

Virve Vuontela

Kouluikäisten lasten työmuistin toiminta ja kehittyminen

Tämä artikkeli pohjautuu Virve Vuontelan väitöskirjaan *Developmental, functional brain imaging and electrophysiological evidence of visual and auditory working memory* (Vuontela, 2008).

Työmuisti on oppimisen edellytys ja välttämätöntä jokapäiväisessä elämässä selviytymisessä. Häiriöt työmuistin toiminnassa vaikeuttavat oppimista, ja niihin liittyy usein myös ongelmakäyttäytymistä. Artikkelissa selvitetään näkö- ja kuuloaistiin perustuvan työmuistin taustalla olevien aivomekanismien toimintaa ja mekanismien kehittymistä 6–13-vuotiailla lapsilla. Samoin selvitetään kouluikäisten lasten työmuistisuorituksen yhteyttä koulumenestykseen ja lapsilla todettuun psyykkiseen oireiluun. Tutkimusmenetelminä on käytetty käyttäytymistutkimuksia ja aivojen toiminnallista magneettikuvantamista (fMRI).

Tulokset osoittavat, että tyttöjen ja poikien näkö- ja kuuloaistiin perustuva paikkasidonnainen työmuisti kehittyy 6–13 ikävuoden välillä merkitsevästi. Näköaistiin perustuva työmuistisuoritus saavuttaa aikuisen tason aikaisemmin kuin kuuloaistiin perustuva, ja tyttöjen kehitys

on nopeampaa kuin poikien. Lapset, jotka suoriutuvat hyvin työmuistitehtävistä, menestyvät myös hyvin koulussa. Tutkimuksen 6–8-vuotiaiden lasten ryhmässä havaittiin heikon työmuistisuorituksen ja tarkkaavaisuusongelmien välinen yhteys, mikä viittaa hitaasti kehittyvän otsalohkon etuosan osuuteen koulunkäyntinsä aloittavien lasten käytös- ja oppimisvaikeuksien taustalla. Tutkimus osoitti myös, että lasten näköaistiin perustuva työmuisti toimii eri tavalla kuin aikuisten. Aikuisten työmuistissa tieto ärsykkeen paikasta ja väristä käsitellään eri hermoverkoissa, kun taas lapsilla samat hermoverkot käsittelevät sekä ärsykkeen paikkaa että väriä. Tarkkaavaisuuden suuntaaminen ärsykkeen paikkaan tai väriin käsitellään kuitenkin lapsillakin osittain erillisissä hermoverkoissa. Tämä tulos viittaa siihen, että 11–13 vuoden iässä näköaistiin perustuvat tarkkaavaisuusmekanismit ovat jo osittain eriytyneitä mutta työmuistimekanismit eivät vielä ole.

Asiasanat: työmuisti, kehitys, koulumenestys, psyykkinen oireilu, toiminnallinen magneettikuvantaminen

JOHDANTO

Työmuistilla tarkoitetaan kykyä pitää mielessä aistihavaintojen tuomaa tai pitkäkestoisesta säilömuistista palautettua tietoa lyhyen, yleensä muutaman sekunnin pituisen ajan, ja muovata käyttäytymistä tämän tiedon pohjalta (Baddeley, 1992). Toisin kuin pitkäkestoinen muisti, työmuisti uusiutuu nopeasti ja jatkuvasti, ja aiempi tieto korvautuu uudella. Muistin eri osaluista juuri työmuistin toimintaan perustuu se, että kykenemme ajattelemaan, päättelämään sekä ratkaisemaan ongelmia. Normaalisti toimivan työmuistin avulla voimme jatkuvasti sopeutua uusiin tilanteisiin tarkoituksenmukaisella tavalla. Toimiva työmuisti on myös ehdoton oppimisen edellytys. Työmuistihäiriöt vaikeuttavat oppimista kaikilla osa-alueilla, jopa opetuksen ymmärtämistä, ja niihin liittyy usein ongelmakäyttäytymistä (De Jong, 1998; McLean & Hitch, 1999).

Lapsen työmuisti kehittyy asteittain, varttumisen myötä lapsen suoriutuminen työmuistitehtävistä paranee. Tälle kehitykselle on luonteenomaista, että lapsen kyky ylläpitää tietoa työmuistissa kasvaa varsin nopeasti aina kahdeksaan ikävuoteen asti ja saavuttaa aikuisen tason jo noin 11–13 vuoden iässä, mutta kyky ohjata työmuistin toimintaa kehittyy huomattavasti hitaammin ja jatkaa kypsymistään aina varhaisaikuisuuteen asti (Gathercole, 1999; Luna, Garver, Urban, Lazar & Sweeney, 2004). Aivojen kehitystä koskevat tutkimukset ovat osoittaneet, että työmuistin toiminnan kannalta keskeiset aivoalueet erityisesti otsalohkon etuosan alueella jatkavat kypsymistään aina varhaisaikuisuuteen asti (Casey, Tottenham, Liston & Durston, 2005). Ajatellaankin, että lapsuuden ja nuoruuden aikana aivojen rakenteellinen ja toiminnallinen kypsyminen tapahtuu rinnakkain käyttäytymisen ja kognitiivis-

ten toimintojen kehittymisen kanssa.

Työmuistin kehittymistä on tutkittu erilaisten työmuistitehtävien avulla, joista niin kutsuttu n-back-tehtävä on osoittautunut erityisen käyttökelpoiseksi kouluikäisten lasten työmuistin testaamisessa. Tässä tehtävässä tutkittavalle esitetään ärsykejä, jotka voivat olla esimerkiksi erikorkuisia tai eri paikoissa esitettäviä ääniä tai näyttöpäätteen ruudun eri kohdissa esitettäviä kuvia. Tutkittavan tehtävänä on vastata jokaisen esitetyn ärsykkeen jälkeen painamalla hiiren oikeaa tai vasenta painiketta. Tehtävän helpoin taso on 0-back; siinä tutkittava painaa esimerkiksi hiiren vasenta painiketta aina kun ärsyke on tietynlainen (esim. tietynkorkuinen ääni, laatu kerrotaan tutkittavalle ennen kokeen alkua). Jos ärsyke on erilainen, tutkittava painaa oikeanpuoleista painiketta. 1-back-tehtävässä vasenta painiketta painetaan aina, kun ärsyke on samanlainen kuin edellinen ärsyke (2-back-tehtävässä samanlainen kuin kahta aiemmin esitetty jne.), ja oikeaa painiketta, jos ärsyke on erilainen. Tehtävää voidaan siis asteittain vaikeuttaa kasvattamalla n-lukua ja samalla mielessä pidettävän tiedon määrää. Ärsykkeet ja motoriset reaktiot pysyvät samanlaisina tehtävästä toiseen, ainoastaan tutkittavalle annettava ohje muuttuu tehtävän eri kuormitustasoilla. Tämän tehtävän suorittaminen vaatii tiedon ylläpitämisen lisäksi myös kykyä ohjata tehokkaasti työmuistin toimintaa, ja se soveltuu siten hyvin lasten työmuistin kehityksen tutkimiseen.

Toiminnallisella magneettikuvantamismenetelmällä (fMRI) voidaan tutkia, mitkä aivoalueet aktivoituvat työmuistitehtävän suorituksen aikana. Aikuisilla tehdyissä tutkimuksissa on selvinnyt, että otsalohkon etuosan ja päälaenlohkon alueiden muodostamalla hermoverkolla on työmuistin toiminnan kannalta keskeinen merkitys. Lasten fMRI-tutkimuksissa on

havaittu, että lapset käyttävät työmuistisuorituksessa huomattavasti vähemmän tämän hermoverkon alueita kuin nuoret tai aikuiset (Scherf, Sweeney & Luna, 2006). On kuitenkin osoitettu, että lasten varttuessa näiden alueiden käyttö työmuistitehtävän suorituksessa lisääntyy (Klingberg, Forssberg & Westerberg, 2002; Kwon, Reiss & Menon, 2002). Myös lasten varttumiseen liittyvä työmuistin kapasiteetin kasvu on yhteydessä lisääntyneeseen aktivaatioon näillä aivoalueilla (Klingberg ym., 2002) ja näiden alueiden välisten yhteyksien vahvistumiseen (Olesen, Nagy, Westerberg & Klingberg, 2003). Onkin ehdotettu, että lasten ja nuorten työmuistin toiminnan kehittymisen taustalla on otsalohkon etuosan ja päälaenlohkon muodostaman hermoverkon alueiden lisääntyntä käyttö ja muistitehtävän suorituksen aikaisen aktivaation parempi kohdentuminen työmuistin toimintaa tehokkaimmin tukeville aivoalueille (Bunge & Wright, 2007).

Aivokuvantamistutkimuksissa on havaittu, että aikuisilla otsa- ja päälaenlohkon keskilinjan alueet muodostavat hermoverkon, joka on aktiivisempi lepotilassa kuin tarkkaavaisuutta vaativan kognitiivisen tehtävän aikana. Kun tehtävän suoritus alkaa, tämä hermoverkko vähentää toimintaansa eli deaktivoituu (Raichle ym., 2001). Tutkimuksessani selvitettiin, olisiko myös kouluikäisillä lapsilla aikuisten kaltainen levon aikana aktivoituva hermoverkko, joka vaimentaisi aktiivisuuttaan eli deaktivoituisi työmuistitehtävän suorituksen aikana.

