sininen signaali näyttää voimistuvan aivokuoressa selittämättömällä tavalla [12]. Myös havainto ylemmän tason solujen reagoimisesta yhtä aikaa sekä kromaattiseen että valoisuusinformaatioon, jotka siis tulevat eri kanavia pitkin, oli selittämättä kaksitasoisessa mallissa.

Monitasoinen värinäkömalli lähtee liikkeelle verkkokalvon tappisolutyyppeiden (L,M,S) lukumäärästä, jonka on havaittu noudattavan suhdetta 10:5:1 [12]. L-tappeja on siis eniten ja S-tappeja vähiten, ja näitä suhdelukuja käytetään myöhemmillä tasoilla laskujen perustana. S-tappien oletetaan sijaitsevan verkkokalvolla tasaisesti, mutta M- ja L-tappien jakautuminen on satunnaista, jolloin erityisesti L-tapit voivat esiintyä rykelmissä [12]. S-tapit ovat kahdesta muusta tyypistä helposti erotettavissa, mutta M- ja L-tappien erottaminen toisistaan on hankalampaa. Psykofyysisten kokeiden tulosten perusteella on kuitenkin päädytty edellä kuvattuihin suhdelukuihin [12].

Mallin toinen taso sijoittuu ensimmäisen tapaan verkkokalvolle, mutta nyt pääosassa ovat hermosolut, eivät reseptorit. Reseptorien kytkettyessä välittäjäsolujen kautta toisiinsa ja edelleen gangliosoluihin muodostuu kolme toisistaan erillistä havainnotokanavaa [12]. Tarkalleen ei tiedetä missä vaiheessa verkkokalvolla nämä kanavat syn-

tyvät, koska mahdollisia synapsitasoja on kaksi (kts. kuva 6 sivulla 17 ja luettelo sivulla 16). Myöskään reseptori- hermo- ja välittäjäsolujen yhteenliittymien anatomisista ominaisuuksista ei ole tarkkaa tietoa, koska tehtyjen tutkimusten mukaan verkkokalvon solujen yhteenliittymät eivät suoraan selitä psykofyysisten kokeiden tuloksia [12]. Vaikka silmän anatomia ja toimintakin tunnetaan jo melko hyvin, ei silti kaikkea värinäkömekanismeihin liittyvää edes silmän tasolla osata selittää.

Näköhavainto siirtyy verkkokalvolla muodostuneita kanavia pitkin silmästä aivoihin. Kaksi kolmesta kanavasta perustuu vastapareille ja niiden avulla kulkee kromaattisuustieto. Nämä vastaparit ovat jo vastaväriteoriasta tutut punainen ja vihreä sekä sininen ja keltainen. Kanavat muodostuvat pääasiassa bipolaarisolujen avulla ja monitasoisessa värinäkömallissa bipolaarisoluja oletetaan olevan kahta eri päätyyppiä [12]. Anatomisesti bipolaarisoluja on nykytietämyksen mukaan kuusi erilaista [20], mutta värinäkömallissa tarvitaan vain kaksi teoreettista, tehtäviltään toisistaan eroavaa bipolaarisolutyyppiä. *Midget*-tyypin bipolaarisolut liittyvät vain yksittäiseen tappisoluuun, kun *diffuse*-tyypin bipolaarisolut liittyvät ryhmään soluja M- ja L-tapin naapurustossa [12]. S-tapit liittyvät yhteen vain toistensa kanssa, mutta M- ja L-tapit siis voivat myös yhdistää signaalinsa välittäjäsolun kautta. Midget- ja diffuse-bipolaarisolujen muodostamat signaalit pysyvät toisistaan erillisinä seuraavalle tasolle eli aivojen näkökuorelle saakka [12].

Bipolaarisolujen lisäksi verkkokalvolla on muitakin värihavaintoon vaikuttavia välittäjäsoluja. Horisontaalisolut eroavat bipolaarisoluista siinä, että ne liittyvät yhteen samalla alueella olevia reseptoreja valikoimatta niitä mitenkään [12]. Kaikkien verkkokalvon solujen yhteistoiminnan tuloksena toiselta tasolta kolmannelle lähtee kolme vastaparia signaaleja: $+L_o$ ja $-L_o$, $+M_o$ ja $-M_o$ sekä $+S_o$ ja $-S_o$ [12].

Kolmannella tasolla solutason vastakohtaparit muuttuvat havaintotason vastakohtapareiksi. Toisella tasolla vastakohtaparit muodostuvat erillisistä soluista ja kolmannella käsitellään näiden vastakohtaparien muodostamien havaintokanavien välittämiä signaaleja [12]. Samalla kromaattisuus- ja valoisuustieto eriytyvät toisistaan, kun ne siihen saakka ovat olleet sulautuneina yhdeksi signaaliksi. Erottaminen tapahtuu L_o ja M_o -kanavien kombinaatioina siten, että S_o -kanavan signaali (negatiivinen tai positiivinen) lisätään edellisten summaan. Mikäli L_o ja M_o ovat saman merkkiset, on kyseessä valoisuustieto ja jos ne ovat keskenään eri merkkiset, välittävät ne kromaattisuustietoa [12]. Taulukossa 2 on esitetty toiselta tasolta tulevien signaalien mahdolliset kombinaatiot ja millaisina ne värinäköjärjestelmän tasolla kolmannella tasolla havaitaan.

Taulukko 2: Kolmannen tason ulostulosignaalit [12]

Syöte	Signaali
$+L_o \quad +M_o \quad +S_o$	korkea valoisuustaso
$-L_o \quad -M_o \quad -S_o$	matala valoisuustaso
$+L_o \quad -M_o \quad +S_o$	punainen
$+L_o \quad -M_o \quad -S_o$	keltainen
$-L_o \quad +M_o \quad +S_o$	sininen
$-L_o \quad +M_o \quad -S_o$	vihreä

Verkkokalvolta tuleva S_o -kanava näyttää vaikuttavan voimakkaasti värien havaitsemiseen, vaikka varsinaiset kromaattisuusakselit värinäköjärjestelmässä muodostuvatkin L_o - ja M_o -kanavien kombinaationa [12], [13]. L- ja M-tapit muodostavat yhden väriakselin, jonka värialue vaihtelee lähinnä oranssin ja magentan välillä. S-tappien avulla tuo akseli hajotetaan värinäkömallin kolmannella tasolla tavanomaisiksi punaviher- ja sini-kelta-akseleiksi [12]. Aivokuorella (tasot 3 ja 4) tapahtuvat muutokset värihavainnon koodaustavoissa eivät ole kovin hyvin tunnettuja, mutta on syytä epäillä, että esimerkiksi akselien muutosprosessissa on huomattavaa epälineaarisuutta [13].

Neljännellä ja viimeisellä monitasoisen värinäkömallin tasolla värihavainnon käsittely tapahtuu monimutkaisten, valikoivien solujen avulla. Nämä solut eroavat edellisillä tasoilla olevista värien havaitsemiseen liittyvistä soluista siinä, että ne reagoivat tiettyihin aallonpituusalueisiin virittymällä (positiivisesti), mutta eivät reagoi muihin aallonpituuksiin negatiivisella ulostulolla kuten aikaisempien tasojen vastakkaisten signaaliparien avulla toimivat solut [12]. Vaikka vastavärioletuksesta näytetäänkin mallin viimeisellä tasolla luovuttavan, ovat esimerkiksi punaiselle ja vihreälle herkistyneet solut kuitenkin käytännössä vastakkaiset. Ne eivät voi koskaan reagoida samalle ärsykkeelle, koska niiden herkkyysalueet ovat toisistaan erilliset [12]. Vaikka solutason vastakohtaisuus poistuukin, on ihmisen värinäköjärjestelmä kokonaisuuden tasolla vastaväreihin perustuva. Tämä värinäköjärjestelmän ominaisuus asettaa vihreän, punaisen, sinisen ja keltaisen ihmisen kannalta erityisasemaan muihin väreihin verrattuna, kuten luvussa 4 esitetään.

4 Yhdentoista perusvärin teoria

Brent Berlin ja Paul Kay julkaisivat vuonna 1969 teoriasensa yhdestätoista yleisestä ja hierarkkisessa järjestyksessä esiintyvistä perusväritermistä. He tutkivat yhteensä 98 eri kieltä, joista 20 värinimeämiskokeiden ja loput kirjallisuuden perusteella [3], [21]. Tutkimuksessaan he havaitsivat, että on olemassa yhteensä yksitoista kielestä riippumatonta perusväriluokkaa ja että niiden nimet ilmestyvät kielen sanastoon tiettyssä, ennalta määrättyssä järjestyksessä. Tämä poikkeaa huomattavasti vallalla olleesta kielellisen relativismin näkökannasta [3], jonka mukaan kieli määrittää havainnon. Berlinin ja Kayn edustaman yleisten kategorioiden teorian mukaan havainto taas määrittää kielen, koska värinköön liittyvät neurofysiologiset mekanismit ovat kaikilla terveillä ihmisillä samanlaiset heidän etnisestä taustastaan riippumatta [38]. Jos värinäköjärjestelmä määrää sen kuinka eri värit saavat merkityksensä semanttisina kategorioina, ovat perusväritermit luonteeltaan yleisinhimillisiä [21].

4.1 Värisanaston tutkimisen historiaa

Vielä 1800-luvulla oletettiin yleisesti, että jos jossakin kielessä ei ole kaikkia samoja väritermejä kuin kehittyneimmiksi arvioiduissa eurooppalaisissa kielissä, on syynä kyseisen kielen puhujien kyvyttömyys erottaa kaikkia eri sävyjä [25]. Esimerkiksi antiikin kreikassa värisanastoon kuului vain neljä termiä: *leukós* (valkoinen, myös lumi, vesi, aurinko ja metalliset pinnat sekä kaikki kirkkaat, kiiltävät ja hohtavat värit), *glaukós* (musta, myös silmien väri, paju, oliivi ja sara – nykykreikassa merkitykseltään sininen), *erythrós* (punainen, myös veri, kupari ja viini) sekä *khlorós* (vihreä ja keltainen, myös nuoret lehdet, hunaja ja hiekka) [3]. Antiikin kreikan värisanastoa on tutkittu vanhojen kirjoitusten, erityisesti Homeroksen, perusteella ja esimerkiksi Demokritos ja pythagoralaiset olettivat olevan neljä perusväriä, jotka ovat juuri edellä mainitut [3]. Koska väritermit määriteltiin materiaalien kuten lumen, veden, oliivin, veren tai lehtien perusteella, ne eivät täyttäisi Berlinin ja Kayn teoriassaan esittämiä kriteerejä perusväritermelle. Lisäksi värit määriteltiin paremminkin kirkkauden (vaaleuden) kuin värisävyn perusteella, esimerkiksi kaikki termin *khlorós* määrittämät värit ovat vaaleita [3], [36].

Aikaisemmasta poikkeavan näkökulman muinaisten tai primitiivisiksi määriteltyjen kielten väritermistön epämääräisyyteen ja suppeuteen esitti Grant Allen 1880-luvulla

[3]. Hänen mukaansa näiden kielten väritermien epämääräisyys johtuu siitä, että kiinnostuksen kohteena olevat asiat ovat ”luontokappaleita” toisin kuin teollistuneissa yhteiskunnissa, joissa esimerkiksi teollinen värinvalmistus on saanut aikaan ihmisten jokapäiväisen värimaiseman muuttumisen. Luonnon kohteet ovat usein väriltään moninaisia ja muuttuvia ja siksi yritykset kuvata niitä abstrakteilla väritermeillä ovat liian epämääräisiä [3]. Siitä syystä on parempi sanoa vaikkapa ”nuoren lehden värinen”.

Samoihin aikoihin Hugo Magnus selvitti ihmisten havaitsevan kaksi värisävyä erilaisina, vaikka he eivät pystyisikään tekemään kielellistä eroa niiden välille. Havainto tukee Allenin oletusta, jonka mukaan erot johtuvat kielestä ja kulttuurista, eivät havainnointimekanismien puuttumisesta [3], [25]. Myöhemmin on havaittu, että ihmiset muistavat perusväritermejä esittävät näytteet muita näytteitä paremmin, vaikka heidän kielessään ei niille kaikille olisikaan erillistä termiä [38]. Magnusin tutkimusta voidaan pitää nykyaikaisen kulttuuritutkimuksen esikuvana: hän painoi esimerkkinä näytteet kymmenestä väristä ja lähetti ne yhdessä toimintaohjeiden kanssa lähetystyöntekijöille ympäri maailmaa. Hän pyysi lähetystyöntekijöitä järjestämään värinnameäskokeita kohdealueen alkuperäiskansasta valituille koehenkilöille ja selvittämään heidän kielensä mukaisen nimen kullekin värinäytteelle, mikäli tällainen termi kyseisessä kielessä esiintyy. Magnus pyysi kokeenjärjestäjiä kirjaamaan ylös kunkin koehenkilön vastaukset translitteroituna joko englanniksi tai saksaksi kokeenjärjestäjän äidinkielen mukaan ja ilmoittamaan onko kyseessä nainen vai mies. Lisäksi hän pyysi kirjaamaan ylös, mikäli käytetty termi tarkoittaa jotakin tiettyä kohdetta, ominaisuutta tai materiaalia ennemmin kuin värin nimeä, tai jos termi on lainasana [3].

Vastaukseksi tutkimuspyyntöönsä Magnus sai tietoja 15 pohjoisamerikkalaisesta, yhdestä eteläamerikkalaisesta, 25 afrikkalaisesta, 15 aasialaisesta, kolmesta australialaisesta ja kahdesta eurooppalaisesta kielestä. Yllätyksekseen hän huomasi, että vaikka primitiiviksi miellettyjen kansojen värisanasto perusvärien osalta oli suppeampi kuin teollistuneiden kansojen, heidän värinerottelukykynsä ei ollut sen heikompi. Esimerkiksi erään lounaisafrikkalaisen heimon ihmiset ilmoittivat suuren joukon värien nimiä, jotka erottelivat elollisista kohteista kuten karjasta eri sävyjä hyvinkin tarkasti. Silti heidän kielessään ei ollut kahta erillistä termiä, jotka olisivat vastanneet perusväritermejä sininen ja vihreä [3]. Magnus tuli tutkimustensa perusteella siihen johtopäätökseen, että ihmisten välillä ei ole fysiologisia eroja värinerottelukyvyyssä ja jos jonkin kielen väritermistö ei ollut kokonaan kehittynyt (verrattaessa eurooppalaisiin kieliin), puuttui siitä termejä tietyssä järjestyksessä [3].

Ensimmäisenä värisanaston hierarkkisen järjestyksen kirjoitti auki W. H. R. Rivers 1900-luvun alussa [3]. Hänen mukaansa oli olemassa neljä erilaista kielen kehitystasoa. Ensimmäisellä tasolla käytössä olivat vain termit *valkoiselle* (sisältäen yleensä myös keltaisen ja vihreän), *mustalle* (myös sininen ja violetti) ja *punaiselle* (myös purppura ja oranssi). Seuraavalla tasolla omaksi kategoriakseen erottuivat *keltaisen* sävyt ja sen jälkeen mukaan tuli termi *vihreälle* (sisältäen myös sinisen). Kehittyneimmässä sanastossa kaikki nämä kuusi termiä – musta, valkoinen, punainen, keltainen, vihreä ja sininen – esiintyivät omina perusväritermeinään [3]. Kyseessä ovat siis samat kuusi väriä, joita muualla tässä tutkielmassa nimitetään ensisijaisiksi perusväreiksi tai vastaväriteorian primääriväreiksi. On havaittu, että kun perusvärin nimi on kielen värisanastoon ilmestynyt ja saavuttanut vakiintuneen aseman, se ei enää kielestä häviä – tosin termi voi korvautua toisella, esimerkiksi lainasanalla [25]. Perusväritermien määrä kielessä voi siis lisääntyä, mutta ei koskaan vähentyä vaikka itse nimet muuttuisivatkin.

Riversin tutkimusten jälkeen värisanaston tutkiminen esimerkkinä yleisistä ja yleisinhimillisistä ominaisuuksista lakkasi noin 50 vuodeksi kehellisen relativismin vallassa alaa kulttuurintutkimuksessa ja kielitieteessä 1920-luvulta alkaen. Väri-nimeämiskokeita ja väritutkimusta kyllä tehtiin, mutta eri lähtökohdista [3]. Kielellisen relativismin perusajatuksiin kuuluu, että ei ole olemassa yhteistä, yleisinhimillistä kokemusta esimerkiksi väreistä siten, että universaaleja kategorioita voisi syntyä. Sen sijaan kielijärjestelmien väliset erot ovat rinnakkaisia kyseisiä kieliä puhuvien ihmisten ei-kielellisten kognitiivisten tilojen kanssa. Siten ei myöskään yleistä värisanaston rakennetta voi olla olemassa. Kielelliseen relativismiin keskitytään tarkemmin kohdassa 5.2.

4.2 Ehdot perusväritermeille

Berlinin ja Kayn teoria yhdestätoista perusväritermistä toi kielitieteen mielenkiinnon kohteeksi uudelleen värien ja värisanaston rakenteen semanttisena kategoriana. Heidän mukaansa jokaisessa kielessä on potentiaalisesti ääretön joukko väriä kuvaavia sanoja ja ilmauksia [3], esimerkiksi homeenvihreä, mönjänpunainen, vaalea kellanvihreä, sinertävä, nougat tai naapurin ruosteisen mopon värinen. Edellä mainituista mikään ei kuitenkaan kelpaisi Berlinin ja Kayn määritelmän mukaan perusväritermiksi. Kun tutkitaan onko jokin tietty väritermi heidän tarkoittamansa perusväritermi, tutkitaan ensin

täyttääkö se neljä perusehtoa. Jos nämä ehdot täyttyvät, on kyseessä perusväritermi. Mikäli yhdenkin perusehdon täyttyminen on epäselvää, on olemassa vielä neljä lisäehtoa, joilla termin asema lopullisesti ratkaistaan [3]. Berlinin ja Kayn perusehdot perusväritermeille ovat [3]:

1. Perusväritermin tulee olla *yksisanainen (monolexic)* ja morfologisesti yksinkertainen eli termin merkitys ei saa olla suoraan nähtävissä sen osista, mikäli erotettavia *morfeemeja* on useampia kuin yksi (sinertävä tai mönjänpunainen eivät ole yksiosaisia, koska ensimmäinen on johdannainen ja toinen yhdyssana).
2. Se ei sisälly minkään toisen perusväritermin määrittämään alueeseen (nougat on eräs ruskean sävy ja siksi ei kelpaa perusväriksi).
3. Sen käyttöä ei saa rajoittaa vain tiettyihin materiaaleihin (hallava, joka viittaa eläinten karvan väriin).
4. Sen täytyy olla *psykologisesti keskeinen* ihmisille yleensä ("naapurin ruosteisen mopon värinen" ei mitään ilmeisimmin tätä ehtoa täytyä, mutta eivät myöskään muut edellisessä kappaleessa mainitut värit).

Lekseemi (lexeme) merkitsee sanaa siinä muodossa, jossa se sanakirjassa esiintyy ja sillä tulee olla yksi, yhtenäinen ja jakamaton merkitys [1]. Se on siis sana, jolla on semanttinen merkitys, mutta ei merkitystä kieliopin tai äänneasun kannalta. Homonyymit ovat siten lekseemiltään erilliset (niiden semanttinen merkitys on erilainen) vaikkakin äänneasultaan identtiset. Sanan eri taivutusmuodot ovat saman lekseemin eli sanan perusmuodon erilaisia muotoja [1]. *Morfeemi (morpheme)* puolestaan on kieliopin perusyksikkö eikä sillä ole itsenäistä semanttista merkitystä [39]. Esimerkiksi suomen kielen monikko tapauksessa *kirjat* koostuu kahdesta morfeemista: perustermistä *kirja* sekä monikon tunnuksesta *-t*.

Psykologisen keskeisyyden käsite sisältää kolme ehtoa: (1) kyseisen väritermin tulee esiintyä listan alkupäässä kun ihmiset saavat vapaasti luetella värien nimiä, (2) sen käytön tulee olla yksimielistä ja johdonmukaista ja (3) ihmisten tulee käyttää juuri sitä termiä, ei mitään sen mahdollista (edes osittaista) synonyymiä tai sen osajoukkoa määrittelevää sanaa [3]. Yksimielisesti ja johdonmukaisesti käytetty termi esiintyy samanlaisena (sama sana ja viittaamassa samaan fyysikaalisesti havaittavaan väriin)

sekä ihmisten välillä että saman ihmisen eri käyttökertoilla. Vaikka siis nougat on nimi ruskealle värille, se ei kelpaa perusväritermiksi (muiden kriteerien täyttymättömyyden ohella) siksi, että kovinkaan suuri joukko ihmisiä ei käytä sitä kuvaamaan laajaa ruskeiden sävyjen aluetta ja vielä siten, että kaikki tarkoittaisivat sillä joka kerta samaa värisävyä.

Vaikka nämä neljä ehtoa ovat riittävät määräämään lähes kaikki perusväritermit kaikissa kielissä, on mahdollista että joidenkin kiistanalaisten termien statusta täytyy tutkia vielä yksityiskohtaisemmin. Berlin ja Kay [3] esittelevät vielä toiset neljä ehtoa, joilla lopullisesti ratkaistaan väritermin asema, mikäli termi ei ole läpäissyt kaikkia neljää perusehtoa.

1. Perusväritermin muodon tulee olla yhtä laajalti tunnettu ja vakiintunut kuin jo olemassa olevat perusväritermit (punertava on mutta rosahtava ei ole).
2. Värin nimi ei saa olla samalla materiaalin nimi (hopea ei siksi kelpaisi perusväritermiksi).
3. Mikäli kyseessä on kieleen hiljattain tullut lainasana, on sen asemaa tutkittava erityisen tarkkaan.
4. Tapauksissa, joissa sanan morfeemeja (erityisesti sen yksiosaisuutta) on hankala tutkia, täytyy erityisen tarkkaan tutkia sen muoto-opillista asemaa ja sen perusteella ratkaista voiko kyseisen sana merkityksen päätellä suoraan sen rakenteesta.

Toiselle lisäehdolle on esitetty vastaesimerkiksi englannin termiä *orange* [10], mutta koska se Berlinin ja Kayn mukaan täyttää neljä perusehtoa, ei sen stausta voida lisäehtoihin vetoamalla kyseenalaistaa.

4.3 Värisanastojen alkuperäinen ryhmittely

Berlinin ja Kayn [3] löytämät universaalit perusvärit ovat *valkoinen, musta, punainen, vihreä, keltainen, sininen, ruskea, purppura, vaaleanpunainen, oranssi ja harmaa*.²

²alkuperäiset [3] englanninkieliset termit ovat: white, black, red, green, yellow, blue, brown, purple, pink, orange ja grey

Vaikka näistä yhdestätoista väristä voisi muodostaa yhteensä $2^{11} = 2048$ erilaista yhdistelmää, löysivät Berlin ja Kay tutkimistaan kielistä yhdistelmiä vain 22 erilaista, jotka esitellään taulukossa 3. Tämän luvun taulukoissa käytetyt lyhenteet ovat Va = valkoinen, M = musta, P = punainen, Vi = vihreä, K = keltainen, S = sininen, R = ruskea, VP = vaaleanpunainen, Pur = purppura, O = oranssi, H = harmaa.

Taulukko 3: Perusvärien mahdolliset yhdistelmät [3]

Värien määrä		Va	M	P	Vi	K	S	R	VP	Pur	O	H
1	2	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	3	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
3	4	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
4	4	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-
5	5	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
6	6	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
7	7	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
8	8	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
9	8	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-
10	8	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-
11	8	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+
12	9	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-
13	9	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-
14	9	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+
15	9	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-
16	9	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
17	9	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+
18	10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
19	10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
20	10	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
21	10	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
22	11	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

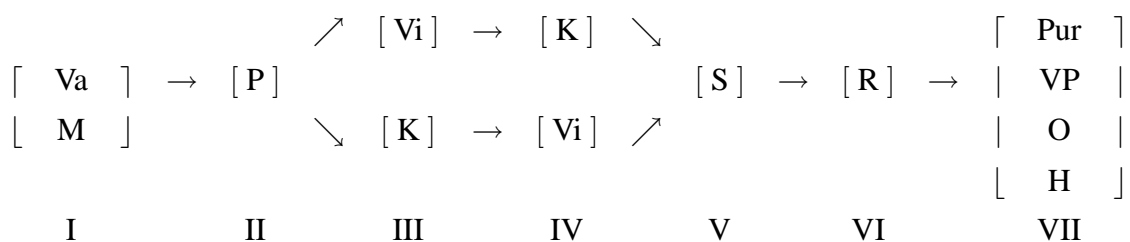
Väritermien jakautuminen kielissä noudattaa selkeää hierarkkista rakennetta siten, että jos kielessä on vain kaksi termiä ne ovat valkoinen ja musta. Pääsääntöisesti väritermit

näissä kielissä jakaantuvat tummiin ja vaaleisiin väreihin ja näiden ryhmien keskukset, siis kunkin ryhmän paras edustaja tai prototyyppi, asettuvat vastaavasti mustan ja valkoisen kohdalle värikartalla. Poikkeuksiakin on, esimerkiksi eräässä papualaisessa kielessä [19] on vain perusväritermit *mili* ja *mola*, joista ensimmäinen tarkoittaa tummia ja värisävyltään kylmiä värejä kun taas jälkimmäinen vaaleita ja lämpimiä sävyjä. Näitä väritermejä ei voi siksi tarkasti kääntää nimillä musta ja valkoinen.

Perusväreistä kolmantena kielen sanastoon tulee punainen, sen jälkeen keltainen ja virheä. Ne voivat esiintyä kummassa järjestyksessä tahansa (taulukon 3 rivit 3 ja 4), mutta kuitenkin aina punaisen jälkeen ja ennen sinistä, joka tulee mukaan kuudentena. Seitsemäntenä sanastoon tulee ruskea ja sen jälkeen vaihtelu kielen välillä on runsaampaa. Mikäli kielessä on kahdeksan perusväritermiä, on kahdeksas termi jokin neljästä jäljellä olevasta eli vaaleanpunainen, purppura, oranssi tai harmaa (taulukon 3 rivit 8 – 11). Jos värejä on yhdeksän tai kymmenen, mukana on jokin näiden neljän värin yhdistelmä (taulukon 3 rivit 12 – 21) ja viimeisessä vaiheessa tulevat mukaan kaikki yksitoista väriä.

Väritermien ilmestymisjärjestys voidaan esittää myös osittain järjestettynä joukkona, kuten on tehty taulukossa 4.

Taulukko 4: Perusväritermien hierarkia Berlinin ja Kayn [3] mukaan



4.4 Perusväriluokkien sisäinen rakenne

Väri on fysikaalisesti havaittavana kohteena spektriluonteensa takia perusolemuksettaan jatkuvaa. Esimerkiksi sateenkaarta katsoessaan ihmiset eivät voi tarkkaan sanoa missä sininen vaihtuu vihreäksi tai vihreä keltaiseksi, koska selviä rajoja eri värien välillä ei ole vaan muutos on jatkuvaa ja liukuvaa. Kuitenkin sateenkaaresta puhuttaessa ihmiset todennäköisesti käyttävät diskreettejä väriluokkia kuvaavia termejä kuten

punainen, oranssi, keltainen, vihreä ja sininen. Väritermeillä voidaan kuitenkin ilmaista myös väreille ominaista liukuvuutta luokan *keskusalkion* (eli värin prototyypin tai luokan parhaan edustajan) suhteen [21]. Kun puhutaan kellertävänvihreästä on kyseessä väri, joka on keltaisempi kuin kaikista vihrein vihreä, mutta silti selvästi vihreäksi, ei keltaiseksi nimettävä. Samalla tavalla voidaan puhua tummansinisestä tai vaaleanvihreästä, näissä liukuma parhaasta sinisestä tapahtuu mustan ja parhaasta vihreästä valkoisen suuntaan. Molemmat määreet voidaan tietenkin myös yhdistää ja puhua vaikkapa tummasta sinivihreästä. Samalaista liukumaa tapahtuu myös värikylläisyydessä ja jossakin vaiheessa väri ei enää olekaan vihreä vaan muuttuu harmaanvihreän kautta harmaaksi [21].

