

TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

FatigEEG – Kuormituksen vaikutus tarkkaavuuden suuntaamiseen ja säätelyyn

Tiina Parviainen, Jyväskylän yliopisto, tiina.m.parviainen@jyu.fi
Santtu Seipäjärvä, Jyväskylän yliopisto, santtu.m.seipajarvi@jyu.fi
Mikko Vesisenaho, Jyväskylän yliopisto, mikko.vesisenaho@jyu.fi

Hanketyöryhmässä lisäksi:

Anita Malinen, Jyväskylän yliopisto
Heikki Kyröläinen, Jyväskylän yliopisto
Mika Luimula, Turun ammattikorkeakoulu
Heikki Hämäläinen, Turun yliopisto
Jarmo Majapuro, NeuroCarrier Oy
Mila Nurminen, Jyväskylän yliopisto
Suvi Holm, Jyväskylän yliopisto
Niko Laivuori, Turun ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä / Abstract

Tarkkaavuuden ylläpito ja tarkoituksenmukainen ohjaaminen on edellytys optimaaliselle suorituskyvyllä. Optimaalisen tarkkaavuuden saavuttamiseksi tarvitaan myös kehon, ja etenkin aivojen tasolla, oikeanlainen fysiologinen tila. Tiedetään, että fyysinen ja psyykinen kuormitus vaikuttaa yksilöön toimintakyvyn ja fysiologian tasolla. Toimintakyvyn heikentyminen on tietyissä tilanteissa, kuten sotilastehtävissä, merkittävä vaaratekijä, jonka suuruutta on tärkeää pystyä arvioimaan. Kuormituksen vaikutukset suorituskykyyn, kuten myös yksilöiden kyvykkyys arvioida omaa toimintakykyään, ovat kuitenkin hyvin vaihtelevia. Yksilön toimintakyvyn määrittämiseksi ja seuraamiseksi tarvitaankin erilaisia mittareita, jotta toimintakyvyn alenemisen aiheuttamia riskejä voidaan välttää.

Kerätyllä aineistolla pyritään vastaamaan kysymyksiin 1) Miten tarkkaavuuden ylläpito sekä tarkkaavuuden suuntaaminen ja säätely muuttuu väsymyksen myötä? 2) Mitkä yksilölliset taustatekijät selittävät väsymystilan erilaisia vaikutuksia tarkkaavuuden mittareihin?

Tutkimuksessa kerättiin aineistoa (N=52) fyysisesti ja psyykkisesti kuormittavien harjoitusten (yht. 12 vrk) yhteydessä. Tutkimuksessa mitattiin laaja-alaisesti kehon signaaleja (aivoaktiivisuus, sykevälivaihtelu, hormonaalinen tila) sekä yksilön subjektiivista kokemusta omasta tilastaan. Harjoitusten yhteydessä suoritettiin myös tarkkaavuuden tilaa ja suuntaamista mittaava tehtävä VR-ajosimulaattorilla. Ajotehtävät suoritettiin ennen kuormittavaa harjoitusta, ja harjoituksen yhteydessä.

1. Johdanto / Introduction

Tarkkaavuuden ylläpito ja tarkoituksenmukainen ohjaaminen on edellytys optimaaliselle suorituskyvyllä. Kriittiseksi tämä muodostuu tilanteissa, joissa ollaan vastuussa teknologisista laitteista, kuten ajoneuvon ohjaamisesta, tai toimenpiteissä, jotka kohdistuvat laajaan ihmisjoukkoon tai ovat luonteeltaan ratkaisevia. Tarkkaavuuden osatekijöinä voidaan

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihe 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

erottaa tarkkaavuuden ylläpito, tarkkaavuuden tarkoituksenmukainen suuntaaminen olennaiseen kohteeseen ja epäolennaisen tiedon ehkäisy (valikoiva tarkkaavuus) sekä tarkkaavuuden joustava siirtäminen. Vigilanssi, eli valppaus, kertoo yksilön kyvystä ylläpitää tarkoituksenmukaista huomiokykyä ärsykeympäristöönsä.