Näköinformaation käsittely aivokuorella on jakautunut kahteen valtaväylään, joista alapuolinen, ns. ventraalinen väylä käsittelee esineiden tunnistamiseen liittyvää eli nonspatiaalista tietoa ja yläpuolinen, ns. dorsaalinen väylä esineiden sijaintiin liittyvää eli spatiaalista tietoa (Mishkin, Ungerleider & Macko, 1983). Uudemmat

neuropsykologiset tutkimukset viittaavat siihen, että myös muistiprosessointia vaativan näköinformaation käsittely voisi olla jakautunut tällä tavalla (Mohr & Linden, 2005). Aivokuvantamistutkimukset ovatkin osoittaneet, että aikuisten spatiaalisen näköinformaation käsittely työmuistissa tapahtuu yläpuolisilla aivoalueilla ja nonspatialisen tiedon käsittely alapuolisilla aivoalueilla (Sala, Rämä & Courtney, 2003; Ventre-Dominey ym., 2005). Vastakkaisena näkemyksenä on esitetty, että työmuistissa näköinformaation käsittely jakautuu sen mukaan, minkälaista prosessointia informaatio vaatii, ei niinkään informaation laadun (spatialinen/nonspatialinen) perusteella. Aivokuvantamistutkimusten tulokset tukevat myös tätä näkemystä, jonka mukaan näköinformaation yksinkertaiseen mielessäpitämiseen liittyvä prosessointi tapahtuu alapuolisilla ja monimutkaisempaan työmuistin toiminnan ohjaukseen liittyvä prosessointi yläpuolisilla aivoalueilla (D'Esposito, Postle & Rypma, 2000; Owen, 2000).

Kehittyvien aivojen työmuistiprosessin järjestäytymisestä näköinformaation laadun mukaan ei ole aikaisempaa tietoa. Tässä tutkimuksessa selvitettiin näköinformaation käsittelyn mahdollista jakautumista spatiaaliseen ja nonspatialiseen prosessointiin lapsilla n-back-työmuistitehtävän suorituksen aikana. Spatiaalisella työmuistilla on tärkeä merkitys käyttäytymisen ohjaamisessa. Siitä huolimatta spatiaalisen, erityisesti auditiivisen työmuistin mekanismeista on vain vähän tutkimustietoa saatavilla. Erityisen puutteellisesti tunnetaan näiden mekanismien kehittyminen, jota myöskin selvitettiin tässä tutkimuksessa.

TUTKIMUKSEN TARKOITUS

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää seuraavia kysymyksiä:

1. Miten lasten näkö- ja kuuloaistiin perustuva paikkasidonnainen työmuisti kehittyy 6:n ja 13:n ikävuoden välillä? Onko tämä kehitys samankaltaista työllä ja pojilla?
2. Onko kouluikäisten lasten työmuistisuoriutumisella yhteyttä koulumenestykseen ja lapsilla todettuun psyykkiseen oireiluun?
3. Miten paikkaan ja väriin liittyvän työmuistin taustalla olevat hermostolliset mekanismit toimivat kouluikäisillä lapsilla? Miten aivojen aktivaatio lapsilla ohjautuu lepotilassa ja työmuistitehtävän suorittamisen aikana?

TUTKITTAVAT

Tutkimukseen osallistuneet lapset rekrytoitiin kahdesta Helsingin alueen peruskoulusta luokka-asteilta I–VI. Tutkimukseen osallistui kaikkiaan 66 6-13-vuotiasta lasta, jotka jaettiin kolmeen ikäryhmään: 6–8-vuotiaisiin (24 lasta), 9–10-vuotiaisiin (20 lasta) ja 11–13-vuotiaisiin (22 lasta). Lapsista 52 prosenttia oli poikia. Helsingin kaupungin sosioekonomisen luokituksen mukaan 64 prosenttia lasten vanhemmista kuului ensimmäiseen, 24 prosenttia toiseen, 8 prosenttia kolmanteen ja 4 prosenttia neljänteen sosioekonomiseen luokkaan (I = korkein, IV = alin). Tutkittavien lasten psyykkistä oireilua kartoitettiin Achenbachin oirekyselylomakkeella opettajalle (TRF, Achenbach, 1991) ja vanhemmille (CBCL, Achenbach, 1991) sekä lasten masennusastetta mittaavalla lomakkeella (CDI, Kovacs, 1985). Näistä lapsista yhdeksän

11–13-vuotiasta tyttöä osallistui myös aivojen magneettikuvantamistutkimukseen. Kaikki tutkimuksiin osallistuneet lapset ja heidän vanhempansa antoivat kirjallisen suostumuksen osallistumiseen. Tutkimukset on hyväksytty Helsingin yliopistollisen keskussairaalan eettisen neuvoston käsittelyssä.

TUTKIMUSMENETELMÄT

Työmuistitehtävä

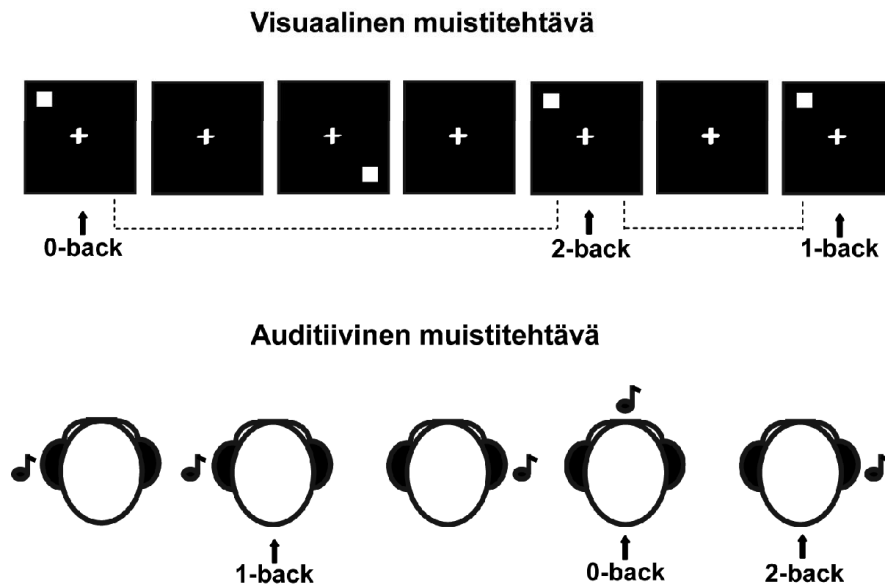
Käyttäytymistutkimuksissa (Vuontela ym., 2003) käytettiin sekä kuuloaistiin (auditiivista) että näköaistiin (visuaalista) perustuvaa spatiaalista n-back-tehtävää (0-back, 1-back, 2-back), jossa tutkittava suoritti tehtävää ärsykkeen paikan mukaan. Visuaaliset ärsykkeet olivat harmaita neliöitä (kesto 100 ms), jotka esitettiin tutkittavalle tietokoneen näytöllä yksi kerrallaan noin joka kolmas sekunti yhdessä kahdeksasta mahdollisesta näytön kohdasta. Auditiiviset ärsykkeet olivat ääniä (2250 Hz, kesto 100 ms), jotka esitettiin tutkittavalle kuulokkeiden kautta noin joka kolmas sekunti siten, että ääni kuului joko oikealta, vasemmalta tai keskeltä. Tehtävässä lapsi painoi hiiren vasenta painiketta, jos ärsyke esitettiin samassa paikassa kuin edeltävä ärsyke (1-back) tai sitä aiemmin esitetty ärsyke (2-back), ja oikeaa painiketta, jos ärsyke esitettiin eri paikassa. 0-back-tehtävässä lapsi painoi hiiren vasenta painiketta, jos ärsyke esitettiin ennalta sovitussa paikassa (kuva 1).

Magneettikuvantamistutkimuksessa (Vuontela ym., 2009) lapset suorittivat visuaalisia n-back-tehtäviä (0-back ja 2-back) joko ärsykkeen paikan perusteella (spatiaalinen tehtävä) tai ärsykkeen värin perusteella (nonspatiaalinen tehtävä). Visuaaliset ärsykkeet olivat värillisiä neliöitä (kesto 200 ms), jotka esitettiin tutkittavalle

yksi kerrallaan kahden ja puolen sekunnin välein.

Reaktioajat ja suoritukset (virheelliset, puuttuvat ja ylimääräiset painallukset) rekisteröitiin ja tulokset käsiteltiin tilastollisesti. Lapset arvioivat tehtävien vaikeutta asteikolla 1–5 (1 = erittäin helppo,

2 = helppo, 3 = keskivaikea, 4 = vaikea, 5 = erittäin vaikea). Lisäksi lapset kuvasivat ensin omin sanoin, millä keinoilla olivat tehtäviä tehneet, ja luokittelivat sen jälkeen mahdollisesti käyttämänsä strategiat verbaliin, visuaaliin tai muihin strategiioihin.