4.4.1 Ensi- ja toissijaiset perusvärit

Perusvärit voidaan jakaa kahteen luokkaan neurofysiologisten tekijöiden mukaan [21], [40]. *Ensisijaisia* (*primary*) perusvärejä ovat *valkoinen*, *musta*, *punainen*, *keltainen*, *vihreä* ja *sininen* ja niiden asema perustuu ihmisen värinäköjärjestelmän toimintaan, jota käsitellään tarkemmin kohdassa 3.3. Ensisijaisista perusväreistä kromaattiset eli punainen, vihreä, keltainen ja sininen ovat erityisasemassa siksi, että nämä neljä väriä voivat esiintyä yksin, puhtaina värisävyinä: kaikki muut kromaattiset värit, sekä toissijaiset perusvärit että muut värit, ovat kahden tai useamman värisävyn johdannaisia tai yhdistelmiä. Ensisijaiset perusvärit muodostavat havaittavan väriavaruuden kiintopisteet, joiden suhteen muut värit asettuvat paikoilleen [25].

Toissijaisten (*secondary*) perusvärien asema on ensisijaisia hankalampi, koska niiden statuksen takaavat psykologiset, eivät fysiologiset seikat [40]. Toissijaisia perusvärejä ovat *ruskea*, *purppura*, *vaaleanpunainen*, *oranssi* ja *harmaa*, jotka kaikki ovat ensisijaisten perusvärien sekoituksia. Kaikista mahdollisista sekoituksista vain nämä viisi täyttävät Berlinin ja Kayn perusväreille esittämät ehdot.

4.5 Väriluokkien väliset erot

Paul Kayn ja Chad K. McDanielin [21] esittämät muutokset Berlinin ja Kayn alkuperäiseen, hyvin jäykkään hierarkiaan esitellään taulukossa 5. Kay ja McDaniel havaitsivat, että hierarkian tasoilla I - IV on värikategorioita, joilla on kaksi tai useampia hyvin erilaisia keskusalkioita. Lisäksi he kiinnittivät huomiota harmaan muista toissi-

jaisista perusväreistä poikkeavaan käyttäytymiseen. Harmaa saattaa esiintyä ”villinä korttina” millä tahansa tasolla III-VII, vaikka se yksinkertaisuuden vuoksi onkin taulukossa 5 merkitty vain tasolle VII. Harmaan erityisasema perustuu siihen, että se on neutraali (akromaattinen) sävy, toisin kuin muuta toissijaiset perusvärit.

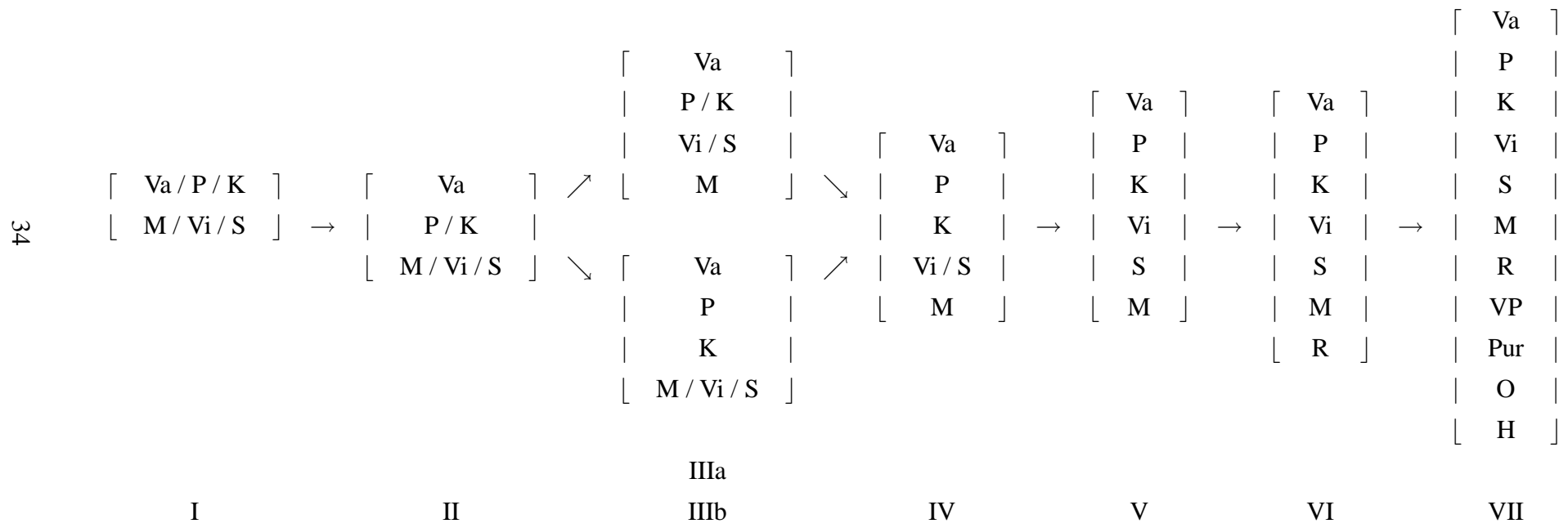
4.5.1 Yhdistelmäluokat

Kay ja McDaniel nimittävät *yhdistelmäluokiksi* (*composite categories*) sellaisia värikategorioita, joilla on useampia kuin yksi keskusalkio. Koska yhdistelmäluokat esiintyvät värihierarkian tasoilla I-IV, on useiden keskusalkioiden esiintyminen sikäli ymmärrettävää, että näillä tasoilla väritermien lukumäärä on pienempi kuin ensisijaisen perusvärien määrä. Kaikkia ensisijaisia perusvärejä ei siksi voida mitenkään määritellä omiksi ryhmikseen. Ensimmäisen kerran useampikeskuksisia väriluokkia havaitsi Eleanor H. Rosch [19] (Eleanor R. Heider) ja se pakotti muuttamaan alkuperäistä oletusta, jonka mukaan tason I kielten väriluokkien keskusalkiot ovat valkoinen ja musta [3].

Viimeisenä eli tasolla IV on mukana sinisen ja vihreän yhdistelmäluokka *sihreä* (*grue*), joka havaittiin yleisenä Amerikan intiaanien kielissä jo 1880-luvulla [21]. Koska sihreä on viimeinen yhdistelmäluokka ennen kuin kaikki ensisijaiset perusväritermit ilmestyvät kieleen, se on kaikista yleisin ja siten myös eniten tutkittu. Värinimeämiskokeissa on havaittu, että tason IV kieliä puhuvat koehenkilöt ilmoittavat sihreän keskusalkioksi näytteen, joka seuraavalla tasolla asettuu joko sinisen tai vihreän luokan parhaaksi näytteeksi [21]. Kyseessä ei siis ole sinivihreä (turkoosi) väri, jonka paras näyte sijoittuisi sinisen ja vihreän välille, vaan sinivihreitä näytteitä valitaan keskusalkioksi aivan yhtä harvoin kuin muitakin näytteitä, jotka sijoittuvat samalle etäisyydelle sihreän luokan keskusalkioista [21]. Yhdistelmävärien keskusalkioiksi saatetaan eri kielten tai jopa saman kielen sisällä valita eri alkiot, mutta kuitenkin valitut keskusalkiot kuuluvat aina yhdentoista perusvärien keskusalkioiden joukkoon [59].

Vaikka tässä yhteydessä puhutaankin yksittäisestä keskusalkiosta kullekin perusvärille, voi parhaan näytteen täsmällinen sijoittuminen väriavaruuteen vaihdella hiukan sekä kielten välillä että yhden kielen käyttäjien kesken. Tuo muuntelu on kuitenkin pientä verrattuna keskusalkioiden etäisyyksiin ja mahdolliset keskusalkiot muodostavat niin pienen alueen väriavaruudessa, että yksinkertaisuuden vuoksi on perusteltua puhua yksittäisestä keskusalkiosta keskusalueen sijaan [59].

Taulukko 5: Perusväritermien hierarkia Kayn ja McDanielin [21] mukaan



Taulukossa 5 merkintä [Va / P / K] ilmaisee yhdistelmäluokkaa, joka koostuu kahdesta tai useammasta (käytännössä kuitenkin korkeintaan kolmesta eli kahdesta kromaattisesta ja yhdestä neutraalista) ensisijaisesta perusväristä. Yhdistelmäluokkia on neljä erilaista [21]:

- *vaaleat lämpimät* valkoinen, punainen ja keltainen ([Va / P / K] tasolla I)
- *lämpimät* punainen ja keltainen ([P / K] tasoilla II ja IIIa)
- *tummat kylmät* musta, vihreä ja sininen ([M / Vi / S] tasoilla II ja IIIb)
- *kylmät* sininen ja vihreä ([Vi / S] tasoilla IIIa ja IV)

Mahdolliset kromaattisten värien yhdistelmät ovat siis punainen ja keltainen sekä sininen ja vihreä. Muutamissa kielissä on havaittu myös keltaisen ja vihreän yhdistelmäluokka, mutta se ei ole yhtä yleinen kuin kaksi muuta [59]. Keltaisen ja sinisen tai punaisen ja vihreän yhdistelmäluokat eivät siis ole mahdollisia ja erääksi selitykseksi on esitetty, että mahdolliset yhdistelmät perustuisivat valon aallonpituuteen [59]. Punainen ja keltainen ovat aallonpituudeltaan vierekkäiset värit samoin kuin sininen ja vihreäkin, kun ensisijaisten perusvärien järjestys on sininen (450-500 nm), vihreä (500-570 nm), keltainen (570-590 nm) ja punainen (620-700 nm) [18]. Vierekkäisyysoletuksen perusteella vain yhdistelmäluokat punainen – keltainen, keltainen – vihreä ja vihreä – sininen kaikkiaan kuudesta mahdollisesta olisivat reaalisia [59]. Ihmisen värinäköjärjestelmän toimiminen kahden kromaattisen kanavan avulla on nykyäsitöksen mukaan mahdollinen selitys tällekin jaottelulle. Vastavärit eivät voi sekoittua keskenään, kuten kohdassa 3.3 esitetään.

Valkoisen kanssa yhdistyvät juuri keltainen ja punainen, koska keltaisen värin keskus on kirkkausakselilla paljon lähempänä valkoista kuin muiden värien. Keltainen on siis huomattavasti muita värejä vaaleampi ja siten luonnollisesti lähempänä valkoista kuin mustaa. Punainen ryhmittyy kahden värin järjestelmässä yhteen keltaisen kanssa edellä esitetyllä tavalla [59]. Varsinainen värisävyn ja kirkkauden jakautuminen kahdeksi erilliseksi muuttujaksi värijärjestelmässä tapahtuu vasta tasolla IIIa tai IV. Tämän jälkeen mukana olevat luokat eivät riipu enää kirkkaudesta vaan pelkästään värisävystä – kuten värin käsite länsimaissa yleisesti ymmärretäänkin.

4.5.2 Johdannaisluokat

Tasolta V alkaen väritermejä on kielessä vähintään kuusi, joten yhdistelmäluokkia ei enää muodostu. Tämä jälkeen uudelleenlaisiksi väriluokaksi nousevatkin toissijaiset perusvärit, jotka muodostuvat kahden tai useamman perusväriluokan leikkauksena. Kay ja McDaniel kutsuvat näitä luokkia *johdannaisluokiksi* (*derived categories*) [21]. Erikoista johdannaisluokissa on se, että ne asettuvat väriavaruudessa punaisen ympärille [59]. Kromaattiset johdannaisvärit perustavat olemassaolonsa punaisen ympärille, koska niiden (mahdollisesti ruskeaa lukuun ottamatta) komponenteista yksi on punainen: oranssi muodostuu punaisesta ja keltaisesta, vaaleanpunainen punaisesta ja valkoisesta, purppura punaisesta ja sinisestä.

Ruskean on katsottu muodostuvan joko keltaisen ja mustan johdannaisvärinä [21] tai olevan muista johdannaisväreistä erillinen, eräänlainen linkki värien kesken [53]. Kun värin puhtaus laskee, mikä tahansa tumma väri, ehkä sinistä lukuun ottamatta, muuttuu ruskehtavaksi, ja ruskea on siten erikoisasemassa verrattaessa muihin johdannaisväreihin [53]. Ruskea myös ilmestyy kielen sanastoon ennen muita toissijaisia perusvärejä, joten senkään takia se ei ole niihin suoraan rinnastettavissa. Kuitenkin myös ruskea sijaitsee väriavaruudessa samalla tavalla punaisen ympärillä kuin muutkin johdannaisvärit: sen paikka on punaisen ja vihreän välissä [3], [5], [53].

Akromaattiset eli neutraalit värit edustavat värien yhdistelmissä lähinnä värin kirkkautta, eivät värisävyä [21]. Harmaan avulla ilmoitetaan myös värikylläisyyttä, joten neutraalien värien avulla muodostettuja väritermejä tarvitaan värisävyjen yksityiskohtaisempien ominaisuuksien esittämiseen aikaisemminkin kuin vasta viimeisellä tasolla [21]. Perusväreiksi nousevat vain valkoisen ja punaisen johdannaisluokka (vaikka suomen kielen *vaaleanpunainen* ei yhdyssanana perusväritermiksi kelpaakaan) ja mahdollinen keltaisen ja mustan johdannaisluokka. Todellisuudessa neutraalit värit muodostavat kromaattisista väreistä erillisen oman akselinsa väriavaruudessa ja siten värin kirkkaus, sävy ja värikylläisyys ovat toisistaan riippumattomia.

Johdannaisluokkien muodostumisessa ei kuitenkaan ole kyse samasta asiasta kuin väripigmenttejä sekoitettaessa, jolloin esimerkiksi vihreää saadaan sinistä ja keltaista sekoittamalla. Kyse ei myöskään ole pelkästään eri väristen valojen yhdistämisestä, jolloin kaikkia värejä yhdistämällä saadaan valkoista valoa. Kyse on ihmisen värinäköjärjestelmässä tapahtuvasta värien sekoittumisesta, joka ei toimi yhtä suoraviivaisesti kuin värillisten valojen tai väripigmenttien sekoittuminen [18].

4.5.3 Perusvärien keskeisyserot

Vaikka kaikki tässä luvussa käsitellyt värit ovatkin perusvärejä, voidaan niidenkin välillä havaita eroja keskeisyyden määritelmään perustuen [59]. Mikäli keskitytään vain varsinaisiin (kromaattisiin) väreihin havaitaan, että kaikista keskeisin väri on punainen. Se vakiintuu lasten sanastossa ensimmäisenä, ja se on ensimmäinen väri, joka väritermien hierarkiassa erottuu yhdistelmäluokista omaksi luokakseen. Värinimeämiskokeissa punaiset näytteet nimetään yksimielisemmin ja johdonmukaisemmin kuin muut värit ja sen alue väriavaruudessa on kooltaan pienempi ja selvärajaisempi kuin muilla perusväreillä [53]. Punaiset värit myös muistetaan ja tunnistetaan muita helpommin [15]. Mitään fysiologista syytä punaisen erityisasemalle ei ole löydetty, mutta voidaan olettaa että esivanhemmillemme on ollut syötäväksi kelpaavien hedelmien ja marjojen tunnistamisessa eniten hyötyä juuri punaisen tunnistamisesta [18]. Punainen toimii luonnossa myös yleisenä varoitus- ja huomiovärinä lajista riippumatta, sekä kasveilla että eläimillä.

Punaisen jälkeen seuraavaksi keskeisimpiä ovat muut ensisijaiset perusvärit: punaisen vastaväri vihreä ja toisen vastaväriparin muodostavat keltainen ja sininen. Vaikka ensisijaisten perusvärienkin kesken eroa on, ovat ne kuitenkin keskeisempiä kuin mitkään toissijaisista [54]. Ero ensi- ja toissijaisten perusvärien kesken ei kuitenkaan ole yhtä suuri kuin perusvärien ja muiden värien kesken [5], [53]. Perusvärit ovat värinimeämiskokeiden perusteella selkeästi erityisasemassa muihin väreihin nähden.

5 Yleisten väriluokkien teorian ongelmia

Vaikka Berlinin ja Kayn [3] työ onkin saavuttanut jonkinlaisen tärkeimmän vertailukohdan statuksen antropologian ja kielitieteen väritutkimuksessa, esitetään sitä kohtaan myös runsaasti kritiikkiä. Tässä luvussa esitellään keskeisimpiä näkökohtia, joita yhdentoista perusväritermin teoriaa vastaan on esitetty. Osa on selkeää kritiikkiä joko teorian semanttisia perusoletuksia tai johtopäätöksiä muokanneita kokeita kohtaan, osa taas parannusehdotuksia kriitikoiden mielestä turhan naiviin ja monilta osiltaan liian jäykkään teoriaan.

5.1 Määritelmän ongelmallisuus

T. D. Crawford [10] esitti vuonna 1982 artikkelissaan *Defining "Basic Color Term"* kritiikkiä Berlinin ja Kayn perusväritermien määritelmää kohtaan ja kävi sen läpi kohta kohdalta analysoiden kunkin ehdon erikseen. Useimpiin kohtiin hän myös ehdotti parannuksia alkuperäiseen määritelmään³, jota piti monimutkaisena, osin ristiriitaisena ja lähes mahdottomana todentaa kokeellisesti [10].

Ensimmäiseksi Crawford kritisoi Berlinin ja Kayn vaatimusta, jonka mukaan termin tulee olla yksiosainen ja sen merkitys ei saa olla termin muodon perusteella ilmeinen, mikäli erotettavia morfeemeja on useampia kuin yksi. Esimerkiksi sanan *käsikirja* merkitys on ilmeinen sanan muodon perusteella eikä se siksi kelpaisi perusväritermiksi, kun taas sen synonyymien *manuaali* merkitys ei ole samalla tavalla ilmeinen ainakaan latinaa taitamattomalle kielenkäyttäjälle. Kuitenkin nämä kaksi sanaa määrittelevät täsmälleen saman alueen semanttisessa käyttöympäristössään ja siksi niitä tulisi Crawfordin mukaan käsitellä samanarvoisina [10]. Toisaalta toinen sanoista on selvästi vierasperäinen lainasana, ja sanat siten Berlinin ja Kayn [3] mukaan eri asemassa.

Määritelmän perusehdoista kaksi ja kolme Crawford on periaatteessa samaa mieltä Berlinin ja Kayn kanssa: perusväritermin määrittämä alue väriavaruudessa ei saa kokonaisuudessaan sisältyä jonkin toisen perusväritermin määrittämään avaruuteen eikä sen käyttöä saa rajoittaa vain joitakin tiettyjä materiaaleja tai olosuhteita koskivaksi. On kuitenkin olemassa kieliä, joissa on käytössä eri termit kuvaamaan elotonta ja elollista kohdetta [10]. Meidän terminologiassamme ne ovat samannimisiä ja niiden

³kts. kohdasta 4.2 sivuilta 28 ja 29

väri havaitaan samanlaisena. Berlinin ja Kayn koejärjestelyjen takia elollisiin olioihin liittyviä termejä ei havaita ollenkaan, heidän värinimeämiskokeissaan kun käytettiin vain elottomia painettuja värinäytteitä.

Erityistä kritiikkiä Crawford esittää epämääräisenä pitämäänsä psykologisen keskeisyyden käsitettä kohtaa [10]. Riskinä nimittäin on, että eri tutkijat soveltavat määritelmään eri tavoilla, jolloin samaakin aineistoa käytettäessä saadaan erilaisia tuloksia. Ensimmäisenä mainittu ehto eli esiintyminen listan alkupäässä vapaasti värjyä lueteltaessa tulisi Crawfordin mukaan hylätä kokonaan, koska se monimutkaistaa määrittelyprosessia tuottamatta mitään hyötyä. Jotta tulos olisi edes jokseenkin luotettava, tulee koehenkilöjoukon olla suuri, koska ihmiset ymmärtävät itse värin käsitteen hyvin eri tavoilla. Jotkut voivat merkitä listansa alkuun mustan ja valkoisen, koska niiden kontrasti on suuri ja ne siksi tulevat mieleen ensimmäisinä. Toiset taas saattavat jättää kyseiset värit kokonaan pois listaltaan, koska ne neutraaleina eivät heidän mielestään täytä värin määritelmää ollenkaan [10]. Luettelointitehtävissä pienestä koehenkilöjoukosta johtuvat vääristymät voivatkin olla melko dramaattisia.

Psykologisen keskeisyyden määritelmän käyttämisessä perusväritermin ehtona on ongelmana myös, että sen avulla ei voida mitenkään tutkia kielen aikaisempien kehitysvaiheiden sanastojen rakennetta. Sitä olisi kuitenkin tärkeä päästä tutkimaan mikäli kielen oletetaan kehittyvän, ja erityisesti kun sen oletetaan kehittyvät tietyssä hierarkkisessa järjestyksessä. Kaksi muuta psykologisen keskeisyyden ehtoa, siis termin yksimielinen ja johdonmukainen käyttö sekä vaatimus tietyn termin (eikä synonyymien) käytöstä riittävät Crawfordin mielestä määrittelemään psykologisen keskeisyyden käsitteen sekä kielen nykyistä tilannetta että historiaa tutkittaessa, kunhan vain aineisto on riittävän laaja.

Crawford kritisoi myös perus- ja lisäehtojen suhdetta alkuperäisessä määritelmässä. Hänen mukaansa pitäisi voida olettaa, että jos tutkittava termi täyttää perusehdot, sen tulisi automaattisesti täyttää myös lisäehdot, koska lisäehtoja ei siinä tapauksessa tutkita ollenkaan. Kuitenkin esimerkiksi englannin termin *orange* (oranssi) on kiistanalainen, koska se Berlinin ja Kayn mukaan täyttää perusehdot, mutta ei täytä toista lisäehtoa eli on materiaalin nimi [3], [10]. Lisäksi ihmisillä ei ole yleisesti tiedossa onko termi alunperin tarkoittanut appelsiinia ja sitten vakiintunut tarkoittamaan kyseistä väriä vai päin vastoin [10]. Myös tuoreita lainasanoja koskeva ehto tulisi Crawfordin mielestä poistaa kokonaan, koska on epäselvää mitä tuoreella tässä yhteydessä tarkoitetaan.

Kyse on näissä kahdessa ehdossa samanlaisesta ongelmasta: kieli kehittyy kaiken aikaa ja siihen tulee uusia sanoja, joiden käyttö vakiintuu vähitellen. Siksi pitäisi tutkia kielen rakennetta tietyllä hetkellä ja verrata sitä aikaisempiin hetkellisiin rakenteisiin siten, että tutkittavat sanastot ymmärretään peräkkäisiksi, mutta erillisiksi [10]. Samanlaisesta epämääräisyydestä termien käytössä kuin tuoreiden lainasanojen kohdalla Crawford kritisoi myös viimeisen lisäehdon vaatimusta, jonka mukaan tulee erityisen tarkkaan tutkia sanan muoto-opillista asemaa. Lisäksi viimeinen ehto tutkii vain morfeemeja eli sanan muotoa, ei mahdollisen perusväritermin semanttista asemaa, joten se ei myöskään siitä syystä ole kelvollinen tutkittaessa väritermin statusta [10]. Sama ongelma esiintyy jo ensimmäisessä perusehdossa ja johtuu nimen omaan kielitieteellisestä sanojen muotoon keskittyvästä tulkinnasta, joka jättää kokonaan huomiotta sanojen merkityksen.

Crawford esittää lopuksi oman ehdotuksensa perusväritermin määritelmäksi [10]:

Kaikkien koehenkilöiden tulee käyttää samaa sanaa ja samassa muodossa, sen täytyy olla yksimielisesti ja johdonmukaisesti käytetty, sen merkitys ei saa sisältyä minkään muun väritermin merkitykseen eikä sen käyttöä saa rajoittaa vain tiettyihin oloihin liittyväksi.

5.2 Yleisten kategorioiden olemassaolo

Kaksi keskeistä paradigmaa semanttisten kategorioiden tutkimuksessa ovat *yleisten kategorioiden teoria* ja *kielellisen relativismin teoria*. Vaikka nämä kaksi eroavatkin toisistaan huomattavasti, elävät ne kuitenkin rinnakkain kulttuuriin ja kieleen keskittyneessä väritutkimuksessa ja yleisemmin semanttisten kategorioiden tutkimuksessa. Väri on perinteisesti ollut relativistien keskeinen esimerkkitapaus kielen ja kulttuurin vaikutuksesta havainnointiin, joten Berlinin ja Kayn haaste on poikunut runsaasti vastineita ja kokeellisia tuloksia kummallakin puolella.

5.2.1 Kielellinen relativismi

Benjamin Lee Whorf on kiteyttänyt kielellisen relativismin perusajatuksen huomautuksessaan [57]:

Maailma on vaikutelmien kaleidoskooppimaista muutosta, jonka ihmiset mielessään järjestävät ensisijaisesti kielen avulla.

Kielellisen relativismin kannattajien mukaan jokainen kieli toteuttaa puhujiensa kautta omaa satunnaista kategoriajärjestelmäänsä [38] ja siten kieli vaikuttaa väriluokkiin, jotka ovat kielestä ja kulttuurista riippuvia, eivät universaaleja [60]. Kielellisen relativismin ja yleisten kategorioiden teorian erimielisyydessä on kyse tulkintaerosta, kun pyritään selvittämään kuinka semanttiset luokat saavat sisäisen rakenteensa. Yhtä mieltä molempien traditioiden puitteissa ollaan siitä, että luokkien rakenne muodostuu ydinmerkityksen eli parhaan esimerkinäytteen ympärille, ja luokan alkioden samankaltaisuus ydinmerkityksen kanssa pienenee sitä mukaa mitä kauemmas ytimestä liikutaan kohti luokan rajoja [47]. Sisäisen rakenteen merkitys voi olla hyvinkin konkreettinen, kun kyseessä on jokin aistein havaittava kohde, jollainen värikin on. Universalistien mielestä tällaisissa tapauksissa luokan merkitys on ulkoapäin annettu eli havaintojärjestelmän määräämä, eikä se koskaan voi olla täysin mielivaltaisen [47] tai erota rajoituksettomasti eri kielten välillä, kuten relativistit puolestaan esittävät [59]. Laajemmassa mittakaavassa kyse on siitä, kuinka käytetty kieli vaikuttaa ihmisten ajatteluun ja sitä kautta yhteiskuntaan ja kulttuuriin [35], ja syntyvätkö ajattelun kategoriat havaittavista kohteista fysiologian vai kielen kautta.

Eräs relativistien perusajatuksista on, että käsitteiden kielellinen koodautuvuus saa aikaan niiden muistettavuuden [38] ja tätä väitettä on esimerkiksi Stanley R. Witkowski kokeellisesti tutkinut värimuistikokeiden avulla [60]. Jo aikaisemmissa värinimeämiskokeissa oli havaittu, että luokkansa keskusalkioksi valitut näytteet tunnistetaan ja muistetaan paremmin kuin muut myös sellaisissa tilanteissa, joissa kieltä ei käytetä [19], [35]. Tämä pätee myös tapauksissa, joissa koehenkilöillä ei ole termiä kyseiselle värille. Esimerkiksi Eleanor H. Rosch on värikokeissaan havainnut, että 4-vuotiaat lapset, joiden värisanasto ei vielä ole kokonaan kehittynyt, suosivat keskusvärejä muihin väreihin nähden ja värinvastaavuuskokeissa saavat keskusväreille paremmin tuloksen kuin muille [47]. Saman on todettu pätevän myös tason II kieltä puhuville aikuisille [19]. Roschin johtopäätös on, että havainnointiin ja sen aikaansaamiin kognitiivisiin tiloihin perustuva värin keskeisyys on ensisijainen kielelliseen keskeisyyteen nähden [47]. Kieli ei siis vaikuta havainnointiin, mutta havainnot määräävät kielen.

