

# Aivot ja kielen ymmärtäminen

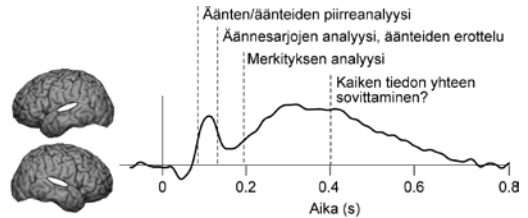
■ Riitta Salmelin

Nykyaikaisilla aivokuvantamismenetelmillä voidaan seurata suoraan terveissä ihmisaivoissa, miten aktivaatio etenee, kun tutkittavat tekevät kielellisiä tehtäviä. Kuullun ja luetun ymmärtäminen on jokapäiväisessä elämässämme aivan oleellinen taito. Olisi loogista ajatella, että vaikka kuultu ja luettu tieto tulevat sisään eri reittejä, toinen korvien ja toinen silmien kautta, niin ymmärtämisen tasolla reitit yhdistyvät.

Kuultujen sanojen käsittelyn ajatellaan etenevän siten, että aivot eristävät ääniaalloista kielellisiä piirteitä, ensin yksittäisten äänneiden tasolla, sitten kokonaisina puheäänien ketjuina, jotka aktivoivat sanan merkityksen (Frauenfelder ja Tyler 1987). Aikainformaatio on olennaisen tärkeää tutkittaessa tällaista ketjua.

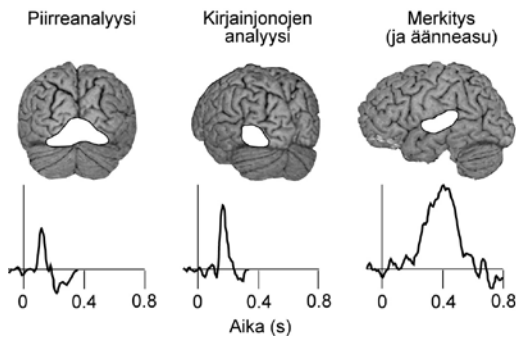
Magnetoencefalografia (MEG) on kielen tutkimuksessa tehokas työväline, koska se mittaa aivosolujen sähköistä toimintaa reaaliajassa ja aktiiviset aivoalueet voidaan myös paikantaa melko hyvällä tarkkuudella. MEG-tutkimusten perusteella puheen käsittely keskittyy aivojen tasolla ohimolohkon yläosaan, kuuloaivokuorelle ja sen välittömään läheisyyteen (kuva 1). Kun kuulemme lyhyen ei-kielellisen äänen piipahduksen tai vaikkapa synteettisesti tuotetun äänteen, kuuloaivokuori aktivoituu voimakkaasti noin 0.1 sekuntia ärsykkeen alkamisen jälkeen ja vaimenee sitten. Mutta kun kuulemme luonnollista puhetta, tätä aikaista vastetta seuraa toinen, pitkäkestoinen aktivaatio, joka on huipussaan noin 0.4 sekuntia ärsykkeen alkamisen jälkeen. Vaikka aktivaatio keskittyy (MEG:n kannalta) koko lailla samalle alueelle aivoissa, se kuvastaa erilaisia prosesseja eri aikaikkunoissa. Yksittäisen sanan kohdalla äännten/äänneiden piirreanalyysiä tehdään 0.1 sekunnin kuluessa ja puheäänteen (esim. /a/ ja /o/) kyetään erottelemaan toisistaan viimeistään 0.15 sekunnin kohdalla. Sanan merkityssisällön analyysi on käynnissä 0.2 sekunnista alkaen, ja kun on edetty

puoli sekuntia ärsykkeen alkamisesta, aivojen ajatellaan jo sovittavan yhteen kaikkea olemassa olevaa tietoa (Salmelin 2007; Uusvuori ym., painossa).



Kuva 1. Aivojen aktivaatioketju puhutun sanan havaitsemisessa. MEG:llä mitattu aktivaatio keskittyy vasemman ja oikean ohimolohkon yläosaan. Sana alkoi kuulua hetkellä 0. Katkoviivat näyttävät eri prosessien arvioidut ajankohdat.