Kuva 1. Käyttäytymistutkimuksissa käytettiin visuaalisia ja auditiivisia työmuistitehtäviä, joiden kuormitustasoina olivat 0-, 1- ja 2-back. Visuaalisessa 0-back-tehtävässä hiiren vasenta painiketta painettiin, kun ärsyke esitettiin tietokoneen näytön vasemmassa ylänurkassa, ja auditiivisessa tehtävässä silloin, kun ääni kuului keskeltä päätä. Jos ärsyke esitettiin samassa paikassa tai se kuului samasta kohdasta kuin edellinen (1-back) tai sitä edeltävä (2-back) ärsyke, lapsi painoi hiiren vasenta painiketta. Kaikissa muissa tilanteissa painettiin hiiren oikeaa painiketta. Nuolet osoittavat niitä kohtia 0-, 1- ja 2-back-tehtävissä, joissa tutkittavan piti painaa hiiren vasenta painiketta.

Koulumenestyksen ja psyykkisen oireilun mittaaminen

Lasten koulumenestystä ja psyykkistä oireilua (Aronen, Vuontela, Steenari, Salmi & Carlson, 2005) kartoitettiin Achenbachin oirekyselylomakkeella opettajalle (TRF). Lomakkeen koulumenestysosa mittaa erikseen akateemista suoriutumista ja yleisempää koulussa pärjäämistä. Akateeminen suoriutuminen lasketaan kunkin luokka-asteen viiden tärkeimmän oppiaineen keskiarvon perusteella. Koulupärjäämis-

osiossa opettaja arvioi lapsen pärjäämistä, ahkeruutta, oppimiskykyä, käyttäytymistä, sosiaalisia taitoja ja tyytyväisyyttä koulussa.

TRF-lomakkeen psyykkisen oireilun osio mittaa psyykkisten oireiden laatua ja määrää 113 kysymyksen avulla, joihin on kolme vaihtoehtoista vastausta (pisteytetty 0, 1 ja 2). Oireet on ryhmitelty kahdeksan erillisen oireasteikon mukaan kolmeen erilliseen pääluokkaan. Sisäänpäin suuntautuneisiin oireisiin luetaan mukaan

vetäytyminen, somaattiset oireet ja ahdistus/masentuneisuus. Ulospäin suuntautuneisiin oireisiin sisältyvät aggressiivisuus ja ongelmakäyttäytyminen (esim. valehtelu tai varastaminen). Kolmas pääluokka koostuu oireista, jotka eivät kuulu kumpaankaan yllä mainittuun; siihen kuuluvat sosiaaliset ongelmat, ajatushäiriöt ja tarkkaavaisuusongelmat. Psykkistä oireilua kartoitettiin myös Achenbachin oirekyselylomakkeella, jonka vanhemmat täyttävät (CBCL), sekä lasten masennusastetta mitaavalla lomakkeella (CDI). CBCL koostuu TRF:n tavoin osioista, joissa kartoitetaan koulumenestystä ja psykkistä oireilua. Lapsen CDI-lomake sisältää 27 väittämää, joihin on kolme vaihtoehtoista vastausta (pisteetty 0, 1 ja 2).

Toiminnallinen magneettikuvantaminen

Lapsi suoritti työmuistitehtäviä joko ärsyksen paikan tai värin perusteella maattessaan magneettitutkimuslaitteen sisällä. Lapsen pää tuettiin pehmusteiden avulla mahdollisimman liikkumattomaksi, jotta kuvaus onnistuisi. Ärsykkeet esitettiin lapselle heijastamalla ne näytölle, josta lapsi katseli niitä pääkelaan kiinnitetyn peilin kautta. Lapsi vastasi muistitehtävään painamalla magneettikuvantamislaitteessa toimivan hiiren painikkeita. Tutkimukseen liittyi myös lepojaksuja, jolloin tutkittava lepäsi laitteessa tekemättä mitään kohdistaen katseensa näytön keskellä olevaan ristiin.

TULOKSET

Iän vaikutus lasten työmuistin kehittymiseen

Visuaalisissa paikkatyömuistitehtävissä lasten suoritussnopeus kasvoi iän lisääntymisen myötä. Auditivisissa tehtävissä 11–

13-vuotiaat olivat nopeampia kuin 6–8- ja 9–10-vuotiaat. 6–8-vuotiaat tekivät eniten virheitä, mutta iän myötä sekä auditivisten että visuaalisten tehtävien suoritustarkkuus kasvoi ja puuttuvien ja ylimääräisten vastausten määrä väheni. Nuorimmat lapset arvioivat tehtävät vaikeammiksi kuin 9–10- ja 11–13-vuotiaat, joiden arviot tehtävien vaikeusasteista eivät eronneet toisistaan (taulukko 1).

Sukupuolen vaikutus lasten työmuistin kehittymiseen

Pojat suoriutuivat tehtävistä nopeammin kuin tytöt. Poikien ja tyttöjen välinen ero suoritussnopeudessa oli suurempi 6–8- ja 9–10-vuotiaiden kuin 11–13-vuotiaiden ryhmissä. Tytöt suoriutuivat tehtävistä poikia virheettömämmin. Tämä sukupuolten välinen ero suoritustarkkuudessa oli voimakkain 6–8-vuotiaiden ryhmässä, heikkeni 9–10-vuotiailla ja miltei katosi 11–13-vuotiailla. Ylimääräisten vastausten määrä oli merkitsevästi suurempi pojilla kuin tytöillä. Tämä sukupuolten välinen ero huomattiin 6–8-vuotiaiden ryhmässä, mutta 9–10- ja 11–13-vuotiaiden ryhmissä sitä ei ollut (taulukko 1).

Kuormitus, vaikeusaste ja strategiat

Visuaaliset tehtävät suoritettiin nopeammin ja tarkemmin kuin auditiviset tehtävät, jotka myös arvioitiin visuaalisia tehtäviä vaikeammiksi. Muistikuormituksen kasvattaminen hidasti suoritussnopeutta ja lisäsi ylimääräisten vastausten määrää sekä auditivisissa että visuaalisissa tehtävissä. Tehtävät tuntuivat sitä vaikeammilta, mitä enemmän muisti kuormittui. Suurin osa lapsista (75 %) kertoi tehneensä muistitehtävät käyttämättä mitään strategiaa suorituksen apuna (taulukko 1).

Taulukko 1. Iän, sukupuolen, tehtävätyypin ja muistikuormituksen vaikutus työmuistitehtävistä suoriutumiseen.

Suoriutumisen mittari	Päävaikutus	Regressiokerroin B	P <
Suoritusnopeus (ms)	Ikä	-50.68	0.001
	Sukupuoli	-57.9	0.01
	Tehtävätyyppi	-226.87	0.001
	Muistikuormitus	81.26	0.001
Suoritustarkkuus (%)	Ikä	-3.48	0.001
	Sukupuoli	4.31	0.001
	Tehtävätyyppi	-2.74	0.05
	Muistikuormitus	-1.11	n.s.
Puuttuvat vastaukset (%)	Ikä	-1.22	0.001
	Sukupuoli	-1.17	n.s.
	Tehtävätyyppi	0.76	n.s.
	Muistikuormitus	0.28	n.s.
Ylimääräiset vastaukset (%)	Ikä	-1.12	0.001
	Sukupuoli	1.55	0.005
	Tehtävätyyppi	-0.31	n.s.
	Muistikuormitus	0.72	0.05
Vaikeusaste (asteikolla 1–5)	Ikä	-0.14	0.001
	Sukupuoli	-6.85	n.s.
	Tehtävätyyppi	-0.19	0.05
	Muistikuormitus	0.23	0.001

(ms) millisekunteina, (%) prosentteina, (n.s.) ei merkitsevä.

