

# MUSIIKILLISTEN ÄÄNTEN HYÖDYNTÄMINEN JULKIS- TEN TILOJEN SAAVUTETTAVUUDESSA

Eeva Sunela  
Kandidaatintutkielma  
Musiikkitiede  
Musiikin, taiteen ja kulttuu-  
rin tutkimuksen laitos  
Jyväskylän yliopisto  
Kevät 2022

# JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

Tiedekunta Humanistis-yhteiskuntatieteellinen	Laitos Musiikin, taiteen ja kulttuurin tutkimuksen
Tekijä Eeva Sunela	
Työn nimi Musiikillisten äänten hyödyntäminen julkisten tilojen saavutettavuudessa	
Oppiaine Musiikkitiede	Työn laji Kandidaatintutkielma
Aika 31.3.2022	Sivumäärä 20
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tutkielmassa tarkastellaan, miten musiikillisia ääniä voidaan käyttää saavutettavuuden edistämiseen julkisissa tiloissa. Kun esteettömyys koskee rakennettua ympäristöä, on saavutettavuudessa kyse ymmärrettävästä tiedosta ja palveluista, joissa on huomioitava eri aisteihin liittyvät asiat sekä käytettävyys. Älypuhelimet ovat osaltaan mahdollistaneet uusia teknisiä ratkaisuja, esimerkiksi äänipohjaisten sisätilanavigointisysteemien kehityksen. Yleisesti ottaen erilaiselle tiedolle, visuaalisille elementeille ja toiminnoille voidaan luoda äänelliset vastineet. Tätä kutsutaan sonifikaatioksi.</p> <p>Äänisignaalit ovat kohtuullisen vahvoja suhteessa taustahälyyn tai kielellisiin eroihin. Niinpä niitä voidaan hyödyntää ympäröivän maailman ymmärtämiseksi, eri tavoilla ja monista syistä. Musiikillinen ääni voi olla erityisen ilmaisuvoimainen etäisyyksien, liikkeen, toiminnan ja kontekstiedon kuvaajana. Tutkielmassa keskitytäänkin musiikillisten äänten vahvuuksiin ja tehokeinoihin informaation välittäjänä, sekä teoreettiselta pohjalta että empiiristen tutkimusten kautta. Tutkimusmenetelmänä on kirjallisuuskat-saus. Tutkittavan ilmiön tausta on laajalla pohjalla, ja monitieteisessä aineistossa käsitellään äänisuunnittelun psykoakustisia suuntaviivoja, erilaisia teknisiä toteutuksia sekä kokeellisia asetelmia. Standardisoidut ja teknologianeutraalit ratkaisut ovat tärkeitä ääniopasteiden käytettävyyden kannalta, sillä miljoonien näkörajoitteisten lisäksi äänipohjaisesta opastamisesta voivat hyötyä laajalti myös muut käyttäjät. Kysymys on kielet ylittävästä kommunikaatiosta.</p>	
Asiasanat sonifikaatio, saavutettavuus, sisätilanavigointi	
Säilytyspaikka Jyväskylän yliopisto	
Muita tietoja	

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	4
2	TUTKIMUSMENETELMÄ JA AINEISTO.....	6
3	TIETO MUSIIKIKSI — MIKSI?.....	8
3.1	Sävel- ja mitta-asteikot sekä arvojen erottelukeinot.....	8
3.2	Kehollinen kognitio, ympäristötietoisuus ja vuorovaikutus .....	10
3.3	Estetiikka ja assosiativisuus.....	12
4	KÄYTÄNNÖN SOVELLUKSIA.....	14
4.1	Sisätilanavigointi ja toiminnanohjaus musiikin avulla .....	15
4.2	Musiikkiavusteinen vuorovaikutus näyttelyissä ja näytöksissä.....	17
4.3	Näkymän sonifointi .....	19
5	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	21
	LÄHTEET.....	24

## LIITTEET

# 1 JOHDANTO

Kuulojärjestelmä erottelee äänilähteitä sekä poimii ja tunnistaa sanoja ja melodioita hyvin vaivattomasti, myös meluisissa olosuhteissa. Niinpä erilaisia äänisignaaleja voidaan hyödyntää ympäröivän maailman ymmärtämiseksi, eri tavoilla ja monista syistä. Esimerkiksi siksi, että näköaisti on rajoitettu tai varattu toisiin tehtäviin. Tässä työssä tarkastelen musiikillisia ääniä sekä niiden tehokeinoja saavutettavuutta edistävissä tehtävissä, sekä teoreettisesti että käytännön ratkaisujen kautta.

Tutkielmani taustalla on viimeaikainen kehityskulku kolmella eri osa-alueella. Saavutettavuudessa on otettu lakisääteisiä askelia eteenpäin (digipalvelulaki 306/2019), älypuhelinien yleistyminen sekä niitä hyödyntävien uusien tekniikoiden kehitys on ollut eksponentiaalista, ja lisäksi sonifikaatio on monitieteisenä metodina synnyttänyt laajalti käytännöllisiä innovaatioita (Hermann et al. 2011). Sonifikaatiolla tarkoitetaan datan, visuaalisten elementtien tai erilaisten toimintojen äänellisten vastineiden tuottamista. Ääni voi olla myös musiikkia.

Tämän tutkielman tavoitteena on kartoittaa tietoa tekniikoista ja tavoista, joilla musiikkia on käytetty tai voitaisiin käyttää saavutettavuuden ja esteettömyyden parantamiseen julkisissa tiloissa. Julkiseksi tilaksi miellän kaupunkiympäristön katuiineen ja puistoiineen, sekä erilaiset virastot, kirjastot, museot, kauppakeskukset, liikenneasemat ja liikehuoneistot. Tavoitteena on tuoda esille myös musiikin vielä hyödyn-tämätön potentiaali sekä tunnistaa rooleja, joita musiikilla voi olla käyttäjien ja palvelujen sekä ympäristön arkisessa vuorovaikutuksessa.

Esteettömyydessä on kyse ihmisten moninaisuuden huomioon ottamisesta rakennetussa ympäristössä. Saavutettavuus puolestaan koskee ymmärrettävää tietoa, palveluja ja asenteita. Yhdenvertaisuuden mahdollistamiseksi on huomioitava myös kommunikaatioon, eri aisteihin ja käytettävyyteen liittyvät asiat. Näkörajoitteisia ja sokeita on maailmanlaajuisesti arviolta yhteensä noin 250 miljoonaa (Ackland et al. 2017). Heidän lisäksi äänipohjaisesta ohjauksesta voivat hyötyä myös miljoonat

muut tilanteeseen liittyvine haasteineen. Kysymys voi olla yksinkertaisesti vaikkapa kielimuurista.

Äänisignaalit ovat hyödyllisiä verrattuna puheeseen, sillä ne ovat kohtuullisen vahvoja suhteessa taustahälyyn, kognitiiviseen kuormaan sekä kielellisiin eroihin (Dingler et al. 2008, 2). Tiedon esittämisessä voidaan hyödyntää myös musiikin teoriaa, esimerkiksi sävellajien ja tempojen vaikutelmia. Musiikilliset äänet ovat silti yleensä silti varsin intuitiivisia ja yleistajuisia. Vaikka kulttuuritausta, musiikillinen koulutus ja yksilölliset erot saattavat vaikuttaa signaalien tulkintaan (mm. Neuhoff et al. 2002; van Zuijen et al. 2005), näyttää niiden osuus olevan vähäinen, ja kevyelläkin harjoittelulla on saatu hyviä tuloksia (mm. Ahmetovic et al. 2019; Abboud et al. 2014; Banf & Blanz 2013; Banf et al. 2016; Dingler et al. 2008).

Tutkittavan ilmiön tausta on laajalla pohjalla, ja sen teoreettinen pohja perustuu oleellisesti psykoakustiikkaan ja kognitiotieteisiin. Itse tilaan ja sen tarkoitukseen liittyvän tarkastelun sekä työn funktionaalisen painotuksen takia erilaiset taiteelliset ääni-installaatiot, markkinointistrategiaan nivoutuvat äänimaailmat sekä yleiset päätelaitteet, kuten infotaulut tai maksupäätteet äänisignaaleineen rajautuvat tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Ääni- ja käyttöliittymäsuunnittelun periaatteita, äänen syntetisointia tai sävellysalgoritmeja sivuan työssäni vain yleisellä tasolla. Tuon kuitenkin esille joitakin äänisuunnittelun suuntaviivoja sekä eroja, joita näkevien ja näkörajoitteisten välillä on sonifikaatiotutkimuksessa havaittu.

Seuraavassa luvussa kaksi käsittelen tutkimusmetodia ja aineistoa. Luvussa kolme avaan sonifikaation ja vuorovaikutuksellisen ohjauksen teoreettista taustaa ja käsitteitä sekä sitä, miksi musiikki on lähtökohtaisesti tehokas viestintäkeino. Vaikka multimodaalisia, moniaistillisia systeemejä käsitellään yleensä siltä pohjalta, että kuulo- ja näköaistin kautta tulevat ärsykkeet yhdistyvät havainnoissamme, pitäydyn tässä työssä tarkoituksellisesti kuuloaistin ja kehollisen kognition varassa. Neljännessä luvussa esittelen saavutettavuusratkaisuja käytännön sovellusten ja empiiristen tutkimusten kautta, ja luvun viisi johtopäätösosiossa teen näistä yhteenvetoa.

## 2 TUTKIMUSMENETELMÄ JA AINEISTO

Tutkimusmenetelmänä käytän integroivaa kirjallisuuskatsausta (Salminen 2011, 8). Tavoitteena on kuvata tarkasteltavaa ilmiötä monesta näkökulmasta ja kriittisestikin arvioiden. Aineistohakuja tein sekä Helsingin että Jyväskylän yliopiston kirjaston tietokannoista sekä niiden liitännäistietokannoista, joista Association for Computing Machineryn eli ACM:n julkaisuilla on aineistossani kohtuullinen edustus. ACM Digital Library on kokotekstitietokanta, joka sisältää ACM:n lehtiä, pöytäkirjoja, kokousjulkaisuja, tiedotteita, SIG (*Special Interest Groups*) -julkaisuja sekä ACM:n jäsenorganisaatioiden julkaisuja tietojenkäsittelyn ja informaatioteknologian aloilta.

Toinen merkittävä julkaisijataho käyttämissäni lähteissä on *International Conference on Auditory Display*. ICAD on foorumi, jossa esitellään äänen käyttämistä datan esittämisessä, systeemien tarkkailussa sekä tietokoneiden ja virtuaalitodellisuuden käyttöliittymissä. Konferenssi keskittyy ääniesityksiin, niiden havainnointiin sekä ääniesityksiin liittyviin teknologioihin ja sovelluksiin. Tässä tutkielmassa aihe rajautuu sonifikaatioiden osalta nimenomaan musiikillisiin ääniin ja niiden saavutettavuutta edistävään rooliin tiedon välittäjänä julkisissa tiloissa. Mainitulla rajauksella tutkimuksissa nousi usein esiin kaksi nimeä, ICAD:n puheenjohtajat Gregory Kramer (vuosina 1992–1997) sekä Bruce N. Walker (vuosina 2006–2011). Taustalla on konferenssiorganisaation tausta-asema julkaisuissa, mutta myös tutkimusintressit. Ääniesitysten tutkimisen lisäksi Kramerilla on säveltäjätausta, ja Walker on keskittynyt käyttäjäkeskeiseen suunnitteluun, avustaviin teknologioihin sekä ihmisen ja koneen vuorovaikutukseen epäkonventionaalisissa käyttöliittymissä.