Tarkkaavuuteen liittyy olennaisesti oikeanlainen vireystila kehon fysiologisella tasolla, sekä aivojen toiminnassa. Autonomisen hermoston (autonomic nervous system, ANS) ja aivojen tila muodostaa pohjan kognitiiviselle suoritukselle, ja mahdollistaa optimaalisen suorituskyvyn. ANS:n sympaattisen ja parasympaattisen osan toiminta luo jatkuvan, dynaamisen pohjan elimistön suorituskyvylle, ja ANS:n toiminnan mittausta tarjoaa ikkunan elimistön valmiustilaan ja reaktiivisuuteen. Oikeanlainen valmiustila on olennainen vigilanssin (valppauden) ja tehokkaan tarkkaavuuden kannalta. Tarkoituksenmukaisen aktivoinnin lisäksi hyvän suorituskyvyn kannalta olennaista on elimistön palautuminen, mikä tapahtuu tyypillisesti pidemmän levon eli yönien aikana. Silloin, kun palautumista ei pääse tapahtumaan, voi vaarantua kyky saavuttaa suorituskyvyn kannalta riittävän hyvä valppaustila. ANS:n tilaa ja reaktiivisuutta voidaan mitata rekisteröimällä sydämen sykevälivaihtelua (heart rate variability, HRV), joka heijastaa erityisesti parasympaattisen hermoston aktiivisuutta, sekä ihon sähkönjohtavuutta (electrodermal activity, EDA), joka taas kertoo erityisesti sympaattisen hermoston toiminnasta.

Tiedonkäsittelyn kannalta olennainen toiminta tapahtuu aivojen hermoverkoissa. Aivojen toimintaketjuista voidaan erottaa aistinelimistä saapuvan tiedon käsittely ('bottom-up'), sekä hermoverkon kulloisenkin tilan ohjaava vaikutus ('top-down'). Tehtäväsuoritukselle on tärkeää virheetön aistitiedon käsittely, mutta top-down ohjaus ylläpitää tehtäväsuuntautunutta tarkkaavuuden tilaa, joka vaikuttaa myös aistitiedon käsittelyyn. Aivojen tarkkaavuusverkoston toimintaa ja sen kykyä huomioida olennaisia signaaleja, ja ehkäistä epäolennaisia, voidaan mitata rekisteröimällä aivojen sähköistä tiedonkulkua elektroenkefalografia (EEG) menetelmällä. EEG:llä voidaan mitata sekä aivoverkoston rytmisen toiminnan tasoa, joka kertoo tarkkaavuuden ja inhibition tasapainosta, sekä aistiärsykkeiden aiheuttamia heräteasteita (evoked potentials, EP), jotka osoittavat aivojen reaktioherkkyyden ja tiedonkäsittelyyn allokoitujen resurssien määrän.

Tarkkaavuus on erittäin herkkä häiriöille, ja siihen vaikuttavat myös yksilölliset tekijät, kuten temperamentti ja kognitiivinen profiili. Viimeaikainen tutkimuksemme on osoittanut, että fyysinen kunto on yhteydessä aivojen tarkkaavuustoimintoihin (Hernandez et al., 2020). Tarkkaavuuteen, ja sen aivoperustaan, vaikuttavat herkästi myös tilannetekijät, kuten väsymys, psyykinen tila tai kuormitus (Liu et al., 2020). Optimaalisen suorituskyvyn kannalta on tärkeää ymmärtää 1) miten tilannetekijät vaikuttavat tarkkaavuuden edellytyksiin fysiologisella ja neurofysiologisella tasolla, sekä 2) miten yksilölliset tekijät vaikuttavat tähän tarkkaavuuden tilannesidonnaiseen vaihteluun.

Luultavasti yleisin tarkkaavuutta heikentävä tilannetekijä on väsymys. Vireystilan laskulla on tunnettuja dramaattisia seurauksia mm. ajokykyyn. Väsymys ei kuitenkaan aina aiheuta tarkkaavuuden laskua, etenkin jos elimistö pystyy tilapäisesti kompensoimaan vireystilan laskuun vaikuttavia tekijöitä. Yksilöllinen fysiologia, palautumisen tehokkuus ja herkkyys vireystilan muutoksille voi myös vaikuttaa siihen, miten herkästi tarkkaavuus vaihtelee väsyvyyden mukaan.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksella pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

1. Miten tarkkaavuuden ylläpito sekä tarkkaavuuden suuntaaminen ja säätely muuttuu väsymyksen myötä (tarkkaavuuden väsymysherkkyyys)?