Spatiaalisen työmuistisuorituksen yhteys koulumenestykseen

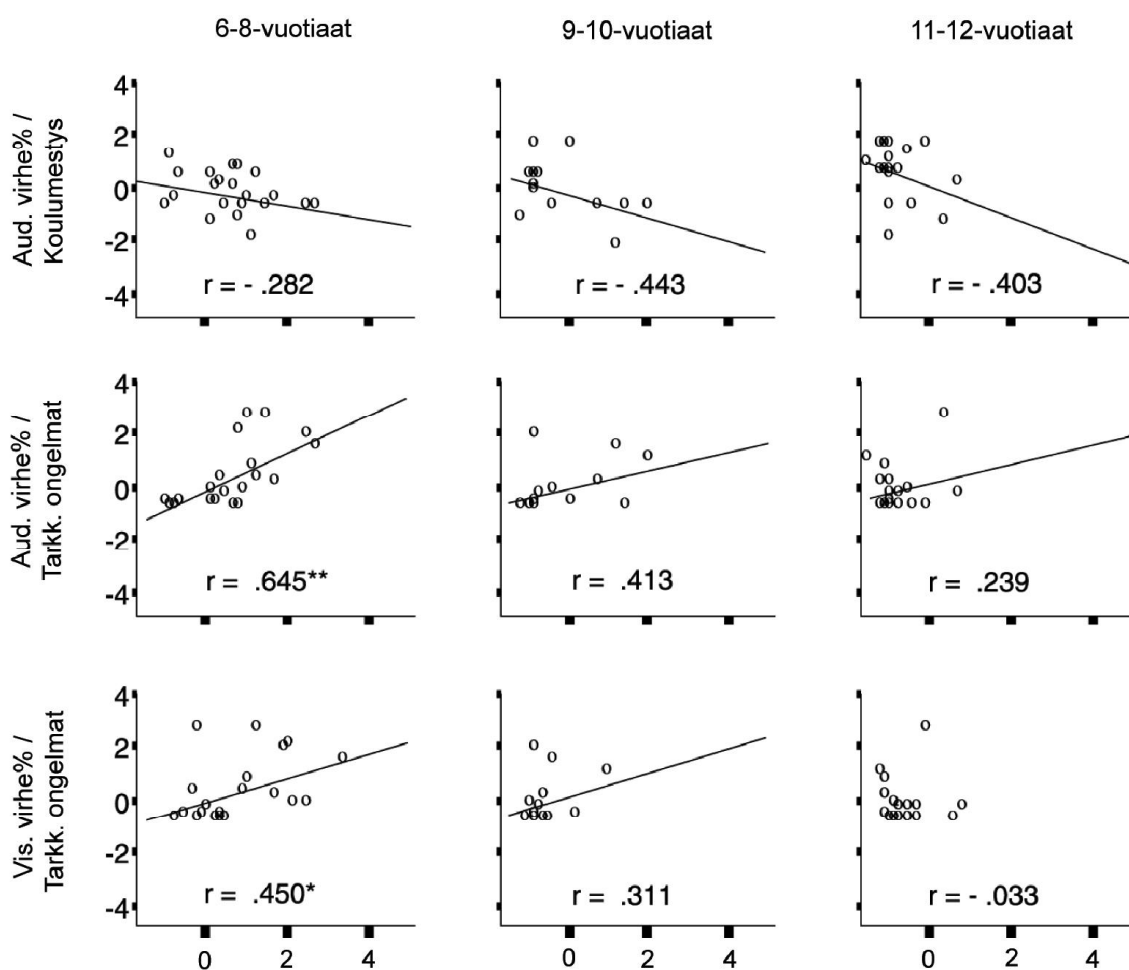
Auditiivisten työmuistitehtävien heikko suoritustarkkuus oli merkitsevästi yhteydessä heikkoon koulumenestykseen (kuva 2). Visuaalisissa tehtävissä tämä vaikutus ei ollut merkitsevä, kun iän ja sukupuolen vaikutus otettiin huomioon. Kuitenkin 6–8-vuotiaiden ryhmässä sekä visuaalisen että auditiivisen työmuistisuorituksen tarkkuus oli yhteydessä koulumenestykseen. Muissa ikäryhmissä (9–10- ja 11–13-vuotiaat) vain auditiivisen tehtävän suoritustarkkuus oli yhteydessä koulumenestykseen.

Spatiaalisen työmuistisuorituksen yhteys psyykkiseen oireiluun

Heikko suoritustarkkuus sekä auditiivisissa että visuaalisissa tehtävissä oli merkitsevästi yhteydessä opettajan raportointiin (TRF) korkeisiin tarkkaavaisuusoirepisteisiin (kuva 2). Iän, sukupuolen, tehtävätyypin tai muistikuormituksen vaikutuksen huomioiminen ei muuttanut tätä tulosta. Visuaalisten tehtävien heikko suoritustarkkuus oli myös yhteydessä opettajan raportointiin korkeisiin emotionaalisiin (sisäänpäin suuntautuneet oireet) oirepisteisiin. Suoritusnopeudella ei ollut yhteyttä psyykkiseen oireiluun. Suuri ylimääräisten

vastausten määrä sekä auditiivisissa että visuaalisissa tehtävissä liittyi merkittävästi korkeaan psyykkisen oireilun kokonaispistemäärään ja korkeisiin tarkkaavaisuusoirepisteisiin. Visuaalisissa tehtävissä ylimääräisten vastausten määrä oli myös yhteydessä korkeisiin emotionaalisiin oirepisteisiin, erityisesti masennus- ja ahdistusoireisiin. Korkea puuttuvien vastausten määrä sekä auditiivisissa että visuaalisissa tehtävissä oli yhteydessä korkeisiin tarkkaavaisuusoirepisteisiin ja visuaalisissa

tehtävissä lisäksi korkeaan psyykkisen oireilun kokonaispistemäärään. Nämä yhteydet olivat voimakkaimpia nuorimman ikäryhmän lapsilla, ja monet niistä heikkenivät tai katosivat muissa ikäryhmissä. Molempien tehtävätyyppien suoritustarkkuus oli myös yhteydessä 6–8-vuotiaiden tarkkaavaisuusoireiden määrään. Vanhempien kertomalla (CBCL) tai lapsen itsensä kuvaamalla (CDI) psyykkisellä oireilulla ei ollut yhteyttä työmuistitehtävistä suoriutumiseen.



Kuva 2. Työmuistitehtävistä suoriutumisen ja opettajan raportoiman koulumenestyksen ja psyykkisen oireilun välisiä yhteyksiä kuvattuna erikseen kullekin ikäryhmälle (6–8-, 9–10- ja 11–12-vuotiaat). Tulokset on esitetty z-arvoina, joissa keskiarvo = 0 ja hajonta = 1. Merkitseviä ja melkein merkitseviä yhteyksiä esittäviin kaavioihin on myös piirretty regressiosuorat. Ylimpänä auditiivisen työmuistitehtävän virheprosentin suhde koulumenestykseen. Keskellä auditiivisen työmuistitehtävän virheprosentin suhde tarkkaavaisuusoirepisteisiin. Alimpana visuaalisen työmuistitehtävän virheprosentin suhde tarkkaavaisuusoirepisteisiin.

Muistikuormituksen ja tehtävätyypin vaikutus lasten aivoaktivaatioon

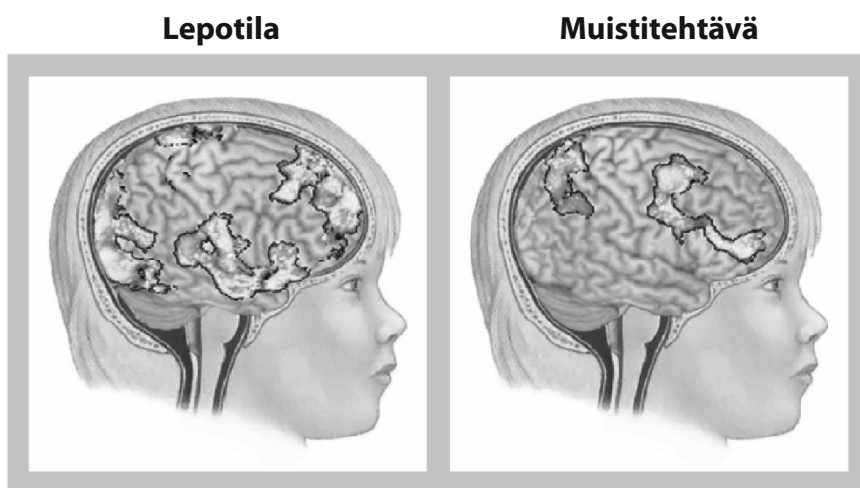
Lasten magneettikuvantamistutkimuksessa tehtävätyyppi (paikka- tai värитеhtävä) ei vaikuttanut muistitehtävistä suoriutumiseen, eikä niiden vaikeusasteiden arvioimiseen. Suurin osa lapsista kertoi käyttäneensä verbaalista strategiaa väri- ja paikkamuistitehtävien suorittamisessa. Muistikuormitus vaikutti merkitsevästi useiden aivoalueiden aktivoitumiseen, sen sijaan tehtävätyypillä tai tehtävätyypin ja muistikuormituksen interaktiolla ei tällaista vaikutusta ollut. Vertailtaessa kummankin muistitehtävän korkeampaa kuormitusta alempaan, aktivoituneita alueita löydettiin niin otsalohkosta kuin myös aivojen taaemmilta alueilta.

Paikkamuistitehtävä aktivoi useita alueita otsalohkosta, päälaenlohkosta ja takaraivolohkosta, samoin myös värimuistitehtävä (kuva 3). Vaikka tehtävätyyppi ei merkitsevästi vaikuttanut aktivaation jakautumiseen lasten aivokuorella, teimme suorat vertailut väri- ja paikkamuistitehtävien välillä. Tämä tehtiin sen vuoksi, että

lapsilla, joiden aivot ovat vielä kehitysvaiheessa, saattaa olla huomattavia yksilöiden välisiä eroja aktivaation jakautumisessa, mikä vaikeuttaa tilastollisesti merkitsevien tulosten esiin saamista erityisesti ryhmäanalyysissä. Paikka- ja värитеhtävien 0-back-tehtävän suorassa ryhmäanalyysissä löydettiin otsalohkon ja päälaenlohkon alueiden muodostamasta hermoverkosta alueita, jotka olivat aktiivisempia paikkatehtävän kuin värитеhtävän suorituksen aikana.