Edellä mainittujen tietokantahakujen ja julkaisijakatsauksen lisäksi käytin tietentekijöiden ja tutkijoiden yhteisöpalvelu ResearchGatea, jonka semanttinen hakukone tekee tiedonhakuja sisäisten resurssien lisäksi sivuston ulkoisissa tietokannoissa, esimerkiksi PubMedissa, CiteSeerissa, arXivissa sekä NASAn kirjastossa. Käytän tutkielmassani pääasiallisesti vertaisarvioituja artikkeleita, mutta mukana on myös joitakin ei-vertaisarvioituja teknisiä tai kaupallisia raportteja.

Sonifikaation monitieteisen taustan, ilmiön laajuuden sekä monialaisten, teknologiavetoisten kokeilujen takia yksittäisten hakusanojen tuottama aineisto oli hyvin hajanaista ja kirjavaa. Musiikillisia ääniä hyvin harvoin eroteltiin otsikkotasolla, eikä muutenkaan juuri puhuttu eksplisiittisesti musiikillisesta sonifikaatiosta (*musical sonification*) tai musifikaatiosta (*musification*). Lisäksi sonifikaatiota hyödyntävät käytännön sovellukset kulkivat monien eri tieteenalojen alla ja vaihtelevilla nimikkeillä, jotka usein kuvastivat kulloistakin ajan henkeä. Ääniesitysten (*auditory display*) ja sonifikaation (*sonification*) lisäksi artikkelit käsittelivät esimerkiksi elektronisia matka-apuja (*electronic travel aid, ETA*), erilaisia avustavia tuotteita tai teknologioita (*assistive product/technology, assisted mobility*), mutta myös aistien korvauslaitteita (*sensory substitution device, SSD*), sisätilanavigointisysteemejä (*indoor navigation, indoor positioning*) ja ultraäänimajakkoita (*beacons*) sekä erilaisia saavutettavuuteen (*accessibility*) liitettyjä sovelluksia. Hakusanojen haasteellisuus näkyi myös lähdeluettelossa.

ICAD on myös myötävaikuttanut Thomas Hermannin, Andy Huntin ja John G. Neuhoffin (2011) toimittaman kokoomateoksen *The Sonification Handbook* julkaisuun. Käsikirjassa esitetään sonifikaation laajaan ja monitieteiseen kenttään teemoitettu jaottelu, jossa erilaiset näkökulmat täydentävät toisiaan. Sonifikaatiokäsikirjan ensimmäinen osa käsittelee äänen havaitsemista, psykoakustiikkaa ja kognitiota, toinen osa sonifikaation lähtötietona olevaa dataa ja äänisynteesiä, kolmas osa käyttöliittymäsuunnittelua ja skaalausfunktioita sekä neljäs osa puolestaan sonifikaation käytännön sovellusalueita. Teos toimi karttana tutkimuksen taustalla.

Hermann, Hunt ja Neuhoff (2011, i) mainitsevat jo esipuheessaan, että kirjava ja moniselitteinen käsitteistö johtuu sonifikaatiotutkimuksen laajasta pohjasta. Kenttä tuntuikin olevan melko sääntelemätön, hajanainen ja paikoin jopa villi, ja erilaisia oman aikansa tuotteina syntyneitä kuvien äänellistämisen prototyyppejä oli konferenssiesityksissä suorastaan hämmästyttävä määrä. Tekniikka kehittyi kuitenkin koko ajan, ja viimeisen kymmenen vuoden aikana on tultu aimo harppauksin eteenpäin kaksiulotteisten kuvien äänimaisemia tuottavista akseli- ja pikseliskannauksista. Teknisen retrospektiivin sijaan käsittelenkin tässä työssä uudempia suuntauksia, kuten reaaliaikaista musiikillista sonifikaatiota arkisessa hyötykäytössä sekä musiikillisten rakenteiden intuitiivisuutta toimintaa ohjaavassa vuorovaikutuksessa, johon liittyy oleellisella tavalla myös kehollinen kognitio.

### 3 TIETO MUSIIKIKSI – MIKSI?

Äänisignaaleja voidaan siis hyödyntää myös saavutettavuuden parantamisessa monin eri tavoin. Sonifikaatio voi olla hyvin suora, yksinkertainen äänisignaali, mutta siinä voi olla myös musiikillisia elementtejä, esimerkiksi tonaalisia ja modaalisia aineksia. Tällöin puhutaan toisinaan datamusikalisaatiosta tai musifikaatiosta (Coop 2016). Koska sonifikaatiotutkimus on laajalla pohjalla, ovat harvat käsitteet yksiselitteisiä, eikä musifikaatioita useinkaan erotella sonifikaatioista (Hermann et al. 2011). Vaikka käytän jatkossa ääniesityksen ja sonifikaation yleiskäsitteitä, keskityn nimenomaisesti musiikillisiin ääniin ja rakenteisiin.

Kramer kollegoineen (1999) määritteli, että sonifikaatio on datan suhteiden muuntamista akustisessa signaalissa havaittaviin suhteisiin niin, että kuulokuva helpottaa kommunikaatiota ja tulkintaa. Ideana on, että suurista datamassoista olisi niiden äänellistämisen kautta mahdollista havaita säännönmukaisuuksia ja poikkeamia. Sonifikaatio on graafien vastine äänimaailmassa, mutta se on paljon muutakin. Koska sonifikaation määritelmään on havaitsemisen lisäksi sisällytetty tulkinta ja kommunikaatio, käy siitä ilmi kognitiivisten prosessien merkitys ääniesitysten luomisessa ja havainnoinnissa. Kun mukana on myös musiikillisia elementtejä, voidaan viestiä tietoa, merkityksiä ja tunteita monin eri mekanismein (esim. Juslin & Västfjäll 2008).

#### 3.1 Sävel- ja mitta-asteikot sekä arvojen erottelukeinot

Wiener kollegoineen (2009) jakoi ympäristön havainnoinnin kognitiiviset tehtävät kolmeen tasoon, joista ensimmäinen on piste avaruudessa. Kyseessä voi olla kiintopiste, määränpää, este tai vaara, vaikkapa portaat. Näitä erilaisia huomioitavia pisteitä voidaan sovellusten avulla tunnistaa ja merkitä äänin ja tarvittaessa varoituksin (Bujac et al. 2012 & 2016; Mascetti et al. 2016; Presti et al. 2019). Hälytykset ja varoitukset



herättävät huomion ja ovat melko ilmeisiä, mutta harvemmin vuorovaikutteisia tai musiikillisia. Erilaisten palvelujen tai automaattien sijainti-ilmoituksissa voi toki jonkinlainen *jingle* ollakin (Ronkainen 2001, Bartholmé & Melewar 2011).

Toinen havainnoinnin tehtävätaaso on tieto reitistä (Wiener et al. 2009). Reitin kulkemista, etenemistä ja käynnösten pyörimisliikettä voidaan äänellistää monin eri tavoin, esimerkiksi taajuuteen tai säveltasoon, sointiin, panorointiin ja volyyymiin liittyvillä ominaisuuksilla (Dubus & Bresin 2013; Spagnol et al. 2018). Taajuus on yleinen ratkaisu, sillä sen data-arvoihin liittämisen ja muuntelu on melko vaivatonta. Skaalaus ei kuitenkaan ole aina ole yleistettävissä, vaan joissain tapauksissa äänen intuitiivinen suunta riippuu esitettävästä tiedosta tai kuuntelijasta. Kun yleisen käsityksen mukaan esimerkiksi nousevaa lämpötilaa esittää parhaiten nouseva sävelkorkeus, sopii se tutkitusti myös kutistuvan koon kuvaukseen, jolloin puhutaan negatiivisesta polariteetista. (Walker 2002.) Kun Walker ja Lane (2001) tutkivat käsitteellistä kytkeä datan ja äänen välillä, oli näkevien ja näkörajoitteisten kesken yleinen yhteisymmärrys monista polariteeteista, mutta myös huomattavia eroja. Näkörajoitteisten intuitiivinen käsitys suunnasta on toisinaan päinvastainen kuin näkeville (Mauney & Walker 2010). Tämä osoittaa käytännön testaamisen tärkeyden saavutettavuuskysymyksissä. On voitava varmistaa, että ääniesitys vastaa käyttäjäryhmän odotuksia ja että aiottu viesti tavoittaa kuulijat oikein.

Äänivastineen skaalaukseen liittyy muitakin käytännön kysymyksiä. Esimerkiksi se, mille taajuusalueelle minimi- ja maksimiarvot kiinnitetään. Kuulon herkin alue on välillä 1000–5000 Hz (Walker & Nees 2011, 25). Jos suhteellisen kapealla taajuuskaistalla on tarpeen vertailla tietovirtoja tai esittää useita visuaalisten elementtien vastineita, on järkevää valita edustajiksi erilaisia soittimia ominaislaatuineen, jolloin samakin sävel kuulostaa hyvin erilaiselta.

Satunnaisten taajuusvaihtelujen sijaan datassa ilmenevät muutokset voidaan esittää diskreeteillä sävelasteikoilla, jotka ovat vakiintuneita kognitiivisia rakenteita. Sävelkulku rakentuu kokemuksessamme aiemmin kuultuun perustuen, eikä vaadi irrallisten arvojen muistamista tai vertailua (mm. Krumhansl 1982, Jordan & Shepard 1987). Jos palataan vielä sonifikaation määritelmässä (Kramer et al. 1999) mainittuihin datassa havaittaviin suhteisiin ja niiden äänellistämiseen, on luontevaa sovittaa arvoihin Pythagoraan suhdelukua 3:2. Kyseessä on puhdas kvintti, jolle tonaalinen metriikka pitkälti perustuu. Jos keski-C:n ( $C^1$ ) taajuus on 262 hertsiä, on tätä kvinttiä ylempi  $G^1$  taajuudeltaan puolitoistakertainen eli 393 hertsiä,  $D^2$  vastaavasti 590 hertsiä ja niin edelleen. Skaalaukselle saadaan siis melko suoria laskentakaavoja. Lisäksi musiikillisten äänten havaitsemisessa pätee läheisyysperiaate, jonka mukaan kaksi toisiinsa riittävän lähellä olevaa säveltasoa kuullaan suhteessa toisiinsa. Kun ääni liikuu ”poispäin”, kasvaa etäisyyden tunne, kunnes taas lähestytään seuraavaa taajuussuhdelukua. (Wishart 1996, 73; Shepard 1982.)

Jonkinlaisen mittapuun tai muun kontekstitiedon liittämällä on oleellinen merkitys äänellä esitettävän tiedon tulkintaan, ja musiikilla on siihen keinonsa. Tonaalisella progressiolla on oma metriikkansa, johon vaikuttaa myös harmonia. Smith ja Walker (2002) taas osoittivat, että kun data-aineistoa esittävään äänigraafiin lisättiin klikki, ”metronomi”, toimi se ikään kuin äänigraafin x-akselina, vaiheistuksena, joka paransi kuulijoiden arvioita datan maksimiarvosta.