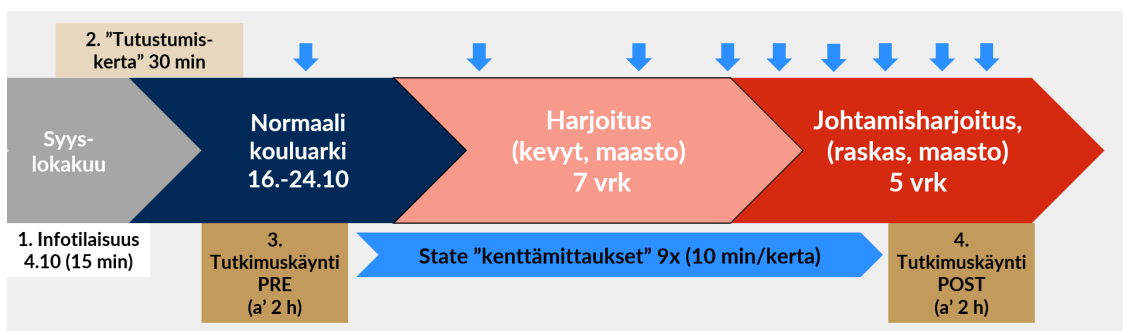
Muutosta tarkasteltiin käyttäytymismittareilla (ajosimulaattoritehtävä, silmänliikkeiden seuranta), fysiologisilla autonomisen hermoston (HRV), hormonitoiminnan mittareilla (kortisoli ja DHEA-S sylkinäytteistä) sekä aivojen sähköfysiologisilla mittareilla (EEG). Lisäksi kerättiin tietoa subjektiivisen kokemuksen suhteesta objektiiviseen tilaan.

2. Mitkä yksilölliset taustatekijät (trait) selittävät väsymystilan erilaisia vaikutuksia tarkkaavuuden mittareihin sekä aivoissa, autonomisessa hermostossa, että kognitiivisessa suorituskykyssä?

Yksilöllisten tekijöiden osalta keräsimme tietoa etenkin fyysisestä kunnosta arvioidaksemme sen vaikutusta tarkkaavuuden väsymysherkkyyteen. Aiempi tutkimus tukee myös ajatusta, että autonomisen hermoston palautumiskapasiteetissa on yksilöllisiä eroja. Tästä syystä keräsimme aineistoa autonomisen hermoston tasapainosta pidemmältä aikaväliltä mitattuna, jotta voimme tarkastella tämän vaihtelun, erityisesti elimistön palautumisen tehokkuuden, vaikutusta tarkkaavuuden väsymysherkkyyteen.

Käytännön toteutus ja aikataulu

Tutkimus toteutettiin seurantatutkimuksena yhteistyössä Maanpuolustuskorkeakoulun kanssa. Tutkittavaan joukkoon kuului 18-30 vuotiaita kadettikoulua suorittavia miehiä tai naisia, joista rekrytoitiin 70 henkilön joukko. Tutkimus toteutettiin kadettikoulun fyysisesti ja psyykkisesti kuormittavien harjoitusten yhteydessä, jotka järjestettiin 25.10-4.11.2023 aikana. Tutkimuskäyntejä järjestettiin Santahaminassa 4.10-4.11.2023 välisenä aikana (kts. kuva 1).