Witkowski kritisoi aikaisempien kokeenjärjestäjien, esimerkiksi juuri Roschin, tapaa pitää näytteet järjestettyinä riveihin ja sarakkeisiin siten, että lähinnä toisiaan olevien näytteiden väriero on pienin, koska se hänen mielestään vinouttaa tuloksia koehenkilöiden verrattessa pieniä värieroja toisiinsa. Jos vierekkäin on kaksi näytettä, joista toinen on erinomainen ja toinen melko hyvä esimerkki vaikkapa punaisesta väristä, on helpompi nähdä kumpi niistä on parempi kuin silloin, jos nämä näytteet ovat kaukana toisistaan ja välissä on muita värejä. Witkowski järjesti omat kokeensa siten, että värinäytteet olivat satunnaisessa järjestyksessä ja havaitsi että kokeissa, joissa tutkittiin pitkäkestoismuistin vaikutusta keskusalkioiden erikoisasema korostui enemmän kuin lyhytkestoista muistia käytettäessä. Keskusalkioiden vahva asema selittyy Witkowskin mukaan sillä, että pitkäkestoismuistin toimintaan vaikuttaa lyhytkestoista enemmän värien kielellinen käsittely ja kategorioiden koodautuvuus [60]. Hän erottikin toisistaan värien ja väritermien lyhytkestoiseen muistiin perustuvan *havaintokeskeisen* ja pitkäkestoiseen muistiin perustuvan *kielikeskeisen* käsitteet ja argumentoi, että ne ovat suurelta osin erilliset, toisin kuin universaalisuusteorian kannattajat ovat väittäneet [60]. Koska pitkäkestoista muistia käytettäessä tai ihmisten välisissä kommunikaatio-tilanteissa keskusalkiot koodautuvat paremmin (ne muistetaan paremmin ja ne voidaan helpommin selittää toiselle ihmiselle), oli se Witkowskin mielestä selkeä osoitus siitä, että todellisuudessa kieli määrittää väriin liittyvän havainnon, kuten *Sapir-Whorf-hypoteesi* olettaa [60]. Värimuistikokeita ja muistin vaikutusta värien nimeämiseen tarkastellaan yksityiskohtaisemmin kohdassa 6.3.

5.2.2 Kielen vaikutus ajatteluun

Kielellisen relativismi ajatukset tunnetaan myös nimellä Sapir-Whorf-hypoteesi, joka on saanut nimensä 1900-luvun alkupuolen merkittävimpien kielellisen relativismin kehittäjien Benjamin Lee Whorfin ja hänen opettajansa Edward Sapirin mukaan. Whorf itse esitti hypoteesin kaksi ensimmäistä väitettä ja kolmannen muodostivat hänen seuraajansa [22]:

1. Kielijärjestelmien väliset rakenne-erot ovat yleensä samankaltaisia ei-kielellisten kognitiivisten erojen kanssa, kun verrataan ihmisiä käyttämässä omaa äidinkieltään.
2. Ihmisen äidinkielen rakenne vaikuttaa voimakkaasti hänen maalimankuvaansa tai jopa kokonaan määrittää sen, ja se muodostuu ihmisen oppiessa puhumaan.

3. Semanttinen järjestelmä eroaa kielten välillä ilman mitään rajoituksia.

Myös yleisten kategorioiden kannattajat ovat todenneet, että eri kieliä puhuvien ihmisten väriluokat eroavat toisistaan, mutta heidän mielestään erot eivät voi olla rajoittamattoman suuria, paremminkin aste-eron kaltaisia. Universalistien mukaan rajoittamattomia eroja eri kielten semanttisten järjestelmien välillä ei voi olla, koska kaikki järjestelmät perustuvat viime kädessä havainnointiin ja esimerkiksi värinäkömekanismit ovat kaikilla normaalisti näkevilla ihmisillä samanlaiset. Relativistien lähestymistapa on siis päinvastainen yleisten kategorioiden teoriaan nähden: koska eri kielten muotoopillinen rakenne ja kielioppi ovat hyvin erilaiset, ovat myös ihmisten ajattelutavat erilaiset – jopa niin, että erilaiset kielenkäyttötavat esimerkiksi koulutuksen myötä saavat aikaan ajattelutapojen eroja myös kielen sisällä [35]. Mielenkiintoista on se, että omaan paradigmaansa avoimesti sitoutuneet tutkijat saavat samanlaisista tutkimustuloksista lähtien kummatkin omaa näkemystään tukevia todisteita [38], esimerkiksi juuri Heider [19] / Rosch [47] ja Witkowski [60].

Toisin kuin hyvin pienelle alueelle asettuvat keskusalkiot, väriluokkien rajat vaihtelevat suuresti eri kielten välillä. Eräs selitys sille, miksi väriä pidettiin malliesimerkkinä kielen ja kulttuurin määräämästä semanttisesta luokasta on, että kielellisen relativismin edustajat keskittyivät tutkimaan nimen omaan väriluokkien suuresti vaihtelevia rajoja [47]. Rajojen sijoittumista tutkimalla saadaankin hyvin erilaisia tuloksia kielten välille kuin keskusalkioiden sijoittumista tutkimalla, koska värimuistin ja -sanaston vaikutus on väriluokkien reunoilla suurempaa kuin keskusalkion läheisyydessä [26]. Tämä voi olla yksi selitys sille, miksi sekä Berlinin ja Kayn edustama yleisten väriluokkien teoria että whorfilainen kielellinen relativismi elävät vahvoina rinnakkain kulttuurisessa väritutkimuksessa.

Tämän tutkielman puitteissa ei oteta kantaa kummankaan tradition puolesta, koska päällimmäinen mielenkiinto ei kohdistu väriluokkien sisäiseen tai kielelliseen rakenteeseen, vaan niiden keskusalkioiden sijoittumiseen väriavaruudessa. Lähtökohtana on Berlinin ja Kayn mukainen yleisten kategorioiden teoria, koska he ensimmäisenä toivat väritutkimukseen (olipa se sitten kielitieteeseen, antropologiaan tai fysikaalisiin tieteisiin pohjautuvaa) selkeästi muotoillun oletuksen värikategorioiden hierarkkisesta määräytymisestä ja erityisesti esittivät väitteen kielestä riippumattomien värien keskusalkioiden paikoista väriavaruudessa. Nykyisessä väritutkimuksessa suurin osa tutkimuksesta määrittyy joka tapauksessa jossakin suhteessa Berlinin ja Kayn pioneeri-

työhön – osa avoimesti ja osa implisiittisten perusoletustensa kautta – ja siitä syystä heidän teoriansa on ilmeinen lähtökohta myös tälle tutkielmalle.

5.3 Väriluokkiin liittyvät oletukset

Barbara Saunders ja Jaap van Brakel [50] kirjoittavat auki yhdentoista perusväritermin teorian perusoletukset ja analysoivat niitä yksityiskohtaisesti. He myös esittävät omat, yleisten kategorioiden traditiosta huomattavasti poikkeavat johtopäätöksensä värin asemasta tutkimuskohteena sekä vastaväriteorian oikeutuksesta [50]. Saunders ja van Brakel saivat artikkelilleen runsaasti vastineita, mutta vaikka siihen liittyvä keskustelu onkin kiehtovaa ja monitasoista, menee se kuitenkin suurelta osin ohi tämän tutkielman aiheesta.

Saundersin ja van Brakelin mukaan väritutkimuksessa on neljä implisiittistä perusoletusta, jotka kaikki ovat virheellisiä [50]:

1. Väri on autonominen ja kaikille ihmisille samanlainen kahdessa suhteessa: sen muodostuminen on alistettu hermostollisille mekanismeille ja se on erotettu kohteen muista ominaisuuksista täysin erilliseksi.
2. Väri voidaan täydellisesti määrittää kolmen toisistaan riippumattoman ominaisuuden eli värisävyn, värikylläisyyden ja kirkkauden avulla.
3. On olemassa neljä *puhdasta sävyä* (*unique hues*): punainen, vihreä, sininen ja keltainen.
4. Puhtaat sävyt muodostuvat kahden psykofyysisen ja/tai hermostollisen kanavan kautta pareina punainen/vihreä ja sininen/keltainen.

Nämä neljä oletusta muodostavat yleisten kategorioiden teorian pohjan ja juuri tuota pohjaa Saunders ja van Brakel kritisoivat jopa niin rajusti, että heidän mukaansa väritutkimusta sen nykyisessä muodossa ei kuuluisi edes olla olemassa. Sitä vastoin kaikkien värin kanssa työskentelevien tulisi uudelleen harkita omat perusoletuksensa ja tutkia kuinka virheelliset oletukset ovat vaikuttaneet omaan tutkimukseen ja sen tuloksiin [50].

Saundersin ja van Brakelin mukaan ei ole olemassa sen paremmin neurofysiologisia kuin psykofyysisiäkään todisteita vastavärien olemassaolosta, vaikka toiminnallisena

mallina vastavärioletus toimiikin. Ei ole mitään vakuuttavaa näyttöä siitä, että solutasolla esiintyvillä erilaisilla hermosolulla ja niiden erikoistuneilla poluilla olisi mitään tekemistä niiden psykofyysisten värikanavien kanssa, joiden avulla vastavärioletuksen mukaan aistimme värit [50]. Lisäksi he väittävät, että psykologisesti ei myöskään ole mitään syytä sille, miksi värin sävy, kirkkaus ja värikylläisyys olisivat toisistaan riippumattomia – tosin niiden liittymisestä yhteen ei todisteita ole sen enempää. Erityisen raskauttavana yhdentoista perusväritermin teoriaa vastaan he kuitenkin pitävät sitä, että ei ole olemassa mitään varmaa näyttöä siitä, että mitään erityisiä väriluokkia esiintyisi esikielellisellä (elämyksellisellä tai biologisella) tasolla [50].

Yhdentoista perusvärin teoriaa voidaan syyttää myös kulttuuri-imperialismista. Sekä sen oletukset että käytetyt väriavaruuksien esitykset perustuvat länsimaisen ajattelutavan oletuksiin. Lisäksi muiden kulttuurien ja kielten värisanastojen tutkiminen erityisesti teorian kehittämisen alkuvaiheessa oli vähintäänkin kursorista [50]. Vaikka kritiikkiä onkin esitetty värinimeämiskokeiden järjestäjien tapaan käyttää Munsellin värikartaston näytteitä ja laskennallisia kolmiulotteisia värikoordinaatioita, voidaan sama postmoderniin ajattelutapaan perustuva kritiikki kohdistaa mihin tahansa tieteessä käytettyyn koordinaatioon tai järjestelmään, koska ne kaikki kuuluvat länsimaisen tieteen traditioon [24].

Lisäksi on väitetty, että luonnonkansojen kielten rakenne ei noudata yhdentoista perusväritermin oletusta läheskään yhtä tarkasti kuin läntisten teollistuneiden yhteisöjen kielten rakenne [27]. Tätä väitettä ovat Paul Kay, Brent Berlin ja William Merrifield tutkineet laajassa kokeellisten tutkimusten sarjassa, joka tunnetaan nimellä *World Color Survey (WCS)* [29]. He tutkivat yhteensä 110 kieltä siten, että keskimääräinen koehenkilöiden määrä kieltä kohti oli 24 ja kaikki värinimeämiskokeet suoritettiin siinä ympäristössä, jossa kyseistä kieltä käytetään jokapäiväisesti [27]. Kaikki heidän tutkimansa kielet ovat pienten yhteisöjen kirjakielettömiä kieliä, siis juuri niitä joiden asettumista yhdentoista perusvärin teorian puitteisiin on eniten kyseenalaistettu. WCS:n värinimeämiskokeissa saatuja tuloksia analysoimalla tutkimusryhmä sai esille voimakkaan samankaltaisuuden perusvärien asettumiselle väriavaruuteen, joten ainakin niiden tulosten valossa luonnonkansojen kielet ovat väriluokiltaan samankaltaisia länsimaisten, teollistuneiden yhteiskuntien kielten kanssa [27].

5.4 Perusväritermien lukumäärä ja ilmestyminen sanastoon

Yhdentoista perusvärin hypoteesi ei pelkästään tyydy tutkimaan mitkä väritermit ovat perusväritermejä, vaan se myös tekee oletuksen järjestyksestä, jolla nämä termit kieleen ilmestyvät [3]. Ensimmäisenä tulevat neutraalit ensisijaiset perusvärit musta ja valkoinen, sitten punaisen johdolla kromaattiset ensisijaiset perusvärit ja sen jälkeen toissijaiset eli johdannaisvärit kuten kohdassa 4.3 esitetään. Kielen on täytynyt kulkea tason I kautta saavuttaakseen tason II värisanaston ja seuraavaksi se voi kehittyä tason III kieleksi, oikopolkuja ei suoraan ylemmille tasoille ole. Tämä oletus on hyvin voimakas ja myöhemmin onkin havaittu, että Berlinin ja Kayn alkuperäinen hierarkia on liian jäykkä kuvaamaan todellisia puhuttuja kieliä, vaikka länsimaiset kielet kyseiseen oletukseen näyttävätkin melko hyvin istuvan [27].

Evoluutio-oletuksen mukaan kieli kehittyi alkuvaiheessaan (tasolle V saakka) siten, että aikasemmat yhdistelmäluokat jakautuvat perusväriluokiksi ilman, että ensisijaisien perusvärien keskusalkoiden paikat mitenkään muuttuvat tuon prosessin aikana. Keskusalkion paikka pysyy samana, mutta uusi termi tulee viittaamaan kyseiseen väriin, kun aikaisemmalla tasolla yksi termi viittasi kahteen tai kolmeen keskusalkioon. Perusväriluokkien kehitysjatkuo on esitetty kohdassa 4.5 taulukossa 5, sivulla 34. Johdannaisluokkien kehittymismekanismi on hieman erilainen ja perustuu uusien keskusalkoiden muodostumiseen, koska johdannaisluokat syntyvät edellisellä tasolla olleiden väriluokkien leikkauksina.

Robert E. MacLaury [37] on havainnut, että erityisesti värikategorioiden alimmilla tasoilla värin vaaleuden (kirkkauden) vaikutus luokitteluun on vähintään yhtä suuri kuin värisävyn. Tämä jää havaitsematta Berliniltä ja Kayltä [3], koska heidän luokittelunsa perustana on pelkästään värisävy. Kun kieli kehittyy ja väritermejä tulee lisää, vähenee kirkkauden vaikutus väriluokkien rakenteeseen sävyn noustessa tärkeimmäksi määrittäjäksi [37]. Sävyä, kirkkautta ja värikylläisyyttä pidetäänkin väritutkimuksessa yleisesti toisistaan riippumattomina.

Muutamissa kielissä esiintyvä keltaisen ja vihreän yhdistelmäluokka on aiheuttanut ongelmia asteittaiseen kehitykseen perustavalle evoluutio-oletukselle. Mikäli tasolta tasolle etenevä kehitys tapahtuu kuten on oletettu, täytyy näissä tapauksissa keltaisen ensin erottautua punaisesta ja valkoisesta ja sen jälkeen yhdistyä vihreän kanssa, joka puolestaan on erottautunut sinisestä ja mustasta [11]. Evoluutio-oletuksen ajatukseksi kuitenkin on, että kun väri kerran on irrottautunut omaksi luokakseen, ei se enää

yhdisty minkään toisen värin kanssa. Mahdollisia selityksiä keltaisen ja vihreän luokalle on kolme [11]. On mahdollista, että värien täytyy voida irrottautua alkuperäisistä luokistaan ja yhdistyä joko (1) saman tien tai (2) myöhemmillä tasoilla uudelleen tai (3) tasolla I täytyy olla luokkien valkoinen-punainen-keltainen ja musta-vihreä-sininen lisäksi vielä kolmas, jossa keltainen ja vihreä ovat yhdessä. Keltaisen ja vihreän yhdistelmäluokkaa selittääkseen Kay kumppaneineen [23] on lisänneet uusia kehityskaaria tasoille I-IV siten, että alkuperäinen ajatus selkeästä hierarkiasta on ainakin osittain vesittynyt.

5.5 Koejärjestelyt

Suuren ongelman yhdentoista perusväritermin teorian tutkimiselle tuottaa Berlinin ja Kayn alkuperäisen tutkimuksen hataraksi osoittautuneet koejärjestelyt. Niistä 20 kielestä jotka he tutkivat itse, 19 tapauksessa tietolähteen muodosti yksi kaksikielinen henkilö, joka oman äidinkieltensä lisäksi puhui myös englantia [50]. Koska koehenkilöitä oli riittämättömästi kattavaa tulosta ajatellen saattavat kaksikielisyydestä johtuvat vääristymät olla hyvinkin huomattavia, erityisesti koska suurin osa testeistä tehtiin englanninkielisessä ympäristössä San Franciscossa [27]. Tulosten kannalta saattaa myös olla huomionarvoista se, että kokeenjärjestäjät eivät monissa tapauksissa osanneet koehenkilöiden äidinkieltä – siis sitä kieltä, jota kokeella oli tarkoitus tutkia [23]. Muut 78 kieltä Berlin ja Kay analysoivat kirjallisuuden, aikaisempien tutkimustulosten ja sanakirjojen perusteella [3] [50], eikä sanakirjojen läpikäyminen välttämättä anna kielestä ja kulttuurista aivan riittävää kuvaa.

Berlin ja Kay ottivat (Yhdysvalloissa puhutun) englannin sanastonsa vertailukohtaksi ja käänsivät koehenkilöiden vastaukset englanniksi analyysiään varten. Heidän teoriasensa metatason kieli on siten englanti, jolla on yksitoista perusväritermiä ja on se voinut vaikuttaa heidän muodostamaansa oletuksen rakenteeseen [50]. Kay ja Berlin kuitenkin ovat sitä mieltä, että koska he kirjoittaessaan käyttivät englantia, oli perusteltua kääntää kaikkien kielten termit englanniksi [24]. Muuten he olisivat joutuneet joka välissä käyttämään kaikkien puheena olevien kielten termejä kyseisille väreille. Berlinin ja Kayn hypoteesihan oli, että kielestä riippumatta väriluokkien keskusalkiot vastaavat toisiaan [3], joten siinä valossa heidän päätöksensä käyttää englanninkielisiä väritermejä on hyvin ymmärrettävä.

Oman lisänsä värinimäskokeiden ongelmiin tuo värinäytteiden valinta. Eleanor H. Rosch [19] on analysoinut todennäköisyyksiä sille, kuin laajat näytejoukon ja koehenkilöjoukon tulee olla, jotta kaikki kielen yleiset väritermit tulevat mukaan edes kohtuullisella todennäköisyydellä. Erityisesti ongelmana ovat sellaiset termit, jotka ovat vasta vakiintumassa kieleen tai muuten muuttamassa muotoaan esimerkiksi siten, että niiden määrittelemä alue väriavaruudessa on siirtymässä. Rosch tähdentää systemaattisen valintaprosessin tärkeyttä sekä näytteitä että koehenkilöitä valittaessa, mutta painottaa myös koetilanteen suunnittelua siten, että mahdollisimman suuri osa erilaisista mahdollisista värinimeämistilanteista esiintyy, ja erityisesti, että ne myös huomataan [19]. Hän huomauttaa myös, että ongelmia saattaa syntyä kokeenjärjestäjän ennakkoletusten kautta: jos tutkitaan kieltä jossa aikaisempien oletusten mukaan on vain värjä ja valkoinen ja musta vastaavat termit (tason I kieli), voi kokeenjärjestäjän olla vaikeaa oman esitietonsa takia huomata, että toinen termeistä tarkoittaaakin lämpimiä ja toinen kylmiä sävyjä, mikäli näytteitä ja koehenkilöitä ei ole valittu systemaattisesti ja kokeen järjestäjä ei ole avoin mahdollisille oletuksista eroaville tuloksille [19].

5.6 Nykyinen tilanne

Vaikka kuluneen yli 30 vuoden aikana Berlinin ja Kayn alunperin esittämää teoriaa yleisistä perusväritermeistä, niiden hierarkkisesta asemasta ja ilmestymisjärjestyksestä onkin runsaasti kritisoitu ja muokattu, eivät muutokset ole Paul Kayn mielestä vesittäneet alkuperäistä ajatusta värisanaston muodostumisesta [26]. Hänen mukaansa viimeaikaiset laajat kokeelliset tulokset (mm. World Color Survey [29], [27]) paremmin vahvistavat kuin kumoavat oletusta väriluokista universaaleina kategorioina, jotka eivät rajoittamattomasti voi vaihdella kielten välillä, koska myös luonnonkansojen kielten on havaittu noudattavan samaa perusrakennetta kuin teollistuneidenkin yhteisöjen [26].

Kay [28] esittää yhteenvedon uudistuksista, joita yhdentoista yleisen ja hierarkkisen perusväritermin teoriaan on sen ilmestymisen jälkeen tehty. Alkuperäinen oletus väriluokkien kehityksestä oli, että luokkien keskusalkiot koodautuvat yhä uudelleen peräkkäisinä askeleina kielen kehittyessä tasolta toiselle. Kielen siirtyessä tasolta toiselle löytyy aina yksi uusi perusväriluokka, ja olemassa olevat keskusalkiot pysyvät paikallaan. Uuden ajatuksen mukaan koodautumisprosessi etenee siten, että havaittavan väriavaruuden luokat jalostuvat askel askeleelta puhtammiksi, pelkästään yhtä

väriä sisätäviksi luokiksi. Alkuperäinen luokittelu perustui pelkästään värisävyyteen, mutta sittemmin on havaittu sävyn ja kirkkauden muodostamia yhteisluokkia, esimerkiksi tasolla I ilmenevät vaaleat lämpimät ja tummat kylmät värit, joista tarkemmin kohdassa 4.5.1 ja taulukossa 5 (sivulla 34).

Perusväritermien keskinäisiä statuseroja on myös havaittu ja on hienosäädetty ajatusta täsmälleen yhdestätoista perusväritermistä jakamalla ne ensi- ja toissijaisiin perusväriin siten, että toissijaiset perusvärit muodostuvat ensisijaisten värien leikkauksina. Myöskään yhtätoista ei enää pidetä perusvärien lukumäärän ehdotomana ylärajana. Lisäksi ensi- ja toissijaisten perusvärien toisistaan erilliset ja pääosin peräkkäiset kehityskaaret on tunnustettu sen jälkeen kun alemmilla hierarkiatasoilla havaittiin yhdistelmäluokkia eli kahdesta tai kolmesta ensisijaisesta perusväristä muodostuvia luokkia. Perusväritermien kattavuusvaatimuksia on myös pienennetty siten, että enää ei oleteta niiden yhdessä kattavan koko havaittavaa väriavaruutta.

Alkuperäinen oletus yleisten väriluokkien olemassaololle liittyi fysiologiaan, ja ensisijaisten perusvärien olemassaolon syyksi esitettiin ihmisen värinäköjärjestelmän rakennetta. Myös tämän väitteen paikkaansapitävyyttä on arvosteltu, koska ei ole onnistuttu löytämään sitä mekanismia, jolla kyseiset väriluokat ihmisen psykofyysisessä havaintojärjestelmässä muodostuvat [50]. Monitasoinen värinäkömalli kuitenkin esittää toimivan oletuksen ihmisen värinäköjärjestelmän toimimisesta vastaväriperiaatteella. Toisaalta muitakaan havainnointiin ja aivojen toimintaan liittyviä mekanismeja ei ihmisen fysiologiaa tutkittaessa ole voitu kiistattomasti sijoittaa mihinkään erityiseen kohtaan ihmisen psykofyysisessä havaintojärjestelmässä, joten saman oletuksen mukaan värien havaitseminen voi perustua biologisiin seikkoihin, mutta ei pelkästään johonkin tiettyyn kohtaan tai toimintoon värinäköjärjestelmässä [25], [26].

6 Värinnimeämiskokeiden tuloksiin vaikuttavat seikat

Ihmiset eroavat toisistaan värisanastonsa laajuuden ja käyttötavan perusteella ja samakin ihminen saattaa erilaisissa tilanteissa käyttää eri termejä samalle näytteelle. Hyvin voimakkaasti tulokseen vaikuttavat nimeämis- tai tunnistamistilanteessa käytössä olevat muistiprosessit. Myös eri ihmisryhmien välille on voitu löytää säännönmukaisia eroja värisanaston laajuudessa ja käyttötavassa. Luonnollisesti väriin liittyvät työtehtävät ja harrastukset vaikuttavat ihmisen värisanastoon, mutta myös persoonasta riippumattomia eroja ihmisryhmien välille on löydetty, esimerkiksi sukupuoli on yksi tällainen erottava tekijä. Tässä luvussa tarkastellaan lähemmin värinnimeämiskokeiden koejärjestelyjä ja koetuloksiin mahdollisesti vaikuttavia seikkoja.

6.1 Värinnimeämiskokeiden tyypit

Värinnimeämiskokeita väriluokkien ja niiden keskusalkioiden selvittämiseksi on neljää eri tyyppiä. Koehenkilöitä voidaan pyytää luettelemaan perusvärien nimet, jolloin kyseessä on luettelointitehtävä eikä värinäytteitä tarvita. Värinäytteiden avulla heille voidaan antaa valinta-, nimeämis- tai rajaamistehtävä väriluokkien selvittämiseksi. Valintatehtävässä koehenkilön on valittava näytteiden joukosta ennalta määrätyn väriluokan paras edustaja eli keskusalkio. Nimeämistehtävässä koehenkilöt nimeävät yksittäisiä värinäytteitä. Rajaamistehtävässä he eksplisiittisesti määrittävät tietyn väriluokan rajat näytesarjan alkioista. Luvussa 8 esiteltävien värinnimeämiskokeiden menetelmät sisältävät näitä kaikkia tehtäviä. Eräs nimeämis- ja rajaamistehtävissä yleisesti käytetty näytesarja esitetään kuvassa 10 sivulla 75. Kuvan 10 näytesarjaa käytettiin World Color Surveyn kokeissa, mutta myös monissa varhaisemmissa värinnimeämiskokeissa käytettiin vastaavanlaista sarjaa [3].

Vanhimmat värinnimeämiskokeet suoritettiin valinta- ja rajaamiskokeina. Eräs ensimmäisistä oli Eric Lennebergin ja John Robertsin vuonna 1956 järjestämä koe *zuni* kielen väritermien tutkimiseksi [3]. Zuni on hyvin eristynyt Pohjois-Amerikan lounaisosissa puhuttu intiaanikieli [46] ja sitä tutkimalla Lenneberg ja Roberts hakivat vahvistusta Sapir-Whorf-hypoteesille. He käyttivät kuvan 10 mukaista värinäytesarjaa, mutta heidän sarjassaan ei neutraaleja näytteitä ollut mukana lainkaan. Valitut kromaattiset näytteet ovat Munsellin värijärjestelmästä tasavälisesti valittujen 40 sävyn esitykset kahdeksalla eri kirkkaustasolla ($V = 2 \dots 9$) ja korkeimmalla mahdollisella väriky-

läisyystasolla [3]. Kromaattisia näytteitä on siten yhteensä 320. Brent Berlin ja Paul Kay käyttivät omassa koesarjassaan kuvan 10 kaltaista näytesarjaa sillä erotuksella, että heidän sarjassaan neutraaleja näytteitä oli vain yhdeksän [3].

Berlinin ja Kayn värinimeämiskoe oli kaksivaiheinen [3]. Ensin koehenkilön avulla pyrittiin selvittämään hänen äidinkiellensä perusväritermit käyttämällä mahdollisimman vähän mitään muuta kieltä apuna [3]. Kokeenjärjestäjillä oli oletus yhdestätoista perusväritermistä, joten sen oletuksen perusteella koehenkilön luettelemista väritermeistä valittiin ne, joiden sijoittumista värikartalla haluttiin tutkia. Perusväritermien selvittämisen jälkeen koehenkilöille esitettiin kerralla koko värinäytetaulukko ja pyydettiin valitsemaan kunkin värin keskusalkio ja rajaamaan jokainen väriluokka omaksi alueekseen [3]. Koehenkilöitä pyydettiin siis eksplisiittisesti ilmoittamaan sekä väriluokan paras näyte että luokan rajat. Kaiken kaikkiaan Berlin ja Kay käyttivät kokeessaan listaus-, valinta- ja rajaamistehtäviä. Muutamissa uudemmissa kokeissa, esimerkiksi koesarjassa nimeltä *Mesoamerican Color Survey*, väriluokat määrättiin samaten luokka kerrallaan, mutta ei rajaamalla vaan asettamalla riisinjyvä kaikkien niiden näytteiden päälle, jotka kuuluvat kyseiseen luokkaan [37]. Tämän jälkeen kokeenjärjestäjä kirjasi tuloksen ylös ja poisti riisit laudalta – ja sitten sama toistettiin niin kauan, että uusia näytteitä ei enää tullut mukaan luokkaan tai pudonnut luokasta pois [37].