Kirjoitettujen sanojen käsittelyn ajatellaan myös alkavan piirreanalyysistä, jonka jälkeen analyysi etenee sisältöön, ensin yksittäisten kirjainten tasolla, sitten kokonaisena sanana, joka puolestaan aktivoi sanan merkityksen ja mahdollisesti myös sen äänneasun, vaikka sanaa ei tarvitsisikaan lukea ääneen (Coltheart ym. 1993). Aivojen tasolla ketju etenee MEG-tutkimusten perusteella seuraavasti (kuva 2): Piirreanalyysia kuvastava aktivaatio keskittyy aivojen takaosan näköalueille 0.1 sekuntia sanan esittämisen jälkeen. Tämä vaihe on samanlainen kaikille ärsyketyypeille (esim. sanat, kasvot). Sisältö alkaa vaikuttaa seuraavassa vaiheessa, 0.15 sekunnin kohdalla, jolloin havaitaan kirjainjonoille herkkä aktivaatio vasemman ohimo-takaraivolohkon rajalla, aivojen alapinnalla. Tämä analyysin vaihe on samanlainen konsonanttijonoille ja oikeille sanoille. Kirjainjonon sisältämä merkitys (ja myös sen äänneasun) vaikuttaa 0.2 sekunnista alkaen ohimolohkon yläosan pitkäkestoisessa aktivaatiossa, joka saavuttaa huippunsa noin 0.4 sekuntia sanan esittämisestä (Salmelin 2007).



Kuva 2. Aivojen aktivaatioketju sanan lukemisessa. MEG:llä mitattu aktivaatio etenee takaosien näköalueilta vasemman aivopuoliskon taka-alaosaan ja lopulta vasemman ohimolohkon yläosaan. Sana ilmestyi näkyviin hetkellä 0.

## Miten kielen ymmärtämistä voidaan jäljittää aivojen tasolla

Kielen ymmärtämisen edustusta näissä aktivaatioketjuissa voidaan tutkia esimerkiksi esittämällä lauseita, jotka väistämättä johtavat tiettyyn viimeiseen sanaan. Lauseista neljäsnes päätty odotettuun sanaan, mutta muissa on eri tavoin odottamaton viimeinen sana. Sana voi olla väärä merkitykseltään eikä myöskään sisällä samoja äänneitä/kirjaimia kuin odotettu sana, tai se voi sopia merkitykseltään lauseeseen, vaikka onkin epätavallinen. Kolmas odottamaton lausetyyppi päättyy sanaan, joka on merkitykseltään väärä, mutta jonka ensimmäiset äänneet/kirjaimet ovat samat kuin odotetussa sanassa. Tällä tavoin voidaan rakentaa eritasoisia merkityksen ja äänne-asun poikkeavuuksia (Connolly ja Phillips 1994). Lauseita on kaikkiaan noin 400, koska kutakin ärsyketyyppiä tarvitaan noin 100 kappaletta, jotta aivojen taustatoiminnasta voidaan tunnistaa systemaattisesti toistuvat piirteet. Kuultujen lauseiden kohdalla erottelu havaitaan ohimolohkon yläosan pitkäkestoisessa aktivaatiossa, 0,2 sekunnista eteenpäin, molemmissa aivopuoliskoissa. Aktivaatio on voimakkain merkitykseltään väärille lauseen viimeisille sanoille, heikompi odottamattomille mutta sinänsä lauseyhteyden sopiville sanoille ja heikoin odotetuille sanoille (Helenius ym. 2002). Tällaisen vaiheittain muuttuvan aktivaation tulkitaan kuvastavan sanan ja lauseen ymmärtämistä. Samanlainen erottelu eri

lausetyyppien välillä havaitaan myös lukemisessa, ohimolohkon pitkäkestoisessa aktivaatiossa, mutta pääasiassa vasemmassa aivopuoliskossa (Helenius ym. 1998).

Tähän vaiheeseen asti kielellisen kuulo- ja näkö tiedon käsittely kulkee omia reittejään, mutta kielen ymmärtämistä kuvastava aivoaktivaatio on hyvin samanlainen riippumatta siitä, tuliko tieto alunperin sisään korvien vai silmien kautta. Intuitiivisesti se tuntuisikin järkevältä, sillä sisällön ymmärtäminen on jo hyvin abstrakti taso, jonka olisi vaikea kuvitella olevan tiukasti sidoksissa kuhunkin aistiin. Toistaiseksi kuulun ja luetun kielen ymmärtämistä on kuitenkin tutkittu pääasiassa eri kokeissa (ja eri henkilöillä), tai jos kokeissa on käytetty sekä kuulo- että näköärsykeitä, niin ärsykkeiden sisältöä ei ole vaihdeltu tavalla, jonka perusteella olisi voitu tulkita aktivaation muutosten varmasti kuvastavan juuri merkityksen käsittelyä. Nämä kaikki piirteet yhdistäviä kokeita siis tarvitaan.