Kuva 1. Tutkimuksen toteutuksen aikajana

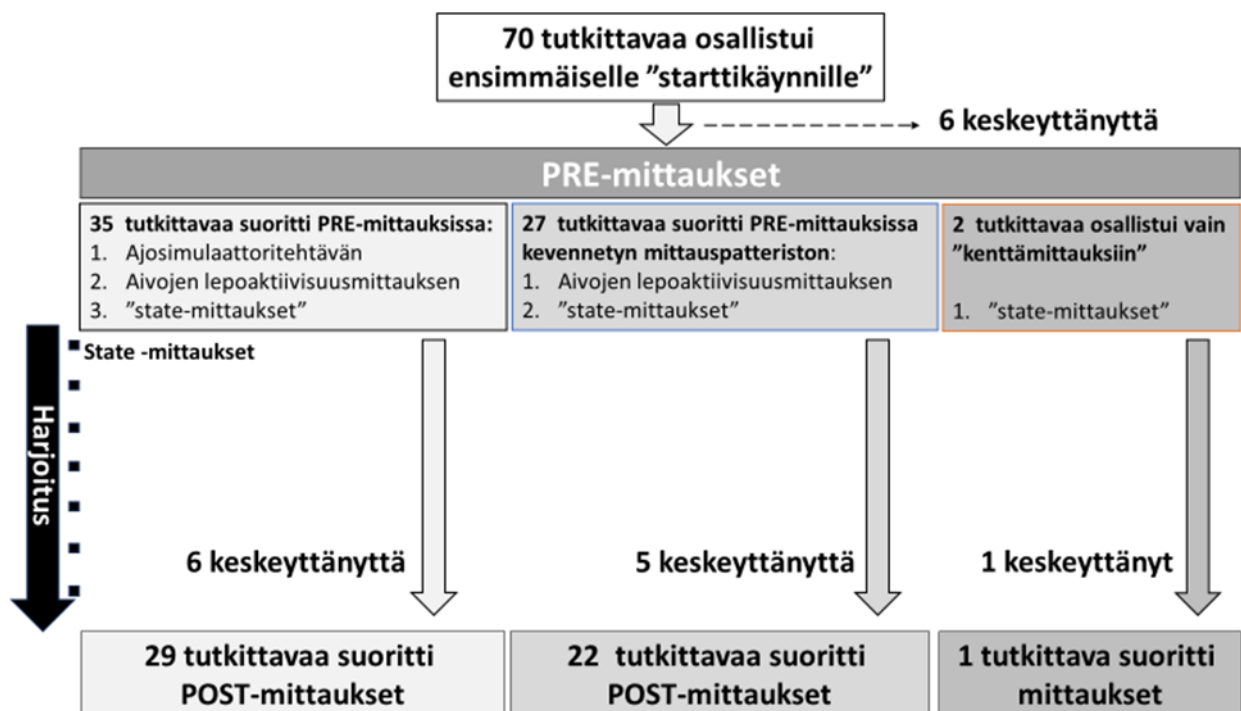
Infotilaisuudessa (kohta 1. ylläolevassa kuviossa) 1. vuosikurssin kadeteille esiteltiin tutkimuksen aihepiiri ja tiedusteltiin kiinnostusta osallistua tutkimukseen.

Tutustumiskäynnillä (kohta 2) (kesto noin 30 min/hlö) tutkittavien oli mahdollista kysyä tutkimuksesta ja sen toteutuksesta tutkijoilta. Käynnillä allekirjoitettiin suostumuslomakkeet ja täytettiin taustatietokyselyt. Näiden lisäksi tutkittaville jaettiin tutkimuksessa käytettävät aktiivisuusmittarit, sekä he pääsivät kokeilemaan VR-ajosimulaattoria.

Varsinaiset tutkimuskäynnit (kohta 3 ja 4) olivat rakenteeltaan samanlaiset, ja niiden kesto noin 1-2 h/hlö. Tutkimuskerroilla suoritettiin aivotoiminnan lepomittaukset, sekä ajosimulaattoritehtävä.

State – mittaukset (sininen laatikko, "kenttämittaukset") olivat lyhyitä mittauksia, joiden avulla on tarkoitus seurata kuormituksen aiheuttamia vasteita yksilön kokemassa ja fysiologisessa tilassa. Kenttämittauksiin kuului koetun tilan kysely, sylkinäytteen kerääminen, sekä sykkeen lepomittaus (6 min).

Aikataulullisten rajoitteiden vuoksi kaikki tutkittavat, eivät suorittaneet kaikki mittauksia. Tutkimuksen läpäisi lopulta 52 tutkittavaa, joista 29 tutkittavaa suoritti täyden mittauskokonaisuuden (kts. kuva 2).



Kuva 2. Tutkimukseen osallistuneiden suorittamat mittauskokonaisuudet.

3. Aineisto ja menetelmät

Varsinaisilla tutkimuskäynneillä (kuva 1. kohta 3 ja 4) tutkittavilta mitattiin aivojen lepoaktiivisuutta sekä aivojen sähköistä aktiivisuutta tarkkaavuustehtävän aikana. Tutkimuksessa yksilön tarkkaavuuden tilaa tutkittiin VR-ympäristössä toteutettavan ajosimulaattoritehtävän avulla. Tehtävässä suoritettiin ensin vapaa-ajo, jonka aikana tutkittavan tuli pitää auto omalla kaistallaan. Erillisissä reagoititehtävissä tutkittavaa pyydettiin reagoimaan ympäristössä esiintyviin ärsykkeisiin ohjausratissa olevien painikkeiden avulla. Samanaikaisesti VR-laseilla tallennettiin tutkittavien silmänliikkeitä, joilla saadaan tietoa kohteiden havainnoinnista ja katseen kohdistamisesta.