Uudemmat tässä tutkielmassa käsitellyt värinimeämiskokeet, eli Robert M. Boyntonin ja Conrad X. Olsonin [5] sekä Julia Sturgesin ja T. W. Allan Whitfieldin [53] järjestämät värinimeämiskokeet, perustuvat yksittäisten värinäytteiden nimeämiseen. Koehenkilö näkee yhden näytteen kerrallaan ja näytteet esitetään satunnaisessa järjestyksessä. Hänen tulee nimetä jokainen yksittäinen näyte ja nimeämiseen käytetty aika mitataan. Vastausvaihtoehtojen määrää rajoitetaan rajoittamalla sallittujen vastausten muotoa siten, että kaikkien vastausten tulee olla yksisanaisia (monolexic). Väriä nimettäessä ei ole sallittua käyttää yhdyssanoja, tarkentavia määreitä tai termien johdannaisia. Yksisanaisuus on myös alkuperäisen perusväritermien määritelmän (luvussa 4.2) ensimmäinen kohta. Mikäli koehenkilöt saisivat aivan rajoituksetta nimetä värinäytteitä oman subjektiivisen sanastonsa mukaan, olisi tulosten analysointi erittäin vaikeaa.

Sturgesin ja Whitfieldin koe on toistokoe, jonka avulla he pyrkivät selvittämään perusväriluokkien sijoittumista Munsellin väriavaruuteen verrattuna Robert M. Boyntonin ja Conrad X. Olsonin [5] järjestämän vastaavanlaisen kokeeseen. Boynton ja

Olson käytettiin omassa kokeessaan *OSA-UCS-väriavaruutta*, Sturges ja Whitfield puolestaan Munsellin värijärjestelmän näytteitä. OSA-UCS on *Optical Society of American (OSA)* kolmiulotteinen *Uniform Color Scales* -koordinaattijärjestelmä. Siinä värit sijoittuvat kirkkauden vakiotasolle (*L*) harmaan värin ympärille [6]. Kohtisuorat kromaattiset akselit esittävät värit vihreästä punaiseen (*g*) ja keltaisesta siniseen (*j*). Kukin värinäyte on yhtä kaukana kaikista viereisistä näytteistä [6], eli kyseessä on tasajakoinen väriavaruus, kuten nimikin jo antaa ymmärtää.

Vaikka tällaisissa nimeämiskokeissa koehenkilöitä ei erikseen pyydetä nimeämään parhaita näytteitä tai luokkien rajoja, voidaan ne siitä huolimatta saada selville. Eräs värinimeämiskokeissa käytetty tapa perusvärien erottamiseksi muista väreistä on tutkia koehenkilön näytteen nimeämiseen käyttämää aikaa. On todettu, että perusvärien nimeäminen on paitsi yksimielisempää ja johdonmukaisempaa, myös nopeampaa kuin muiden näytteiden [6]. Koska koehenkilöiden värien nimeämiseen käyttämä aika värinimeämiskokeissa [5], [53] mitattiin, saatiin keskusalkioiksi ne yksimielisesti ja johdonmukaisesti nimetyt näytteet, joiden nimeämiseen käytettiin vähiten aikaa [53].

Eroja näiden kahden värinimeämiskokeen välillä kuitenkin on. Munsellin värijärjestelmästä on mahdollista saada värikylläisyystasoltaan suurempia näytteitä kuin OSA-järjestelmästä, ja koska väriluokkien keskusnäytteet ovat melko värikylläisiä, saattaa näytteiden valinnalla olla suuri vaikutus keskusalkioiden valintaan [53]. Ainakin muutettaessa OSA-avaruuden keskusalkiot Munsellin värijärjestelmään siten, että jokaiselle etsitään lähin vastaava Munsell-näyte, ovat Sturgesin ja Whitfieldin nimeämiskokeen keskusalkiot kautta linjan värikylläisempiä kuin Boyntonin ja Olsonin vastaavat [53]. Tosin koko mahdollisen väriavaruuden riittävän hyvin ja tasapuolisesti kattava näytteiden valinta on helpompi toteuttaa OSA-avaruudessa [53].

Toinen merkittävä ero on koehenkilöiden valinnassa. Sturgesin ja Whitfieldin kokeessa käytettiin 20 vapaaehtoista yliopisto-opiskelijaa tai vastavalmistunutta: 10 naista ja 10 miestä, joista kellään ei ollut minkäänlaista väritutkimustaustaa [53]. Boyntonin ja Olsonin kokeessa oli vain seitsemän koehenkilöä: molemmat tutkijat itse, kolme heidän kollegaansa ja kaksi vapaaehtoista [53]. Lisäksi yksi koehenkilöistä tietoisesti rajoitti kokeessa käyttämänsä värisanaston kattamaan vain yksitoista perusväritermiä [5]. Koska erityisesti miehillä väriin liittyvät työtehtävät ja harrastukset vaikuttavat värisanaston laajuteen (kts. kohta 6.2.1) ja koska nimeämistilanne ei kaikilta osin ollut aivan luonnollinen, on mielestäni parempi käyttää Sturgesin ja Whitfieldin kokeen tuloksia myöhemmin tutkielmassa ensisijaisina.

6.2 Erot kielen sisällä

Samaa kieltä äidinkielenään puhuvien ihmisten värisanaston laajuudessa ja käytössä on havaittu eroja. Sukupuolten väliset erot ovat selkeitä havaita, mutta myös esimerkiksi iän ja koulutuksen, sekä muiden yhteiskunnallis-taloudellisten tekijöiden perusteella löytyy eroja ihmisryhmien välillä [45], [62]. Lisäksi väriin liittyvät harrastukset vaikuttavat erityisesti miesten käyttämien väritermien lukumäärään sanastoa laajentavasti [52], [62].

6.2.1 Sukupuolten väliset erot

Vertaamalla naisten ja miesten tuloksia värinimeämiskokeissa on havaittu naisten käyttävän useampia, monimutkaisempia ja yksityiskohtaisempia väritermejä. Miehet taas suosivat perusväritermien yhdistelmiä ja värin kirkkaudesta kertovia adjektiiveja [17], [52]. Lisäksi naiset nimeävät näytteet nopeammin kuin miehet [49]. Mitään yhtä ja kattavaa selitystä eroille ei ole löydetty siitäkään syystä, että värien nimeämisprosessi aivoissa on monimutkainen eikä sen rakennetta tarkkaan tunneta, vaikka ero havaittiin ensimmäisen kerran jo 1900-luvun alussa. Siksi ei voida, sanoa johtuuko naisten nopeus nimeämisessä paremmasta värinerotellukyvystä, laajemmasta värisanastosta, kyvystä paremmin pukea ajatuksiaan sanoiksi, vai nopeammasta sanojentuottamiskyvystä [49]. Varmaa ei ole myöskään se, onko värien nimeäminen luonteeltaan erilainen tehtävä kuin muut nimeämistehtävät, esimerkiksi muotojen tunnistaminen. Mikäli naisten värinerotellukyky on parempi kuin miesten, on värien kohdalla kyse eri asiasta kuin muissa nimeämiskokeissa. Jos eroa erotellutarkkuudessa ei ole, on väri vain yksi esimerkkitapaus naisten paremmista tuloksista tehtävissä, joissa vaaditaan jonkin tietyn asian nopeaa nimeämistä [49]. Muutamilla naisilla on havaittu olevan kahdenlaisia M- ja L-tappeja, joten heillä todellisuudessa on reseptorisoluja kolmen eri tyyppin sijasta viisi [4]. Tämä vaikuttaa myös heidän värinerotellukykyynsä, mutta ei selitä koko tilannetta.

Eräänä selityksenä naisten laajemmalle värisanastolle on esitetty naisten ja miesten kulttuurista johtuvaa työnjakoa ja erilaista kielenkäyttötapaa [45]. Perinteisesti naiset ovat vastanneet perheissä vaatteiden hankkimisesta ja huoltamisesta sekä sisustamisesta, eli tehtävistä jotka liittyvät väreihin. Lisäksi naisten harrastukset, esimerkiksi käsityöt, useammin sisältävät värien käsittelyä kuin miesten. Kulttuurista selitystä puoltaa

Elaine Richin tulokset tutkimuksesta, jossa verrattiin neljää ryhmää: nuoria ja vanhempia miehiä, naisia ja nunnia [45]. Nunnien värisanasto oli suppeampi kuin muiden naisten, mutta laajempi kuin miesten. Koska nunnat ovat tehneet tietoisin valinnan olla käyttämättä aikaansa vaatteiden hankintaan, sisustamiseen tai muihin vastaaviin tehtäviin, on tulos Richin mukaan osoitus kulttuuristen tekijöiden vaikutuksesta naisten värisanaston laajuuteen. Koska myös nunnat muiden naisten ohella kuitenkin käyttävät laajempaa sanastoa kuin miehet, näyttäisi sukupuoleen perustuva erilaistunut kohtelu ja käyttäytyminen alkavan jo lapsena, ovathan nunnat valinneet elämäntapansa vasta nuorina tai aikuisina [45]. Erikoisten väritermien käyttö liitetään länsimaisessa kulttuurissa niin voimakkaasti naiselliseksi miellettyyn käyttäytymiseen, että sellaisia termejä käyttävä mies – mikäli hän ei ole sisustussuunnittelija tai muuten värien kanssa työskentelevä – leimataan helposti joko naismaista käyttäytymistä piloillaan matkivaksi tai homoseksuaaliksi [17].

6.2.2 Ikäryhmien väliset erot

Naisten värisanaston laajuus ei juurikaan vaihtele iän myötä, mutta miehillä sanaston laajeneminen jatkuu läpi koko elämän [52]. Yleisesti ottaen vanhemmat ihmiset käyttävät erikoisempia ja monimutkaisempia värien nimiä kuin nuoremmat, vaikka miehillä ero ikäryhmien välillä on huomattavasti suurempi kuin naisilla. Myös näkömuistin toiminta ja havaintotiedon käsittely muuttuu ihmisen vanhetessa. Esimerkiksi tarkkaavaisuus ja monien näköön liittyvien perustoimintojen taso heikkenee anatomisista, psykofyysisistä ja fysiologisista muutoksista johtuen [14]. Kognitiivisten toimintojen heikkeneminen koskee kuitenkin lähinnä monimutkaisempia havaintomekanismeja kuin pelkkää värihavaintoa, jota käsitellään lyhytaikaisessa työmuistissa [14]. Pelkkä ikääntyminen ei siis välttämättä aiheuta ongelmia esimerkiksi havaintokyvyn tai muistin toimimiselle, vaan enemmän vaikuttaa ihmisen persoonallisuus ja hänen kykynsä kehittää toimivia selviytymisstrategioita jokapäiväisen elämän muuttuviin tilanteisiin [14], [58]. Erityisen tärkeää vireyden ylläpitämisessä on ihmisen oma aktiivisuus ja hänen sosiaalinen elinympäristönsä [58]. Mikäli värinimeämiskokeisiin osallistuvat henkilöt eivät kärsi dementiaasta tai muista kognitiivisiin toimintoihin vaikuttavista sairauksista, ei heidän iällään ole koetulosten kannalta ratkaisevaa merkitystä, jos mahdollisten silmäsairauksien vaikutus on eliminoitu [58].

6.3 Värimuistin osuus värien nimeämisessä

Sekä yleisten kategorioiden teorian että kielellisen relativismin kannattajien keskuudessa ollaan yksimielisiä siitä, että värimuisti ja väriluokkien keskusalkiot vaikuttavat värien nimeämiseen ja luokitteluun, vaikka tuon mekanismin synnystä ollaankin eri mieltä. Erimielisyyttä tosin esiintyy siitä, voiko väriaistimuksen muistaa ilman siihen liittyvän nimen käsittelyä aivoissa [16]. Tarkan kielellisen kuvauksen vaikeus värihavainnon yhteydessä näyttää siirtävän muistikuvaa kohti kielellisesti keskeisiä ja kielille yhteisiä värejä eli yleisten väriluokkien keskualkioiden suuntaan [51].

6.3.1 Väriaistimuksen käsittely aivoissa

Värien tunnistamista ja nimeämistä on pidetty muistinkäsittelytehtävänä yksinkertaisempaan kuin muotojen tai materiaalien käsittelyä, koska sekä värien havaitseminen että värien nimen ajattelu tapahtuu samassa osassa aivoja [51]. Värien käsittelyssä käytetään kolmenlaisia muistiprosesseja riippuen siitä kuinka pitkäaikainen havainto oli ja kuinka pitkä aika sen käsittelyyn on käytettävissä [51]. Lyhytaikainen havainto saa aikaan nopeasti heikentyvän väriaistimuksen, joka on mielikuvan kaltainen. Assosiatiivista pitkäaikaismuistia käytetään silloin, kun havaintoon liittyy opittuja, kielelliseen kuvailuun ja nimeämiseen liittyviä toimintoja. Näiden lisäksi käytössä on lyhytaikaismuisti, jota kutsutaan myös työmuistiksi. Työmuisti toimii lähinnä puskurin kaltaisena havaintotiedon tilapäisvarastona ja jonkin verran myös käsittelee saamaansa havaintotietoa korkeamman tason kognitiivisia toimintoja varten [14].

Näköhavaintoa käsitellään aivoissa eri tavalla kuin havaitun kohteen nimeä (label). Myös samannimiset kohteet havaitaan erilaisina, mikäli kohde on fyysisesti erilainen [16]. Värien tapauksessa ei siis ole sama, käsitelläänkö painettua värinäytettä, jonkin tunnistettavan esineen väriä vai näytölle tuotettua väriä. Näköhavaintoon perustuvan visuaalisen muistin tuottamat muistiesityksetkin ovat visuaalisia siinä mielessä, että niiden käsittelyyn ei välttämättä kaikissa tapauksissa liity sanallista käsittelyä [16].

Verrattavat värit sekoitetaan keskenään todennäköisemmin silloin, kun ne kuuluvat samaan luokkaan [56], ja värien nimen tai kahden värien vastaavuuden määrittämiseen kuluva aika on sitä pitempi mitä lähempänä värit visuaalisesti ovat toisiaan [16]. Lisäksi referenssiväri vaikuttaa eniten saman luokan muihin näytteisiin ja seuraavaksi eniten viereisten luokkien näytteisiin, joten ihmisen värimuisti näyttäisi olevan raken-

tunut perusväriluokkien mukaan. Tätä voidaan pitää osoituksena siitä, että värinäköjärjestelmässä on korkealla tasolla olemassa jonkinlainen luokittelumekanismi [56]. Jos koehenkilölle näytetään ensin värinäytettä ja jonkin ajan kuluttua esitetään toinen näyte, joka hänen täytyy säätää vastaamaan ensimmäistä näytettä, muutetaan toista näytettä usein hieman värikylläisemmäksi kuin mitä alkuperäinen väri oli [56]. Väri-
luokkien keskusalkiot ovat yleensä hyvin värikylläisiä, joten tämäkin voi liittyä muistikuvan siirtymiseen kohti keskusalkioita. Lyhytaikaismuistia käytettäessä värin tunnistamiseen vaikuttaa huomattavasti se, kuinka pitkän aikaa näyteiden esittämisen välillä koehenkilö joutuu odottamaan [16].

Portia Filen [16] järjestämässä värinvastaavuuskokeessa näytettiin kahta näytettä, kumpaakin 0,5 sekunnin ajan. Näytteiden esittämisen välillä olevan odotusajan pituus vaihteli 0 ja 4,5 sekunnin välillä. Peräkkäin esitettyjen näytteiden lisäksi tutkittiin vielä näytepareja samanaikaisesti esitettynä. File havaitsi, että esitettäessä kaksi näytettä samanaikaisesti, peräkkäin tai korkeintaan sekunnin välein, tai vastaavasti usean sekunnin (tässä tapauksessa 4,5 sekunnin) välein, asettuu vastauksen antamiseen kuluva aika välille 400 - 550 ms. Mikäli näytteiden välinen aika on 2,5 sekuntia, on vasteaika huomattavasti pitempi, noin 750 ms. Tämän perusteella voi päätellä, että kahden näytteen samuuden havaitseminen on vaikeampaa silloin, kun näytteiden esittämisen välinen aika on parin sekunnin luokkaa ja muulloin helpompaa. Lisäksi hän havaitsi, että vastausajan pituus lyhenee, kun näytteiden väriero kasvaa eli kaukana toisistaan olevat näytteet on helpompi erottaa toisistaan kuin toisiaan lähellä olevat. Näytteiden esittämisen välinen odotusaika vaikutti myös värinvastaavuuskokeessa tehtyjen virheiden määrään. Filen värinvastaavuuskokeissa tehdyt virheet prosentteina on esitetty sekä taulukossa 6 että kuvassa 7. Kuvassa 7 merkintä SA aikaerolle merkitsee näytteiden esittämistä samanaikaisesti.

Välittömästi peräkkäin esitetyille näytteille virhemäärä on yllättävästi sitä suurempi mitä kauempana verrattavat sävyt ovat toisistaan. Mielikuvankaltaisen väriaistimuksen värinerottelukyky ei siten vaikuttaisi olevan aivan yhtä hyvä kuin muilla muistiprosesseilla, joiden toimintaan kuuluu kielellisten toimintojen käyttöä. Tämä antaa viitteitä ihmisen värimuistin rakentumisesta kielellisten väriluokkien kautta. Toinen erikoinen piirre värinvastaavuuskokeen [16] tuloksissa on virheiden puuttuminen kokonaan silloin, kun näytteiden esittämisen välillä on puoli sekuntia aikaa. Siinä vaiheessa havaintoa käsitellään työmuistissa, jonka värinerottelukyky vaikuttaisi näiden tulosten perusteella erityisen tarkalta. Kun assosiativinen pitkäaikaismuisti astuu toimintaan, piene-

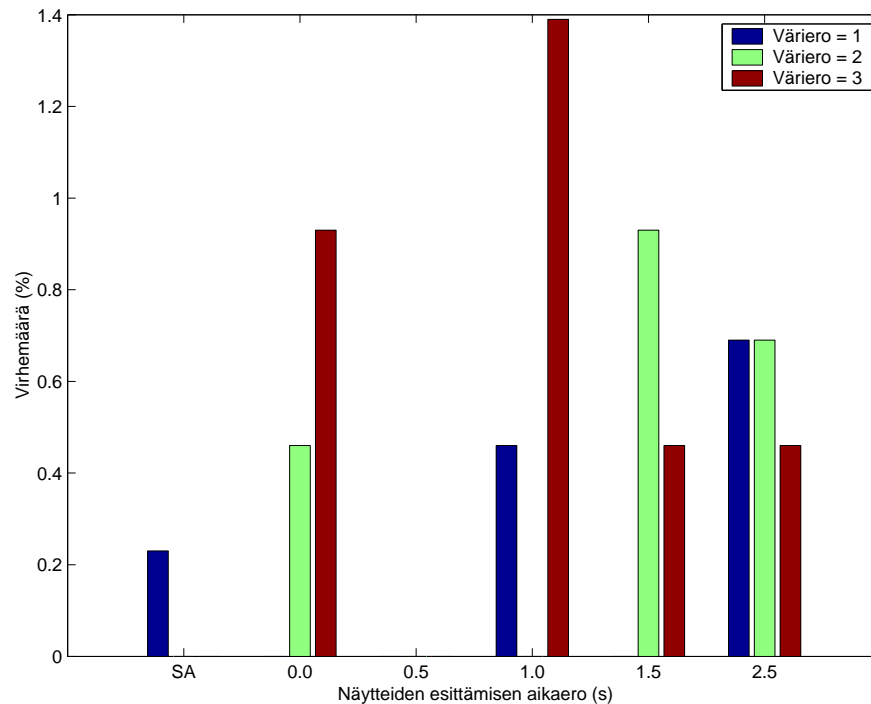
nee virheiden määrä sitä mukaa kun verrattavien näytteiden väriero kasvaa. Tämänkin perusteella voi olettaa kielellisten väriluokkien vaikuttavan värien muistamiseen: kun näytteet kuuluvat eri luokkiin, liikkuvat ne muistissa luokkansa keskusalkioita kohti, ja ovat siten entistä suuremmalla todennäköisyydellä muistettavissa eri värisiksi.

Värien järjestys ja väriero määräytyy värinvastaavuuskokeessa käytettyjen Munsellin värikartaston näytteiden perusteella [16]. Vierekkäisten värien väriero taulukossa 6 on yksi ja vierekkäiset värit ovat sininen - purppura - punainen - oranssi - keltainen - vihreä - sininen. Värierolla kaksi ovat näyteparit sininen - punainen, purppura - oranssi, punainen - keltainen, oranssi - vihreä, keltainen - sininen ja vihreä - purppura. Värierolla kolme on kolme näyteparia: sininen - oranssi, purppura - keltainen ja punainen - vihreä [16].

Taulukko 6: Värinvastaavuuskokeen virheellisten vastausten määrä prosentteina [16]

Näytteiden välinen aika (s)	Värieron taso		
	1	2	3
samanaikainen	0,23	0,00	0,00
0,0 s	0,00	0,46	0,93
0,5 s	0,00	0,00	0,00
1,0 s	0,46	0,00	1,39
2,5 s	0,00	0,93	0,46
4,5 s	0,69	0,69	0,46

Myös värien kesken esiintyy vaihtelua niiden tunnistamisessa ja muistamisessa. Puna-viherakselilla sijaitsevat värit näyttävät olevan helpommin muistettavissa kuin kelta-siniakselilla sijaitsevat [15]. Sama suuntaus on havaittavissa myös värinvastaavuuskokeissa, joissa näytteitä tarkastellaan samanaikaisesti, joten kyse ei liene pelkästään muistin vaikutuksesta värien erottelussa. Mitää varmaa syytä tälle ilmiölle ei kuitenkaan ainakaan toistaiseksi ole löydetty, vaikka tulokset viittaisivatkin värinäköjärjestelmän havaintokanavien olevan hieman toisistaan poikkeavat [15].



Kuva 7: Värinvastaavuuskokeen virheellisten vastausten määrä prosentteina [16]

6.3.2 Koejärjestelyt värimuistin tutkimiseksi

Värimuistikokeissa voi olla ongelmallista se, että kyky tunnistaa havaittu väri näyttää riippuvan sekä kyvystä sanallisesti kuvailla havaittua väriä että tietoisuudesta kokeenjärjestäjän intresseistä [51]. Periaatteessa värinvastaavuuskokeita on kahta tyyppiä: verrattavia värejä tarkastellaan joko samanaikaisesti tai peräkkäin. Värimuistikokeet ovat yleensä jälkimmäistä tyyppiä, mutta vaihtoehtoja on tässäkin tyypissä runsaasti tarjolla. Koehenkilöä voidaan pyytää säätämään toinen näyte vastaamaan ensimmäistä, valitsemaan ensimmäistä väriä vastaava väri näytejoukosta tai vain ilmoittamaan ovatko verrattavat näytteet samaa väriä vai eivät. Mikäli näytteet esitetään yhtä aikaa ja vierekkäin, on ihmisen silmän erottelutarkkuus erittäin suuri, vaikka tarkkuus vaihtelee ihmisten ja olosuhteiden kuten valaistuksen mukaan. Hyvissä valaistusolosuhteissa ihminen voi erottaa jopa yli 2 miljoonaa eri sävyä [55]. Erottelutarkkuus pienee heti, kun värejä ei esitetä samanaikaisesti ja värimuistin vaikutus tulee mukaan prosessiin [15]. Lisäksi värinäyte voidaan liittää johonkin tuttuun esineeseen (vihreää ruohoa, punainen liikennevalo, keltainen sitruuna [51]) sen sijaan, että tutkittaisiin vain painettua värilaattaa, monokromaattorin tuottamaa valoa tai näytölle tuotettua väriä.

Mikäli ensimmäisen ja toisen näytteen esittämisen välinen aikaero on lyhyempi kuin yksi sekunti, käyttää koehenkilö päätöksen tekemiseen mielikuvamuistia, johon ei liity ollenkaan kielellistä käsittelyä. Tutkittaessa näytteen esittämisajan pituuden vaikutusta vastausten tarkkuuteen silloin, kun koehenkilöt asettavat toisen näytteen vastaamaan ensimmäistä, todettiin muutetun näytteen vastaavan alkuperäistä parhaiten silloin, kun ensimmäistä näytettä esitettiin alle sekunnin ajan [51].

Myös käytetty värien esitystapa vaikuttaa tuloksiin. Jos kokeissa käytetään painettuja värinäytteitä esimerkiksi Munsellin värikirjasta, on näytejoukko silloin diskreetti eli koehenkilö ei voi valita aivan mitä väriä tahansa vaan käytettävissä olevien värien joukko on ennalta määrätty. Myös väriavaruuden tasajakoisuus näytteiden värikoordinaatteja laskettaessa, vaikuttaa aikaansaatuun näytejoukkoon [15]. Käytettävän väriavaruuden tai -järjestelmän valinta riippuu pitkälti kokeen muusta toteutuksesta. Painovärien ollessa kyseessä vaaditaan näytteiltä erilaisia ominaisuuksia kuin monokromaattista valoa tai esimerkiksi CRT-näyttöä käytettäessä.

7 Käytetyt laskennalliset ryhmittelymenetelmät ja tietokannat

Värinimeämiskokeiden väriluokkia vastaavien ryhmien etsimiseen on käytetty kah- ta erilaista laskennallista menetelmää: *itseorganisoivaa karttaa* (*self-organizing map, SOM*) ja *ei-negatiivista matriisihajotelmaa* (*non-negative matrix factorization, NMF*). Itseorganisoivan kartan käyttäminen on ohjaamattoman oppimisen mukaista ryhmitte- lyä eli ryhmiteltävän tietokannan alkioista ei etukäteen tiedetä mihin ryhmään ne kuu- luvat [31]. Ei-negatiivinen matriisihajotelma puolestaan esittää tutkittavan tietokannan keskusvektoreiden avulla eikä siten ryhmittele koko tietokantaa [33]. Tarkoituksena on tiivistää tietokannan oleellinen informaatio, koska keskusvektoreiden tai kartan solu- jen määrä voidaan valita tietokannan alkioiden lukumäärää pienemmäksi, jolloin tuo pienempi joukko edustaa koko tietokantaa. Ryhmiteltävinä tietokantoina on käytetty Munsellin värikirjojen painoksia *Glossy* [41] ja *Matte* [42] standardivalonlähteellä C painotettuna. Kummassakin tapauksessa ryhmiteltävän tietokannan voi olettaa riittä- vän hyvin kattavan koko käytettävissä olevan väriavaruus.

7.1 Itseorganisoiva kartta

Itseorganisoiva kartta on neuraalilaskennan menetelmä, jonka avulla voidaan ilman analyttistä mallia kuvata suuressa datamäärässä olevia ominaisuuksia, kuten muuttu- jien merkittävyyttä suhteessa toisiinsa sekä niiden riippuvuussuhteita. Sen avulla pro- jisoidaan ja visualisoidaan moniulotteisia signaaliavaruuksia kaksiulotteisen piirrekar- tan muotoon [31]. Se muuttaa moniulotteisen tilastollisen datan geometrisiksi suhteik- si tiedon esittämisen abstraktiotason samalla noustessa [31]. Itseorganisoivan kartan avulla syötedatan samankaltaiset alkiot sijoittuvat lähekkäin ulostuloavaruuteen, joka voi olla esimerkiksi kaksiulotteinen kartta. Kartan opetusprosessi on adaptiivinen, eli solun sisältö sopeutuu opetusjoukon mukaan ja solun arvon muuttuessa myös sen ym- päristön arvot muuttuvat. Jokainen solu on naapurustonsa keskiarvo – tosin muutosten naapurusten välillä ei tarvitse olla tasaisia, vaan ne voivat tapahtua hyppäyksittäin [31]. Järjestetyssä kartassa solun lähimmät naapurit ovat siten aina samankaltaisempia ky- seisen solun kanssa kuin kauempana olevat, ja solujen ”muoto” muuttuu kartalla liikut- taessa liukuvasti, mutta ei välttämättä lineaarisesti.