Lasten aivoaktivaatio levon aikana

Lasten aivoista löytyi monia alueita, jotka olivat aktiivisempia lepotilassa kuin paikka- tai värimuistitehtävien suorituksen aikana. Näihin alueisiin sisältyi aivojen keskilinan rakenteita sekä alueita otsa- ja päälaenlohkossa, jotka vaimensivat aktiivisuuttaan eli deaktivoituivat työmuistitehtävän suorituksen aikana 0- ja 2-back-tehtävissä (kuva 3). Monien lepotilassa aktiivisten aivoalueiden toiminta väheni sitä enemmän, mitä vaikeammasta muistitehtävästä oli kyse.



Kuva 3. *Lepotilan aikainen aktivaatio jakautuu lapsilla samoille aivokuoren alueille kuin aikuisilla, joilta on löydetty hermoverkko, joka on aktiivisempi lepotilan kuin kognitiivisen tehtävän suorituksen aikana. Kun lapsi suorittaa tarkkaavaisuutta vaativaa työmuistitehtävää, lepotilan aikainen aktiivisuus vaimenee ja aktiivisuus keskittyy aivoalueille, jotka ovat tärkeitä työmuistitehtävän suorituksen kannalta (Kuvan osia lainattu ja muokattu kirjasta Silverthorn, 2007).*

POHDINTA

Näkö- ja kuuloaistiin perustuvan paik- kasidonnaisen työmuistin kehitys

Tutkimuksessa selvisi, että kouluikäisten lasten suoriutuminen auditiivisista ja visuaalisista työmuistitehtävistä paranee iän myötä. Tämä kehitys on havaittu muissakin tutkimuksissa (Gathercole, 1999; Huizinga, Dolan & van der Molen, 2006). On myös osoitettu, että aikuiset suoriutuvat lapsia paremmin n-back-tehtävistä (Kwon ym., 2002). Oman tutkimukseni lapset eivät yltäneet aikuisten tasolle visuaalisten tehtävien suoritusnopeudessa ja -tarkkuudessa (Vuontela, Rämä, Raninen, Aronen & Carlson, 1999), eikä suoriutuminen ollut aikuisten luokkaa auditiivisissakaan tehtävissä (Anourova ym., 1999). Tämä tulos on yhteneväinen tutkimusten kanssa, joissa on osoitettu, että työmuistin kehitys jatkuu varhaisaikuisuuteen asti ja aikuisten suoriutumistaso saavutetaan vasta noin 15–19 vuoden iässä (Luna ym., 2004; Huizinga ym., 2006). Tulos sopii myös ehdotukseen, että työmuistitoiminto kehittyy samanaikaisesti työmuistin toimintaa tukevien hermoverkkojen fysiologisten ja toiminnallisten muutosten kanssa (Casey, Giedd & Thomas, 2000; Klingberg, 2006).

Työmuistisuorituksen kehittymiseen iän myötä on myös liitetty kyky muuttaa näköinformaatiota kielelliseen muotoon. Sen arvellaan kehittyvän noin 7–8-vuotiaana (Pickering, 2001), joten tämänkin tutkimuksen lapset olisivat saattaneet hyödyntää sitä työmuistitehtävien suorituksessa. Silti vain 25 prosenttia lapsista ilmoitti käyttäneensä jotakin strategiaa tehtävien suorituksessa.

9–10-vuotiaat lapset suoriutuivat auditiivisista 2-back-tehtävistä 6–8-vuotiaita hitaammin mutta tarkemmin, mikä viittaa siihen, että vanhemman ikäryhmän työmuistin toiminnan ohjaus oli tehokkaam-

paa ja muistikapasiteetti suurempi kuin nuorempien lapsien. Toisaalta nuoremmat lapset saattavat käyttäytyä impulsiivisemmin kuin vanhemmat lapset (Davidson, Amso, Anderson & Diamond, 2006). Se sopii havaintoon, että 6–8-vuotiaat lapset tekivät muistitehtävissä eniten ylimääräisiä painalluksia. Kaikki nämä havainnot saattavat myös liittyä estosäätelymekanismien (inhibition) kypsymättömyyteen. Näiden mekanismien arvellaan kehittyvän asteittain kasvamisen myötä (Davidson ym., 2006). Tutkimuksissa on osoitettu, että lapset ovat aikuisia alttiimpia häirinnälle ja heidän on myös vaikeampi pidättäytyä tehtäväänkuulumattomista vasteista kuin aikuisten (Casey ym., 1997). Muisti, tarkkaavaisuus ja estosäätely ovat osittain samojen hermoverkkojen säätelyalaisia prosesseja, joita ei ole helppo erotella toisistaan työmuistisuorituksen yhteydessä (Casey ym., 2000; Davidson ym., 2006).

Poikien ja tyttöjen työmuistin kehitys

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että poikien työmuisti kehittyy hitaammin kuin tyttöjen. Samoin kuin aikaisemmissa, aikuisilla tehdyissä tutkimuksissa (Loring-Meier & Halpern, 1999; Duff & Hampson, 2001), pojat suoriutuivat tyttöjä nopeammin, mutta epätarkemmin spatiaalisista työmuistitehtävistä. Pojat myös tekivät tyttöjä enemmän ylimääräisiä painalluksia. Nämä tyttöjen ja poikien väliset erot olivat selkeimpiä 6–8-vuotiaiden ryhmässä, ja näyttääkin siltä, että vaikka kaikilla tämän ikäryhmän lapsilla on puutteita estosäätelyssä, pojat ovat selvästi tyttöjä impulsiivisempia käytökseltään. Tämä tulos viittaa siihen, että poikien työmuistin toimintaa ohjaavien järjestelmien kypsyminen, joihin estosäätely myös kiinteästi liittyy, kestää pidempään kuin tyttöjen. Tämä löydös on tärkeä siltä kannalta, että impulsiivinen käytös, tarkkaavaisuuden ongelmat ja

puutteet työmuistin toiminnassa ovat tarkkaavaisuus-yliaktiivisuushäiriön (ADHD) tyypillisiä oireita. ADHD on 3–9 kertaa yleisempi nuorilla pojilla kuin tytöillä (Jensen, Martin & Cantwell, 1997), ja onkin mahdollista, että joissakin tapauksissa ADHD-oireet eivät liity itse oireyhtymään, vaan poikien tyttöjä hitaampaan otsalohkon etuosan kypsymiseen.

Lapset suoriutuivat visuaalisista työmuistitehtävistä nopeammin ja tarkemmin kuin auditiivisista, lisäksi visuaaliset tehtävät arvioitiin auditiivisia helpommiksi suorittaa, mikä viittaa vaikeuseroon tehtävien välillä. Hiljattain julkaistussa tutkimuksessa aikuisten heikompi suoriutuminen äänten kuin kuvien paikan muistamisesta liitettiin visuaalisen ja auditiivisen järjestelmän eroihin aistitiedon havaitsemisessa ja käsittelyssä (Lehnert & Zimmer, 2006). Lapsilla ero tuskin kuitenkaan johtui vaikeudesta erottaa auditiivisten ärsykkeiden paikka, sillä harjoittelujakson aikana varmistettiin, että jokainen lapsi erottaa vasemman, oikean ja keskimmäisen äänen paikan toisistaan ja keskimmäinen ääni säädettiin kullekin lapselle erikseen niin, että se kuului aina keskeltä päätä. Auditiivisen ja visuaalisen tehtävän väliset suoriutumiserot saattavat myös viitata siihen, että visuaalinen työmuisti kypsyä toiminnallisesti auditiivista aikaisemmin. Se, että 11–13-vuotiaat lapset suoriutuvat visuaalista 1- ja 2-back-tehtävistä miltei yhtä hyvin kuin aikuiset (Vuontela ym., 1999), mutta jäivät auditiivisissa tehtävissä selvästi aikuisia alhaisemmalle suoriutumistasolle (Anourova ym., 1999), ei välttämättä johdu pelkästään tehtävien välisestä vaikeuserosta, vaan saattaa olla merkki siitä, että auditiivisen työmuistitoiminnon kypsyminen kestää visuaalista pitempään. Tämän asian perinpohjainen selvittäminen vaatii kuitenkin jatkotutkimuksia. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että suoriutuminen vi-

suaalisista ja auditiivisista työmuistitehtävistä paranee iän myötä, mikä viittaa työmuistitoimintoihin liittyvien kognitiivisten prosessien ja niitä tukevien aivoaluiden toiminnalliseen kypsymiseen. Pojilla tämä kypsyminen kestää kauemmin kuin tytöillä. Visuaalisten työmuistitehtävien auditiivisia parempi hallitseminen saattaa olla merkki siitä, että näköaistiin perustuva työmuistitoiminto kypsyä kuuloon perustuvaa aiemmin.