Varsinaisilla tutkimuskäynneillä yksilön fysiologista tilaa tutkittiin mittaamalla aivojen lepoaktiivisuutta (Elektroenkefalografia, EEG), sekä sykeä ja sykevälivaihtelua (HRV). Mittauksessa tutkittavaa pyydettiin istumaan rauhallisesti 4 minuutin ajan. Sykevälivaihtelun ajatellaan kuvaavan kehon tilaa (palautuminen vs. kuormitus/stressi), kuvaamalla autonomisen hermoston sympaattisen ja parasympaattisen osan aktiivisuutta. Aivojen sähköi-

nen aktiivisuus taas kuvaa aivojen hermosolujen viestintää ja tiedonkäsittelyä, joiden ajatellaan muuttuvan väsymyksen johdosta.

Kenttäolosuhteissa toteutetuilla "state-mittauksilla" (kuva 1, "state-mittaukset") tutkittiin väsymyksen ilmenemistä kehon fysiologian, ja subjektiivisesti koetun tilan tasoilla. Fysiologisista signaaleista hormonitasapainoa (kortisoli ja DHEA-S) tutkittiin sykinäytteiden ja autonomisen hermoston tilaa sykevälivaihtelun avulla. Näiden muuttujien ajatellaan heijastelevan stressireaktion (peräisin fyysisestä tai psyykkisestä lähteestä) voimakkuutta ja vaikutuksia kehossa.

Tutkimuksessa haluttiin huomioida myös yksilön ominaisuuksien (trait) vaikutuksia huomioidaan väsymysvasteisiin. Yksilön ominaisuuksista tietoa kerättiin tutkimalla "hermostollisen palautumiskyvyn" ja fyysisen kunnon vaikutuksia väsymysherkkyyteen. Hermostollinen palautusmiskyky määritellään suhteuttamalla yksilön levossa ja kuormituksessa esiintyvää sykevälivaihtelua (kokeellinen muuttuja), sekä fyysisen kunnon tuloksina hyödynnettään MPKK:n pääsykokeiden tai koulutuksen aikaisia kuntotestituloksia.

Yksilön kokemaa tilaa (state) arvioidaan kysymyksillä koetusta kuormittuneisuudesta, väsymyksestä, vireystilasta sekä mielialasta.

4. Tulokset ja pohdinta

Johtuen lupakäsittelyn viivästymisestä, projektin mittaukset saatiin päätökseen vasta 4.11.2023, joten tutkimuksen tuloksia ei pystytäkään vielä esittelemään. Voidaan kuitenkin todeta, että neurofysiologisten mittausten osalta kerätty aineisto on laajuudessaan varsin ainutlaatuinen myös kansainvälisessä mittakaavassa. Tutkimuksessa aivoaktiivisuutta ja tarkkaavuutta mitattiin VR-simulaattoriympäristössä, joka mahdollistaa ilmiöiden tutkimisen luonnollisemmassa toimintatilanteessa. Tutkimuksessa pyrittiin myös tarkastelemaan ihmiskehon signaaleja sekä väsymystä yksilöllisesti pitemmältä aikaväliltä, monipuolisilla mittareilla. Tutkimuksen ainutlaatuisuus on nähtävissä eri näkökulmista.

Ensinnäkin, vaikka kuormituksen aiheuttamia fysiologisia vasteita on tutkittu (esim. Tait ym. 2022), on näiden muuttujien yhteys yksilön kognitiiviseen suorituskyykyyn edelleen epäselvä.

Toisekseen, koska kognitiivisella suorituskyykyllä on hermostollinen perusta, on oleellista tarkastella hermoston toimintaa kuormituksen alaisena. Vaikkakin aivoaktiivisuuden muutoksia erilaisten suoritusten (esim. Diaz-Piedra 2020), ja vielä spesifimmin tarkkaavuuden osalta (esim. Boksem ym. 2005) onkin raportoitu, on edelleen epäselvää, mitkä mittarit ovat suoranaisemmin yhteydessä toimintakyykyyn, ja miten väsymys näkyy kyseisissä mittareissa.

Tämän tutkimuksen vahvuutena voidaankin pitää sen laajaa mittauspatteristoa, jolla pyritään selvittämään nimenomaan väsymyksen ilmentymistä yksilöllisemmällä tasolla. Yksilöllisemmän tarkastelun mahdollistamiseksi mittaukset on aloitettu jo ennen kuormituksen kertymistä, jotta käytettyjen fysiologisten mittareiden perustasosta saataisiin luotettavampi käsitys. Osaa mittauksista (state-mittaukset) on toistettu, tasaisin väliajoin, jolloin väsymyksen aiheuttamista muutoksista ja aikajanasta saadaan luotettavampaa tietoa.