Opetusprosessin kuluessa kartan solujen painokertoimet tulevat siis vastaamaan syöte-dataa siten, että kutakin syötteen alkiota *parhaiten vastaavaa solua* (*best matching unit, BMU*) ja sen naapureita muutetaan kohti syötealkion arvoa opetuskertoimen määräämällä voimakkuudella. Kukin syötealkio menee jokaiselle kartan solulle tutkitavaksi, mutta vain syötettä parhaiten vastaavaa solua ja sen naapurustoa päivitetään: eniten BMU-solua itseään ja naapureita vähemmän. Alussa solujen päivitysvoimakkuudesta kertovan *naapurustofunktion* (*neighborhood function*) arvo on suuri, mutta se pienenee kierrosten edetessä. Ideana on saada kartan solut alussa karkeasti määrättyä ja sen jälkeen hienosäätää niitä kuvaamaan syötedataa entistä tarkemmin.

Algoritmitasolla itseorganisoivan kartan opettaminen tapahtuu seuraavalla tavalla [31]:

Olkoon L erillisistä soluista koostuva hila, jonka soluilla ovat painokertoimet m_i , missä i on solun numero ja $m_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{in}]^T \in \mathbb{R}^n$

Syötevektori $x = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]^T \in \mathbb{R}^n$ liittyy jokaiseen hilan soluun rinnakkaisesti solun mukaan vaihtelevien painokertoimien μ_{ij} kautta

Syötevektoria parhaiten vastaavalle solulle m_c pätee

$$\|x - m_c\| = \min_i \{\|x - m_i\|\} \quad (7.1)$$

Kartan opettaminen eli sen solujen päivittäminen tapahtuu kolmella askeleella [31]:

Algoritmi 7.1. SOM

1. Etsi syötejoukon alkiolle x sitä parhaiten vastaava solu m_c
2. Muokkaa kaikkien solun m_c naapurustoon kuuluvien solujen m_i painokertoimia naapurustofunktion h_{ci} mukaan:

$$m_i(t+1) = m_i(t) + h_{ci}(t)[x(t) - m_i(t)], \quad (7.2)$$

missä $t = 0, 1, 2, \dots$ on kierroslaskuri

3. Toista kohtia 1 ja 2 opetuskierrosten lukumäärän verran

Opetuskierrosten lukumäärä on päätettävissä tehtäväkohtaisesti ja ensimmäisen kierroksen ($t = 0$) aikana painokertoimet $m_i(0)$ voivat olla satunnaiset tai ne on voituu

alustaa jollakin muulla tavalla [31]. Kartan solujen alustamiseen on kaikissa tapauksissa käytetty ryhmiteltävää tietokantaa, jolloin solujen muoto on jo valmiiksi lähempänä haluttua lopputulosta kuin se satunnaisesti alustettaessa olisi.

Kaavan 7.2 naapurustofunktiolla $h_{ci}(t)$ on keskeinen rooli oppimisprosessissa ja ainoalle asetettu vaatimus on, että sen tulee pienentyä kohti nollaa opetuksen kuluessa, eli $h_{ci}(t) \rightarrow 0$ kun $t \rightarrow \infty$. Ryhmittelyssä on käytetty gaussista naapurustofunktiota, jolloin lähellä keskussolua olevat naapurit päivittyvät voimakkaammin kuin naapuruston reunalla olevat. Naapuruston päivittyminen riippuu lisäksi suorituksen alussa määrättävästä opetuskertoimesta $\alpha(t)$, joka voi saada arvoja välillä $0 < \alpha(t) < 1$. Gaussinen naapurustofunktio (kellofunktio) on siten muotoa [31]

$$h_{ci}(t) = \alpha(t) \left(-\frac{\|r_c - r_i\|^2}{s\sigma^2(t)} \right), \quad (7.3)$$

missä $\sigma(t)$ on muokattavan naapuruston leveys, $\alpha(t)$ opetuskerroin, r_c naapuruston keskussolu ja r_i päivitettävä solu.

Koska soluista muodostuu hila, voi sen topologia olla lähes mitä tahansa, jopa epäsäännöllinen [31]. Yleisimmin käytettyjä ovat suorakulmainen (rectangular) ja kuusikulmainen (hexagonal) kartta, joista jälkimmäinen on yleensä ihmisen kannalta havainnollisempi [31]. Ensimmäisessä tapauksessa kullakin kartan sisäsolulla on neljä naapuria ja jälkimmäisessä kuusi. Nämä mahdollisuudet tarjoaa myös SOM_PAK, ja tässä työssä käytetään kuusikulmaista topologiaa. Koska kaikki käytetyt kartat ovat yksiulotteisia, ei sillä kuitenkaan ole vaikutusta lopputulokseen.

7.1.1 SOM_PAK-ohjelmapaketti ja ryhmittelyohjelma

Itseorganisoivalla kartalla tehty tietokantojen ryhmittely on suoritettu ryhmittelyohjelmalla, jonka toteutin erikoistyössäni [48]. Ryhmittelyohjelma on toteutettu Teknillisen korkeakoulun tietojenkäsittelyopin laboratorion SOM_PAK-ohjelmapaketin [30] avulla. SOM_PAK-paketti tarjoaa valmiit sovellukset itseorganisoivan kartan alustamiseen ja opettamiseen. Ryhmiteltäessä tietokantaa itseorganisoivaa karttaa käytetään kolmi-vaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa luodaan oikeankokoinen kartta ja alustetaan se, jonka jälkeen suoritetaan opetusvaihe kaksi kertaa. Ensimmäisellä kerralla eli varsinaisessa opetusvaiheessa opetuskerroin ja opetettavan naapuruston koko ovat suurempia ja kierrosten määrä pienempi, kun taas toisella kerralla eli hienosäätövaiheessa opetuskerroin ja naapuruston koko ovat pienempiä ja kierrosten lukumäärä suurempi. Opetusjoukkona sekä

opetus- että hienosäätövaiheessa on koko ryhmiteltävä tietokanta standardivalonlähteellä C painotettuna. Valonlähteellä painotettuun tietokantaan päädyttiin siksi, että itseorganisoivan kartan värinerottelukyky oli sille suurempi kuin esimerkiksi pelkkiä heijastusspektrejä sisältävälle tietokannalle [48]. Kartan erottelukyvyn tutkimisesta kerrotaan enemmän tämän luvun kohdassa 7.3.

SOM_PAK-paketin alustusohjelma kirjoittaa luomansa kartan tiedostoon, jonka ensimmäisellä rivillä on tieto ryhmiteltävän datan komponenttien lukumäärästä, naapuruston tyypistä, kartan korkeudesta ja leveydestä sekä naapurustofunktion tyypistä, joka tässä tapauksessa on gaussinen. Tiedoston seuraavilla riveillä ovat luodun kartan solut eli painokertoimet, joita opetusvaiheessa päivitetään. Alustamisen jälkeen alkaa opetusvaihe, jossa opetusohjelma lukee tiedostosta alustusohjelman luoman kartan ja aloittaa opetusjoukon läpikäynnin. Opetusvaiheessa naapuruston kokona on kartan pituus eli kaikkia kartan soluja päivitetään jokaisella kierroksella. Itseorganisoivan kartan periaatteen mukaan opetusjoukon käsiteltävänä olevalle spektrille etsitään ensin kartasta sitä parhaiten vastaava solu. BMU-solua muutetaan eniten kohti tutkittavana olevaa opetusjoukon spektriä, solun lähimpiä naapureita seuraavaksi eniten ja kauimpana kartassa olevia soluja kaikkein vähiten.

Kartan järjestämisen jälkeen alkaa hienosäätövaihe, jolloin keskitytään muokkaamaan solujen painokertoimia yksi kerrallaan eli naapuruston koko on yksi. Hienosäätöön käytetään samaa opetusohjelmaa ja tietokantaa kuin opettamiseenkin. Opetuskerron ja hienosäätövaiheen pituus tosin ovat erisuuret kuin opetusvaiheessa, koska hienosäätökierroksia on nelinkertainen määrä opetuskierroksiin verrattuna. Koska naapuruston koko hienosäätövaiheessa on yksi, vaikuttaa kukin syöte vain itseään parhaiten vastaavaan soluun muuttamalla sitä itsensä suuntaan. Muiden solujen arvot eivät muutu. Koska opetuskertoimen arvo on opetusvaihetta pienempi, eivät kartan solujen muutokset ole yhtä suuria kuin opetusvaiheessa.

Hienosäätövaiheen jälkeen kartta on valmis ja voidaan ryhtyä tutkimaan muodostettuja ryhmiä. Kullekin ryhmiteltävän tietokannan värille etsitään kartan soluista lähin eli kyseisen spektrin BMU-solu. BMU-tiedon perusteella muodostetaan ryhmät: kaikki tietokannan spektrit, joilla on sama BMU-solu, kuuluvat samaan ryhmään. Tässä tutkielmassa ei olla kiinnostuneita saatujen ryhmien muista ominaisuuksista, vaan halutaan vain verrata laskettuja tuloksia värinimeämiskokeiden keskusalkioihin. Tästä syystä jokaiselle ryhmälle lasketaan keskusalkiota vastaava spektri ryhmän kaikkien spektrien aritmeettisena keskiarvona. Keskiarvo lasketaan jokaiselle aallonpituudelle erikseen

ryhmän kaikista spektreistä. Laskettuja keskiarvoja kutsutaan myöhemmin tutkielmassa keskusalkioiksi ja niitä käsitellään samalla tavalla kuin värinimeämiskokeiden keskusalkioita.

7.2 Ei-negatiivinen matriisihajotelma

Toinen tässä tutkielmassa käytetty laskennallinen menetelmä keskusalkioiden löytämiseksi Munsellin värikirjoista on ei-negatiivinen matriisihajotelma. Oppimismenetelmänä ei-negatiivisen matriisihajotelman toiminta perustuu kokonaisuuden tunnistamiseen osien kautta, ei holistisesti tai prototyyppien avulla [33]. NMF-algoritmin suuri etu on, että oppimisprosessin tuloksena syntyvät kantavektorit sisältävät vain ei-negatiivisia arvoja. Väriluokkien keskusalkioita etsittäessä tämä on erittäin hyödyllistä, koska kantavektoreita voidaan suoraan käyttää keskusalkioina kun negatiivisista arvoista ei tarvitse erikseen huolehtia. Ei-negatiivista matriisihajotelmaa voidaan lisäksi käyttää myös semanttisten piirteiden etsimiseen tekstistä [33].

Tutkittavana oleva tietokanta (joka voi sisältää vaikkapa kasvokuvia) esitetään ei-negatiivisen matriisihajotelman avulla kantavektoreiden lineaarikombinaationa [33]. Jos kantavektoreiden määrää muutetaan, muuttuvat kaikki kantavektorit, joten sekä lisäämisen että vähentämisen jälkeen kaikki kantavektorit tulevat lasketuiksi uudelleen. Optimoinnin toteuttaminen on NMF-algoritmille suhteellisen hankalaa, koska vaatimus ei-negatiivisista kantavektoreista vaatii ei-lineaarista iteratiivista optimointia [7]. Ongelmana on, että haluttu lopputulos saadaan kantavektoreiden lineaarikombinaationa ja optimoinnissa on mahdollista käyttää vain lisäysoperaatioita, ei vähennystä [33]. Tämä tuo omat ongelmansa optimoinnin toteuttamiseen, mutta vastaa hyvin NMF-algoritmin perusajatusta, jonka mukaan kokonaisuus syntyy osista yhdistämällä.

Ei-negatiivinen matriisihajotelma suoritetaan tietokannoille, jotka tässä työssä ovat Munsellin värikirjoista [41] ja [42] mitatut värispektritietokannat. Tietokanta $V \in \mathbb{R}^{n \times m}$ koostuu m spektristä, jotka sijaitsevat matriisin V sarakkeissa. Kukin spektri on ilmoitettu n aallonpituuskomponentin avulla. Kantavektorit W ja koodaus H yhdessä vastaavat alkuperäistä tietokantaa tiivistettynä eli $V \approx WH$ [33]. Kantavektoreita $W \in \mathbb{R}^{n \times r}$ on r kappaletta ja ne luonnollisesti sisältävät kaikki n aallonpituuskomponenttia. Kantavektorit W_i ovat värinimeämiskokeiden väriluokkien keskusalkioita vastaavat värit. Koodaus $H \in \mathbb{R}^{r \times m}$ puolestaan liittyy kunkin kantavektorin jokaiseen

tietokannan spektriin, mutta tässä yhteydessä ollaan kiinnostuneita vain kantavektoreista, ei niiden koodauksesta. Komponenteittain (kasvokuvien kyseessä ollessa kuvapisteittäin, spektrien tapauksessa yhtä aallonpituuskomponenttia kohti) matriisia V approksimoidaan kaavan 7.4 mukaan:

$$V_{i\mu} \approx (WH)_{i\mu} = \sum_{a=1}^r W_{ia} H_{a\mu}, \quad (7.4)$$

missä V on tietokanta, W kantavektorit ja r niiden lukumäärä, H koodaus sekä i , a ja μ indeksointimuuttujia.

Jokaisella iteraatiokierroksella kantavektoreita ja koodausta päivitetään. Laskennan edetessä päivityssääntöjen iteratiivinen muuttaminen tapahtuu kohti tavoitefunktion paikallista maksimia [33]. Tämä tavoitefunktio on esitetty kaavassa 7.5 [33]:

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{\mu=1}^m [V_{i\mu} \log(WH)_{i\mu} - (WH)_{i\mu}], \quad (7.5)$$

missä V on tietokanta, W kantavektorit, H koodaus, n aallonpituuskomponenttien lukumäärä, m spektrien lukumäärä sekä i ja μ indeksointimuuttujia.

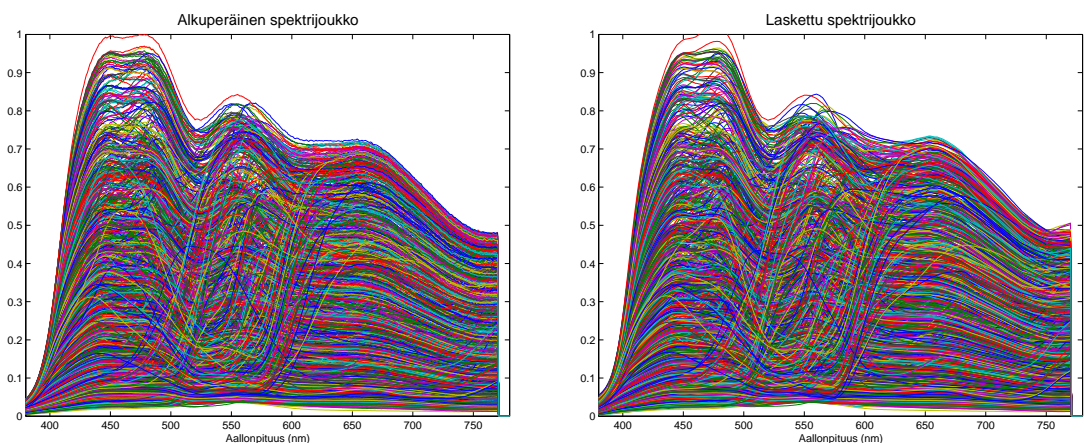
Tämä voidaan ymmärtää myös tilanteena, jossa kuva luodaan todennäköisyyssmallien perusteella. Jokainen tietokannan alkio (esimerkiksi kasvokuvan kuvapiste tai värikirjan spektri) lasketaan erikseen ja tavoitefunktio liittyy tällöin todennäköisyyteen, jolla kantavektoreiden ja koodauksen tuottama kohde todellakin sijaitsee alkuperäisessä tietokannassa [33]. Ei-negatiivisen matriisihajotelman avulla saadaan siis koodauksessa H olevat piilevät piirteet suoraan havaittavaan, samanlaiseen muotoon kuin ne ovat alkuperäisessä tietokannassa V . Tästä syystä sitä voidaan käyttää hyväksi hyvin erilaisissa tehtävissä silloin, kun tietokannasta etsitään jotakin tiettyä tai toistuvaa piirrettä [33]. Myöskään haluttujen piirteiden mahdollinen riippuvuus toisistaan tai todennäköinen esiintyminen yhdessä eivät vaikuta lopputulokseen, koska etsittyjen piirteiden luonteesta ei tehdä mitään voimakkaita oletuksia [33].

Edellä kaavassa 7.5 esitetty optimoinnin tavoitefunktio ja käytetty optimointitapa mahdollisimman hyvin tietokantaa esittävien kantavektoreiden laskemiseksi ei suinkaan ole ainoa mahdollinen [34]. Mahdollisuuksia on monia kunhan vain pitää mielessä ei-negatiivisen matriisihajotelman perusvaatimukset eli optimoinnin iteratiivisen luonteen, jolloin koodausta ja kantavektoreita päivitetään jokaisella kierroksella ja vain lisäoperaatioiden mahdollisuuden ei-negatiivisuuden vaatimuksen takia. Mahdollisia

ovat siis lähinnä yhteenlaskuun ja kertomiseen perustuvat menetelmät. Tosin edellä esitetty päivitystapa tuottaa todistetusti vähintään paikallisesti optimaalisen tuloksen [34].

Ennen laskennan aloittamista sekä kantavektori- että koodausmatriisi alustetaan. Kantavektorit alustetaan tämän tutkielman laskuissa ykkösiksi eli kaikkien kantavektoreiden kaikki alkiot saavat aluksi arvokseen 1. Tästä johtuen keskusvektorit eli keskusvärit ovat laskennan alussa hyvin vaaleita ja tummuvat laskennan edetessä. Koodaus puolestaan alustetaan satunnaisluvuilla väliltä $[0 \dots 1]$. Koska kantavektorit ovat aluksi ykköstä eli ”valkoisia”, on kirikkaustaso huomattavasti alkuperäistä tietokantaa korkeampi ensimmäisten kierrosten jälkeen. Laskuissa kierrosmäärä kaikille tietokannoille ja kaikille keskusvektorien määrille oli tässä tutkielmassa 1000 kierrosta. Tuhannen kierroksen jälkeen keskusvektorien taso oli jo asetunut hyvin lähelle käytettävän tietokannan valoisuustasoa, eikä kierrosmäärän nostaminen enää juurikaan vaikuttanut lopputulokseen. Kun kantavektorit on laskettu, normitetaan ne vielä yhteisesti ykköseen eli jaetaan koko kantavektori-joukko suurimmalla arvollaan.

Kuvassa 8 on vasemmalla alkuperäisen Munsellin *Glossy*-kirjan spektrit painotettuina standardivalonlähteellä C. Oikealla puolella on ei-negatiivisen matriisihajotelman tulos käytettäessä yhtätoista kantavektoria ja niiden koodausta. Laskettu tietokanta vastaa hyvin tarkoin alkuperäistä kun iteraatiokierroksia on ollut 1000, sen jälkeen ei dramaattisia muutoksia kantavektoreissa enää tapahtunut kierrosmäärää nostettaessa.



Kuva 8: Alkuperäinen ja laskettu tietokanta

Tutkielman laskut on suoritettu Matlab-ympäristössä ohjelmalla, jonka ovat kirjoittaneet Daniel D. Lee ja H. Sebastian Seung. He esittelivät Nature-lehden artikkelissaan

vuonna 1999 kehittämänsä algoritmin [33], joka on siis sama kuin tässä työssä käytetty. He eivät kuitenkaan ole käyttäneet ei-negatiivista matriisihajotelmaa värispektritietokantojen tutkimiseen, mutta seuraavassa luvussa esitellään Gershon Buchsbaumin ja Orin Blochin [7] tutkimus, jossa saman NMF-algoritmin avulla on etsitty väriluokkien keskusalkioita Munsellin *Matte*-kirjasta. Samalla Buchsbaumin ja Blochin saamia keskusalkioita verrataan tätä tutkielmaa varten laskettuihin uusiin tuloksiin.

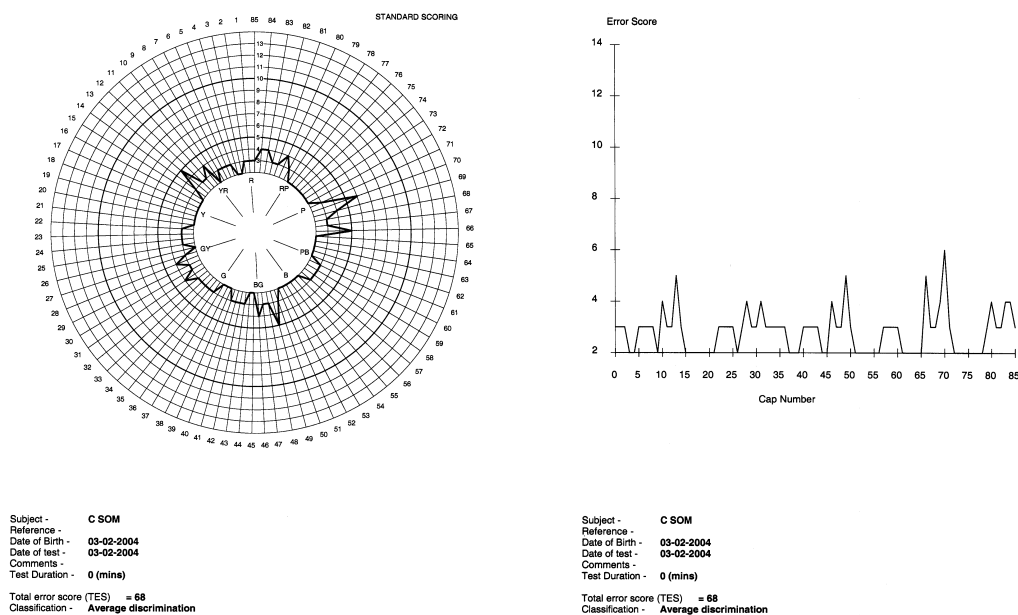
7.3 Farnsworth-Munsell 100 -värinäköttesti

Farnsworth-Munsell 100 -värinäköttestin (FM100-testi, Farnsworth-Munsell 100 hue test), kuten muidenkin vastaavanlaisten testien, avulla pyritään mittaamaan ihmisten värinäkökykyä mahdollisten poikkeamien varalta. Eräs tunnetuimmista melko yksinkertaisesti ja nopeasti toteuttavista testeistä on *Ishihara-testi*, mutta muitakin samantapaisia testejä on. Etuna näillä yksinkertaisilla testeillä on, että niitä helppo ja nopea käyttää. Ishihara-testin kaltaisten yksinkertaisten testien kuvat koostuvat pienistä erivärisistä ympyröistä, joissa samanväriset ympyrät muodostavat jonkin tunnistettavan kuvion [20]. Mikäli ihmisen värinäkökyvyssä on tiettyjä tunnettuja ongelmia, hän ei pysty erottamaan kuviota taustasta. Näillä testeillä voidaan melko tarkasti tunnistaa ne ihmiset, joilla värinäköongelmia on, mutta ongelman laatua ei välttämättä saada selville [20].

Farnsworth-Munsell 100 -värinäköttesti on luonteeltaan hyvin erilainen. Sitä pidetään parhaana käytettävissä olevana testinä värinerottelukyvyn yleiseen mittaamiseen [20], mutta testin tekeminen vie huomattavasti enemmän aikaa ja on monimutkaisempaa kuin yksinkertaisempien testien. FM100-testi koostuu neljästä laudasta ja 85 nappulasta, jotka on jaettu lautojen kesken siten, että ensimmäisellä laudalla nappuloita on 22 ja loppuilla 21. Kullakin laudalla on kiinteät reunanappulat ja irrallaan olevat testinappulat on tarkoitus järjestää laudalle siten, että lopputuloksena saadaan nappuloiden järjestys, jossa värin sävy muuttuu asteittain. Seuraavan laudan ensimmäinen (kiinteä) nappula on samanvärisen kuin edellisen laudan viimeinen, ja viimeinen lauta loppuu samaan väriin, josta ensimmäinen alkaa. FM100-testin nappulat kiertävät siten väriavaruudessa täyden ympyrän ja väriero kahden vierekkäisen nappulan välillä on ihmisen kannalta vakio. Ensimmäinen lauta alkaa punaisen sävyistä ja muuttuu asteittain keltaiseen. Toinen lauta puolestaan muuttuu keltaisesta vihreään ja kolmas vihreästä siniseen. Neljäs lauta täydentää ympyrän muuttumalla sinisestä punaiseen.

Väriäkötestin kuluessa kutakin lautta käsitellään erikseen, mutta jokainen lauta on käsiteltävä [20]. Kun koehenkilö on saanut nappulat järjestettyä laudalle, sen kansi suljetaan ja nappulat käännetään ylösalaisin. Kunkin nappulan pohjassa on järjestysnumero, joka paljastaa onko nappulat asetettu oikeaan järjestykseen. Testin tulosten analysoimiseen käytetään testin mukana tulevaa ohjelmaa, jolle syötetään nappuloiden järjestys. Mikäli nappulat ovat väärässä järjestyksessä, lasketaan nappuloille virhepisteet. Mitä pienemmät pisteet testistä saa, sen parempi on tulos.

FM100-testi paljastaa paitsi väriäön virheet myös sen, millä sävyillä virheet tapahtuvat. Tämä on tärkeää pyrittäessä selvittämään väriäön ongelman laatua ja syytä [20]. Kuvassa 9 on itseorganisoivan kartan testitulos valonlähteellä C painotetuille spektrille. Erityisesti ympyrän kehälle tulostetut virheet ilmoittavat havainnollisesti missä kohdassa testiä eli millä väreillä virheet ovat tapahtuneet.



Kuva 9: Itseorganisoivan kartan testitulos (valonlähteellä C painotetut spektrit)

Tässä tutkimuksessa FM100-testiä käytettiin itseorganisoivan kartan väriänerottelukyvyyn mittaamiseen ennen Munsellin värikirjojen ryhmittelyä [48]. Testi tehtiin nappuloista mitatuille heijastusspektreille, standardivalonlähteellä C painotetuille, ihmisen herkkyyskäyrällä painotetuille ja molemmilla edellä mainituilla tavoilla painotetuille spektreille, yhteensä siis neljä kertaa. Näistä valittiin lopullisessa ryhmit-

telyssä käytettäväksi se spektrijoukko, jolle FM100-testin tulos oli paras. Parhaaksi valikoituivat valonlähteellä C painotetut spektrit, joille ohjelma antoi arvioksi ”keskimääräinen värinerottelukyky” (average discrimination) [48].

7.4 Munsellin värikirjat

Munsellin värijärjestelmästä on kerrottu enemmän luvussa 2.3. Tässä tutkielmassa on käytetty sekä mattapintaisia [42] että kiiltävöpintaisia [41] värejä, ja nämä kaksi tietokantaa eroavat toisistaan jonkin verran. *Matte*-kirjassa [42] on yhteensä 1269 värinäytettä, jotka kaikki ovat kromaattisia. Mukana ei siis ole ainoatakaan mustaa, valkoista tai harmaata näytettä. Värinäytteiden lukumäärä on suhteellisen tasainen eri värien kesken. Eniten on punaisia näytteitä (noin 11 % kaikista) ja vähiten sinivihreitä (8 %). *Glossy*-kirjassa [41] puolestaan on mukana myös neutraaleja ja näytteiden kokonaismääräkin on suurempi: näytteitä on yhteensä 1600. Myös siinä on eniten punaisia näytteitä (12 %) ja kromaattisista väreistä vähiten sinivihreitä (8 %). Neutraaleja näytteitä on yhteensä vain 37 eli 2 % kokonaismäärästä. Taulukossa 7 on molempien värikirjojen sävyjakauma⁴.