Työmuistisuorituksen yhteys koulumenestykseen

Tutkimuksessa selvisi, että lapset, jotka suoriutuivat hyvin spatiaalisista työmuistitehtävistä, menestyivät myös hyvin koulussa. Koulussa heikommin menestyvät lapset tekivät enemmän virheitä työmuistitehtävissä kuin lapset, joiden koulumenestys oli hyvä. Aikaisemmissa tutkimuksissa on osoitettu yhteys oppimisvaikeuksien ja työmuistitoiminnon välillä (Henry, 2001; Passolunghi & Siegel, 2001), ja tämän tutkimuksen tulokset osoittivat, että hyvin toimiva työmuisti on yhteydessä hyvään koulumenestykseen niilläkin lapsilla, joilla ei ole todettuja oppimisvaikeuksia. Tämän perusteella lievät oppimisvaikeudet saattaisivat johtua työmuistin toiminnan puutteista.

Lasten suoriutuminen auditiivisista työmuistitehtävistä oli vahvemmin yhteydessä koulumenestykseen kuin heidän suoriutumisensa visuaalisista tehtävistä. Samankaltainen tulos on saatu tutkimalla lapsia, joilla on lieviä oppimisvaikeuksia (Henry, 2001). Auditiivisten työmuistitehtävien vahvempi yhteys koulumenestykseen voisi selittyä sillä, että auditiivisten tehtävien suorittaminen saattaa kuormittaa työmuistin ohjaustoimintoja ja tarkkaavaisuusmekanismeja enemmän kuin visuaalisten tehtävien suorittaminen.

Työmuistisuorituksen yhteys psyykkiseen oireiluun

Tutkimukseni toinen tärkeä havainto oli, että tavallisilla koululaisilla, joiden työmuistin kapasiteetti oli alhainen, oli enemmän tarkkaavaisuus- ja käytösongelmia koulussa kuin korkeamman työmuistikapasiteetin omaavilla lapsilla. Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu puutteita ADHD-lasten työmuistin toiminnassa (Klorman ym., 1999). On siis mahdollista, että joissain tapauksissa tarkkaavaisuuden ongelmat, impulsiivisuus tai yliaktiivinen käytös liittyvät puutteisiin työmuistin kapasiteetissa. TRF-kyselylomakkeella kartoitetaan ADHD-lapsille tyypillistä käyttäytymistä, kuten keskittymiskyvyn puutetta, kykenemättömyyttä istua hiljaa, impulsiivisuutta jne. Achenbachin kyselylomakkeet määrittävät käyttäytymisen ja tunne-elämän ulottuvuuksia ja tuottavat kirjon oireita myös vertailuaineistoissa, mikä liittyy väestössä esiintyvään yleiseen vaihteluun (Achenbach, 1991). Oman tutkimukseni tulokset tukevat aiemmin havaittuja yhteyksiä spatiaalisen työmuistikapasiteetin ja ADHD-tyyppisen käyttäytymisen välillä (Klorman ym., 1999 Cairney ym., 2001).

Estosäätelyllä on tärkeä merkitys työmuistin toiminnalle. Estesäätelyä tarvitaan esimerkiksi tilanteissa, joissa täytyy pidättäytyä tekemästä reaktiota tai kun parhaillaan käynnissä oleva toiminta tai ajattelu äkillisesti keskeytyy. Tutkimuksissa on havaittu, että ADHD-lapset tekevät enemmän virheitä spatiaalisissa työmuistitehtävissä kuin vertailuryhmän tai lääketoimintoryhmän ADHD-lapset (Cairney ym., 2001). Onkin ehdotettu, että estesäätelyyn liittyvät puutteet ovat keskeisimpiä tekijöitä ADHD-oireyhtymän taustalla (Quay, 1997; Schachar, Mota, Logan Tannock & Klim, 2000). Estesäätelyn puutteet heikentävät lasten kykyä hyödyntää muita säätelytoimintoja käyttäytymisen optimoimisessa.

Omassa tutkimuksessani ei käytetty erillistä tehtävää estesäätelyn tutkimiseen, vaan n-back-tehtävien ylimääräisten vastausten määrän katsottiin kuvastavan puutteita estesäätelyssä. Samalla tavalla n-back-tehtävien puuttuvien vastausten määrän katsottiin kuvastavan tarkkaavaisuuden säätelyn puutteita. Samansuuntaisesti aikaisempien tutkimusten kanssa, joissa havaittiin yhteys estesäätelyn ja ADHD-oireiden välillä (Slusarek, Velloing, Bunk & Eggers, 2001), tutkimuksessani löydettiin yhteys n-back-tehtävien ylimääräisten vastausten ja opettajan ilmoittamien tarkkaavaisuus- ja käytösongelmien välillä. Selvä yhteys havaittiin myös opettajan ilmoittamien tarkkaavaisuusongelmien ja n-back-tehtävien puuttuvien vastausten välillä: virheellisten (työmuistitehtävien suoritustarkkuuden taso), ylimääräisten (estesäätelyn taso) ja puuttuvien (tarkkaavaisuuden taso) vastausten määrä oli yhteydessä ADHD-tyyppiin käytökseen koulussa.

Tutkimuksessani havaittiin myös, että suoriutuminen visuospatiaalisesta työmuistitehtävästä on yhteydessä opettajan ilmoittamiin sisäänpäin suuntautuneisiin oireisiin, joihin kuuluvat mm. sellaiset tunne-elämän ongelmat kuin masentuneisuus ja ahdistuneisuus. Lisääntynyt masentuneisuus/ahdistuneisuus oli yhteydessä suurempaan virheiden määrään sekä ylimääräisten ja puuttuvien vastausten määrään visuaalisessa työmuistitehtävässä. Aikaisemmissa tutkimuksissa on löydetty puutteita masentuneiden lasten lyhytkestoisen ja metamuistin toiminnasta (Kaslow, Rehm & Siegel, 1984; Lauer ym., 1994). Keskittymiskyvyn puute on yksi suurimmista ongelmista masentuneilla lapsi- ja aikuispotilailla (Sund, Larsson & Wichstrom, 2001). Nämä havainnot sopivat hyvin tuloksiin, jotka osoittivat, että jopa lievät masentuneisuus-/ahdistuneisuus-oireet ovat yhteydessä heikompaan työmuisti-

suoritukseen ja keskittymisvaikeuksiin. Tutkimukseni perusteella koulussa heikosti menestyvien lasten käyttäytymisen ja tunne-elämän ongelmia sekä työmuistin toimintaa tulisi selvittää jo koulu-uran alkutaipaleella. Joidenkin oppimisvaikeuksien ja impulsiivisuuteen, keskittymiskyvyn puutteeseen ja yliaktiivisuuteen liittyvien käytöshäiriöiden taustalla saattaa olla heikosti toimiva työmuisti. Toisaalta masentuneisuus-/ahdistuneisuusoireet saattavat heikentää työmuistin toimintaa ja keskittymiskykyä, mikä johtaa heikkoon pärjäämiseen koulussa.

Lasten spatiaalisen ja nonspatialisen työmuistin toiminta

Toiminnallisen magneettikuvantamismenetelmän avulla selvitettiin, osallistuvatko samat aivoalueet sekä spatiaalisen että nonspatialisen muistiaineuksen käsittelyyn 11–13-vuotiaiden lasten työmuistisuorituksen aikana. N-back-työmuistitehtävänä käytettiin sekä alhaisen kuormituksen (0-back, tarkkaavaisuustehtävä) että korkean kuormituksen (2-back, vaatii paljon työmuistin ohjaustoimintoja) väri- ja paikkamuistitehtävää. Tulokset osoittivat, että sekä väri- että paikkatehtävän suoritus aktivoi samoja otsalohkon etuosan ja päälaenlohkon muodostaman hermoverkon alueita. Tulos viittaa siihen, että näköinformaation käsittely lapsen aivoissa on järjestäytynyt sen mukaan, minkälaista prosessointia muistitehtävä vaatii, eikä prosessoitavan muistiaineuksen laadun mukaan. Aikaisemmissa tutkimuksissa aikuisilla on saatu samansuuntaisia tuloksia (D'Esposito ym., 2000; Owen, 2000). Tärkeä havainto tutkimuksessa oli se, että 0-back-tehtävän suorituksen aikana spatiaalinen ja nonspatialinen muistitieto käsiteltiin kuitenkin osittain erillisillä aivoalueilla. Alueet otsalohkon etuosassa, päälaenlohkossa ja takaraivolohkossa oli-

vat aktiivisempia paikka- kuin värimuistitehtävän suorituksen aikana. Tämä sopii myös aikaisempiin havaintoihin aikuisilla, jotka viittaavat siihen, että aivokuoren taemmilla alueilla työmuistiprosessointi on jakautunut prosessoitavan tiedon laadun perusteella (Postle, Stern, Rosen & Corkin, 2000; Hautzel ym., 2002). 0-back-tehtävä on kuitenkin luonteeltaan tarkkaavaisuustehtävä, eikä sen suoritus sisällä kaikkia niitä prosesseja, joita 2-back-tehtävään sisältyy (Owen, McMillan, Laird & Bullmore, 2005). Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että aikuisilla tarkkaavaisuuden valikoiva suuntaaminen ärsykkeen paikkaan aktivoi otsalohkon etuosan ja päälaenlohkon hermoverkon ylempänä sijaitsevia alueita enemmän kuin tarkkaavaisuuden suuntaaminen ärsykkeen väriin (Giesbrecht, Woldorff, Song & Mangun, 2003). Tutkimuksessani saadut tulokset olivat samansuuntaisia ja osoittavat, että lasten tarkkaavaisuuden suuntaaminen ärsykkeen paikkaan aktivoi edellä mainittuja alueita enemmän kuin tarkkaavaisuuden suuntaaminen ärsykkeen väriin. Tulokset viittaavat myös siihen, että kehittyvissä aivoissa työmuistimekanismit eivät ole jakautuneet erillisiin rinnakkaisiin prosesseihin, mutta tarkkaavaisuusmekanismeissa tällainen jako on havaittavissa.