Vaikka Walkerin ja Neesin (2011, 18) mukaan toiset äänen attribuutit havaitaan jatkumossa ja toiset, kuten sointi puolestaan kategorisesti, tuo Wishart (1996, 80–81) esille sävyprogressiot tietokonemusiikissa. Hänen mukaansa kuulokokemus muodostuu moniulotteisessa ääniavaruudessa, jossa etäisyyden tunne syntyy läheisyysperiaatteen avulla sävykentältä toiselle liikkeessä, vaikka harmonisuus ei päde. Käytännössä tämä tarkoittaa spektraalisten ominaisuuksien muuntelua, topologiaa, jossa yhtä ääntä ikään kuin venytetään niin kauan, että se muuttuu toiseksi (ks. Banf et al. 2016 sävyarkkityypit 4.3). Musiikilla voidaan siis esittää kontekstitietoa sekä muuttuvia arvoja varsin havainnollisesti ja monipuolisesti.

### **3.2 Kehollinen kognitio, ympäristötietoisuus ja vuorovaikutus**

Useat sonifikaatiotavat parantavat suuntausta ja liikkuvuutta, mutta musiikillinen ääni on erityisen ilmaisuvoimainen liikkeen ja toiminnan kuvaajana. Tähän liittyy edellä mainittu suhteellinen mitattavuus, mutta myös musiikin syntaksi sekä musiikin aktiivinen, moniaistillinen kokeminen, joka yhdistää havainnon ja toiminnan (Leman 2008). Vuorovaikutuksen tehokkuus johtuu siitä, että musiikillisen kehittelyn pohjalta odotamme seuraavaksi tapahtuvan jotain, ja tapa ymmärtää musiikkia ikään kuin ehdollistuu. Callejan (2003) mukaan tämä temporaalinen logiikka on musiikin syntaktinen työkalu, jolla on yhteys kielen kanssa. Näin määriteltynä esille nousee musiikin kommunikatiivinen luonne, mutta myös sen soveltuvuus toiminnanohjaukseen. Niin ikään De Lucia kollegoineen (2009) tutki ääniin liittyvää ennakoitua, ja he todensivat, että kun äänien kognitiivinen käsittely yhdistyy toimintasuunnitelmaskeemaan, valmistaudumme alitajuisesti reagoimaan tulevaan. Reaktioaika on tällöin oleellisesti erilainen, ja sillä on käytännön merkitystä arjessa (De Lucia et al. 2009; Ahmetovic et al. 2019).

Havainnon ja toiminnan luonnollista kytkentää hyödynnetään myös reaaliaikaisen sonifikaation palautesilmukassa, jossa käyttäjän toiminta muuttaa ääntä, ja ääni informoi tehtävän suorittajaa siitä, mitä hänen pitää tehdä seuraavaksi tai eri tavalla (Serafin 2011, 94). Välittömän äänipalautteen avulla voidaan korjata esimerkiksi liikeratoja tai suuntausta (mm. Godbout & Boyd 2010; Scholz et al. 2016). Oikea-aikainen

liikesonifikaatio on mielenkiintoinen kysymys sekä kehollisen kognition että saavutettavuuden kannalta, mutta myös musiikillisesti. On ratkaistava, minkälainen ääni on niin intuitiivinen, että osataan toimia oikein, mutta samalla riittävän kompleksinen, jotta sen hienoinenkin muuntuminen huomataan.

Kehollistunut kognitio toimii aktiivisesti ympäristön kanssa, ja kun havainnoimme, rakennamme tietoa ja merkityksiä prosessissa (Thompson & Stapelton 2009). Ihmisen ja ääniympäristön välistä suhdetta sekä suhteen vaikutusta käytökseen voidaan tarkastella myös akustisen ekologian kautta (Truax 1978). Cohenin (1994 a) mukaan akustinen ekologia tarkoittaa hieman paradoksaalisesti saumatonta, samaan aikaan sekä informatiivista että huomaamatonta ääniympäristöä. Äänellä on kyky toimia myös tietoisuuden reunamilla, ja erilaiset taustäänet voivat kohottaa tietoisuutta hyvällä tavalla, mutta ne voivat myös ärsyttää. Cohenin (1994 a & b) tutkimuksissa toimistotilaan tuodut prosessin seurantaäännet herättivät närää, sillä jaetussa huoneessa koettiin olevan häiriöääniä jo valmiiksi paljon, kun taas tavalliset tekemisen äänet, kuten näppäimistön naputus ja hiiren klikkailu virittivät hyväntuulisen tekemisen ilmapiirin. Estetiikka, hienovaraisuus ja tarkoituksenmukaisuus ovat tärkeitä teemoja myös silloin, kun suunnitellaan musiikillisten äänten vuorovaikutuksellisuutta ja niiden roolia julkisessa tilassa.

Toimistomiljööstä lähti myös Colemanin, Macaulayn ja Newellin (2008) laatima semanttinen kartoitustyökalu äänisuunnittelulle. Kun ääniympäristöstä kerätään sanallista tietoa, voidaan sanojen merkityksistä poimia keskeiset avainäänet suunnittelun tarkentamiseksi. Metodien kuvauksessa korostui myös äänilähteen sijainnin tärkeä rooli arkisessa havainnoinnissa. Äänien avulla pysymme orientoituneena ja tietoisena siitä, mitä ympärillämme tapahtuu, myös näkökentän ulkopuolella.

Semantiikka käsittelee merkityksiä ja semiotiikka merkkejä ja signaaleja, mutta käsitteinä ne ovat myös osin päällekkäisiä. Pirhonen kollegoineen (2006) otti äänisuunnitteluun semioottisen näkökulman. Tällöin lähtökohtana on pohtia, miten tiedon akustinen esitys tavoittaa sen käsitteellisen määritelmän. He esittivät, että kun suunnittelun tueksi laaditaan yksityiskohtainen käyttöskenaario, jossa kuvataan sekä käyttäjä että tämän tehtävä, ja kuvaus esitetään suunnittelijoille ja kohderyhmälle, saadaan kontekstiin sopivin tapa käyttää ääntä. Lisäksi, kun suunnittelu perustuu asiantuntijakommentaareihin eikä mieltymyksiin, saadaan suunnitteluun yleistajuinen ote ja objektiivisempi tulkinta. Tämä teoreettinen viitekehys soveltuu varsin hyvin mihin tahansa tekniseen spesifiointiin. Lisäksi se sisältää tärkeitä ajatukset käyttäjäkunnan huomioimisesta, suorituksen tukemisesta sekä testauksen tärkeydestä.

Tyypillinen toimistoympäristö on täynnä tarkoituksellisia ääniä, kuten viestisovellusten piippauksia, jotka vastaavat tai värähtävät tapahtumia ja kohottavat tietoisuutta yleistilanteesta. Tietoisuutta voidaan vahvistaa missä tahansa ympäristössä.

Tästä annan konkreettisia esimerkkejä luvussa neljä, jossa käsittelen saavutettavuusprojekteja erilaisissa oppimisympäristöissä ja näyttelyissä. Musiikillisilla äänillä on suurta potentiaalia tilojen, näkymien, materiaalien, tunnelmien, tunnesisältöjen, tapahtumien ja liikkeiden välittämisessä. Tapahtumien esittäminen kuulomodaliteetissa edistää saavutettavuutta, auttaa hahmottamaan muuttuvia tilanteita ja osallistumaan keskusteluun. Ajatusten, tunteiden ja keskustelun herättäminen onkin yksi taiteen ja näyttelyiden perimmäisistä, osallistavista tehtävistä. Musiikillisilla äänimaisemilla voidaan laajentaa myös näkevien kävijöiden moniaistillista kokemusta (Shams & Kim 2010).

### 3.3 Estetiikka ja assosiativisuus

Yksi monista sävelasteikkojen eduista sonifikaatioissa on, että niitä pidetään yleisesti miellyttävänä, vähemmän ärsyttävänä kuin musiikilliseen systeemiin perustumatonta taajuusvaihtelua tai erilaisia piippauksia (Neuhoff 2011, 79; Ahmetovic et al. 2019). Miellyttävyys on esteettinen arvio, mutta se viittaa myös siihen, että rakenteina asteikot eivät ole kognitiivisesti kovin kuormittavia.

Buxtonin (1989) mukaan ääniä on kaikkialla, ja ne olisivat vähemmän ärsyttäviä, jos meillä olisi niihin parempi kontrolli omassa ympäristössämme. Lausuma on edelleen relevantti. Kramer (1994, 52–53) puolestaan arvioi, että meluväsymystä voitaisiin vähentää äänien paremmalla estetiikalla. Vickers ja Hogg (2006) esittivät kärjistetysti, että koska esteettisyys helpottaa signaalien kuuntelua, edistää se myös viestin ymmärtämistä. Äänipohjainen viestintä tai vuorovaikutus voi tosiaan onnistua tai epäonnistua, koska ääni vaikuttaa myös tunteisiin.

Kaikenlaisen teknologian käytettävyyden kannalta on tärkeää, että käyttöliittymän äänimaailma on miellyttävä. Vanhemmissa avustavissa teknologioissa äänimaailma on yleisesti ollut melko raakaa siniaaltopulsaatiota, mutta uudemmissa sovelluksissa värien, muotojen ja kokonaiskuvan esittämiseen käytetään yleisesti musiikillisia ääniä ja näytteistettyjä soittimia, jotka ovat syntetisoituja miellyttävämpiä (ks. kooste Sanz et al. 2014, 167–168 sekä LIITE 1). Käyttömukavuuteen liittyy myös taajuuskais-tan raja-  
Koska korkeaenergistä taajuusalueetta 2500–5000 hertsin välillä on pidetty melko epämiellyttävänä, on joissain ohjelmissa ylätaajuus leikattu jo 1568 hertsiiin, mikä vastaa sävelkorkeudeltaan kolmiviivaista g:tä (Kumar et al. 2009; Wright et al. 2013; Abboud et al. 2014). Jos herkän kuuloalueen alataajuus on noin 1000 hertsiä ( $\sim h^2$ ), on käytössä käytännössä alle oktaavi, jolloin instrumenttien ominaissoinnin rooli korostuu.

Musiikillisten äänten miellyttävyydestä on tosin eriäviäkin näkemyksiä. Gaver kollegoineen (1991) totesi prosessin seurantaääniä käsittelevässä artikkelissaan, että musiikilliset viestit ovat ärsyttävämpiä kuin todellisiin ääniin perustuvat audiitiiviset ikonit, sillä musiikki ei täydennä ääniympäristöä luonnollisella tavalla. Suora esitys onkin usein tehokas, sillä se on ilmeinen, eikä vaadi opettelua. Kaikille toiminnoille ei kuitenkaan oikein ole ääntä. Kenties kodinkoneiden *jinglet* ovat hieman irrallisia, mutta musiikin elinympäristöä ei silti pidä tulkita teknokraattisen suppeasti, sillä musiikilla on kyky välittää hämmästyttävän monitahoista tietoa ja merkityksiä. Lisäksi on huomattava, että on eri asia kuvata tapahtumia sellaisenaan, ajantasaisesti, kuin ohjata toimintaa ennakoivasti, mikä on yksi musiikin ehdoton vahvuus.

Suoran esityksen lisäksi äänen ja kohteen suhde voi olla myös epäsuora tai metaforinen (Keller & Stevens 2004). Epäsuorassa ekologisessa suhteessa esimerkiksi kuoro kuvaa kirkkoa. Metaforisessa suhteessa äänellä ja kohteella on joku samankaltainen ominaisuus reaali maailmassa, ja ääni edustaa kohdetta kuvainnollisesti, esimerkiksi trumpetti elefantin kärsää. Lisäksi musiikki assosioituu useiden mekanismien kautta, myös muistin, omakohtaisten kokemusten ja tunteiden kanssa liittoutuen (esim. Juslin & Västfjäll 2008). Esimerkiksi soittimien sointiväri jo itsessään liitetään reaali maailman väreihin, mutta myös duuri-, molli- ja tempovaikutelmien sekä värien välillä on todettu vahvaa, ristimodaalista, tunneperäistä vastaavuutta (Palmer et al. 2013). Musiikin ja värien yhteyttä on laajasti hyödynnetty avustavissa teknologioissa (ks. 4.3).