Taulukko 7: Munsellin värikirjojen sävyjakauma

	Matte [42]	Glossy [41]
R	139	193
YR	122	171
Y	143	179
GY	127	143
G	115	143
BG	106	127
B	112	133
PB	137	156
P	131	144
RP	137	174
neut	–	37

⁴R = red, YR = yellow-red, Y = yellow, GY = green-yellow, G = green, BG = blue-green, B = blue, PB = purple-blue, P = purple, RP = red-purple

Munsellin värikirjojen voidaan olettaa kattavan hyvin se väriavaruus, joka painoväritekniikalla on toteutettavissa. Pigmenteistä ja muista painoteknisistä syistä johtuen värikirjojen eivät voi olla yhtä värikylläisiä kuin esimerkiksi tietyt monokromaattorilla tuotetut sävyt ovat. Munsellin värikirjat kuitenkin esittävät melko hyvin luonnossa esiintyviä värejä, joiden spektrit yleensä ovat sileitä ja tasaisia, eivätkä sisällä samantaisia teräviä piikkejä kuin esimerkiksi juuri monokromaattorin tuottamat erittäin puhtaat värit.

Käytetyt spektritietokannat, niin FM100-testin nappulat kuin värikirjojen näytteetkin, ovat spektritietokantoina saatavana Joensuun yliopiston väritutkimusryhmän kautta. Kaikki spektrit on mitattu spektrofotometrillä yhden nanometrin välein. Aallonpituusalueen rajat vaihtelevat hieman, ja kaikista laajin alue on FM100-testistä mitatuilla spektreillä eli 360 - 800 nm (aallonpituuskomponentteja siten 441). *Matte*-kirjan aallonpituusalue on 380 - 800 nm (komponentteja 421) ja *Glossy*-kirjan 380 - 780 nm (komponentteja 401). Kun näkyvän valon aallonpituusalue on noin 400 - 700 nm [18], kattavat kaikkien käytettyjen tietokantojen aallonpituusalueet tämän välin helposti. Verrattaessa laskennallisten menetelmien tuloksia värinimeämiskokeiden tuloksiin voidaan siis olettaa, että kaikki lopputulokseen vaikuttavat aallonpituuksiin ja ihmisen havaintokykyyn liittyvät seikat tulevat huomioiduksi.

8 Keskusalkioiden sijainti väriavaruudessa

Värinimeämiskokeiden keskusalkiot on käytetyistä koejärjestelyistä riippuen valittu toisella kahdesta mahdollisesta tavasta: joko koehenkilöt ovat eksplisiittisesti osoittaneet jonkin tietyn näytteen luokan parhaaksi edustajaksi ja useimmin mainittu on valittu keskusalkioksi tai koehenkilöiden yksimielisten ja johdonmukaisten vastausten vastaajien perusteella on valittu näyte, jolle vastaajien keskiarvo on pieni. Itseorganisoivaa karttaa käytettäessä keskusalkioksi muodostuu ryhmän spektrien keskiarvo, kun se lasketaan jokaiselle aallonpituudelle itsenäisesti kaikkien ryhmän spektrien kesken [48]. Ei-negatiivisen matriisihajotelman tapauksessa ei tietokantaa varsinaisesti ryhmitellä mitenkään, vaan keskusalkioita ovat hajotelman kantavektorit. Koska ryhmittelyä ei molemmilla laskennallisilla keinoilla saada, keskitytään tässä tutkielmassa vain keskusalkioiden sijaintiin, ei väriluokkien muihin ominaisuuksiin. Edes itseorganisoivan kartan tapauksessa ei ole mielekäästä tarkastella ryhmiä kokonaisuuksina, koska kartta ryhmittelee koko tietokannan kartan solujen ilmoittamaan määrään ryhmiä. Värinimeämiskokeissa kuitenkin ei kaikkia näytteitä sijoiteta mihinkään perusväriluokista, vaan ne nimetään muilla kuin perusväritermeillä, eikä luokittelu siten ole samanlainen kuin itseorganisoiva kartan tuottama.

8.1 Perusvärien ominaisuudet

Perusväreiksi kutsutaan värejä, jotka ovat ihmisille psykologisesti merkittäviä ja joiden nimeäminen tapahtuu yksimielisesti ihmisten kesken ja johdonmukaisesti eri käyttökerroilla [3]. Perusvärit voidaan vielä jakaa ensi- ja toissijaisiin [21]. Ensisijaisien perusvärien punaisen, vihreän, keltaisen ja sinisen sekä valkoisen ja mustan (valaistustason ääripäät) asema perustuu ihmisen värinäköjärjestelmän toimintaan. Kuten kohdassa 3.3 esitetään, ihmisten oletetaan havaitsevan värisävyjä kahden kromaattisen opponentikanavan eli puna-vihreän ja sini-keltaisen kanavan kautta. Valoisuustasoa käsitellään värihavaintojärjestelmän korkeammilla tasoilla aivoissa kromaattisuusakseleista erillisenä, vaikka ne silmän tasolla liittyvätkin yhteen [12].

Toissijaiset perusvärit ruskea, vaaleanpunainen, purppura ja oranssi sekä harmaa (joka ominaisuuksiltaan ja käyttäytymiseltään väriluokkana poikkeaa melkoisesti kromaattisista) perustavat asemansa psykologiseen erityisyyteen muihin väreihin verrattuna [40]. Luonteenomaista toissijaisille kromaattisille perusväreille on niiden sijoittumi-

nen väriavaruudessa punaisen väriluokan ympärille johdannaisluokkina, joissa yhtenä osana on punainen. Punaisen ja muiden ensisijaisten perusvärien mahdollisten kombinaatioiden joukosta (kun punaisen ja vihreän ei voida vastaväriluonteensa takia olettaa sekoittuvan) puuttuu vain punaisen ja mustan yhdistelmä. Esimerkiksi unkarin kielessä tällainen termi kuitenkin on [3], eli käytössä on kaksi perusväritermiä ilmoittamaan punaisia sävyjä. Joissain tapauksissa ruskeaa on pidetty punaisen ja vihreän värin linkkinä, koska se värinnimeämiskokeissa asettuu punaisen ja vihreän välille, mutta toinen vaihtoehto on nähdä se keltaisen ja mustan muodostamana johdannaisluokkana [21].

Värinnimeämiskokeiden mukaan perusvärejä ovat johdonmukaisesta ja yksimielisesti nimetyt värit. Useissa tutkimuksissa on havaittu, että vaikka tiettyjä väritermejä käytetään lähes yhtä usein kuin perusväritermejä, on niiden käyttötavoissa kuitenkin suuri ero [5], [53], [55]. Perusväritermien käyttö on johdonmukaisempaa ja yksimielisempää kuin esimerkiksi termien *turkoosi* ja *beige*, vaikka niitä käytetäänkin lähes yhtä usein. Perusvärien nimeäminen on myöskin nopeampaa kuin muiden. Värin nimeämiseen kuluva aika kasvaa heti, kun nimettävänä on jokin muu kuin perusväri, vaikka ainakin osa koehenkilöistä nimeäisikin sen johdonmukaisesti samalla termillä [6].

Boynton ja Olson [6] löysivät tutkimuksessaan erittäin selkeän eron perusväritermien ja muiden väritermien välille vastausaikojen suhteen. Toisaalta he eivät havainneet mitään eroa ensi- ja toissijaisten väritermien käytön välillä, toisin kuin Sturges ja Whitfield omassa tutkimuksessaan [54]. Molemmissa tutkimuksissa löydettiin kuitenkin selkeä ero perusväritermien ja muiden väritermien välille, ja molemmissa tutkimuksissa pidettiin todennäköisenä perusväritermien aseman fysiologisia syitä. Niiden erityisasema näyttää siis johtuvan ihmisen värinäköjärjestelmän toiminnasta kahden kroomaattisen opponenttikanavan kautta. Koska ero yhdentoista perusväritermin ja muiden värinnimeämiskokeissa käytettyjen väritermien välillä on ollut selkeästi havaittavissa [6], [54], pidetään löydettyä perusväritermien lukumäärää lähtökohtana laskennallisten menetelmien tutkimisen kohdalla.

8.2 Värinnimeämiskokeiden keskusalkiot

Koska Sturgesin ja Whitfieldin värinnimeämiskoe [53] on tehty käyttäen Munsellin kiiltäväpintaisen värikirjan näytteitä, käytetään tässä tutkielmassa värikirjojen eri painoksia hieman eri tavoitteilla ja erikseen. Kohdassa 7.4 selvitetään Munsellin värikirjojen eroja: *Glossy*-kirjassa on mukana myös valkoisia, mustia ja harmaita näytteitä, jotka *Matte*-kirjasta puuttuvat kokonaan. Kuitenkaan kumpikaan laskennallinen menetelmä ei *Glossy*-kirjan keskusalkioita etsittäessä muodostanut neutraaleista luokista kuin korkeintaan harmaan tai harmahtavan keskusalkion esittämän luokan. Siitä syystä seuraavista esityksistä on jätetty neutraalit luokat pois ja laskettu vain kahdeksan, ei yhtätoista keskusalkiota. Toinen syy mustan, valkoisen ja harmaan värialueen jättämiselle pois on niiden vähäinen yllätyksellisyys värinnimeämiskokeiden tuloksissa ja eräänlainen erillisyyys muista värialueista. Neutraalit värit ovat luonteeltaan melko erilaisia kuin kromaattiset, joten tuo yllätyksättömyys oli jopa oletettavaa.

Tässä luvussa esitellään kahden värinnimeämiskokeen (Berlinin ja Kayn [3] sekä Sturgesin ja Whitfieldin [53] kokeet) ja kahden laskennallisen menetelmän (itseorganisoiva kartta ja ei-negatiivinen matriisihajotelma) tuottamat keskusalkiot. Ero laskennallisten menetelmien tulosten kesken on melko suuri, mutta ei-negatiivinen matriisihajotelma on tuloksiltaan melko lähellä värinnimeämiskokeiden tuloksia. Käytetyt laskennalliset menetelmät ovat melko erilaiset, joten tulosten erot ovat oletettavia.

Laskennallisten menetelmien tuloksissa on keskitytty vain värialueiden keskusalkioiden tutkimiseen. Värialueiden rakenteeseen ei puututa mitenkään. Itseorganisoiva kartta tosin tuottaa ryhmittelyn tuloksena myös eksplisiittisesti määrätyt värialueet, mutta ei-negatiivinen matriisihajotelma ei ryhmittelyä suoraan tee. Laskennallisia menetelmiä on tosin käytetty myös värialueiden rakenteen ja koon tutkimiseen. Sumeaan logiikkaan perustuvilla sovelluksilla on saatu aikaan hyvin selvästi Berlinin ja Kayn englannin kielen värialueita vastaavat luokat [2].

Eräs huomattava ero itseorganisoivan kartan ja värinnimeämiskokeiden välillä on niiden tuottamien värialueiden muoto ja koko. Värinnimeämiskokeissa osa alkioista jää perusvärialueiden ulkopuolelle ja nimetään jollakin muulla termillä tai muilla termeillä. Itseorganisoiva kartta puolestaan ryhmittelee koko tietokannan kaikki alkiot niin moneen soluun kuin kartan koko on. Samanlainen tilanne värinnimeämiskokeissa saadaan aikaan, jos koehenkilöt rajoittavat vastauksiaan ja käyttävät pelkästään ensisijaisten perusvärien nimiä kaikkien näytteiden nimeämisessä. Kun värialueiden

keskusalkiot itseorganisoivan kartan tapauksessa vielä muodostetaan kartan mukaisista ryhmistä laskemalla niiden keskiarvo, vaikuttavat lopputulokseen aivan yhtä voimakkaasti kaikki ryhmän spektrit – sekä ne, joita voidaan pitää tietyn värin hyvinä edustajina että ne, jotka eivät ihmisen tekemässä luokittelussa tulisi mukaan otella vaan jäisivät esittämään muita kuin perusvärejä. Ei-negatiivisen matriisihajotelman kohdalla ei samanlaista keskiarvoistamisongelmaa ole, mikä voikin olla yksi syy sen tulosten suurempaan samankaltaisuuteen värinimeämiskokeiden kanssa.

Taulukossa 8 on vasemmalla väriluokan nimen lyhenne⁵. Sen jälkeen tulevat värinimeämiskokeiden ja laskennallisten menetelmien keskusalkioiden Munsell-koodit⁶. Ne itseorganisoivan kartan ja ei-negatiivisen matriisihajotelman tuottamat keskusalkiot, jotka eivät selkeästi asettuneet samoille alueille väriavaruuteen kuin värinimeämiskokeissa löydetty keskusalkiot on taulukossa 8 merkitty kursiivilla ja kuvissa 13 ja 14 (sivuilla 78 ja 79) harmaalla. Tällaisia värejä olivat kaikki neljä itseorganisoivan kartan toissijaista perusväriä sekä ei-negatiivisen matriisihajotelman värit ”ruskea” ja ”oranssi”.

Taulukko 8: Kromaattisten perusväriluokkien keskusalkiot *Glossy*-kirjassa

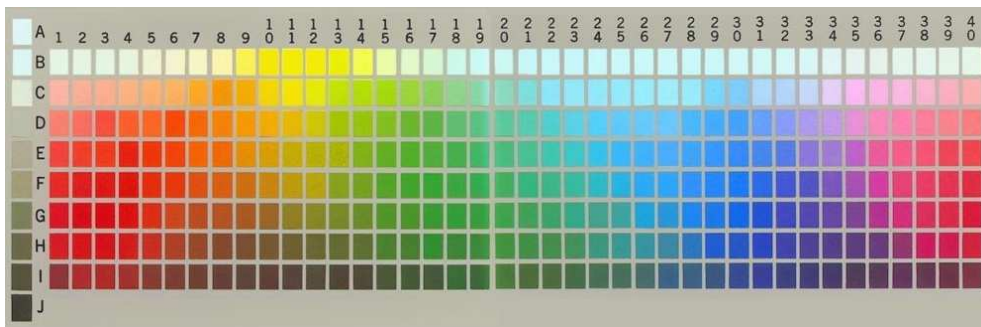
	B&K [3]			S&W [53]			SOM			NMF		
Väri	H	V	C	H	V	C	H	V	C	H	V	C
P	5R	4	14	7,5R	4	16	10RP	5	7	9R	4	15
Vi	7,5G	4	10	5G	4	10	2GY	6	4	8GY	8	19
S	10B	5	10	2,5PB	5	12	9B	6	4	8PB	4	22
K	2,5Y	8	16	5Y	8,5	14	2Y	7	6	2Y	7	13
R	7,5YR	4	8	10YR	3	6	5Y	6	1	1BG	6	7
VP	2,5R	8	6	7,5RP	7	8	2P	6	3	9P	5	7
Pur	2,5P	4	10	5P	4	12	5PB	6	4	2P	3	7
O	5YR	6	12	2,5YR	6	14	3B	5	5	1B	6	11
H	N	6	–	N	5,5	–						
Va	N	9	–	N	9,5	–						
M	N	1	–	N	0,5	–						

⁵P = punainen, Vi = vihreä, S = sininen, K = keltainen, R = ruskea, VP = vaaleanpunainen, Pur = purppura, O = oranssi, H = harmaa, Va = valkoinen, M = musta

⁶H = hue/sävy, V = value/vaaleus, C = chroma/värikylläisyys, esitetään muodossa H V/C

Muut keskusalkiot ovat taulukon ensimmäisessä sarakkeessa ilmoitettujen väriluokkien keskusalkioita. Värinimeämiskokeiden tuloksiin on merkitty myös neutraalien näytteiden tiedot, laskennallisten menetelmien kohdalla ne eivät ole tiedossa, koska laskuilla etsittiin vain kromaattisten väriluokkien keskusalkiot. Itseorganisoivan kartan ja ei-negatiivisen matriisihajotelman keskusalkioiden muuttaminen CIE $L^*a^*b^*$ -koordinaatistosta Munsellin järjestelmään on tehty erityisellä muunnosohjelmalla⁷.

Kuvissa 11 – 14 (keskusnäytteiden sijoittuminen Munsell-avaruuteen) käytetty ruudukko vastaa värinimeämiskokeissa käytettyä näytesarjaa (kuvassa 10) sillä muutoksella, että mukaan on lisätty myös alin kirkkaustaso, eli Munsellin merkintätavan mukainen arvo $V = 1$. Näytteet asettuvat siis kirkkaustasoille 1 – 9, kun kuvassa 10 esitetään vain tasot 2 – 9. Alimman kirkkaustason näytteet olivat mukana Sturgesin ja Whitfieldin [53] kokeessa, mutta eivät Berlinin ja Kayn [3] kokeessa muuten kuin neutraalien näytteiden osalta.



Kuva 10: Värinimeämiskokeissa käytetty näytesarja [29]

Sturgesin ja Whitfieldin näytesarjassa oli yhteensä 446 näytettä, mutta lisätyt näytteet ovat samojen sävyjen erilaisia värikylläisyystasoja eivätkä siten vaikuta ruudukon muotoon, koska ruudukossa ei värikylläisyyttä ilmoiteta mitenkään. Heidän kokeessaan näytteet esitettiin yksitellen ja keskusalkioksi valittiin se yksimielisesti ja johdonmukaisesti nimetty näyte, jolle vastausaikojen keskiarvo oli pienin [53]. Koska näytteitä ei esitetty yhtenäisenä taulukkona, oli helppo lisätä mukaan uusia näytteitä. Berlinin ja Kayn värinimeämiskokeessa koko näytetaulukko esitettiin kerralla ja koehenkilöt osoittivat kullekin väriluokalle parhaan edustajan. Eniten ääniä saanut näyte valittiin sitten luokan edustajaksi [3]. Lähestymistapa ja värinäytteiden määrä ovat siis melko erilaiset kahdessa esitellyssä kokeessa.

⁷Munsell Conversion Software V6.4, <http://standards.gretamacbeth.com/Munsell/Software/>

Laskennallisten menetelmien tuottamien keskusalkioiden Munsell-koodit on taulukossa 8 esitetty suuremmalla tarkkuudella kuin ruudukossa on mahdollista esittää. Kuvia 13 ja 14 varten on keskusnäytteille etsitty ruudukosta lähin sävy, esimerkiksi itseorganoivan kartan tuottaman keltaisen tarkka sävy on $2Y$, mutta ruudukossa se sijoittuu kohtaan $2,5Y$ ja ei-negatiivisen matriisihajotelman tuottaman sinisen tarkka sävy on $1B$, mutta se sijoittuu kohtaan $10BG$, joka on lähempänä kuin $2,5B$.

Ruudukoissa (kuvat 11 – 14) rivien numerot vastaavat Munsell-näytteiden kirkkausarvoja. Sarakkeet puolestaan ilmoittavat sävyä⁸. Munsellin väriavaruudesta on poimittu tasavälisesti 40 sävyä, joista ensimmäinen on $2,5Y$ ja viimeinen $10RP$. Koska sävyt kiertävät väriavaruudessa täyden ympyrän, ovat ensimmäinen ja viimeinen sarake sävyiltään vierekkäiset.

Molempien värinimeämiskokeiden tulokset (kuvilla 11 ja 12) muistuttavat huomattavasti toisiaan – erityisesti kun ottaa huomioon sen, että värisävyn muutos kiertää taulukon vaakatasossa täyden kierroksen väriavaruudessa. Tällöin myös vaaleanpunaiset asettuvat molemmissa kokeissa punaisen ympärille samaan sarjaan oranssin ja ruskean kanssa. Purppura on hieman kauempana muista toissijaisista väreistä, mutta punaiselle viereinen kuten muutkin. Erityisen selkeästi värinimeämiskokeiden tuloksista voi huomata punaisen värin erityisaseman ihmisten havaintojärjestelmässä. Kaikki kromaattiset toissijaiset perusvärit riippuvat jollakin tasolla punaisesta väristä: ruskea asettuu punaisen ja vihreän väliin, vaaleanpunainen punaisen ja valkoisen, oranssi punaisen ja keltaisen ja purppura punaisen ja sinisen väliin. Sinisen ja vihreän ympärillä puolestaan on laaja jakamaton alue, mutta ihmisen erottelukykykin on tällä alueella heikompi kuin punaisen ympäristössä.

Sinisen väriluokan keskusalkio sijoittuu molemmissa värinimeämiskokeissa purppuraan päin, Sturgesin ja Whitfieldin kokeessa jopa melkoisesti, eli kohtaan $2,5PB$ 5/12 [53]. Muista väreistä eroavat melkoisesti myös ruskea ja vaaleanpunainen, joiden värikylläisyystaso on huomattavasti muita keskusalkioita alhaisempi. Vaaleanpunaisen kohdalla se johtunee osaltaan esitettävän värialueen rajoista, koska vaaleanpunainen on valoisuusarvoltaan korkea väri. Toisaalta keltainen on vähintään yhtä vaalea väri, mutta sille värikylläisyysarvot ovat huomattavan korkeat [3], [53]. Ruskea puolestaan on sekä tumma että värikylläisyysdeltaan matala väri, ja edustaakin kirkkaiden ja puh-taiden värien joukossa yleisesti ”likaisia” sävyjä.

⁸R = red, YR = yellow-red, Y = yellow, GY = green-yellow, G = green, BG = blue-green, B = blue, PB = purple-blue, P = purple, RP = red-purple

	5 R	10 R	5 YR	10 YR	5 Y	10 Y	5 GY	10 GY	5 G	10 G	5 BG	10 BG	5 B	10 B	5 PB	10 PB	5 P	10 P	5 RP	10 RP
9																				
8	VP					K														
7																				
6			O																	
5														S						
4	P			R					VI								Pu			
3																				
2																				
1																				

Kuva 11: Keskusalkiot Berlinin ja Kayn [3] mukaan

	5 R	10 R	5 YR	10 YR	5 Y	10 Y	5 GY	10 GY	5 G	10 G	5 BG	10 BG	5 B	10 B	5 PB	10 PB	5 P	10 P	5 RP	10 RP
9						K														
8																				
7																				VP
6			O																	
5														S						
4	P			R					VI								Pu			
3																				
2																				
1																				

Kuva 12: Keskusalkiot Sturgesin ja Whitfieldin [53] mukaan

Väriinimeämiskokeissa perusväriluokat eivät kata koko käytettävissä olevaa väriavaruutta, vaan niiden väliin jää perusväriluokkiin kuulumattomia värejä. Perusvärit eivät myöskään ole levinneet tasaisesti väriavaruuteen, ja siksi perusväriluokkien keskusalkioiden välille jää paikoitellen runsaastikin tyhjää tilaa. Kaikista vähiten perusväriluokiksi nimeämättömiä alkioita kuvan 10 kaltaisessa väriavaruudessa on sinisen ja purppuran väriluokan välillä [53]. Eniten tyhjää tilaa on sinisen ja vihreän ja jonkin verran vihreän ja ruskean tai keltaisen välillä [53]. On mahdollista, että jossain vaiheessa kielen kehittyessä nämä tyhjät alueet täyttyvät, joko nykyisten väriluokkien alueiden muuttuessa tai uusien perusväriluokkien syntyessä. Tyhjät alueet nimetään nykyisin termeillä *turkoosi* ja *oliivi* tai *lime*, jotka ovat kyllä monissa kielissä yleisiä, mutta eivät lähelläkään perusväritermin statusta [6], [55].

Itseorganisoivan kartan tuottamat keskusalkiot ovat hyvin erilaisia kuin väriinimeämiskokeissa löydetty tai ei-negatiivisen matriisihajotelman tuottamat. Keskusalkioita tarkastellessa huomaa, kuinka ne ovat spektreiltään tasaisempia ja sileämpiä kuin muut ja väriltään siten harmaampia. Ne eivät ole yhtä puhtaita ja värikylläisiä.

Tämä näkyy erityisen selkeästi kuvassa 15, jossa ovat Sturgesin ja Whitfieldin värinimeämiskokeen sekä molempien laskennallisten menetelmien kromaattisten keskusalkioiden sRGB-esitykset ja spektrit. Itseorganisoivan kartan keskusalkiot ovat luokkiensa artimeettisia keskiarvoja, mikä vaikuttaa spektrien sileyteen.

	5 R	10 R	5 YR	10 YR	5 Y	10 Y	5 GY	10 GY	5 G	10 G	5 BG	10 BG	5 B	10 B	5 PB	10 PB	5 P	10 P	5 RP	10 RP	
9																					
8																					
7					K																
6														S							
5																					
4																					P
3																					
2																					
1																					

Kuva 13: Itseorganisoivan kartan tuottamat keskusalkiot

Itseorganisoivan kartan keskusalkioiden sijoittuminen väriavaruuteen (kuva 13) on hieman erilaista kuin muissa tapauksissa. Keskusalkioista syntyy selkeästi havaittava rypäs sinisen ja purppuran alueelle. Värinimeämiskokeiden tapauksessa punaisen määrittämä alue on selkeämmin erityisasemassa ja ei-negatiivisella matriisihajotelmallä saadut keskusalkiot jakautuvat hyvin tasaisesti koko väriavaruuteen kattaen kaikki sävyt. Yksi näyte on lähes harmaa (5Y 6/1), mutta muuten neutraaleja ryhmiä ei syntynyt. Myös valoisuustaso on lähes vakio keskusalkioiden kesken, eikä jakoa tummiin ja vaaleisiin väreihin synny. Tästä syystä myöskään keltaisen luokan keskusalkioiksi valikoituva näyte ei vastaa kovinkaan hyvin värinimeämiskokeissa keltaisen luokan parhaaksi edustajaksi valittua väriä. Ensisijaiset kromaattiset perusvärit ovat kuitenkin tunnistettavissa, vaikka toissijaisia ei kartan keskusalkiosta voi tunnistaakaan.

Sinisen alueen painottuminen voi johtua standardivalonlähteen C käyttämisestä ryhmiteltävän värikirjan painottamiseen. Valonlähdettä käytettiin, koska itseorganisoivan kartan värinerottelukyky Farnsworth-Munsell 100 -värinäköttestin tuloksella mitattuna oli painotetuille spektreille parempi kuin heijastusspektreille [48]. Perusväreistä vihreä (2GY 6/4) on huomattavasti painottunut keltaisen suuntaan kun vertaa sitä värinimeämiskokeiden tuloksiin. Sininen ja punainen ovat hieman lähempänä toisiaan, eli purppuraan päin siirtyneitä, tosin sininen tuskin huomattavasti.

Ei-negatiivisen matriisihajotelman tuloksissa ovat ensisijaiset perusvärit aivan selkeästi tunnistettavissa, tosin vihreä ja keltainen ovat vaaleuden suhteen kääntyneet päin-

	5 R	10 R	5 YR	10 YR	5 Y	10 Y	5 GY	10 GY	5 G	10 G	5 BG	10 BG	5 B	10 B	5 PB	10 PB	5 P	10 P	5 RP	10 RP	
9																					
8								V													
7					K																
6																					
5																				VP	
4		P														S					
3																	Pu				
2																					
1																					

Kuva 14: Ei-negatiivisen matriisihajotelman tuottamat keskusalkiot

vastoin. Toissijaisista perusväreistä purppura vastaa todellisuutta hyvin ja vaaleanpunainen kohtuullisesti, joten ne on merkitty perusväriluokkina sekä taulukkoon 8 että kuvaan 14. Vaaleanpunaisen kuuluisi tosin olla jonkin verran vaaleampi, mutta muuten sijoittuminen värikartalla on samanlaista kuin värinnimeämiskokeiden tuloksissakin.

Kahden viimeisen toissijaisen perusvärin tulisi olla ruskea ja oranssi, ja siten sijoittua punaisen läheisyyteen: punaisesta keltaiseen ja vihreään päin. Ei-negatiivinen matriisihajotelma antaa kuitenkin tulokseksi kaksi sinisen ja vihreän väliin sijoittuvaa väriä. Tästä syystä keskusalkiot sijoittuvat väriavaruuteen huomattavasti tasaisemmin kuin värinnimeämiskokeiden tulokset, joissa punaisen ympärille syntyy selkeästi havaittava rypäs, ja sinisen ja vihreän välinen suuri alue on täysin ilman omaa keskusväriä – turkoosi kun ei ole perusväri. Myös värien vaaleudessa syntyy eroja ei-negatiivisen matriisihajotelman keskusalkioita tutkittaessa.