Otsalohkon etuosan aktiivisuus on myös liitetty työmuistitehtävien strategioiden hallintaan ja strategian vaihtamiseen tehtävän suorituksen aikana (Owen ym., 2005; Rypma, 2006). Tämä alue aktivoitui kummankin tehtävän aikana, joten on mahdollista, että lapset käyttivät samoja strategioita sekä paikka- että väritehtävän suorituksessa.

Lasten aivoaktivaatio levon aikana

Monet aivojen keskilinjän alueet otsa- ja päälaenlohkon alueella olivat lapsilla aktiivisempia lepotilassa kuin n-back-tehtävien

suorituksen aikana. Aikuisilta on aikaisemmissa tutkimuksissa löydetty näitä samoja alueita käsittävä hermoverkko, joka on aktiivinen lepotilan aikana (Raichle ym., 2001; McKiernan, Kaufman, Kucera-Thompson & Binder, 2003), ja myös lapsilla on aiemmin havaittu lepotilan aikaista aktiivisuutta (Kiviniemi ym., 2000; Fransson ym., 2007). Tämän hermoverkon aktiivisuuden on ehdotettu heijastavan mm. yksilön sisäisiä prosesseja (Raichle ym., 2001), kuten esimerkiksi ajatusten harhailua asiasta toiseen (Mason ym., 2007). Aikuisilla on myös osoitettu, että muistikuormitus vaikuttaa tehtävän aiheuttaman deaktivaation voimakkuuteen (McKiernan ym., 2003), mikä sopii hyvin tämän tutkimuksen havaintoon, että korkeampi muistikuormitus (2-back) aiheutti voimakkaamman ja laajemman deaktivaation lapsilla kuin matala muistikuormitus (0-back). Aikaisempaa tietoa kouluikäisten lasten deaktivaatiosta on hyvin vähän. Tässä tutkimuksessa tehdyllä havainnolla, että kognitiivisen tehtävän aiheuttama deaktivaatio jakautuu lapsilla samoille aivokuoren alueille kuin aikuisillakin, saattaa olla kliinistä merkitystä silloin, kun arvioidaan lasten normaalista poikkeavia aivotoimintoja. Aikuisilla autisteilla on jo osoitettu, että tehtävän aiheuttama aktivaatio ei vaimene niillä aivokuoren alueilla, jotka aikuisilla normaalisti tuolloin deaktivoituvat, ja tämän arveltiin johtuvan siitä, että autistien sisäiset prosessit ovat erilaisia verrattuna terveisiin aikuisiin (Kennedy, Redcay & Courchesne, 2006).

Tässä tutkimuksessa havaittiin myös, että aivoalueet, jotka lapsilla prosessoivat kuulo- ja tuntoaistitietoa, vaimensivat aktiivisuuttaan näköaistiin perustuvan tehtävän suorituksen aikana. Tämä havainto on yhtäpitävä aikaisempien aikuisista tehtyjen havaintojen kanssa, joissa tarkkaavaisuuden suuntaaminen tietyn aistikanavan

kautta tulevaan tietoon vaimentaa niiden aivoalueiden aktiivisuutta, joilla prosoidaan muilta aistikanavilta tulevaa tietoa (Haxby ym., 1994; Laurienti ym., 2002).

Yhteenveto

Yhteenvetona voidaan todeta, että kehittyvissä aivoissa työmuistimekanismit eivät vielä 11–13 vuoden iässä ole jakautuneet erillisiin rinnakkaisiin prosesseihin, mutta tarkkaavaisuusmekanismeissa tällainen jako on jo havaittavissa. Lapset käyttävät samoja hermoverkkoja sekä spatiaalisen että nonspatiaalisen työmuistitehtävän suorituksessa, mikä viittaa siihen, että molempien työmuistitehtävien suorituksessa käytetään samanlaisia kognitiivisia prosesseja ja strategioita. Edelleen havaittiin, että 11–13-vuotiailla lapsilla kognitiivisen tehtävän aiheuttama deaktivaatio jakautui vastaaville hermoverkon alueille kuin terveillä aikuisilla.

Lasten suoriutuminen visuaalisista ja auditiivisista työmuistitehtävistä paranee iän myötä, mikä viittaa työmuistitoimintoihin liittyvien kognitiivisten prosessien ja niitä tukevien aivoalueiden toiminnalliseen kypsymiseen. Pojilla tämä kypsyminen kestää kauemmin kuin tytöillä. Visuaalisten työmuistitehtävien auditiivisia parempi hallitseminen saattaa olla merkki siitä, että visuaalinen työmuistitoiminto kypsyy auditiivista aikaisemmin. Edelleen havaittiin, että lapset, jotka suoriutuivat hyvin spatiaalisista työmuistitehtävistä, menestyivät myös hyvin koulussa ja heikko työmuistisuoritus oli yhteydessä lasten lisääntyneisiin tarkkaavaisuuden ja tunne-elämän ongelmiin. Koulussa heikosti menestyvien lasten käyttäytymisen ja tunne-elämän ongelmia sekä työmuistin toimintaa tulisi selvittää jo koulu-uran alkutaipaleella. Joidenkin oppimisvaikeuksien ja impulsiivisuuteen, keskittymiskyvyn puutteeseen ja yliaktiivisuuteen liittyvien

käytöshäiriöiden taustalla saattaa olla heikosti toimiva työmuisti. Toisaalta masentuneisuus-/ahdistuneisuusoireet saattavat heikentää työmuistin toimintaa ja keskittymiskykyä, mikä johtaa heikkoon koulu-menestykseen.

Kirjoittajatiedot:

Virve Vuontela, FT, toimii tutkijana Helsingin yliopiston Biolääketieteen laitoksen fysiologian osaston Neurotieteen yksikössä.

KIRJALLISUUSVIITTEET

- Achenbach, T.M. (1991). Integrative guide for the 1991 CBCL/4-18, YSR and TRF profiles. VT:University of Vermont, Department of Psychiatry.
- Anourova, I., Rämä, P., Alho, K., Koivusalo, S., Kahnari, J. & Carlson, S. (1999). Selective interference reveals dissociation between auditory memory for location and pitch. *NeuroReport*, 10, 3543–3547.
- Aronen, E.T., Vuontela, V., Steenari, M.-R., Salmi, J. & Carlson, S. (2005). Working memory, psychiatric symptoms and academic performance at school. *Neurobiology of Learning and Memory*, 83, 33–42.
- Baddeley, A.D. (1992). Working memory. *Science*, 255, 556–559.
- Bunge, S.A. & Wright, S.B. (2007). Neurodevelopmental changes in working memory and cognitive control. *Current Opinion in Neurobiology*, 17, 243–250.
- Cairney, S., Maruff, P., Vance, A., Barnett, R., Luk, E. & Currie, J. (2001). Contextual abnormalities of saccadic inhibition in children with attention deficit hyperactivity disorder. *Experimental Brain Research*, 141, 507–518.
- Casey, B.J., Giedd, J.N. & Thomas, K.M. (2000). Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. *Biological Psychology*, 54, 241–257.
- Casey, B.J., Tottenham, N., Liston, C. & Durston, S. (2005). Imaging the developing brain: what have we learned about cognitive development? *Trends in Cognitive Science*, 9, 104–110.
- Casey, B.J., Trainor, R.J., Orendi, J.L., Schubert, A.B., Nystrom, L.E., Giedd, J.N., Castellanos, F.X., Haxby, J.V., Noll, D.C., Cohen, J.D., Forman, S.D., Dahl, R.E. & Rapoport, J.L. (1997). A developmental functional MRI study of prefrontal activation during performance of a go-no-go task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 835–847.
- Davidson, M.C., Amso, D., Anderson, L.C. & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition and task switching. *Neuropsychologia*, 44(11), 2037–2078.
- De Jong, P. (1998). Working memory deficits of reading disabled children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 70, 75–96.
- D’Esposito, M., Postle, B.R. & Rypma, B. (2000). Prefrontal cortical contributions to working memory: evidence from event-related fMRI studies. *Experimental Brain Research*, 133, 3–11.
- Duff, S.J. & Hampson, E. (2001). A sex difference on a novel spatial working memory task in humans. *Brain and Cognition*, 47, 470–493.
- Fransson, P., Skiöld, B., Horsch, S., Nordell, A., Blennow, M., Lagercrantz, H. & Åden, U. (2007). Resting-state networks in the infant brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 15531–15536.
- Gathercole, S.E. (1999). Cognitive approaches to the development of short-term memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(11), 410–419.
- Giesbrecht, B., Woldorff, M.G., Song, A.W. & Mangun, G.R. (2003). Neural mechanisms of top-down control during spatial and feature attention. *NeuroImage*, 19, 496–512.
- Hautzel, H., Mottaghy, F.M., Schmidt, D., Zemb, M., Shah, N.J. & Muller-Gartner, H.W. (2002). Topographic segregation and convergence of verbal, object, shape and spatial working memory in humans. *Neuroscience Letters*, 323(2), 156–160.
- Haxby, J.V., Horwitz, B., Ungerleider, L.G., Maisog, J.M., Pietrini, P. & Grady, C.L. (1994). The functional organization of human extrastriate cortex: a PET-rCBF study of selective attention to faces and locations. *Journal of Neuroscience*, 14, 6336–6353.
- Henry, L.A. (2001). How does the severity of a learning disability affect working memory performance? *Memory*, 9, 233–247.
- Huizinga, M., Dolan, C.V. & van der Molen, M.W. (2006). Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia*, 44(11), 2017–2036.
- Jensen, P.S., Martin, D. & Cantwell, D.P. (1997). Comorbidity in ADHD; implication for research, practice, and DSMV. *Journal of*