## 4 KÄYTÄNNÖN SOVELLUKSIA

Älypuhelimet kulkevat nykyään mukanaamme kaikkialle, mikä on mahdollistanut myös uusia saavutettavuusratkaisuja, muun muassa ultraäänen hyödyntämisen sisätilanavigoinnissa ja tiedonjakelussa. Toisaalta laskentateho, äänentuottomahdollisuudet sekä tietokone-musiikin kenttä kehittyvät jatkuvasti. On mahdollista tuottaa reaaliajassa liikkumiseen ja liikeratoihin kytkettyä musiikillista palauteääntä ja jopa varsinaisia sävellyksiä (Giomi 2020). Sonifikaation peruskysymyksenä on, mikä tieto on oleellista ja kuinka äänisignaali voi välittää tiedon mahdollisimman tarkasti. Äänen on oltava havaittava, merkityksellinen sekä yksiselitteinen, mutta ei kuitenkaan liian yksinkertaistettu, jotta tulkinnaissa ja toiminnan ohjauksessa päästään riittävään tarkkuuteen (Ahmetovic et al. 2019)

Digipalvelulaki (306/2019) velvoittaa viranomaiset huomioimaan saavutettavuuden verkkosivujen ja -palvelujen sekä mobiilisovellusten toteutuksessa. Taustalla on yhdenvertaisuusdirektiivi (2000/78/EY), joka korostaa tasavertaista osallisuutta ja mahdollisuutta itsenäiseen asiointiin myös digitaalisessa ympäristössä. Lisäksi yhdenvertaisuuslain (1325/2014) mukaan viranomaisten, työnantajien, koulutuksen järjestäjien sekä palveluntarjoajien on tehtävä asianmukaiset, kohtuulliset mukautukset, jotta vammaiset henkilöt voi yhdenvertaisesti muiden kanssa asioida, saada koulutusta ja töitä sekä yleisesti tarjolla olevia tavaroita ja palveluita.

Seuraavissa alaluvuissa esittelen erilaisia avustavia ohjelmia ja saavutettavuusprojekteja, joissa liikkeen, tilojen ja tapahtumien reaaliaikainen sonifikaatio tuottaa musiikillisia ääniä ja maisemia. Useimmat ratkaisut on testattu näkörajoitteisten tai sokeiden käyttäjryhmillä. Tuloksista välittyy musiikillisten äänten intuitiivisuuden vaikutus osallistumiseen, kokemuksiin ja itsenäiseen kulkemiseen, mutta myös teknisten ratkaisujen mahdollisuudet esimerkiksi julkisyhteisöjen ja taideinstituutioiden käytössä.

## 4.1 Sisätilanavigointi ja toiminnanohjaus musiikin avulla

Kulkemista voidaan avustaa luomalla rakennuksiin musiikillisia tiloja tai kiintopisteitä, kuten esimerkiksi Helsingin keskustakirjasto Oodissa on tehty. Siellä sisäänkäynnin paikkaa osoittaa ovelta soiva sävellys, joka on suunnattu ja suunniteltu psyykoakustisesti niin, että äänispektri erottuu liikenteen kohinasta, mutta ei ole häiritsevää (Äänimajakka, Oodin sivusto 10.3.2022). Toisaalta navigoinnissa voidaan käyttää avuksi puhelinta, jonka sovellukset voivat ottaa vastaan tilaa koskevaa tietoa esimerkiksi ultraäänen avulla (Mavroudis et al. 2017). *Beacon*, majakka, on yksinkertainen laite, joka lähettää ultraäänisignaalia *Bluetooth*-tiedonsiirtotekniikalla. Majakan avulla saadaan tarkka sijaintitieto myös sisätiloissa, missä satelliittipaikannus ei toimi luotettavasti. (Ahmetovic et al. 2019.)

Majakkoita hyödynnetään sisätilanavigointijärjestelmissä, mutta yleisesti myös festivaaleilla, kauppakeskuksissa, parkkihalleissa, juna- ja metroasemilla. Kun puhelin poimii ultrasignaalin, sitä käyttävä sovellus herää automaattisesti. Sovellus prosessoi äänen välittämän datan, jonka jälkeen vierailija saa mainoksia, tarjouksia, tilaa tai aluetta koskevaa tietoa tai ohjeita. (Mavroudis et al. 2017.)

Majakoiden mahdollistama tarkka sisätilapaikannus on osaltaan vaikuttanut navigointisysteemien kehitykseen. Ohjelmien toteutuksessa etäisyyksiä ja etenemistä koskevan tiedon välitys ei-visuaalisten ja ei-sanallisten ohjeiden avulla on tärkeää näkörajoitteisille. Kuten edellä luvussa 3 on esitetty, on musiikillisella äänellä monipuoliset tehokeinot tämän tyyppisen tiedon kuvaajana. Muuttuvan sijainnin perusteella voidaan soittaa erilaisia ääni-impulsseja, muuntuvaa sävelkorkeutta tai musiikillisia progressioita tai käyttää äänen panorointia (mm. Dubus & Bresin 2013; Spagnol et al. 2018; Ahmetovic et al. 2019).

Sisätilanavigoinnissa virheellinen suuntaus kertautuu reitin pituudessa, mutta saattaa myös aiheuttaa ongelmia matkan varrella. Kun Ahmetovic kollegoineen (2019) tutki erilaisia sonifikaatioita käännosten apuna, oli tavoitteena löytää ääni, jonka avulla kohdekulmaan osutaan mahdollisimman tarkasti sekä soveltaa tuloksia navigointijärjestelmiin laajemmin. Pyörimisliikettä ohjattiin sävelasteikolla ja katkoäänellä, joita verrattiin järjestelmiin vakiintuneeseen *pingiin*.

Tutkimuksessa tarkasteltiin, miten erilaiset käyttäjät havaitsevat sonifikaatiot, sekä miten oppiminen, musiikillinen koulutus ja kulttuuritausta vaikuttavat käyttäjän suoriutumiseen. Äänien tehon mittaamiseksi määriteltiin erilaisia suureita, esimerkiksi kulmanopeus, kulmavirhe ja rotaatioaika. Tutkimusotannassa oli kaksi kulttuuritaustoiltaan erilaista sokeiden ryhmää, yksi Ugandasta ja toinen Italiasta. Vaikka ryhmien suoriutumisessa oli ilmeisiä eroja, oli kaksi asiaa yhteisiä molemmille. Sävelasteikon avulla rotaatiivirhe pieneni merkittävästi ( $3.25^\circ \pm 4.58$ ) verrattuna *pingiin*

( $11.11^\circ \pm 12.78^\circ$ ), ja sävelasteikkoa arvostettiin selvästi enemmän kuin muita tekniikoita. Sävelasteikkomallissa etäisyys kohdekulmasta oli jaettu kahdeksaan C-duurin säveliä vastaavaan sektoriin, ja kohdekulman ylityttyä asteikko alkoi laskea. Koska kohdekulmaa ei muuten erikseen merkattu, asteikkoja tuntemattomat sahasivat yleensä kulman ylitystä edestakaisin suunnan varmistamiseksi, mutta skaalan oppiminen paransi rotaatioaikaa merkittävästi. Musiikkitaustaiset kiinnittävät ääniin enemmän huomiota ja pyörivät siksi hitaammin, mutta myös tarkemmin. Yleisesti tutkimuksessa vahvistui oletus, että musiikilliselle esitykselle tyypillinen jatkuva-aikainen ohjaus on näkörajoitteiselle yksittäisiä ääni-impulsseja parempi vaihtoehto. Mittaus- ja kyselytuloksista oli kuitenkin pääteltävissä, että kulttuurierot on otettava huomioon, kun suunnitellaan vastaavaa vuorovaikutuksellista, avustavaa tekniikkaa.

Vaikka edellä kuvatussa tutkimuksessa käänöskulman mittausta tehtiinkin puhelimen (android) inertiaalisensoreilla, edellyttää sisätilanavigoinnin toteutus, että julkisissa tiloissa on saatavilla tarkkaan paikannukseen tarvittava tekniikka. Lisäksi, kun vuorovaikutuksen ja sonifikaatioiden miellyttävyydestä annetut käyttäjäarvot viittasivat siihen, ettei mikään äänistä aiheuttanut kognitiivista ylikuormitusta testitilanteessa, on silti huomattava, ettei hiljaisen huoneen kokeellinen asetelma vastaa luonnollista ympäristöä ärsykeineen, taustahälyineen ja häiriötekijöineen. Akustisten signaalien havaittavuutta ja erottelua melussa voidaan arvioida psykoakustiikan teoriapohjalta (mm. Watson & Kidd 1994). Tunnistettavuuteen ja erotteluun voidaan vaikuttaa äänen laadullisilla ominaisuuksilla, soinnilla ja taajuudella, mutta jos ilmoituksia on paljon, jossain vaiheessa niiden tunnistettavuus heikkenee (McGookin & Brewster 2004). Käytännössä on myös mietittävä myös sitä, miten tai mistä ääniä kuunnellaan. Käytössä voi olla kaiutin, kuulokkeet tai luujohdekuulokkeet, jotka eivät estä tarpeellisten taustaäänien havainnoimista.

Tarkka sisätilapaikannus on mahdollistanut erilaisia saavutettavuusratkaisuja. Menegotto (2017) esitteli navigoinnin hybridimallin, jossa majakka lähettää rakennuksen kunkin arkkitehtonisen tilan läpi kävellessä puhelimeen tilaa kuvaavaa musiikkia (*sound qualifier*) MIDI-tiedostona. Ideana on luoda musiikillisia maamerkkejä, joiden perusteella näkörajoitteiset voivat suunnistaa tilassa itsenäisesti. Musiikilla ilmaistaan erilaisia arkkitehtonisia piirteitä, kuten muotoja, valonlähteitä, katseenkiinnittäjiä, kulkuväyliä ja tilan käyttötarkoitukseen liittyvää yleisvaikutelmaa. Tällöin sävellystekniikka on tietenkin keskeinen, eikä mitenkään yksinkertainen kysymys. Menegotton mallissa tilan kolmiulotteiseen mallinnukseen on liitetty modulaarinen sävellystietokanta, ja tilatunnisteita voidaan soittaa kulkukoordinaattien mukaan joko alueittain tai päällekkäin niin, että äänikerrostumat kuvaavat tilan eri ominaisuuksia. Esimerkiksi toistuva perkussiivinen kuvio voi ilmaista pylvästä tai pilaria, kun taas pitkät melodialinjat viittaavat tilalliseen jatkumoon. Musiikkiin on mahdollista liittää



myös hienosyisempää kulkuun liittyvää kinemaattista tietoa, kuten kiihdytyksiä, jarrutuksia, pysähdyksiä tai suunnanmuutoksia.