Lopuksi, tämän aineiston keskeisimpiä uutuusarvoja on se, että kuormituksen aiheuttamia fysiologisia vasteita voidaan yhdistää tarkkaavuuden ja aivotoiminnan tasolla tapahtuneisiin muutoksiin. Saadaan siis tietoa siitä, onko jo harjoituksen aikaisissa fysiologisissa signaaleissa, tai yksilöllisissä taustatekijöissä, merkkejä, joista kuormituksen johdosta syntyy alentunutta tarkkaavuuden tilaa voidaan ennakoita. Tutkimuksessa käytetyt mittarit

(HRV, sylkinäytteet, kyselyt) ovat myös "kenttäkelpoisia", ja saavutettavaa tietoa on helposti sovellettavissa eteenpäin.

5. Loppupäätelmät / Conclusions

On selvää, että ennen pitkää yksittäisten sotilaiden/joukkojen tilaa tullaan monitoroimaan entistä enemmän myös fysiologisten signaalien pohjalta. Teknologia tarjoaa jatkuvasti laajenevan kannettavien mittareiden valikoiman, jotka tuottavat rekisteröintiä yksilöllisesti muuttavasta fysiologisesta ym. tilasta. Haasteena on oikeiden fysiologisten signaalien löytäminen ja niiden tulkinta. Tässä tutkimuksessa onnistuimme keräämään laadukkaaksi todettua aineistoa sekä autonomisen hermoston tilasta (sykevälivaihtelu, aivojen sähköinen toiminta) tarkkaavuuden väsyvyysvaikutuksesta, joka osoitti alustavissa tarkasteluissa huomattavaa yksilöllistä vaihtelua. Tällä tutkimuksella tuotetaan siis ensiarvoisen tärkeää tietoa, jota tullaan hyödyntämään tarkkaavuuden väsymysvaikutusten tunnistamiseksi, sekä sen yleisen määrän ja yksilöllisen vaihtelun kartoittamiseksi. On todennäköistä, että esimerkiksi tarkkaavuuden alenemisen ennustamiseksi tarvitaan tietoa useammasta kehon fysiologisesta signaalista, kuten tässäkin tutkimuksessa on tehty.

Suoritettu aineistonkeruu ja yhetistyö Maanpuolustuskorkeakoulun kanssa antoi myös hedelmällisen pohjan kehittää tutkimusyhteistyötä Jyväskylän yliopiston ja Maanpuolustuskorkeakoulun välillä. Jyväskylän yliopistossa on hankkeen rinnalla käynnistynyt myös toinen, Business Finlandin rahoittama hanke (*DIGIMIND: Psykofysiologinen mittaus ja seuranta mielen tilan digitaalisena indikaattorina*), jonka tavoitteena on niinkään lisätä aivoista ja autonomisesta hermostosta mitatun tiedon tulkittavuutta ja ymmärrystä, mutta kliinisen tiedon ja terveydenhuollon konteksteissa. Molemmissa hankkeissa pyritään kuitenkin edistämään mittaustietoon perustuvaa yksilöllisen tason ja arvioinnin luotettavuutta. Tulevaisuudessa tutkimuksessa kerätyllä aineistolla tavoitellaan toimintakyvyn monitoroinnin mahdollistamista sotilaskontekstissa. Hanke



Lähteet:

Boksem MAS, Meijman TF, Lorist MM. Effects of mental fatigue on attention: An ERP study. *Cognitive Brain Research*. 2005;25(1):107-116.
doi:10.1016/j.cogbrainres.2005.04.011

Diaz-Piedra C, Sebastián MV, Di Stasi LL. EEG Theta Power Activity Reflects Workload among Army Combat Drivers: An Experimental Study. *Brain Sciences*. 2020;10(4):199.
doi:10.3390/brainsci10040199

Hernández D, Heinilä E, Muotka J, et al. Physical activity and aerobic fitness show different associations with brain processes underlying anticipatory selective visuospatial attention in adolescents. *Brain Research*. 2021;1761:147392.
doi:10.1016/j.brainres.2021.147392

Tait JL, Drain JR, Corrigan SL, Drake JM, Main LC. Impact of military training stress on hormone response and recovery. Lomonaco T, ed. *PLoS ONE*. 2022;17(3):e0265121.
doi:10.1371/journal.pone.0265121