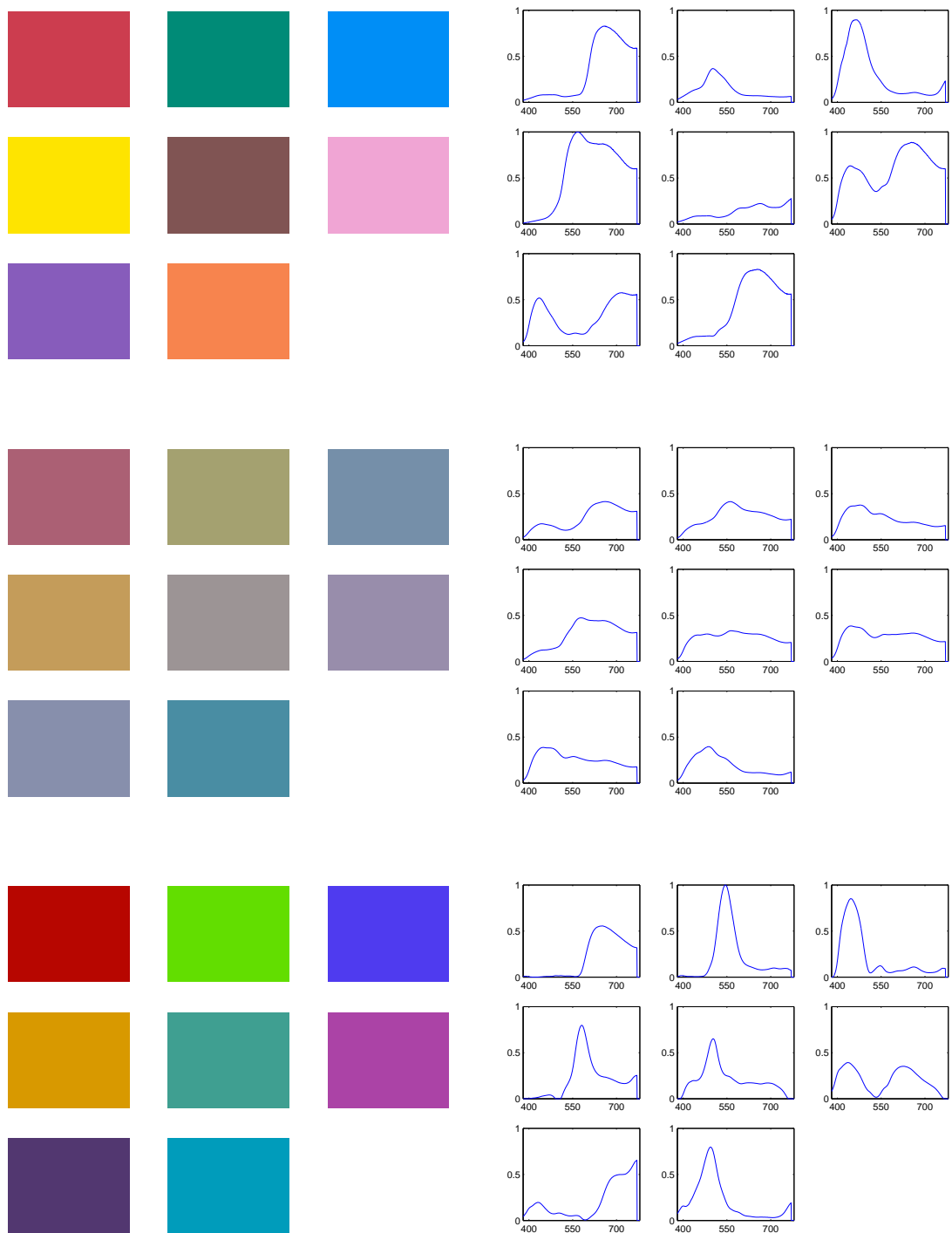
Kokonaisuudessaan ei-negatiivisen matriisihajotelman tulos on kuitenkin samankaltaisempi värinnimeämiskokeiden tulosten kanssa kuin itseorganisoivalla kartalla. Vihreä sijoittuu tässäkin tapauksessa huomattavasti keltaiseen päin (8GY 8/19), ja on todella värikylläinen ja vaalea. Samoin sininen (8PB 4/22) on siirtynyt purppuraan päin. Purppura ja vaaleanpunainen ovat jonkun verran tummempia kuin värinnimeämiskokeissa ja värikylläisyysarvoiltaan muita keskusvärejä matalampia, kuten toinen turkooseistakin näytteistä. Selkeä ruskea väri jää kuitenkin puuttumaan tässäkin tapauksessa.

Ei-negatiivinen matriisihajotelma tuottaa siis kaikista kapeimmat keskusalkioiden spektrit ja itseorganisoiva kartta puolestaan kaikista sileimmät ja tasaisimmat. Kuvassa 15 ovat kromaattisten keskusalkioiden sRGB-esitykset ja spektrit samassa järjestyk-

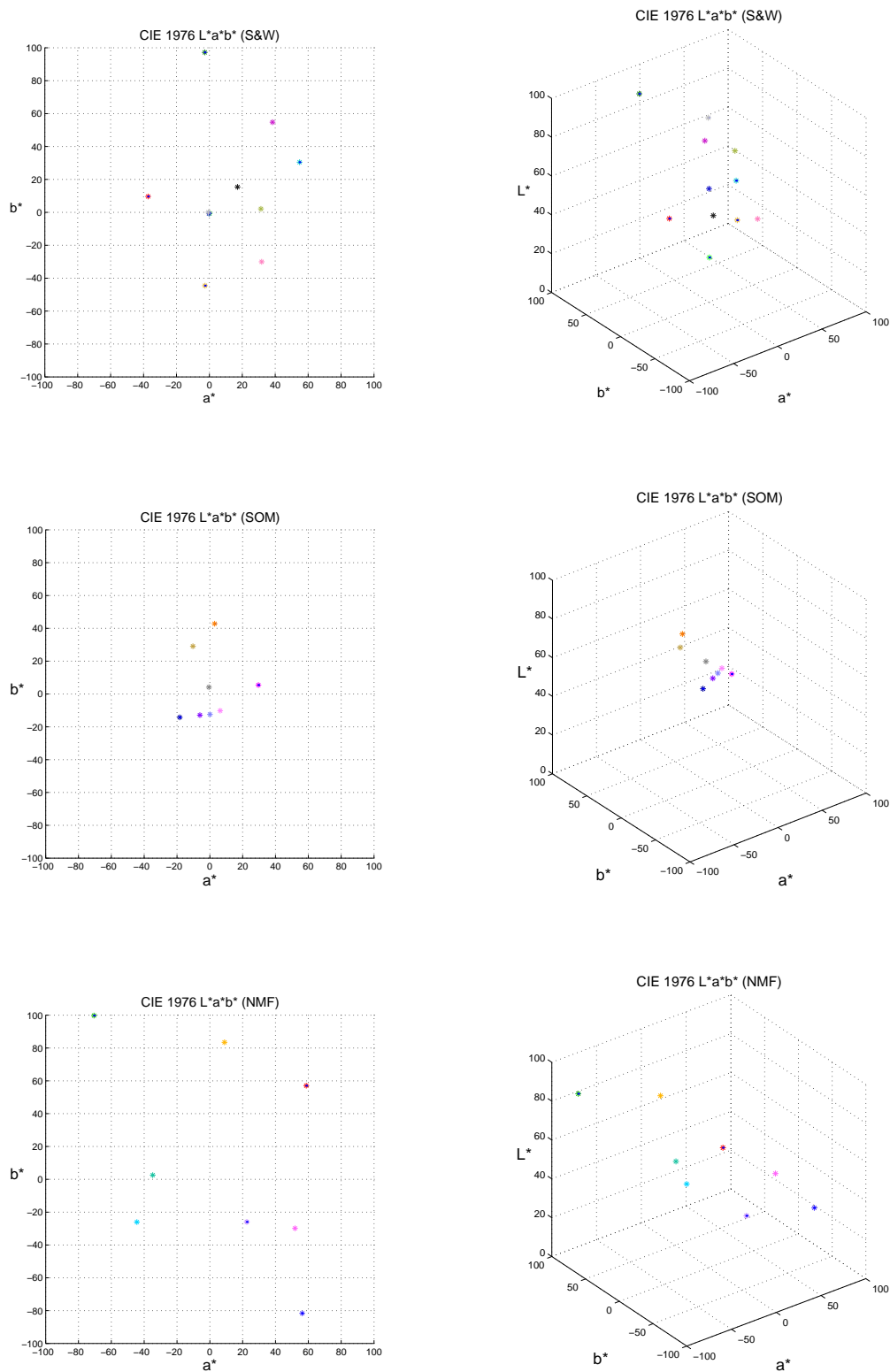
sessä kuin keskusalkiot on esitetty taulukossa 8: ylimpänä ovat värinnimeämiskokeen [53], keskellä itseorganisoivan kartan ja alimpana ei-negatiivisen matriisihajotelman keskusalkiot. Ensisijaisten perusvärien eli kuvissa neljän ensimmäisen näytteen spektrit vastaavat toisiaan melko hyvin, mutta sen jälkeen vaihtelua on enemmän. CIE $L^*a^*b^*$ -värikoordinaatistossa (kuva 16) värinnimeämiskokeiden alkio asetuvat melko tasaisesti neutraalien näytteiden ympärille. Ei-negatiivisen matriisihajotelman näytteiden värikylläisyydet ovat suurimmat, joten myös hajonta väriavaruudessa on suurin. Itseorganisoivan kartan keskusalkiot puolestaan ovat supussa lähellä koordinaatiston keskustaa, koska värit ovat yleisesti harmahtavia. Myös tässä kuvassa ylimpänä ovat värinnimeämiskokeen [53], keskellä itseorganisoivan kartan ja alimpana ei-negatiivisen matriisihajotelman tuottamat keskusalkiot.

Koska kahden värinnimeämiskokeen tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, on seuraavissa kuvissa esitetty vain Sturgesin ja Whitfieldin [53] kokeen keskusalkiot. Heidän värinnimeämiskoettaan käsitellään tässä ensisijaisena erityisesti koejärjestelyjen takia: sekä värinäytteiden että koehenkilöiden määrä on suurempi kuin Berlinin ja Kayn koeksessa.

Kaikissa tämän luvun kuvissa, joissa esitetään keskusalkioiden spektrejä, värinäytteitä tai -koordinaatteja, on sekä itseorganisoivan kartan että ei-negatiivisen matriisihajotelman tuloksia muokattu keskusalkioiden järjestyksen osalta. Itseorganisoiva karttahan määritelmänsä mukaan tuottaa kartan, jossa vierekkäiset solut ovat muodoltaan lähimpänä toisiaan. Nyt tulokset kuitenkin esitetään järjestyksessä, joka parhaiten vastaa perusvärien sisäistä hierarkiaa. Kuvissa värit ovat siten järjestyksessä punainen, vihreä, sininen, keltainen, ruskea, vaaleanpunainen, purppura ja oranssi riippumatta siitä, missä järjestyksessä itseorganisoiva kartta tai ei-negatiivinen matriisihajotelma on ne tuottanut.



Kuva 15: *Glossy*-tietokannan kromaattiset keskusalkiot: ylimpänä värinnimeämisko-keen [53], keskellä itseorganisoivan kartan ja alimpana ei-negatiivisen matriisihajotel-
man keskusalkiot



Kuva 16: *Glossy*-tietokannan kromaattiset keskusalkiot CIE L*a*b* -avaruudessa: ylimpänä värinnimeämiskokeen [53], keskellä itseorganoivan kartan ja alimpana ei-negatiivisen matriisihajotelman keskusalkiot

8.3 *Matte*-kirjan keskusalkiot

Matte-värikirjan käsittely on melko erilaista kuin oli *Glossy*-kirjan käsittely edellisessä kohdassa, koska vertailuarvoina käytetään nyt Gershon Buchsbaumin ja Orin Blochin [7] tuloksia, jotka on saatu ei-negatiivista matriisihajotelmaa käyttämällä. Laskennallisia tuloksia ei-negatiiviselta matriisihajotelmalta ja itseorganisoivalta kartalta ei *Matte*-kirjan tapauksessa verratakaan värinimmeämiskokeiden tuloksiin, vaan toisiin laskennallisiin tuloksiin. Tarkoituksena on selvittää, vastaavatko tätä tutkielmaa varten NMF-algoritmillä tehdyt laskut Buchsbaumin ja Blochin artikkelissaan [7] esittämiä tuloksia, eli ovatko nyt muodostetut väriluokat samoja kuin heidän tutkimuksessaan.

Matte-tietokannalle tehtyjä laskuja on useampia kuin *Glossy*-tietokannalle, koska tutkitaan syntyviä väriluokkia luokkien määrän muuttuessa. Keskusalkioiden sijoittumista väriavaruuteen tutkitaan ei-negatiivisen matriisihajotelman ja itseorganisoivan kartan avulla kahdeksalle kromaattiselle perusvärille, kuten edellä tehtiin *Glossy*-kirjalle. Lisäksi tutkitaan mitä väriluokkia keskusalkiot edustavat silloin, kun keskusalkiota lasketaan neljä (ensisijaiset kromaattiset perusvärit), kuusi (kaikki ensisijaiset perusvärit) ja yksitoista (kaikki perusvärit). Buchsbaum ja Bloch laskivat artikkelissaan keskusalkiot tapaukselle, jossa väriluokkia on kymmenen [7], mutta tätä tutkielmaa varten on laskettu jako yhteentoista väriluokkaan Berlinin ja Kayn [3] perusvärioletuksen mukaan.

Taulukossa 9 ovat ei-negatiivisella matriisihajotelmalla ja itseorganisoivalla kartalla laskettujen väriluokkien keskusalkioiden Munsell-koodit ja väriluokan nimi, kun luokkia on neljä, kuusi, kahdeksan ja yksitoista, sekä Buchsbaumin ja Blochin saamien luokkien nimet. Lasketut väriluokat on nimetty sen värinimeämiskokeen luokan mukaan, jonka keskusalkio on lähimpänä laskettua keskusalkiota. Viimeisessä kohdassa Buchsbaumin ja Blochin luokkien nimet on kursivoitu, koska luokkien määrä ei vastaa laskettujen luokkien määrää. Tuloksista saa kuitenkin kuvan väriluokkien jakautumisesta väriavaruuteen, kun luokkia on useampia kuin kromaattisten ensisijaisten perusvärien lukumäärä.

Laskennallisten menetelmien tuottamat perusvärit erovat melko paljon *Glossy*-kirjan perusväreistä, kun tutkitaan kahdeksan väriluokan tapausta. Ei-negatiivisen matriisihajotelman keskusalkiot *Matte*-kirjalle (kuva 17 sivulla 85) muistuttavat huomattavan paljon enemmän värinimeämiskokeiden [3], [53] tuloksia kuin *Glossy*-kirjan tapauksessa (kuva 14 sivulla 79). Punaisen ympärille muodostuu samankaltainen rypäs kuin

Taulukko 9: Väriluokkien keskusalkiot Matte-tietokannassa

	NMF				SOM				B&B [7]
	Väri	H	V	C	Väri	H	V	C	Väri
4	punainen	9R	4	17	sininen	6B	5	5	punainen
	vihreä	6G	8	16	purppura	2PB	6	2	vihreä
	sininen	7PB	5	21	oranssi	6YR	6	4	sininen
	keltainen	6Y	8	16	harmaa	4Y	6	0	keltainen
6	punainen	5R	3	10	punainen	3YR	6	4	punainen
	vihreä	6G	7	15	sininen	10B	6	3	vihreä
	sininen	5PB	5	16	sininen	5B	5	6	sininen
	keltainen	3GY	8	15	keltainen	7Y	6	2	keltainen
	purppura	9PB	5	17	purppura	5PB	6	3	purppura
	oranssi	8R	6	13	harmaa	4Y	6	0	oranssi
8	punainen	3R	5	13	punainen	3R	5	6	punainen
	vihreä	10GY	8	18	vihreä	6BG	6	5	vihreä
	sininen	5PB	5	16	sininen	1PB	5	7	vihreä
	keltainen	10YR	6	13	keltainen	6Y	7	4	sininen
	oranssi	6YR	6	10	oranssi	1GY	6	2	sininen
	punainen	3R	3	7	purppura	4PB	6	3	keltainen
	sininen	8PB	4	16	purppura	2P	6	2	purppura
	vihreä	6BG	6	11	sininen	2B	6	3	ruskea
11	punainen	8R	3	11	punainen	7RP	5	7	<i>punainen</i>
	vihreä	9GY	8	16	vihreä	4G	7	3	<i>punainen</i>
	sininen	5PB	5	16	sininen	3PB	5	7	<i>vihreä</i>
	keltainen	9Y	7	10	keltainen	7Y	7	4	<i>vihreä</i>
	oranssi	4YR	6	14	oranssi	5YR	6	4	<i>sininen</i>
	purppura	8PB	4	11	purppura	6PB	6	4	<i>sininen</i>
	purppura	9PB	4	9	punainen	4P	6	3	<i>keltainen</i>
	purppura	9PB	5	8	sininen	3B	5	6	<i>purppura</i>
	punainen	9RP	5	11	sininen	4PB	5	5	<i>oranssi</i>
	sininen	1PB	6	4	vihreä	5BG	6	4	<i>ruskea</i>
	vihreä	3GB	6	14	vihreä	6GY	7	3	–

värinnimeämiskokeissakin, eikä väriluokkien jakautuminen avaruuden eri osiin ole läheskään yhtä tasaista. Sekä sininen että punainen väri jakautuvat kahdeksi hyvin lähekkäin sijaitsevaksi luokaksi, joista punaisen lähellä oleva ($3R\ 3/7$) vastaa hieman ruskeaa ja sinisen luona oleva ($8PB\ 4/16$) purppuraa perusväriä. Ne ovat kuitenkin liian lähellä ensisijaisia perusvärejä voidakseen todella olla itsenäisiä toissijaisia perusvärejä.

Sinisen ja vihreän luokan välille muodostuu yksi (värinnimeämiskokeisiin nähden ylimääräinen) luokka, mutta sitä voi pitää jopa oletettavana. Muuten koko laaja sini-vihreä alue jäisi kokonaan ilman edustusta, joka vaatisi enemmän selityksiä kuin sinivihreän luokan syntyminen. Keltainen keskusalkio on hyvin tumma ($V = 6$) ja punertava, joten se muistuttaa oranssia. Vihreä liukuu keltaista kohti samalla tavalla kuin *Glossy*-kirjankin kohdalla. Sinisen ja punaisen jakautuneissa keskusalkioissa erikoista on se, että ne ovat sävyltään hyvin lähellä parejaan. Punaisen kohdalla ero kahden näytteen välillä on selkeä, koska toinen on tummempi ja värikylläisyydeltään matalampi – lähellä ruskeaa – mutta sinisen kohdalla ei eroa tahdo löytyä.

	5 R	10 R	5 YR	10 YR	5 Y	10 Y	5 GY	10 GY	5 G	10 G	5 BG	10 BG	5 B	10 B	5 PB	10 PB	5 P	10 P	5 RP	10 RP
9																				
8																				
7																				
6																				
5	P			O	K											S				
4																				
3																				
2																				
1																				

Kuva 17: Ei-negatiivisen matriisihajotelman kromaattiset keskusalkiot (*Matte*)

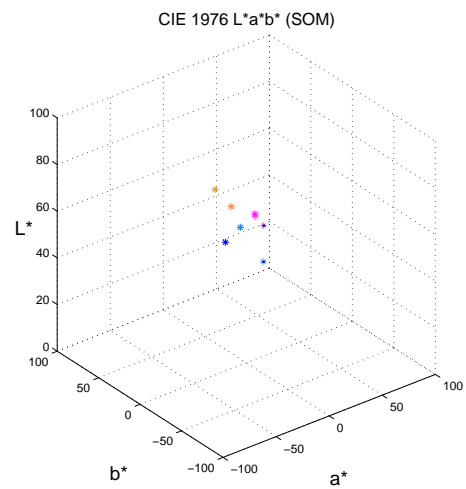
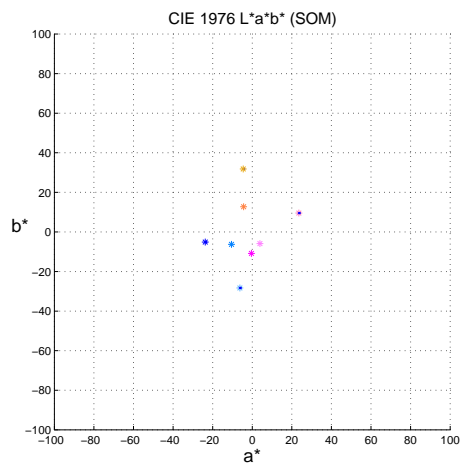
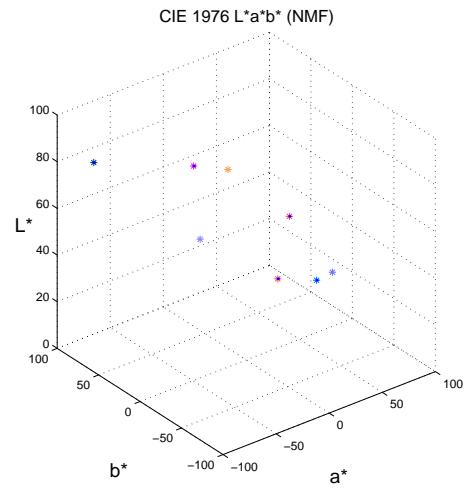
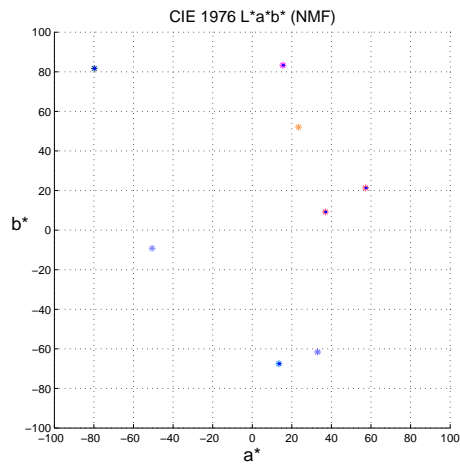
Matte-kirjan tapauksessa laskennallisten menetelmien tuottamat tulokset muistuttavat toisiaan huomattavasti enemmän kuin *Glossy*-kirjan kohdalla. Myös itseorganisoivan kartan keskusalkioista (kuva 18) on nyt löydettävissä muutamia selkeitä toissijaisia perusvärejä eli oranssi ja purppura. Oranssi ei tosin aivan yhtä hyvin asetu paikalleen matalan värikylläisyydensä takia. Vihreä näyte on itseorganisoivalla kartalla ryhmitellylle *Matte*-kirjalle huomattavasti sinisempi ($6BG\ 6/5$) kuin muissa tapauksissa. Muutenkin ryhmittelyn tulos painottuu jälleen sinisten sävyjen alueelle. Sama ilmiö on havaittavissa myös *Glossy*-kirjan tapauksessa ja johtunee siis standardivalonlähteen C käytöstä tietokannan painottamiseen.

	5 R	10 R	5 YR	10 YR	5 Y	10 Y	5 GY	10 GY	5 G	10 G	5 BG	10 BG	5 B	10 B	5 PB	10 PB	5 P	10 P	5 RP	10 RP	
9																					
8																					
7					K																
6						O					V				Pu						
5	P													S							
4																					
3																					
2																					
1																					

Kuva 18: Itseorganisoivan kartan kromaattiset keskusalkiot (*Matte*)

Kuvassa 19 ovat laskettujen keskusalkioiden sRGB-esitykset ja spektrit järjestettynä perusväritermien sisäisen hierarkian mukaan. Ei-negatiivisen matriisihajotelman keskusalkiot ovat jälleen spektreiltään terävämpiä ja siten väriltään puhtaampia ja värikylläisempiä kuin itseorganisoivan kartan tuottamat. Tulosten erilaisuus johtuu käytettyjen laskennallisten menetelmien eroista: itseorganisoivan kartan ryhmien keskiarvot ovat keskusalkioina perusolemukseltaan hyvin erilaisia kuin ei-negatiivisen matriisihajotelman keskusvektorit.

Yhtäläisyyksiäkin käytettyjen laskennallisten menetelmien tuloksissa on. Keltainen väriluokka ei kummassakaan tapauksessa tule edes kohtuullisella tavalla esitetyksi, vaan keltaiseksi valitut näytteet ovat lähinnä oransseja, jopa ruskehtavia. Sininen ja vihreä ovat kahden käytetyn menetelmän samankaltaisimmat alkio, muiden spektrien väliltä samankaltaisuutta on lähes mahdotonta löytää. Kuvassa 20 ovat *Matte*-kirjan kahdeksan keskusalkion sijainnit CIE $L^*a^*b^*$ -avaruudessa, ylemmissä kuvissa ovat ei-negatiivisen matriisihajotelman ja alemmissä itseorganisoivan kartan tuottamat keskusalkiot.



Kuva 20: *Matte*-tietokannan kromaattiset keskusalkiot CIE $L^*a^*b^*$ -avaruudessa: ylhäällä ei-negatiivisen matriisihajotelman ja alhaalla itseorganoisoivan kartan keskusalkiot

8.4 Kahdestoista perusväri?

Väri-nimeämiskokeiden tuloksissa väri-luokkien keskusalkiot jakautuvat erittäin epä-tasaisesti väri-avaruuteen. Punaisen ympärille muodostuu tiheämpi rypäs, kun taas vihreän ja osin sinisenkin väri-luokan ympäristö jää suureksi jakamattomaksi alueek-si. Mahdollisesta puuttuvasta tai uudesta, vasta vakiintumassa olevasta perusväristä on monenlaisia arvioita. Koska kieli kehittyy jatkuvasti, ei ole mitään syytä olettaa, että perusväritermien lukumäärä pysyisi jatkuvasti yhdessätoista.

Mahdollisia uusia perusvärejä voisivat olla *turkoosi*, joka täyttäisi sinisen ja vihreän väri-luokan välisen suuren jakamattoman tilan tai *oliivi / lime*, joka sijoittuisi vihreän ja keltaisen väliin [55]. Myös punaisen ja ruskean väri-n välimaastoon on uutta väriä kaavailtu: unkarin *piros* (punainen) ja *vörös* (tummanpunainen) sekä ranskan *brun* (ruskea) ja *marron* (kastanjanruskea, tumma punertavan ruskea) ovat tästä esimerk-keinä [55]. Erikoisessa asemassa on myös venäjä, jossa on kaksi väritermiä siniselle, tummalle ja vaalealle erikseen [3].

Aikaisemmin tässä luvussa on esitelty ei-negatiivisen matriisihajotelman ja itseorga-nisoivan kartan tuottamia keskusalkioita Munsellin värikirjojen painoksille *Glossy* ja *Matte*. Laskennallisista menetelmistä ei-negatiivisen matriisihajotelman keskusalkiot vastaavat paremmin väri-nimeämiskokeiden keskusalkioita kuin itseorganisoivan kar-tan keskusalkiot. Ei-negatiivista matriisihajotelmaa käytettäessä *Matte*-kirjasta löyde-tyt keskusalkiot ovat lähempänä väri-nimeämiskokeiden keskusalkioita kuin *Glossy*-kirjan keskusalkiot. Tästä syystä kahdennentoista perusväri-n etsimiseen käytetään ei-negatiivista matriisihajotelmaa *Matte*-kirjalle.

Edellisissä kohdissa jätettiin neutraalit väri-luokat eli musta, valkoinen ja harmaa koko-naan analyysin ulkopuolelle. Kumpikaan laskennallinen menetelmä ei tuottanut neut-raaleja keskusalkioita, joten neutraalien luokkien tutkiminen ei tässä työssä käytetyillä menetelmillä ole mahdollista. Samasta syystä lasketaan nyt ei-negatiivisen matriisiha-jotelman tulos yhdeksällä kantavektorilla, ei kahdellatoista. Koska ei ole mitään syytä olettaa minkään neutraalin luokan olevan jakautumassa kahdeksi, ei neutraalien luok-kien jättäminen analyysin ulkopuolelle vaikuttane tulokseen.