Ultraäänimajakoilla on laajat sovellusmahdollisuudet, sillä tekniikka on edullinen, energiatehokas, joustava ja ihmiskorvalle kuulumaton (Mavroudis et al. 2017). *Wayfindr Open Standard* on yksi majakoihin ja ultraääneen perustuva audiopohjainen mobiiliopas, jonka avulla näkörajoitteiset voivat navigoida läpi kaupungin tai rakennuksen. Kun rakennuksissa on majakoita joka kulmalla, kommunikoivat ne älypuhelimien kanssa. Kuljettaessa majakka lähettää sovellukselle yksityiskohtaisia ja ennakkoivia navigointiohjeita. Wayfindr-projekti tehtiin yhteistyössä *International Telecommunication Unionin* (ITU) sekä saavutettavuusasiantuntijoiden kanssa, ja vaikka sen ohjeet ovatkin pääasiassa sanallisia, on projekti merkittävä siksi, että sen myötä syntyi ITU-T F.921-audionavigointistandardi 08/18 (Standardit, ITUn sivusto 10.3.2022), joka toimii sisätilanavigointisysteemien lähtökohtana kaikissa ITUn 193 jäsenvaltiossa, Suomi mukaan lukien (Jäsenvaltiot, ITUn sivusto 10.3.2022). Hajanainen ja kirjava keksintökenttä alkaa siis viimein vakiintua, ja standardi on vakavasti otettava pohja spesifioinnille, kun kehitetään uusia, musiikkia vuorovaikutuksessa hyödyntäviä sovelluksia tilojen kontekstiedon välittämiseksi ja kulkemisen avuksi.

## 4.2 Musiikkiavusteinen vuorovaikutus näyttelyissä ja näytöksissä

Erilaiset epämuodolliset oppimisympäristöt, kuten luonnontieteelliset museot, tiedekeskukset, eläintarhat ja akvaariot opettavat hyvin monenlaisia vierailijoita, joilla voi olla aisteihin liittyviä tai fyysisiä haasteita. Näyttelyt ovat usein dynaamisia ja vuorovaikutteisia, ja niiden kohdalla saavutettavuuden huomioimisessa on omat erityiskäsymyksensä. Kun sonifikaation on tarkoitus tukea oppimista ja löytämistä, on sillä hyvä olla vuorovaikutteisia ominaisuuksia. Parhaimmillaan jopa niin, että vierailija voi itse vaikuttaa ääniesitykseen.

Bowers ja Shaw (2014) kokeilivat erilaisia metodeja äänellistääkseen kivilajeja ja fossiileja luonnonhistoriallisessa museossa. Kivet eivät juuri liiku, mutta ideana oli välittää todenmukaista materiaalin tuntua, ja erilaisista kivilajeista luotiin niitä kuvaavia äänitekstuureja esimerkiksi raesynteesin avulla. Raesynteesi on tietokonemusiikkitekniikka, jolla voidaan luoda eläviä, orgaanisia ääniä, joskaan ne eivät länsimaisen taidemusiikin näkökulmasta ole kovin sovinnaisia (Roads 2004). Bowers ja Shaw myös nauhoittivat veden, jään, hiekan ja kivien ääniä, joita käytettiin sävellysmateriaalina näyttelykokonaisuudessa, niin että luonto heräsi eloon näyttelyssä moniaistilisenä kokemuksena.

Walker kollegoineen (Walker et al. 2006) puolestaan toteutti Georgian akvaariossa saavutettavuusprojektin, jossa erilaisten kalojen ulkoiset ominaisuudet ja liikkeet muutettiin musiikillisiksi ääniksi, joilla luotiin muuttuva äänimaisema. He keräsivät sensoritekniikalla dataa kalan uimareitistä ja suunnasta, mutta myös nopeudesta aktiivisuudesta. Kalan ulkoisia ominaisuuksia varten käytettiin ennalta näytteistettyjä soittimia, ja kun kalan attribuutteihin lisättiin paikkatieto, voitiin reaaliaikainen äänimaisema luoda sekvensserin (Reason) avulla. Sonifikaation moottori rakennettiin MAX/MSP:lle. MAX on ohjelmointikieli, joka on riittävän tehokas prosessoidakseen useita erilaisia datalistoja moniajona, ja audiotoinnallisuuslaajennus MSP (*Max Signal Processing*) mahdollistaa äänisignaalin reaaliaikaisen muuntelun.

Bläsing ja Zimmermann (2021) taas koostivat näkörajoitteisten osallistamisen keinoja tanssitaiteen kentällä. He kuvasivat tanssiesityksen kokemiseen vaikuttavien visuaalisten elementtien moninaisuutta, johon kuuluvat muun muassa puvut, lavastus, valot, värit ja koreografia. Koska esityksissä voi kuulla tanssijoiden liikkeen, hengityksen, tossujen kopsahdukset sekä tekstiilien kahinan, esittivät he yhdeksi osallistamisen keinoksi haptista kulissikierrosta, jolla saa varsin konkreettisen yhteyden esitykseen. He toivat kuitenkin esille, että vaikka tanssiin kuuluukin yleensä musiikki, itse taidemuodon ydintä, ilmaisuvoimaista liikettä tarkasteltaessa liikeseuradatan sonifikaatiolla voidaan päästä visuaalisen kuvan tarkempaan vastaavuuteen. Kun keho on visuaalinen, tunnetta välittävä viestintäväline (Orgs et al. 2018), kysymys ei ole pelkästään liikeradoista, vaan myös liikkeen laadusta ja nyansseista. Tanssiliike voi olla esimerkiksi ilmava, kevyt, hauras tai maadoitettu ja voimakas, jolloin sonifikaation tulee tukea havainnollista laatua (Niewiadomski et al. 2019).

Landry ja Jeonin (2020) tavoitteena oli tuottaa musiikillisia sonifikaatioita tanssiesityksen liikkeistä ja niiden välittämistä tunteista. Sonifikaatiomalleja oli monia, ja yleisesti sonifikaatio selvensi ja syvensi liikkeen tunnesisältöä, mikä on linjassa muiden ristimodaalisten affektitutkimusten kanssa, vaikka niitä harvoin on toteutettu näkörajoitteisten ehdoilla. Landry ja Jeon toivat esille kehonkielen musiikillisen sonifikaation mahdollisuudet, mutta myös problemaattisuuden pidemmälle viettäessä, kun reaaliaikaiseen sonifikaatioon tarvitaan sekä algoritmista säveltämistä että affektiivista laskentaa eli järjestelmiä, jotka voivat tunnistaa, tulkita ja simuloida tunnetiloja. Kun dataa on riittävästi, voi älykäs algoritmi oppia aineistosta itse lainalaisuuksia, ja esimerkiksi kielen — myös kehonkielen (Lauriola et al. 2022). Tätä kutsutaan syväoppimiseksi.

Koska monet perustekniikoistakin ovat vielä hyödyntämättä, voi syväoppiminen tehdä tuloaan vielä rauhassa, mutta sillä välin erityistä vuorovaikutteista potentiaalia on kuitenkin jo reaaliaikaisella äänivasteella, joka palautuu takaisin toimintaan (ks. 3.3). Taidekontekstissa suljettuun silmukkaan perustuvaa ääniesitystä voidaan

käyttää myös luovana vuorovaikutuksen työkaluna, jolla ilmaistaan ja muokataan liikkeitä, mutta myös luodaan sävellyksiä kehon liikkeiden avulla (Giomi 2020).

### 4.3 Näkymän sonifiointi

Korva erottelee äänihavainnon osiin, mutta ympäristöä katsoessamme kokonaisuus integroituu (Wiener et al. 2009). Myös tätä yleiskatsausta varten on kehitetty useita erilaisia sonifikaatio-ohjelmia ja aistin korvauslaitteita (*sensory substitution device, SSD*), jotka muuntavat värejä, ulottuvuuksia ja kontrasteja ääneksi. Laitteet auttavat paikallistamaan ja tunnistamaan asioita, ymmärtämään ympäröivää maailmaa sekä parantamaan vuorovaikutusta (Hamilton-Fletcher et al. 2022).

Tyypillisesti (LIITE 1) sonifikaatiossa äänellistetään visuaalisia peruspiirteitä ja luetaan kuvia vasemmalta oikealle. Tämä niin sanottu pyyhkäisytekniikka on luonnollinen valinta siinä mielessä, että ääni ei voi esittää kerralla kaikkea näkemäämme, sillä siitä seuraisi kakofonia. Pyyhkäisy luo muuntuvan äänimaiseman, jossa kuullaan värit, valonlähteet, muodot, sijainnit ja syvyysvaikutelmat. Yksittäinen pikseli edustaa esimerkiksi värin HSL-komponentteja eli värin sävyä (*hue*), kylläisyyttä (*saturation*) ja valoisuutta (*lightness*), joihin on liitetty sointi ja volyyymi. Säveltasoa esittää yleensä pikselin asemaa kuvan pystyakselilla ja vaaka-akseli aikaa. Joissain ohjelmissa samanaikaisesti soitettavien äänten riitasointisuutta on lievennetty käyttämällä puolisävelaskelien sijaan esimerkiksi pentatonista asteikkoa (Abboud et al. 2014).

Banf ja Blanz (2013) ottivat haptoakustisessa kosketusnäyttösysteemissään näkymän sonifikaation toisenlaisen lähestymistavan. Järjestelmä kääntää näkymän ääniksi eri tekniikoita yhdistäen ja auttaa ymmärtämään kokonaisuutta eksploratiivisesti tutkimalla, ei pelkästään vasemmalta oikealle lukien. Visuaalisten elementtien äänivastineet perustuvat havainnollisiin ja semanttisiin skeemoihin, ja ohjelma yhdistää matalan tason tietoa, esimerkiksi värejä, algoritmeilla tuotettavaan korkeamman tason tietoon. Hahmontunnistusalgoritmit luokittelevat objekteja luonnollisiin ja ihmisen tekemiin (*man-made*). Sellaisenaan tunnistettavat kohteet ilmaistaan auditivisin ikonein (koiraa kuvaa haukunta), ja värit esitetään musiikillisilla äänillä. Esimerkiksi energistä, elävää punaista kuvaa kaksi taajuudeltaan lähekkäistä siniaaltoja, jotka luovat tremolon. Levollinen vihreä luodaan pehmeästi liikkuvalla rytmillä, joka syntyy soinnillisten siniaaltojen harmoniamonikerroista. Ihmisen tekemiä muotoja, rakennuksia ja kiinteitä pystysuoria linjoja kuvataan rytmisillä kuvioilla, mikä on tavallinen ratkaisu vastaavissa sovelluksissa, kun taas vihreää, luonnollista rosoisuutta edustaa sateen kaltainen ruskea kohina. Tilaan ja asemointiin liittyvää tietoa esitetään puolestaan stereopanooroinnilla, ääntä suuntaamalla ja häivyttämällä.