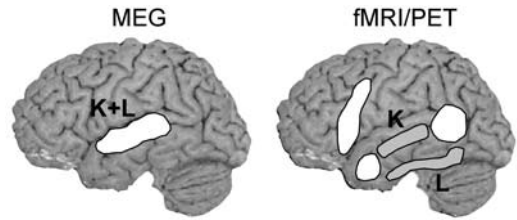
## Eri kuvantamismenetelmien antama kuva

Eri kuvantamismenetelmät antavat jossain määrin erilaisen kuvan aivoalueista, joiden ajatellaan olevan mukana kielen ymmärtämisessä. MEG-menetelmä mittaa suoraan aivojen sähköistä toimintaa ja on herkkä laajojen aivosoluryhmien samanaikaiselle aktivoitumiselle. Sen perusteella vasemman ohimolohkon yläosa on erityisen tärkeä alue kuullun ja luetun kielen ymmärtämisessä. Toiminnallinen magneettikuvaus (*functional magnetic resonance imaging*, fMRI) ja positroniemissiotomografia (PET) perustuvat aivojen energiankulutukseen, jota mitataan seuraamalla veren virtauksen ja hapen kulutuksen muutoksia tehtävän suorituksen yhteydessä. Koska nämä ilmiöt ovat hitaita, fMRI ja PET antavat tietoa aktivaation paikasta, mutta eivät sen ajoitukselta. Näiden menetelmien perusteella ohimolohkon yläosa on mukana puheen ymmärtämisessä, mutta vain aivan sen etu- ja takaosa myös luetun ymmärtämisessä; luetun ymmärtäminen aktivoi lisäksi erityisesti ohimolohkon alaosa (kuva 3). (Spitsyna ym. 2006; Vigneau ym. 2006.)

Nämä erot MEG- ja fMRI/PET-menetelmien antamien kuvien välillä saattavat johtua menetelmien erilaisesti herkkyydestä aivosolujen toiminnan mittaamisessa, mikä antaisi kiinnostavia mahdollisuuksia selvittää, kuinka ymmärtämisen prosessi on järjestynyt solutasolla. Toisaalta erot voivat myös olla jossain määrin näennäisiä ja johtua erilaisista koeasetelmista, jotka on viritetty parhaiten sopiviksi kullekin kuvantamismenetelmälle. Näiden asioiden selvittäminen alkaa olla mahdollista nyt, kun yhä useammissa tutkimuskeskuksessa on käytettävissä sekä MEG- että fMRI-kuvauslaitteet. Kaikki menetelmät viittaavat joka tapauksessa vasemman ohimolohkon ylätaakaosan oleelliseen rooliin kielen ymmärtämisessä, mikä itse asiassa sopii yhteen klassisen Wernicken–Geschwindin mallin kanssa (Geschwind 1965). Tämä malli sanoo, että kyseinen alue (väljästi ajatellen) on ymmärtämisalue, koska vaurio sen seutuvilla johtaa vaikeuksiin kielen ymmärtämisessä.

### Kohti luonnonmukaisempia koeasetelmia

Kielen ymmärtämistä tutkitaan perinteisesti yksittäisillä sanoilla tai muuten melko epäluonnollisilla koeasetelmilla. Se on välttämätöntä, koska koetilanne on rakennettava sellaiseksi, että saatu tieto pystytään analysoimaan ja tulkitsemaan mielekkäästi. Pohjimmiltaan haluamme kuitenkin ymmärtää luonnollisen kielen käsittelyä ja sen aivomekanismeja. Tarvitaan uusia lähestymistapoja, ja yksi lupaava tapa on tutkia aivoalueiden välistä reaaliaikaista kytkeytyvyyttä pelkän aktivaation sijasta (Gross ym. 2001). Ajatuksena on, että tehtävän suorituksessa mukana olevat aivoalueet tunnistetaan sillä perusteella, että niiden aktivaation aikasarjat ovat samanlaisia, eli ne toimivat yhdessä osana verkkoa. Niiden välisten vuorovaikutusten voimakkuus ja suunta voivat vaihdella eri koetilanteiden välillä ja siten kertoa eri alueiden ja yhteyksien toiminnallisesta roolista. Tällainen analyysitapa mahdollistaa luonnollisemmat koetilanteet, koska ajastusta ei nyt tarvitsekaan asettaa ulkoisilla



*Kuva 3. Sanojen merkityksen käsittelyyn osallistuvia alueita. Aivojen sähköisen toiminnan perusteella (MEG) on päätelty, että erityisesti vasemman ohimolohkon yläosan aktivaatio kuvastaa sekä kuultujen (K) että luettujen (L) sanojen merkityksen käsittelyä. Aivojen energiankulutuksen perusteella (fMRI, PET) taas on päätelty eräiden otsalohkon alueiden ja ohimolohkon etu- ja takaosien osallistuvan merkityksen hahmottamiseen sisääntuloreitistä riippumatta, kun taas ohimolohkon keskiosissa reitit ovat erillään siten, että kuulun ymmärtäminen aktivoi alueen yläosaa ja luetun ymmärtäminen sen alaosa.*

ärsykkeillä, vaan se otetaan suoraan aivoista.