Kuvassa 21 on esitetty *Matte*-kirjan yhdeksän kromaattista keskusalkiota. Ne on esi-tetty samanlaisessa väri-ruudukossa kuin edellistenkin kohtien keskusalkiot. Väri-nimeämiskokeiden keskusalkioita vastaavat alkioit on merkitty kirjaintunnuksilla ja

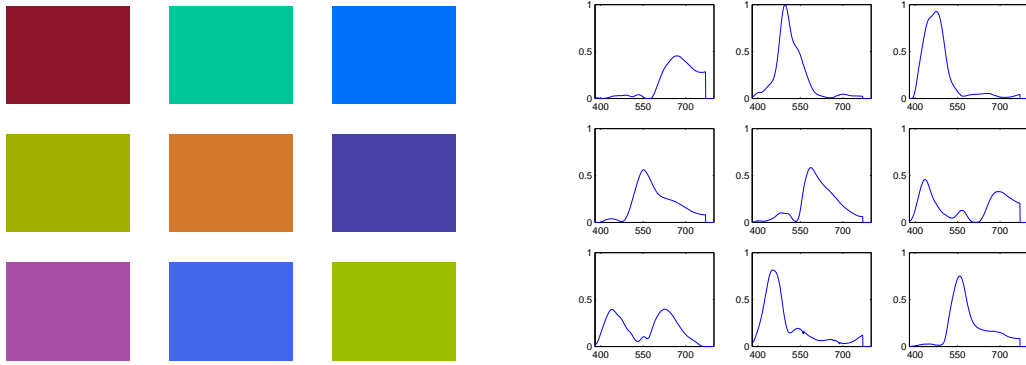
esitetty värillisinä. Harmaalla on merkitty ne kaksi näytettä, jotka eivät vastaa värinimeämiskokeiden keskusalkioita.

	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10	5	10
	R	R	YR	YR	Y	Y	GY	GY	G	G	BG	BG	B	B	PB	PB	P	P	RP	RP		
9																						
8																						
7							K			V												
6			O																			
5															S					VP		
4																						
3	P															Pu						
2																						
1																						

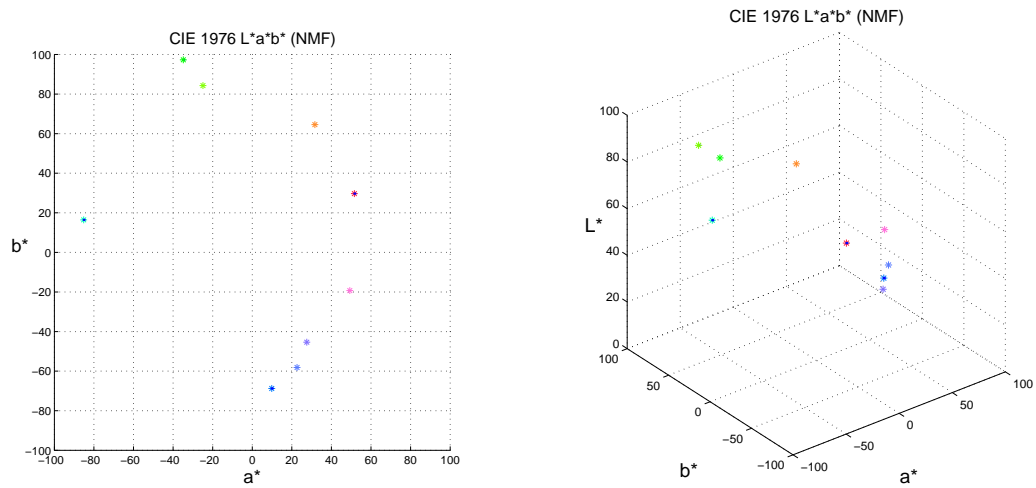
Kuva 21: Ei-negatiivisen matriisihajotelman yhdeksän kromaattista keskusalkiota

Keskusalkioiden jakautuminen väriavaruuteen on hieman tasaisempaa kuin kahdeksan kromaattisen perusvärin kohdalla. Kun *Matte*-tietokannalle ei-negatiivisella matriisihajotelmalla lasketaan kahdeksan keskusalkiota, jää sinisen ja punaisen värialueen välille yllättävä tyhjä alue (kuva 17 sivulla 85). Yhdeksän keskusalkion tapauksessa ei samanlaista tyhjää tilaa jää.

Uusi värialue muodostuu sinisen ja purppuran väliin, mutta myös keltainen on nyt paremmin omalla paikallaan kirkkaustasolla $V = 7$, vaikkakin hyvin vihertävänä. Purppura ja vaaleanpunainen ovat myös omien paikkojensa tuntumassa, mutta edelleen liian tummina. Sinisellä ja keltaisella on kaksi aivan vierekkäistä keskusalkiota, mutta muuten värialue sijoittuvat väriavaruuteen todella tasaisesti. Uusi värialue voisi siis olla muodostumassa keltaisen ja vihreän väliin täyttämään sinne värinimeämiskokeissa jäävää aukkoa. Toinen jakautunut luokka on sinisen ja purppuran tienoilla. Siitä voisi seurata sinisen luokan jakautuminen vaaleisiin ja tummiin sinisiin kuten venäjässä on tapahtunut. Sinisen ja vihreän välille ei tässä värialuekajaossa muodostunut turkoosia värialuekajausta, mutta sinisen jakautuminen kunnolla kahtia voisi myös sen synnyttää. Kieli kuitenkin kehittyy omaa tahtiaan, eikä uusien termien vakiintuminen ole läheskään samanlaista suoraviivaista toimintaa kuin uusien keskusalkioiden laskeminen ei-negatiivisen matriisihajotelman avulla.



Kuva 22: Yhdeksän kromaattista keskusalkiota (*Matte*)



Kuva 23: Yhdeksän kromaattista keskusalkiota CIE $L^*a^*b^*$ -avaruudessa

9 Yhteenveto

Kaikki ihmiset näyttävät havainnoivan ja käsittelevän värejä yhdentoista yleisinhimillisesti samalla tavalla koetun perusväriluokan kautta. Ihmisen äidinkieli, etninen tausta, ikä tai sukupuoli eivät juurikaan vaikuta hänen henkilökohtaisten perusväriluokkiensa sijoittumiseen väriavaruudessa ainakaan luokkien keskusalkioiden osalta. Luokkarajojen suhteen vaihtelua on enemmän. Koska ihmisten välillä ei ole suuria eroja värinäköjärjestelmän rakenteessa ja toiminnassa, ajatellaan yleisten perusväriluokkien olemassaolon olevan fysiologiaan pohjautuva ilmiö.

Perusvärit jaetaan ensi- ja toissijaisiin perusväriin. Ensisijaiset perusvärit eli *punainen, vihreä, sininen, keltainen, musta* ja *valkoinen* saavat erityisasemansa ihmisen värinäköjärjestelmän toiminnasta. Väriäistimuksen syntymistä kuvataan monitasoisen värinäkömallin avulla. Mallin mukaan värihavaintoa käsitellään neljällä tasolla, joista kaksi ensimmäistä sijaitsee silmän verkkokalvolla ja kaksi viimeistä aivo-kuorella. Monitasoisen värinäkömallin mukaan ihmiset aistivat värejä kahden kromaattisen opponentikanavan eli puna-vihreän ja sini-keltaisen havaintokanavan kautta. Lisäksi valoisuustieto esiintyy silmän jälkeisillä korkeammilla käsittelytasolla omana, värisävystä irrallisena akselinaan, jonka ääripäinä ovat musta ja valkoinen. Monitasoinen värinäkömalli on tällä hetkellä toimivin ja yksityiskohtaisin selitys värien havaitsemisen monimutkaisille prosesseille.

Toissijaisten perusvärien *ruskean, vaaleanpunaisen, purppuran, oranssin* ja *harmaan* asema perustuu psykologisiin seikkoihin. Harmaa tosin eroaa kromaattisista väreistä huomattavasti. Sen avulla ilmoitetaan värin kirkkautta ja värikylläisyyttä, joten sitä ei suoraan voi rinnastaa muihin toissijaisiin perusväriin. Perusväritermien hierarkiassa harmaa voi esiintyä ”villinä korttina” millä tasolla tahansa. Muut toissijaiset perusvärit tulevat aina ensisijaisten jälkeen, ruskea niistä ensimmäisenä.

Kromaattisille toissijaisille perusväreille on ominaista sijoittuminen väriavaruuteen punaisen värialueen ympärille. Punainen on kromaattisista perusväreistä ihmiselle psykologisesti keskeisin. Toissijaiset perusvärit ovat syntyneet punaisen ja muiden ensisijaisten perusvärien yhdistelminä. Ruskean asema tosin on poikkeuksellinen, koska se näyttää syntyneen punaisen ja sen vastavärin, vihreän, yhdistelmänä. Muista mahdollisista yhdistelmistä puuttuu vain punaisen ja mustan yhdistelmä. Muutamissa kielissä, esimerkiksi unkarissa, sekin on olemassa.

Brent Berlin ja Paul Kay esittivät ensimmäisenä oletuksen yhdestätoista hierakkisesta, yleisinhimillisesti samanlaisena havaitusta ja kielestä riippumattomasta perusväritermistä. Heidän teoriansa on saanut vahvistusta väri-nimeämiskokeista, joissa on tutkittu väriluokkien sijoittumisen lisäksi koehenkilöiden näytteiden nimeämiseen käyttämää aikaa. Perusväritermit nimetään nopeammin, johdonmukaisemmin ja yksimielisemmin kuin muut värit. Joissain tutkimuksissa on löydetty ero myös ensi- ja toissijaisten perusvärien välille. Perusvärit eivät kuitenkaan kata koko väriavaruutta, joten myös harvinaisemmille ja vähemmän käytetyille termeille on sijansa. Näiden termien kohdalla vaihtelu ihmisten kesken on huomattavasti suurempaa kuin perusväritermien kohdalla. Perusvärin kriteeri on, että ihmisten täytyy käyttää sitä yksimielisesti ja johdonmukaisesti, siis (lähes) kaikki ihmiset käyttävät samasta sävystä samaa termiä (lähes) aina.

Myös ihmisen värimuisti on rakentunut väriluokkien mukaan. Lähellä luokan keskustaa olevat värit paitsi nimetään nopeammin myös muistetaan paremmin kuin muut. Lisäksi muistissa olevissa väreissä tapahtuu siirtymä kohti värin luokan keskusalkiota eli luokan parasta edustajaa. Värit muistetaan puhtaampina ja värikylläisempinä kuin ne todellisuudessa ovat, koska väriluokkien keskusalkiot ovat tavallisesti hyvin värikylläisiä ja sävyltään puhtaita. Juuri tuosta muistissa olevan värin liukumisesta kohti keskusalkiota johtuu, että kaksi väriä sekoitetaan toisiinsa todenäköisimmin silloin, kun ne kuuluvat samaan väriluokkaan. Vaikka kahden näyteparin havaittava väriero olisi yhtä suuri, ei eri väriluokkiin kuuluvia näytteitä sekoiteta toisiinsa yhtä usein kuin samaan luokkaan kuuluvia.

Tässä tutkielmassa käytettiin itseorganisoivaa karttaa ja ei-negatiivista matriisihajotelmaa perusväriluokkien keskusalkioiden etsimiseen Munsellin värikirjoista. Varsinaisia väriluokkia ei tässä yhteydessä tutkittu, vaikka laskennallisia menetelmiä on niidenkin muodostamiseen käytetty. Esimerkiksi sumeaa logiikkaan perustuvia sovelluksia käyttämällä on muodostettu perusväriluokat, jotka hyvin vastaavat väri-nimeämiskokeiden tuloksia. Itseorganisoivan kartan avulla väriluokat olisi ollut helppo muodostaa, mutta ei-negatiivinen matriisihajotelma ei ryhmittelyä suoraan tee. Väriluokkien rakenteen tutkiminen jätettiin tutkielman ulkopuolelle myös siksi, että vaihtelu eri kielissä on väriluokkien reunoilla huomattavasti suurempaa kuin keskusalkion ympäristössä. Tulosten analysointi olisi siksi saavutettavaan tietomäärään nähden turhan monimutkaista. Koska väriluokkia ei laskennallisilla menetelmillä tutkittu, myös väri-nimeämiskokeissa keskityttiin vain väriluokkien keskusalkioiden sijaintien tutkimiseen.

Väriluokkien reunojen epämääräisyyden lisäksi toinen syy luokkien rakenteen analysoinnin poisjättämiselle on ero itseorganisoivan kartan tuottaman ryhmittelyn ja värinimeämiskokeiden väriluokkien rakenteessa. Itseorganisoivan kartan ryhmittely kattaa koko käytetyn väriavaruuden, eli jokainen ryhmiteltävä alkio kuuluu johonkin perusväriluokkaan. Kartan koko ilmoittaa näiden luokkien lukumäärän. Värinimeämiskokeessa osa näytteistä jää ilman yksimielisesti ja johdonmukaisesti käytettyä väritermiä ja siten perusväriluokkien ulkopuolelle. Mahdollisten väriluokkien lukumäärä ei siten ole ennen värinimeämiskokeen suorittamista tiedossa.

Itseorganisoivalla kartalla ryhmiteltävän tietokannan spektrit täytyy ennen ryhmittelyä normalisoida. Normalisoitujen spektrien avulla muodostetun kartan solut eivät sovi keskusalkioiksi, koska normalisoinnin seurauksena spektreistä häviää tieto näytteiden valoisuusarvoista. Normalisoidun tietokannan ryhmittelyn jälkeen alkuperäisen, normalisoimattoman tietokannan spektreistä muodostetaan täysin vastaavat ryhmät. Sen jälkeen keskusalkio lasketaan ryhmän kaikkien spektrien keskiarvona.

Keskiarvoina lasketut keskusalkiot ovat spektreiltään huomattavasti tasaisempia kuin värinimeämiskokeen tai ei-negatiivisen matriisihajotelman keskusalkiot. Ryhmän keskiarvoon perustuvassa keskusalkion määrittämisessä väriluokkien rajat vaikuttavat liian paljon keskusalkioihin, koska sekä lähellä luokan parhaita näytteitä olevat että aivan luokan reunoilla olevat värit vaikuttavat lopputulokseen yhtä voimakkaasti. Asian pitäisi kuitenkin olla juuri päinvastoin, eli keskusalkio on omalla paikallaan ja väriluokka muodostuu sen ympärille. Mikäli luokittelu itseorganisoivan kartan tapaisella ryhmittelymenetelmällä näin käytettynä halutaan tehdä, olisi tarpeen pystyä jollakin kriteerillä rajaamaan väriluokasta pois liian kaukana keskusalkiosta olevat alkiot, tai ainakin vähentämään niiden painoarvoa suhteessa ryhmän keskustan alkioihin. Koska väriluokat ovat kooltaan hyvin erisuuruisia, saattaa näytteen ja keskusalkion etäisyyden käyttäminen kriteerinä olla hankalaa. Edes värinimeämiskokeiden väriluokkien kohdalla tämän rajan löytäminen ei aina ole aivan yksinkertaista.

Ei-negatiivista matriisihajotelmaa käytettäessä vastaavaa ongelmaa ei synny, koska siinä ei muodosteta ryhmiä keskusalkioiden laskemiseksi. Laskennan tuloksena saadaan tietokannan koodauksen keskusvektorit, joita niiden ei-negatiivisuuden vuoksi voidaan suoraan käyttää väriluokkien keskusalkioina. Lasketut keskusvektorit ovat usein värispektreinä värinimeämiskokeiden keskusalkioita teräväpiirteisempiä, joten ei-negatiivisen matriisihajotelman tuottamat väriluokkien keskusalkiot ovat värikylläisempiä ja puhtaampia kuin värinimeämiskokeissa saadut. Ei-negatiivinen mat-

riisihajotelma näyttää sopivan väritietokannan luokkien keskusalkioiden etsimiseen itseorganisoivaa karttaa paremmin. Lisäksi eroa ilmenee jonkin verran siinä, onko käytettävässä tietokannassa mukana neutraaleja näytteitä vai ei. Itseorganisoiva kartta ja ei-negatiivinen matriisihajotelma eivät kumpikaan tuota muita neutraaleja luokkia kuin korkeintaan harmaan, vaikka mustia ja valkoisiakin olisi tietokannassa mukana. Laskennallisten menetelmien tulokset muistuttavat värinnimeämiskokeiden tuloksia Munsellin värikirjojen perusteella enemmän silloin, kun laskenta tehdään pelkästään kromaattisia näytteitä sisältävälle tietokannalle.

Kun neutraalit väriluokat jätetään huomioimatta, toistuvat lasketut ensisijaiset perusvärit toissijaisia paremmin verrattaessa värinnimeämiskokeiden tuloksiin. Koska laskenta perustuu pelkästään värien spektreihin, voi se olla osoitus ensisijaisten perusvärien erityisyydestä muutenkin kuin ihmisen värinäköjärjestelmässä. Eräs selitys voi liittyä perusväriluokkien sisäiseen rakenteeseen: ensisijaiset perusvärit ovat puhtaita sävyjä, mutta toissijaiset muodostuvat kahden ensisijaisen perusvärin yhdistelmänä.

Lähteet

- [1] Aronoff, M. (2003) Lexemes. *International Encyclopedia of Linguistics*, 2. painos, 2. osa (toim. Frawley, W. J.), Oxford University Press, New York, 325.
- [2] Benavente, R., Vanrell, M. (2004) Fuzzy Colour Naming Based on Sigmoid Membership Functions. *Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision*, Society for Imaging Science and Technology, Aachen, 135-138.
- [3] Berlin, B., Kay, P. (1969) *Basic Color Terms: Their Universality and Evolution*. University of California Press, Berkeley.
- [4] Bimler, D. L., Kirkland, J., Jameson, K.A. (2004) Quantifying variations in personal color spaces: Are there sex differences in color vision? *Color Research and Application* **29**(2), 128-134.
- [5] Boynton, R. M., Olson, C. X. (1987) Locating Basic Colors in the OSA Space. *Color Research and Application* **12**, 94-105.
- [6] Boynton, R. M., Olson, C. X. (1990) Saliency of Chromatic Basic Color Terms Confirmed by Three Measures. *Vision Research* **30**(9), 1311-1317.
- [7] Buchsbaum, G., Bloch, O. (2002) Color categories revealed by non-negative matrix factorization of Munsell color spectra. *Vision Research* **42**(2), 559-563.
- [8] Buck, S. L. (2001) What is the hue of rod vision? *Color Research and Application* **26**(S1), S57-S59.
- [9] CIE Publication 15.2 (1986) *Colorimetry*, 2. painos. Commission Internationale de l'Éclairage, Wien.
- [10] Crawford, T. D. (1982) Defining "Basic Color Term". *Anthropological Linguistics* **24**(3), 228-343.
- [11] Dedrick, D. (1996) Color language universality and evolution: On the explanation for basic color terms. *Philosophical Psychology* **9**(4), 497-522.
- [12] De Valois, R. L., De Valois, K. K. (1993) A Multi-Stage Color Model. *Vision Research* **33**(8), 1053-1065.

- [13] De Valois, R. L., De Valois, K. K., Mahon, L. E. (2000) Contribution of S opponent cells to color appearance. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **97**(1), 512-517.
- [14] Faubert, J., Bellefeuille, A. (2002) Aging effects on intra- and inter-attribute spatial frequency information for luminance, color, and working memory. *Vision Research* **42**(3), 369-378.
- [15] de Fez, M. D., Capilla, P., Luque, M. J., Pérez-Carpinell, J., del Pozo, J. C. (2001) Asymmetric Colour Matching: Memory Matching Versus Simultaneous Matching. *Color Research and Application* **26**(6), 458-468.
- [16] File, P. E. (1980) Visual Memory for Colour. *Acta Psychologica* **46**(2), 103-114.
- [17] Frank, J. (1990) Gender differences in color naming: Direct mail order advertisements. *American Speech* **65**(2), 114-126.
- [18] Goldstein, E. B. (1999) *Sensation and Perception*, 5. painos. Brooks/Cole, Pacific Grove.
- [19] Heider, E. R. (1972) Probabilities, Sampling, and Ethnographic Method: The Case of Dani Colour Names. *Man* **7**(3), 448-466.
- [20] Kaiser, P. K., Boynton, R. M. (1996) *Human Color Vision*, 2. painos. Optical Society of America, Washington.
- [21] Kay, P., McDaniell, C. K. (1978) The Linguistic Significance of the Meanings of Basic Color Terms. *Language* **54**(3), 610-646.
- [22] Kay, P., Kempton, W. (1984) What Is the Sapir-Whorf Hypothesis? *American Anthropologist* **86**(1), 65-79.
- [23] Kay, P., Berlin, B., Maffi, L., Merrifield, W. (1997) Color Naming Across Languages. *Color Categories in Thought and Language* (toim. Hardin, C.L., Maffi, L.), Cambridge University Press, Cambridge. Saatavana myös: <http://www.icsi.berkeley.edu/~kay/KBMM.ps> (5.9.2003).
- [24] Kay, P., Berlin, B. (1997) Science \neq imperialism: There are nontrivial constraints on color naming. *Behavioral and Brain Sciences* **20**(2), 196-201.
- [25] Kay, P., Maffi, L. (1999) Color Appearance and the Emergence and Evolution of Basic Color Lexicons. *American Anthropologist* **101**(4), 743-760.

- [26] Kay, P. (2002) *Color Categories are Not Arbitrary*. Konferenssiesitelmä, Society for Cross Cultural Research Annual Meetings, Santa Fe, 21.2.2002. Saatavana: <http://www.icsi.berkeley.edu/~kay/colcats-not-arbit.pdf> (5.9.2003).
- [27] Kay, P., Regier, T. (2003) Resolving the question of color naming universals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **100**(15), 9085-9089.
- [28] Kay, P. (2003) Methodological Issues in Cross-Language Color Naming. *Ethnolinguistics and Anthropological Theory* (toim. Jourdan, C., Tuite, K.). Fides, Montreal. Saatavana myös: <http://www.icsi.berkeley.edu/~kay/color.meth.ps> (5.9.2003).
- [29] Kay, P., Cook, R. (2004) *The World Color Survey*. WWW-sivusto, <http://www.icsi.berkeley.edu/wcs/> (18.4.2004).
- [30] Kohonen, T., Hynninen, J., Kangas, J., Laaksonen, J. (1996) *SOM_PAK: The Self-Organizing Map Program Package*. Raportti A31, Teknillinen korkeakoulu, Helsinki. Saatavana myös: http://www.cis.hut.fi/research/som_pak/som_doc.ps (8.3.2004).
- [31] Kohonen, T. (2001) *Self-Organizing Maps*, 3. painos. Springer, Berliini.
- [32] Kuehni, R. G. (2002) The Early Development of the Munsell System. *Color Research and Application* **27**(1), 20-27.
- [33] Lee, D. D., Seung, H. S. (1999) Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization. *Nature* **401**, 788-791.
- [34] Lee, D. D., Seung, H. S. (2001) Algorithms for non-negative matrix factorization. *Advances in Neural Information Processing Systems* **13** (toim. Leen, T. K., Dietterich, T. G., Tresp, V.), MIT Press, Cambridge, 556-562.
- [35] Lucy, J. A. (1997) Linguistic Relativity. *Annual Review of Anthropology* **26**, 291-312.
- [36] Lyons, J. (1999) The vocabulary of color with particular reference to Ancient Greek and Classical Latin. *The Language of Color in the Mediterranean* (toim. Borg, A.), Almqvist & Wiksell International, Tukholma, 38-75.
- [37] MacLaury, R. E. (1992) From Brightness to Hue: An Explanatory Model of Color-Category Evolution. *Current Anthropology* **33**(2), 137-186.

- [38] MacLaury, R. (1999) Basic Color Terms: Twenty-five Years After. *The Language of Color in the Mediterranean* (toim. Borg, A.), Almqvist & Wiksell International, Tukholma, 1-37.
- [39] Matthews, P. H. (2003) Morpheme. *International Encyclopedia of Linguistics*, 2. painos, 3. osa (toim. Frawley, W. J.), Oxford University Press, New York, 3.
- [40] Moss, A. E. (1989) Basic Colour Terms: Problems and Hypotheses. *Lingua* **78**(4), 313-320.
- [41] Munsell Book of Colour, Glossy Finish Collection (1976). Munsell Color, Baltimore.
- [42] Munsell Book of Colour, Matte Finish Collection (1976). Munsell Color, Baltimore.
- [43] Pointer, M. R., Attridge, G. G. (1998) The Number of Discernible Colours. *Color Research and Application* **23**(1), 52-54.
- [44] Ramanah, R., Kuehni, R. G., Snyder, W., E., Hinks, D. (2004) Spectral Spaces and Color Spaces. *Color Research and Application* **29**(1), 29-37.
- [45] Rich, E. (1977) Sex-related Differences in Colour Vocabulary. *Language and Speech* **20**(4), 404-409.
- [46] Rood, D. S. (2003) North American Languages. *International Encyclopedia of Linguistics*, 2. painos, 3. osa (toim. Frawley, W. J.), Oxford University Press, New York, 167-172.
- [47] Rosch, E. H. (1973) On the Internal Structure of Perceptual and Semantic Categories. *Cognitive Development and the Acquisition of Language* (toim. Moore, T. E.), Academic Press, New York, 111-144.
- [48] Räisänen, E. (2004) *Värien luokittelu itseorganisoivalla kartalla väri-nimeämiskokeisiin vertaamista varten*. Erikoistyö, Joensuun yliopisto.
- [49] Saucier, D. M., Elias, L. J., Nylén, K. (2002) Are colours special? An examination of the female advantage for speeded colour naming. *Personality and Individual Differences* **32**(1), 27-35.
- [50] Saunders, B. A. C., van Brakel, J. (1997) Are there nontrivial constraints on colour categorization? *Behavioral and Brain Sciences* **20**(2), 167-228.

- [51] Seliger, H. H. (2002) Measurement of Memory of Color. *Color Research and Application* **27**(4), 233-242.
- [52] Simpson, J., Tarrant, A. W. S. (1991) Sex- and Age-related Differences in Colour Vocabulary. *Language and Speech* **34**(1), 57-62.
- [53] Sturges, J., Whitfield, T. W. A. (1995) Locating Basic Colours in the Munsell Space. *Color Research and Application* **20**(6), 364-376.
- [54] Sturges, J., Whitfield, W. A. (1997) Salient Features of Munsell Colour Space as a Function of Monolexic Naming and Response Latencies. *Vision Research* **37**(3), 307-313.
- [55] Taft, C., Sivik, L. (1997) Salient Color Terms in Four Languages. *Scandinavian Journal of Psychology* **38**, 29-34.
- [56] Uchikawa, K., Shinoda, H. (1996) Influence of Basic Color Categories on Color Memory Discrimination. *Color Research and Application* **21**(6), 430-439.
- [57] Whorf, B. L. (1971) Science and Linguistics. *Language, Thought, and Reality: Selected Writings of Benjamin Lee Whorf*, 6. painos (toim. Carroll, J. B.), MIT Press, Cambridge, 207-219. Julkaistu myös: *Technology Review* **42**(6), 229-231, 247-248 (1940).
- [58] Wijk, H., Berg, S., Bergman, B., Hanson, A. B., Sivik, L., Steen, B. (2002) Colour perception among the very elderly related to visual and cognitive function. *Scandinavian Journal of Caring Sciences* **16**(1), 91-102.
- [59] Witkowski, S. R., Brown, C. H. (1977) An Explanation of Color Nomenclature Universals. *American Anthropologist* **79**(1), 50-57.
- [60] Witkowski, S. R., Brown, C. H. (1982) Whorf And Universals Of Color Nomenclature. *Journal of Anthropological Research* **38**(4), 411-420.
- [61] Wyszecki, G., Stiles, W. S. (1982) *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, 2. painos. John Wiley and Sons, New York.
- [62] Yang, Y. (2001) Sex and language proficiency level in color-naming performance: an ESL/EFL perspective. *International Journal of Applied Linguistics* **11**(2), 238-256.