Hahmojen tunnistus kognitiivisena tehtävänä perustuu ääriivioihin ja muotoihin, joita vertaamme muistiin tallentuneisiin kuviin (Braisby et al. 2012, 105–106). Samat periaatteet pätevät myös hahmontunnistusalgoritmeihin. Vaikka prosessoimme ääniä hyvin eri tavalla kuin näköhavaintoja, kuvasi Kramer (1994, 15) äänien seurantatehtäviä hahmontunnistusta vastaavasti ”mallin sovittamiseksi”. Kun kuulijalla on aiempaa tietoa äänestä ja sen merkityksestä, tuntee hän äänen akustisen kaavan, jota sitten sovittaa olemassa olevaan äänten katalogiin. Seurantatehtävien ja eksploraatiivisten tehtävien ero on Kramerin mukaan se, että vieraan ympäristön tutkimisessa data ei mahdollista ennako-oletuksia ja äänikatalogin hyödyntämistä, vaan tarvitaan tieto kontekstista. Kuitenkin esimerkiksi Banfin ja Blanzin (2013) empiirisissä tutkimuksissa kontekstiedon ja musiikillisten äänten avulla näkörajoitteiset hahmottivat yleiskuvaa ja tunnistivat objekteja suhteellisen nopeasti ja hyvin tarkasti. Myöhemmin Banf ryhmineen (2016) kehitti järjestelmää vielä mobiililaitteille sopivammaksi, joten vastavärit esitettiin MIDI-äänten sijaan valmiilla ääniarkkityypeillä ja murretut värit niiden sekoituksena. Värisävyihin liitettiin kylläisyyden lisäksi myös valoisuusarvo valkoisesta mustaan, ja sitä kuvattiin sävelasteikoilla. Sanalliset arviot kuvista tarkentuivat, ja sovelluksen käyttäminen koettiin hyvin intuitiiviseksi.

Vaikka erilaiset sonifikaatiosovellukset eivät yksityiskäytössä sinänsä olekaan osa julkisten tilojen saavutettavuutta, on saatavilla olevalla tekniikalla selvää potentiaalia esimerkiksi taideinstituutioiden käytössä. Saman teeman nosti esille myös Nadri kollegoineen (2019). Lisäksi he totesivat, että vaikka sonifikaatiometodit ja erilaiset tiedon prosessointialgoritmit ovat kehittyneet, vain harvat ohjelmat yhdistävät erilaisia tekniikoita tehokkaasti ihanteellisen tuloksen saavuttamiseksi. Banf ja Blanz ryhmineen (2013 & 2016) ottivat jo selvän askeleen tähän suuntaan, mutta tekniikat kehittyvät jatkuvasti.

Kuvataiteen puolella on tehty jonkin verran sonifikaatiotutkimusta, ja esimerkiksi duuri-, molli- ja tempovaikutelmien sekä värien välillä todettu aistienvälistä vastaavuutta, joka perustuu värien ja äänien ilmentämiin tunteisiin (Palmer et al. 2013). Nadri ryhmineen (2019) vei yhdistelmämetodivisiossaan taideteosten sonifikaation vielä hieman pidemmälle. Koska algoritmit tunnistavat jo kuvataiteen tyyllilajeja (Bar et al. 2015; Saleh & Elgammal 2016; Rodriguez et al. 2018; Smirnov & Eguizabal 2018) sekä eri säveltäjien ominaispiirteitä (De Prisco 2017; Moss et al. 2019), esittävät he, että nämä kaksi taiteenlajia yhdistetään tyylikauden mukaan. Toistaiseksi algoritmeja on testattu taiteen ja musiikin asiantuntijoilla, eikä tutkimusta ole tehty niinkään näkörajoitteisten taidekokemus mielessä, mutta ajatus on silti varsin mielenkiintoinen, ja samansuuntainen kuin Landryn ja Jeonin (2020) edistyksellinen näkemys liikekielen sonifikaatiosta.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkielman tavoitteena oli kartoittaa tietoa tavoista ja tekniikoista, joilla musiikillisia ääniä on käytetty saavutettavuuden ja esteettömyyden parantamiseksi julkisissa tiloissa. Lisäksi tarkoituksena oli tutkia musiikin tehokkuutta mainituissa tehtävissä, niin teoreettisesti tarkasteltuna kuin empiirisesti todennettunakin, mutta myös nostaa esille musiikin vielä hyödyntämätön potentiaali saavutettavuuskysymyksissä. Ääni-interaktiosuunnittelussa on hyvä tunnistaa rooleja, joita äänellä voi olla käyttäjien ja palvelujen tai tuotteiden sekä ympäristön vuorovaikutuksessa.

Musiikkia käytettiin hyvin erilaisissa avustavissa järjestelmissä ja sovelluksissa, mutta toisaalta myös kunnianhimoisissa saavutettavuusprojekteissa reaaliaikaisen ja vuorovaikutteisen äänimaiseman luomiseksi. Musiikin avulla kuvattiin kontekstia, tiloja, tapahtumia, yleisnäkyviä, materiaaleja, muotoja, värejä, taidetta, etäisyyksiä, syvyysvaikutelmia, valonlähteitä, etenemistä, käännöksiä, tanssiliikkeitä ja tunteita. Näiden lisäksi musiikilla ohjattiin toimintaa. Ilahduttavaa oli, että musiikin intuitiivisuus ja tehokkuus todennettiin lähes poikkeuksetta näkörajoitteisten kohdekäyttäjär ryhmän avulla.

Vaikka akustisen ekologian kentällä on edustettuna myös näkemys, etteivät musiikilliset äänet välttämättä kuulu arkiseen viranomaisympäristöön, musiikin hyötykäyttöä puoltavat lukuisat seikat. Semiotiikan näkökulmasta musiikillinen signaali voi olla hyvin yleistajuinen ja intuitiivinen tietoa ja ohjeita välittäessään, kunhan tehtävän määrittely suoritettu ja kohderyhmä huomioitu. Psykoakustiikan teoreemojen pohjalta musiikillisesta signaalista voidaan tehdä paremmin havaittava, mutta siitä huolimatta ne ovat yleisesti miellyttävämpiä kuin yksinkertaiset siniäänisignaalit, millä on myös psykologisia vaikutuksia viestin ymmärtämiseen, vuorovaikutuksen onnistumiseen, motivaatioon sekä sovellusten käytettävyyteen.

Kognitiivisen käsittelyn näkökulmasta musiikillisten rakenteiden avulla on melko vaivatonta ymmärtää muuttuvia arvoja, sillä äänet havaitaan jatkumossa, suh-

teessa toisiinsa, eivätkä ne siten vaadi pinnistelyä arvojen muistamisessa tai vertailussa. Musiikin metriikalla voidaan luoda tiedolle suhteellinen mitta-asteikko, konteksti, johon etenemisen ja muutoksen tuntu tai funktion arvot pohjautuvat, ja ylipääntään dynaamisia tapahtumia on luontevaa esittää musiikin avulla, sillä se elää ajassa. Muuntumiseen ja muunneltavuuteen perustuu myös musiikin vahvuus toiminnanohjaajana. Koska musiikillinen kehittäminen johdattaa meidät ajatuksissa alitajuisiin jatkotoimiin, on sillä suotuisa vaikutuksensa reaktioaikaan vuorovaikutuksessa. Liikkeiden reaaliaikainen sonifikaatio tukee itsenäistä kulkemista, mutta myös harrastamista ja osallistamista. Sonifikaation avulla voidaan esittää eri taiteenlajeja, kuten tanssia, kuvataidetta ja arkkitehtuuria väreineen, tunnelmineen ja tunnesisältöineen.

Tämä hengästyttävä määrä tutkimuksissa esille tulleita ihmisen ja musiikillisen äänen vuorovaikutusmalleja tuottaa myös testattavia hypoteeseja, joita voidaan hyödyntää, kun ääniesityksiä luodaan ohjelmallisesti. Teoreettisten viitekehysten avulla saadaan suunnittelun pohjaksi parempi ymmärrys äänien kognitiivisesta käsittelystä. Visuaalisten elementtien äänivastineiden tuottamisen ideahan ei ole mitenkään uusi (ks. esim. Kay 1974; Meijer 1992). Vaikka äänisignaalien potentiaali jokapäiväisessä hyötykäytössä onkin tunnustettu, ja aihe on herättänyt suurta mielenkiintoa näkörajoitteisten parissa, eivät tekniset ratkaisut ole toistaiseksi oikein juurtuneet käyttöön. Aineistossa tuli vastaan useita välitilinpäätöksiä, joissa todettiin, että erilaisia avustavia teknologioita ja prototyyppisiä on, mutta laajemmin käytössä olevaa kuluttajaversiota ei. Syitä tähän on monia. Käyttäjäkyselyistä välittyi, että laitteita on pidetty kalliina, vaivalloisina tai vaikeakäyttöisinä ja niiden tuottamia ääniä epämiellyttävänä tai ärsyttävänä (mm. Elli et al. 2014; Sanz et al. 2014; Osinski et al. 2021; Hamilton-Fletcher et al. 2022).

Aiemmissä ratkaisuisissa äänimaailma onkin ollut melko karkeaa siniäänipulsaatiota, eikä järjestelmien intuitiivisuudesta tai musiikillisuudesta ole oikein voinut puhua. Suurin osa ihmisistä ei myöskään halua erottua joukosta, ainakaan pitämällä kameraa otsassaan, mutta hienovaraisuuden ja estetiikan merkitystä käyttäjille ei pidä koskaan aliarvioida. Tekniikan jalostumattomuus on siis ollut yksi käytön este. Vasta varsin hiljan laitteet ovat kutistuneet, ja monista erillislaitteista on tullut tarpeettomia, sillä yhä useammat ohjelmat toimivat myös älypuhelimilla. Käytettävyyden kannalta vähintään yhtä tärkeää on, että ohjelmien äänimaailma on estetisoitunut.

Siiloutunut tutkimusaineisto kuvastaa oikeastaan kentän keskeisiä haasteita. Ensinnäkin, monenlaisia projekteja on tehty, ja teknisten ratkaisujen kirjo on huima, mutta tehokas menetelmien yhteensovittaminen on vasta alussa. Sovelletun tieteen keksintökenttä on liian laaja, jotta synergia toimisi hyvin. Sen lisäksi kysymys voi olla liiketoiminnasta tai patenteista. Muutamia OpenSource-standardisointiyrityksiä (esim. Ben-Tal et al. 2002) lukuun ottamatta sääntely vaikutti heikolta, vaikka standardisoidut ja teknologianeutraalit ratkaisut olisivat tärkeitä audiopohjaisten opasteiden

käyttöönottojen, käytettävyyden ja laajemman yhteensopivuuden kannalta. Kysymys on kuitenkin yleishyödyllisestä asiasta. Juuri siksi julkisten toimijoiden olisi hyvä ottaa vahva rooli audiopohjaisten palvelujen tarjoamisessa.

Sonifikaation hyödyntäminen erilaisissa avustavissa sovelluksissa on kuitenkin ollut jatkuvasti esillä, ja yhdistelmätekniikoissa on päästy askelia eteenpäin. Verraten tuore älypuhelininvaasio on mahdollistanut monia uusia ratkaisuja, ja ultraäänimajakoihin perustuvan tarkan paikannuksen ja tiedonsiirron hyödyntäminen on vaikuttanut oleellisella tavalla näkörajoitteisten mahdollisuuteen kulkea ja matkustaa itsenäisesti. Mikä merkittävintä, tuloksena oli hyvin nopeasti audionavigointistandardi (ITU-T F.921/2018). Toisaalta viimeaikainen lainsäädäntö (306/2019 & 1325/2014) on tarkoittanut lisää painetta, valvontaa ja suuntaviivoja yhdenvertaisuuden edistämiseksi.

Laskentatehon kannalta jo melko mielikuvitukselliset asiat alkavat olla realiteettia. Kun sonifikaation perusmalleissa äänitekstuuri syntyy kuvista pikseli pikseliltä, kehittyneemmissä ohjelmissa muodot ja värit käännetään musiikillisiksi ääniksi algoritmien avulla, ja systeemi on todettu intuitiiviseksi. Oma lukunsa on visionäärinen korkeakulttuuripalapeli, jossa älykäs kone tunnistaa kuvataiteen tyylikauden ja kytkee sen tunnesisältöä tai lajityyppiä vastaavaan musiikkiin. Yhtä jännittävää on, että liikesensoridatasta saadaan koneiden tulkitsemien tunnetilojen kautta lähtötiedot sävellysalgoritmeille.