Esimerkiksi kun tutkittavat lukevat jatkuvaa tarinaa, jota näytetään nopeassa tahdissa sana kerrallaan kolmella eri nopeudella (5–30 sanaa sekunnissa), niin että tarinaa on helppo seurata, sitä pystyy seuraamaan osittain mutta vain ponnistamalla tai sitä ei pysty kunnolla seuraamaan, vaikka yksittäiset sanat havaitseekin, löytyy voimakkaasti kytkeytynyt alueiden verkko vasemmassa aivopuoliskossa (Kujala ym. 2007). Kun esitysnopeutta kasvatetaan ja tarinan seuraaminen vaatii lisää ponnistusta, kytkentävoimakkuudet muuttuvat pienessä osassa tätä laajaa verkkoa. Tämä pieni aliverkko on kiinnostava, koska se yhdistää ohimo-takaraivolohkon rajapinnan aivojen alaosassa (aktivaatio suunnilleen tällä alueella kuvastaa kirjainjonojen analyysia; kuva 2), ohimolohkon yläosassa (merkitys, äänneasu; kuva 2) ja otsalohkon etualaosassa (näköjärjestelmän työmuisti). Tällainen koeasetelma ei toki suoraan salli päätelmiä kielen ymmärtämisen ja tiettyjen aivoverkkojen yhteydestä, mutta menetelmä itsessään antaa lupauksen siitä, että on mahdollista päästä tutkimaan ymmärtämisen aivomekanismeja luonnonmukaisissa tilanteissa (Salmelin ja Kujala 2007).

## KIRJALLISUUS

- Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P. & Haller, M. (1993): Models of reading aloud: dual-route and parallel-distributed-processing approaches. *Psychological Review*, 100:589–608.
- Connolly, J.F. & Phillips, N.A. (1994): Event-related potential components reflect phonological and semantic processing of the terminal word of spoken sentences. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 6:256–266.
- Frauenfelder, U.H. & Tyler, L.K. (1987): The process of spoken word recognition: an introduction. *Cognition*, 25:1–20.
- Geschwind, N. (1965): Disconnexion syndromes in animals and man. Part I. *Brain*, 88:237–294.
- Gross, J., Kujala, J., Hämäläinen, M., Timmermann, L., Schnitzler, A. & Salmelin, R. (2001): Dynamic imaging of coherent sources: studying neural interactions in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 98:694–699.
- Helenius, P., Salmelin, R., Service, E. & Connolly, J.F. (1998): Distinct time courses of word and sentence comprehension in the left temporal cortex. *Brain*, 121:1133–1142.
- Helenius, P., Salmelin, R., Service, E., Connolly, J., Leinonen, S. & Lyytinen, H. (2002): Cortical activation during spoken-word segmentation in non-reading-impaired and dyslexic adults. *Journal of Neuroscience*, 22:2936–2944.
- Kujala, J., Pammer, K., Cornelissen, P., Roebroek, A., Formisano, E. & Salmelin, R. (2007): Phase coupling in a cerebro-cerebellar network at 8–13 Hz during reading. *Cerebral Cortex*, 17: 1476–1485.
- Salmelin, R., & Kujala, J. (2006): Neural representation of language: activation vs. long-range connectivity. *Trends in Cognitive Sciences*, 10:519–525.
- Salmelin, R. (2007): Clinical neurophysiology of language: the MEG approach. *Clinical Neurophysiology*, 118:237–254.
- Spitsyna, G., Warren, J., Scott, S., Turkheimer, F. & Wise, R. (2006): Converging language streams in the human temporal lobe. *Journal of Neuroscience*, 26:7328–7336.
- Uusvuori, J., Parviainen, T., Inkinen, M. & Salmelin, R. (painossa): Spatiotemporal interaction between sound form and meaning during spoken word perception. *Cerebral Cortex*. doi:10.1093/cercor/bhm076
- Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P.Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (2006): Meta-analyzing left language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *Neuroimage*, 30:1414–32.

**Kirjoittaja on akatemiaprofessori Teknillisen korkeakoulun kylmälaboration aivotutkimusyksikössä. Artikkelin perustuu Tieteen päivien esitelmään 12.1.2007.**