- American Academy of Child and Adolescent Psychiatry, 36, 1065–1079.
- Kaslow, N.J., Rehm, L.P. & Siegel, A.W. (1984). Social-cognitive and cognitive correlates of depression in children. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 12, 605–620.
- Kennedy, D.P., Redcay, E. & Courchesne, E. (2006). Failing to deactivate: resting functional abnormalities in autism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103, 8275–8280.
- Kiviniemi, V., Jauhiainen, J., Tervonen, O., Pääkkö, E., Oikarinen, J., Vainionpää, V., Rantala, H. & Biswal, B. (2000). Slow vasomotor fluctuation in fMRI of anesthetized child brain. *Magnetic Resonance in Medicine*, 44, 373–378.
- Klingberg, T. (2006). Development of a superior frontal-intraparietal network for visuospatial working memory. *Neuropsychologia*, 44, 2171–2177.
- Klingberg, T., Forssberg, H. & Westerberg, H. (2002). Increased brain activity in frontal and parietal cortex underlies the development of visuospatial working memory capacity during childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 1–10.
- Klorman, R., Hazel-Fernandez, L.A., Shaywitz, S.E., Fletcher, J.M., Marchione, K.E., Holahan, J.M., Stuebing, K.K. & Shaywitz, B.A. (1999). Executive functioning deficits in attention-deficit/hyperactivity disorder are independent of oppositional defiant or reading disorder. *Journal of American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 38, 1148–1155.
- Kovacs, M. (1985). The children's depression inventory (CDI). *Psychopharmacology Bulletin*, 21, 995–998.
- Kwon, H., Reiss, A.L. & Menon, V. (2002). Neural basis of protracted developmental changes in visuo-spatial working memory. *Proceedings of National Academy of Science, U.S.A.*, 99, 13336–13341.
- Lauer, R.E., Giordani, B., Boivin, M.J., Halle, N., Glasgow, B., Alessi, N.E. & Berent, S. (1994). Effects of depression on memory performance and metamemory in children. *Journal of American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 33, 679–685.
- Laurienti, P.J., Burdette, J.H., Wallace, M.T., Yen, Y.-F., Field, A.S. & Stein, B.E. (2002). Deactivation of sensory-specific cortex by cross-modal stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience* 14, 420–429.
- Lehnert, G. & Zimmer, H.D. (2006). Auditory and visual spatial working memory. *Memory & Cognition*, 34, 1080–1090.
- Loring-Meier, S. & Halpern, D.F. (1999). Sex differences in visuospatial working memory: Components of cognitive processing. *Psychonomic Bulletin and Review*, 6, 464–471.
- Luna, B., Garver, K.E., Urban, T.A., Lazar, N.A. & Sweeney, J.A. (2004). Maturation of cognitive processes from late childhood to adulthood. *Child Development*, 75(5), 1357–1372.
- Mason, M.F., Norton, M.I., Van Horn, J.D., Wegner, D.M., Grafton, S.T. & Macrae, N. (2007). Wandering minds: the default network and stimulus-independent thought. *Science*, 315, 393–395.
- McKiernan, K.A., Kaufman, J.N., Kucera-Thompson, J. & Binder, J.R. (2003). A parametric manipulation of factors affecting task-induced deactivation in functional neuroimaging. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15, 394–408.
- McLean, J. & Hitch, G. (1999). Working memory impairments in children with specific arithmetic learning difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, 74, 240–260.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. & Macko, K. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neuroscience*, 6, 414–417.
- Mohr, H.M. & Linden, D.E. (2005). Separation of the systems for color and spatial manipulation in working memory revealed by a dual-task procedure. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17, 355–366.
- Olesen, P.J., Nagy, Z., Westerberg, H. & Klingberg, T. (2003). Combined analysis of DTI and fMRI data reveals a joint maturation of white and grey matter in a fronto-parietal network. *Cognitive Brain Research*, 18, 48–57.
- Owen, A.M. (2000). The role of the lateral frontal cortex in mnemonic processing: the contribution of functional neuroimaging. *Experimental Brain Research*, 133, 33–43.
- Owen, A.M., McMillan, K.M., Laird, A.R. & Bullmore, E. (2005). N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, 25, 46–59.
- Passolunghi, M.C. & Siegel, L.S. (2001). Short-term memory, working memory, and inhibitory control in children with difficulties in arithmetic problem solving. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80, 44–57.

- Pickering, S.J. (2001). The development of visuo-spatial working memory. *Memory*, 9, 423–432.
- Postle, B.R., Stern, C.E., Rosen, B.R. & Corkin, S. (2000). An fMRI investigation of cortical contributions to spatial and nonspatial visual working memory. *NeuroImage*, 11, 409–423.
- Quay, H.C. (1997). Inhibition and attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 25, 7–13.
- Raichle, M.E., MacLeod, A.M., Snyder, A.Z., Powers, W.J., Gusnard, D.A. & Shulman, G.L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of National Academy of Science U.S.A.*, 98, 676–682.
- Rypma, B. (2006). Factors controlling neural activity during delayed-response task performance: testing a memory organization hypothesis of prefrontal function. *Neuroscience*, 139, 223–235.
- Sala, J.B., Rämä, P. & Courtney, S.M. (2003). Functional topography of a distributed neural system for spatial and nonspatial information maintenance in working memory. *Neuropsychologia*, 41, 341–356.
- Schachar, R., Mota, V.L., Logan, G.D., Tannock, R. & Klim, P. (2000). Confirmation of an inhibitory control deficit in attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 28, 227–235.
- Scherf, K.S., Sweeney, J.A. & Luna, B. (2006). Brain basis of developmental change in visuospatial working memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(7), 1045–1058.
- Silverthorn, D.U. (2007). *Human physiology. An integrated approach*, 4. ed., Pearson Education, Benjamin Cummings, San Francisco, p. 225.
- Slusarek, M., Velloing, S., Bunk, D. & Eggers, C. (2001). Motivational effects on inhibitory control in children with ADHD. *Journal of American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 40, 355–363.
- Sund, A.M., Larsson, B. & Wichstrom, L. (2001). Depressive symptoms among young Norwegian adolescents as measured by the Mood and Feelings Questionnaire (MFQ). *European Child & Adolescent Psychiatry*, 10, 222–229.
- Ventre-Dominey, J., Bailly, A., Lavenne, F., Lebars, D., Mollion, H., Costes, N. & Dominey, P.F. (2005). Double dissociation in neural correlates of visual working memory: A PET study. *Cognitive Brain Research*, 25, 747–759.
- Vuontela, V. (2008). *Developmental, functional brain imaging and electrophysiological evidence of visual and auditory working memory*. Helsinki University Print, Helsinki.
- Vuontela, V., Rämä, P., Raninen, A., Aronen, H.J. & Carlson, S. (1999). Selective interference reveals dissociation between memory for location and colour. *NeuroReport*, 10, 2235–2240.
- Vuontela, V., Steenari, M.R., Aronen, E.T., Korvenoja, A., Aronen, H.J. & Carlson, S. (2009). Brain activation and deactivation during location and color working memory tasks in 11-13-year-old children. *Brain and Cognition*, 69, 56–64.
- Vuontela, V., Steenari, M.R., Carlson, S., Koivisto, J., Fjällberg, M. & Aronen, E.T. (2003). Audiospatial and visuospatial working memory in 6-13 year old school children. *Learning & Memory*, 10, 74–81.