Jo olemassa olevat, audiopohjaiset ja musiikkia hyödyntävät tekniset ratkaisut soveltuvat käyttökokemustutkimusten perusteella mainiosti saavutettavuuden parantamiseen yksityishenkilöiden päivittäisessä elämässä, matkustaessa ja ostoksilla, oli sitten kysymys hedelmä- ja vihannesosaston värikylläisyydestä tai vaatteiden välinnasta. Jatkoa ajatellen odotan mielenkiinnolla, miten visionääriset tiedeprojektit arkipäiväistyvät, ja musiikilliset äänet saadaan julkiseen hyötykäyttöön, luontevaksi osaksi kaupunkiympäristöä, viranomaispalveluja, oppimisympäristöjä ja eri alojen taidelaitoksia. Kokeilujen tulokset ovat kuitenkin kannustavia, keskustelu vireillä, ja monista asioista on tullut teknisesti mahdollisia hyvin lyhyessä ajassa. Aihe ansaitsee lisätutkimusta, ja mikäli tuloksia halutaan hyödyntää palvelumuotoilussa, on käytännön suunnittelutyö ja testaus tehtävä yhdessä kokemusasiantuntijoiden kanssa. Tämä oli esillä kautta linjan myös tämän tutkielman aineistossa. Näkevät yksin eivät voi suunnitella palveluja näkörajoitteisille, vaan on yhdessä varmistettava, mikä tieto heitä palvelee parhaiten.

## LÄHTEET

Association or Computing Machinery = ACM  
International Conference on Auditory Display = ICAD

- Ackland, P., Resnikoff, S. & Bourne, R. (2017). World blindness and visual impairment: despite many successes, the problem is growing. *Community eye health*, 30(100), 71–73.
- Abboud, S., Hanassy, S., Levy-Tzedek, S., Maidenbaum, S. & Amedi, A. (2014). EyeMusic: Introducing a "visual" colorful experience for the blind using auditory sensory substitution. *Restorative neurology and neuroscience*, 32(2), 247–257. <https://doi.org/10.3233/RNN-130338>
- Ahmetovic, D., Avanzini, F., Baratè, A., Bernareggi, C., Galimberti, G., Ludovico, L. A., Mascetti, S. & Presti, G. (2019). Sonification of Rotation Instructions to Support Navigation of People with Visual Impairment. *Proceedings IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, 332–341. <https://doi.org/10.1109/PERCOM.2019.8767407>
- Banf, M. & Blanz, V. (2013). Sonification of images for the visually impaired using a multi-level approach. *ACM International Conference Proceeding Series*, 162-169. <https://doi.org/10.1145/2459236.2459264>
- Banf, M., Mikalay, R., Watzke, B. & Blanz, V. (2016). PictureSensation – a mobile application to help the blind explore the visual world through touch and sound. *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*, 3(Jan), 1–10. <https://doi.org/10.1177/2055668316674582>
- Bartholmé, R. H. & Melewar, T. C. (2011). Exploring the Auditory Dimension of Corporate Identity Management. *Marketing Intelligence and Planning*, 29(2), 92–107.
- Bar, Y., Levy, N. & Wolf, L. (2015). Classification of artistic styles using binarized features derived from a deep neural network, *Lecture Notes Computer Science*, vol. 8925, 71–84. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16178-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16178-5_5)
- Ben-Tal, O., Berger, J., Cook, B. Daniels, M., Scavone, G. & Cook, P. (2002). SonART: The sonification application research toolbox. *Proceedings of the 2002 ICAD*.
- Bläsing, B. & Zimmermann, E. (2021). Dance Is More Than Meets the Eye – How Can Dance Performance Be Made Accessible for a Non-sighted Audience? *Frontiers in Psychology* 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.643848>
- Braisby, N., Gellatly, A. & Angus Gellatly. (2012). *Cognitive Psychology*. OUP Oxford. [https://digitalcommons.risd.edu/liberalarts\\_contempaesthetics/vol2/iss1/13](https://digitalcommons.risd.edu/liberalarts_contempaesthetics/vol2/iss1/13)
- Bowers, J. & Shaw, T. (2014). Reappropriating museum collections: performing geology specimens and meteorology data as new instruments for musical expression. *New Interfaces for Musical Expression*, 14, 175–178. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1178720>
- Bujacz, M., Skulimowski, P. & Strumillo, P. (2012). Naviton - A Prototype Mobility Aid for Auditory Presentation of Three-Dimensional Scenes to the Visually



- Impaired. *Journal of the Audio Engineering Society*, 60(9), 696–708.  
<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16374>
- Bujacz, M., Kropidlowski, K., Ivanica, G., Moldoveanu, A., Saitis, C., Csapo, A., Wersenyi, G., Spagnol, S., Johannesson, O., Unnthorsson, R., Rotnicki, M. & Witek, P. (2016). Sound of Vision - Spatial Audio Output and Sonification Approaches. *International Conference on Computers Helping People with Special Needs: Lecture Notes in Computer Science*, 9759, 202–209.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-41267-2\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41267-2_28)
- Buxton, W. (1989). Introduction to this special issue on nonspeech audio. *Human-Computer Interaction*, 4, 1–9.
- Calleja, M. (2003). Semiotics as a Model for a Musical Temporal Logic. *Musiikki* 33(4) 74–89. Helsinki: Suomen musiikkiteollinen seura.
- Coleman, G., Macaulay, C. & Newell, A. (2008). Sonic mapping - Towards engaging the user in the design of sound for computerized artifacts. *NordiCHI*, 83–92.  
<https://doi.org/10.1145/1463160.1463170>
- Cohen J. (1994 a). Monitoring Background Activities. *Auditory Display: Sonification, Audification and Auditory interfaces*, toim. G. Kramer. Reading, MA, USA: Addison-Wesley Publishing Company. 499–532
- Cohen, J. (1994 b). Out to lunch: Further adventures monitoring background activity, toim. G. Kramer, S. Smith. *ICAD*, 15–20.
- Coop, A. (2016). Sonification, Musification, and Synthesis of Absolute Program Music. *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> ICAD*, 1–7. <https://doi.org/10.21785/icad2016.030>
- De Lucia, M., Camen, C., Clarke, S. & Murray, M. (2009). The role of actions in auditory object discrimination. *Neuroimage*, 48(2), 475–485.
- De Prisco, R., Malandrino, D., Zaccagnino, G., Zaccagnino, R. & Zizza, R. (2017). A Kind of Bio-inspired Learning of mUsic style, *Computational Intelligence in Music, Sound, Art and Design*, 97–113.
- Digipalvelulaki (306/2019). Oikeusministeriön oikeudellisen aineiston palvelu. Viitattu 10.3.2022 <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190306>
- Dubus, G. & Bresin, R. (2013). A Systematic Review of Mapping Strategies for the Sonification of Physical Quantities. *PLoS ONE*, 8(12), e82491.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082491>
- Elli, G.V., Benetti, S., Collignon, O. (2014). Is There a Future for Sensory Substitution Outside Academic Laboratories? *Multisensory Research*, 27(5-6), 271-291.  
<https://doi.org/10.1163/22134808-00002460>
- Gaver, W., Smith, R. & O’Shea, T. (1991). Effective sounds in complex systems: The ARKOLA simulation, toim. S. Robertson, G. Olson & J. Olson. Proceedings of the *Conference on Human Factors in Computing Systems*, 85–90.  
<https://doi.org/10.1145/108844.108857>
- Giomi, A. (2020). Somatic sonification in dance performances. From the Artistic to the Perceptual and Back. *Proceedings of the 7th International Conference on Movement and Computing MOCO 7*, 1–8. ACM, New York, USA.  
<https://doi.org/10.1145/3401956.3404226>
- Godbout, A. & Boyd, J. E. (2010). Corrective sonic feedback for speed skating: A case study. *Proceedings of the 16<sup>th</sup> ICAD*, 23–30.

- Hamilton-Fletcher, G. Alvarez, J., Obrist, M. & Ward, J. (2022). SoundSight: a mobile sensory substitution device that sonifies colour, distance, and temperature. *Journal on Multimodal User Interfaces* 16, 107–123.  
<https://doi.org/10.1007/s12193-021-00376-w>
- Hermann, T., Hunt, A. & Neuhoff, J. toim. (2011). *The Sonification Handbook*. Berlin: Logos Verlag.
- Juslin, P. N. & Västfjäll, D. (2008). Emotional responses to music: The need to consider underlying mechanisms. *Behavioral and Brain Sciences*, 31(5).  
<https://doi.org/10.1017/S0140525X08005293>
- Jordan, D. S. & Shepard, R. N. (1987). Tonal schemas: Evidence obtained by probing distorted musical scales. *Special Issue: The understanding of melody and rhythm*, 41, 489–504.
- Jäsenvaltiot. International Telecommunication Unionin (ITU) verkkosivut. Viitattu 10.3.2022. [https://www.itu.int/en/ITU-R/terrestrial/fmd/Pages/administrations\\_members.aspx](https://www.itu.int/en/ITU-R/terrestrial/fmd/Pages/administrations_members.aspx)
- Kay, L. (1974). A sonar aid to enhance spatial perception of the blind: Engineering design and evaluation. *Radio and Electronic Engineer*, 44(11), 605–627.
- Keller, P. & Stevens, C. (2004). Meaning from environmental sounds: Types of signal referent relations and their effect on recognizing auditory icons. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 10(1), 3–12.
- Kramer, G. (1994). An introduction to auditory display. *Auditory Display: Sonification, Audification and Auditory interfaces*, toim. G. Kramer. Reading, MA, USA: Addison-WesleyPublishing Company. 1–78.
- Kramer, G., Walker, B., Bonebright, T., Cook, P., Flowers, J., Miner, N., Neuhoff, J., Bargar, R., Barrass, S., Berger, J., Evreinov, G., Fitch, W., Grohn, M., Handel, S., Kaper, H., Levkowitz, H. Lodha, S., Shinn-Cunningham, B., Simoni, M. & Tipei, S. (1999). The sonification report: Status of the field and research agenda. *Report prepared for the National Science Foundation by members of the International Community for Auditory Display*.
- Krumhansl, C. L. (1983). Perceptual structures for tonal music. *Music Perception* 1, 28–62.
- Kumar, S., Forster, H., Bailey, P. & Griffiths, T. (2009). Mapping unpleasantness of sounds to their auditory representation. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 124(6), 3810–7. <https://doi.org/10.1121/1.3006380>
- Landry, S. & Jeon, M. (2020). Interactive sonification strategies for the motion and emotion of dance performances. *Journal of Multimodal User Interfaces*, 14, 167–186. <https://doi.org/10.1007/s12193-020-00321-3>
- Lauriola, I., Lavelli, A. & Aiolli, F. (2022). An introduction to Deep Learning in Natural Language Processing: Models, techniques, and tools, *Neurocomputing*, 470, 443–456. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.05.103>
- Leman, M. (2008). *Embodied music cognition and mediation technology*. The MIT Press.
- Mascetti, S., Ahmetovic, D., Gerino, A., Bernareggi, C. (2016). ZebraRecognizer: Pedestrian Crossing Recognition for People with Visual Impairment or Blindness. *Pattern Recognition*, 60(Dec), 405–419.  
<https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.05.002>

- Mauney, L. M. & Walker, B. N. (2010). Universal design of auditory graphs: A comparison of sonification mappings for visually impaired and sighted listeners. *ACM Transactions on Accessible Computing*, 2(3), Article 12.
- Mavroudis, V., Hao, S., Fratantonio, Y., Maggi, F., Kruegel, C., Vigna, G. (2017). On the Privacy and Security of the Ultrasound Ecosystem. *Proceedings on Privacy Enhancing Technologies*, 2017(2), 95–112.  
<https://doi.org/10.1515/popets-2017-0018>
- McGookin, D. K. & Brewster, S. A. (2004). Understanding concurrent earcons: Applying auditory scene analysis principles to concurrent earcon recognition. *ACM Transactions on Applied Perception*, 1, 130–150.
- Meijer, P.B. (1992). An experimental system for auditory image representations. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 39(2), 112-121.
- Menegotto, J. (2017). Hybrid Indoor Location Infrastructure based on BLE beacons, BLE Lighting Devices and Music Combination. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 6(7), 56–64.
- Moss, F., Neuwirth, M., Harasim, D. & Rohrmeier, M. (2019). Statistical characteristics of tonal harmony: A corpus study of Beethoven's string quartets. *PLoS ONE*. 14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217242>
- Nadri, C., Anaya, C., Yuan, S. & Jeon, M. (2019). Preliminary guidelines on the sonification of visual artworks: linking music, sonification and visual arts, *Proceedings of the 25<sup>th</sup> ICAD*, 323-326. <https://doi.org/10.21785/icad2019.074>
- Neuhoff, J. G., Knight, R. & Wayand, J. (2002). Pitch change, sonification, and musical expertise: Which way is up? *Proceedings of the ICAD*.
- Neuhoff, J. G. (2011). Perception, cognition and action in auditory display. *The Sonification Handbook*, toim. T. Hermann, A. Hunt & J. G. Neuhoff, Berlin: Logos Verlag. 63–85.
- Niewiadomski, R., Mancini, M., Cera, A., Piana, S., Caneta, C. & Camurri, A. (2019). Does embodied training improve the recognition of mid-level expressive movement qualities sonification? *Journal of Multimodal User Interfaces* 13, 191–203. <https://doi.org/10.1007/s12193-018-0284-0>
- Orgs, G., Calvo-Merino, B. & Cross, E. S. (2018). Knowing dance or knowing how to dance? Sources of expertise in aesthetic appreciation of human movement, *The Neurocognition of Dance - Mind, Movement and Motor Skills*, toim. B. Bläsing, M. Puttke & T. Schack. NY: *Psychology Press*, 238–257.
- Osinski, D., Łukowska, M., Hjelme, D. & Wierzchoń, M. (2021). Colorophone 2.0: A Wearable Color Sonification Device Generating Live Stereo-Soundscapes – Design, Implementation, and Usability Audit. *Sensors* 21(21), 7351.  
<https://doi.org/10.3390/s21217351>
- Palmer, S. E., Schloss, K. B., Xu, Z. & Prado-León, L. R. (2013). Music-color associations are mediated by emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(22), 8836–8841.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1212562110>
- Pirhonen, A., Murphy, E., McAllister, G. & Yu, W. (2006). Non-speech sounds as elements of a use scenario: A semiotic perspective. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> ICAD*.  
<https://doi.org/10.1097/WCO.0b013e32834ed723>

- Presti, G., Ahmetovic, D., Ducci, M., Bernareggi, C., Ludovico, L., Avanzini, F. & Mascetti, S. (2019). WatchOut: Obstacle Sonification for People with Visual Impairment or Blindness. *ASSETS '19: The 21<sup>st</sup> International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, 402–413.  
<https://doi.org/10.1145/3308561.3353779>
- Roads, C. (2004). *Microsound*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Rodriguez, C. S., Lech, M. & Pirogova, E. (2018). Classification of style in fine-art paintings using transfer learning and weighted image patches. *12<sup>th</sup> International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 1–7.  
<https://doi.org/10.1109/ICSPCS.2018.8631731>
- Ronkainen, S. (2001). Earcons in motion--defining language for an intelligent mobile device. *Proceedings of the ICAD*.
- Saleh, B. & Elgammal, A. (2016). Large-scale Classification of Fine-Art Paintings: Learning The Right Metric on The Right Feature. *International Journal for Digital Art History*, (2). <https://doi.org/10.11588/dah.2016.2.23376>
- Salminen, A. (2011). Mikä kirjallisuuskatsaus?: Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyyppeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin. Vaasa: Vaasan yliopisto.
- Sanz, P., Mezcuca, B., Pena, J. & Walker, B. N. (2014). Scenes and images into sounds: a taxonomy of image sonification methods for mobility applications. *Journal of the Audio Engineering Society* 62(3), 161-171.
- Scholz, D., Rohde, S., Nikmaram, N., Brückner, H.-P., Großbach, M., Rollnik, J. D. & Altenmüller, E. O. (2016). Sonification of Arm Movements in Stroke Rehabilitation - A Novel Approach in Neurologic Music Therapy. *Frontiers in Neurology*, 7, 106–106. <https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00106>
- Serafin, S., Franinovic, K., Hermann, T., Lemaitre, G., Rinott, M. & Rocchesso, D. (2011). Sonic Interaction Design. *The Sonification Handbook*, toim. T. Hermann, A. Hunt & J. G. Neuhoff. Berlin: Logos Verlag, 87–110.
- Shams L & Kim R. (2010). Crossmodal influences on visual perception. *Physics of Life Reviews*, 7(3), 269–284. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2010.04.006>
- Shepard, R. N. (1982). Geometrical approximations to the structure of musical pitch. *Psychological Review*, 89, 305–333.
- Smirnov, S. & Eguizabal, A. (2018). Deep learning for object detection in fine-art paintings. *Metrology for Archaeology and Cultural Heritage*, 45–49. IEEE.
- Smith, D. R. & Walker, B. N. (2002). Tick-marks, axes, and labels: The effects of adding context to auditory graphs. *Proceedings of the ICAD*, 1–6.
- Spagnol, S., Wersenyi, G., Bujacz, M., Mitruț, O., Herrera Martínez, M., Moldoveanu, A. & Unnthorsson, R. (2018). Current Use and Future Perspectives of Spatial Audio Technologies in Electronic Travel Aids. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2018/3918284>
- Standardit. International Telecommunication Unionin (ITU) verkkosivut. Viitattu 10.3.2022. <https://www.itu.int/rec/T-REC-F.921-201808-I/en>
- Thompson, E. & Stapelton, M. (2009). Making sense of sense-making: Reflections on enactive and extended mind theories. *Topoi*, 28, 23–30.
- Truax, B., toim. (1978). *Handbook for Acoustic Ecology*, Burnaby, B.C. Canada: ARC Publications.



- Yhdenvertaisuusdirektiivi (2000/78/EY). EU:n oikeudellisen aineiston palvelu. Viitattu 10.3.2022. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/78/oj>
- Yhdenvertaisuuslaki (1325/2014). Oikeusministeriön oikeudellisen aineiston palvelu. Viitattu 10.3.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20141325>
- van Zuijlen T. L., Sussman, E., Winkler, I., Näätänen, R. & Tervaniemi, M. (2005). Auditory organization of sound sequences by a temporal or numerical regularity – A mismatch negativity study comparing musicians and non-musicians. *Cognitive Brain Research*, 23, 240-276.
- Walker, B. N. & Lane, D. M. (2001). Psychophysical scaling of sonification mappings: A comparison of visually impaired and sighted listeners. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> ICAD*, 90-94.
- Walker, B. N. (2002). Magnitude estimation of conceptual data dimensions for use in sonification. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 8(4), 211-221. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.8.4.211>
- Walker, B. N., Godfrey, M. T., Orlosky, J. E., Bruce, C. & Sanford, J. (2006). Aquarium sonification: Soundscapes for accessible dynamic informal learning environments. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> ICAD*, 238-241.
- Walker, B., N. & Nees, M. (2011). Theory of Sonification. *The Sonification Handbook*, toim. T. Hermann, A. Hunt & J. G. Neuhoff. Berlin: Logos Verlag, 9-39.
- Wright, T. & Ward, J. (2013). The evolution of a visual-to-auditory sensory substitution device using interactive genetic algorithms. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 66(8), 1620-1638. <https://doi.org/10.1080/17470218.2012.754911>
- Watson, C. & Kidd, G. (1994). Factors in the design of effective auditory displays, toim. G. Kramer, S. Smith. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> ICAD*.
- Wayfindr. Wayfindr Open Sourcen verkkosivut. Viitattu 10.3.2022. <https://www.wayfindr.net>
- Vickers, P. & Hogg, B. (2006). Sonification abstraite/sonification concrète: An aesthetic perspective space for classifying auditory displays in the ars musica domain. Toim. T. Stockman, L. V. Nickerson, C. Frauenberger, A. D. N. Edwards & D. Brock, *The 12<sup>th</sup> Meeting of the ICAD*, 210-216.
- Wiener, J., Büchner, J. Hölscher, C. & Büchner, S. (2009). Taxonomy of Human Wayfinding Tasks: A Knowledge-Based Approach. *Spatial Cognition & Computation*, 9(2), 152-165. <https://doi.org/10.1080/13875860902906496>
- Wishart, Trevor. 1996. *On Sonic Art*. Amsterdam: Harwood Academic Publishers.
- Äänimajakka. Helsingin kaupungin keskustakirjasto Oodin verkkosivut. Viitattu 10.3.2022. <https://www.oodihelsinki.fi/oodin-aanimajakka-2-0/>

## LIITTEET

### LIITE 1: SSD-OHJELMISTOJA 2012-

#### Colorophone 2.0

Osinski, D., Łukowska, M., Hjelme, D., Wierzchoń, M. (2021). Colorophone 2.0: A Wearable Color Sonification Device Generating Live Stereo-Soundscapes – Design, Implementation, and Usability Audit. *Sensors* 21(21), 7351. <https://doi.org/10.3390/s21217351>

#### Musical Vision

Polo, A. & Sevillano, X. (2018). Musical Vision: an interactive bio-inspired sonification tool to convert images into music. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 13, 231-243.

#### EyeMusic

Abboud, S., Hanassy, S., Levy-Tzedek, S., Maidenbaum, S. & Amedi, A. (2014). EyeMusic: Introducing a "visual" colorful experience for the blind using auditory sensory substitution. *Restorative neurology and neuroscience*, 32(2), 247-257. <https://doi.org/10.3233/RNN-130338>

#### SonarX

Cavaco, S., Mengucci, M., Henriques, T., Correia, N. & Medeiros, F. (2013). From pixels to pitches: Unveiling the world of color for the blind, IEEE 2<sup>nd</sup> International Conference on Serious Games and Applications for Health, for Health (SeGAH), *Book of Proceedings*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/SeGAH.2013.6665305>

#### SoundSight

Hamilton-Fletcher, G. Alvarez, J., Obrist, M. & Ward, J. (2022). SoundSight: a mobile sensory substitution device that sonifies colour, distance, and temperature. *Journal on Multimodal User Interfaces* 16, 107-123. <https://doi.org/10.1007/s12193-021-00376-w>

#### Synaestheatre

Hamilton-Fletcher, G. Mengucci, M. & Medeiros, F. (2016). Synaestheatre: Sonification of Coloured Objects in Space. Proceedings of the international conference on live interfaces, 252-256. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5053.7845>