

HÄVITTÄJÄOHJAAJAN RESPIRAA- TIOTIHEYS KOGNITIIVISEN KUOR- MITUKSEN MITTARINA

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Teknologiaosaamisen johtamisen tutkinto-ohjelma, InnoTech-liiketoiminta			
Työn tekijä(t) Mikko Fingerroos			
Työn nimi Hävittäjäohjaajan respiraatiotiheys kognitiivisen kuormituksen mittarina			
Päiväys	30.5.2024	Sivumäärä/Liitteet	60/3
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Puolustusvoimat/Insta Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>F/A-18 hävittäjäohjaaja toimii kognitiivisesti vaativassa ympäristössä suorittaessaan lentotehtäviä. Kognitiivinen kuormitus saattaa ylittää ajoittain hävittäjäohjaajan kognitiivisen kapasiteetin ja tällöin riskinä on tehtävän epäonnistuminen tai jopa onnettomuus. Hävittäjäohjaajien koulutuksessa kognitiivisen kuormituksen reaaliaikainen mittaaminen ja analysointi mahdollistaisi koulutuksen optimoinnin jokaiselle koulutettavalle yksilölle sopivalle tasolle. Tämä tehostaisi koulutusta ja voisi mahdollistaa hävittäjäohjaajien kognitiivisten ylikuormitustilanteiden ennaltaehkäisemistä.</p> <p>Sydämen toiminta ja hengitystiheys reagoivat ihmisen kognitiivisen kuormituksen tasoon autonomisen hermoston välityksellä. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia hengitystiheyden eli respiraatiotiheyden soveltuvuutta kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen. Tutkimuksessa verrattiin koehenkilöiden respiraatiotiheyttä heidän fysiologisiin ja subjektiivisiin kuormitusarvoihin. Fysiologiset kognitiiviset kuormitusarvot mitattiin sykevälivaihtelulla ja subjektiiviset kognitiiviset kuormitusarvot saatiin NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration Task Load Index) menetelmällä. Vertailun perusteella tehtiin johtopäätökset respiraatiotiheyden soveltuvuudesta kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen.</p> <p>Tutkimusta varten luotiin koeasetelma, jossa 16 koehenkilöä suoritti kaksi kognitiiviselta vaativuudeltaan eri tasoista lentosimulaattoritehtävää. Tehtävien aikana koehenkilöiltä mitattiin sykevälivaihtelua Firstbeat bodyguard 2-laitteella ja respiraatiotiheyttä IPBAM (Insta Pilot's Breath Air Monitor) -hengitysilmaamonitorilla. Lisäksi tehtävien suoritukset arvioitiin ja koehenkilöt vastasivat NASA-TLX kyselyyn. Näistä tuloksista saatiin vertailukohta fysiologisille mittauksille. Sykevälivaihtelumuuttujia, NASA-TLX pisteitä, suoritusarviointia ja respiraatiotiheystietoja verrattiin toistettujen mittausten t-testillä.</p> <p>Tulosten mukaan respiraatiotiheys reagoi samansuuntaisesti kognitiivisen kuormituksen kasvuun kuin tutkimuksen vertailumittarit sykevälivaihtelu, suoritusarviointit ja NASA-TLX pisteet. Tutkimuksen tulosten mukaan respiraatiotiheys korreloi muihin kognitiivisen kuormituksen mittaustietoihin. Täten respiraatiotiheyttä voidaan käyttää luotettavasti kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen. Respiraatiotiheys on kuitenkin herkkä tekijöille, jotka eivät suoraan liity kognitiiviseen kuormitukseen, joten respiraatiotiheyden analysoimisessa mahdolliset ulkoiset tekijät tulee pystyä erottelamaan todellisista kuormitustekijöistä. Tämän tutkimuksen johtopäätös on, että respiraatiotiheyttä voidaan harkita tukemaan muita kognitiivisen kuormituksen mitta-reita. Tämä tutkimus ei täysin tue respiraatiotiheyden käyttämistä yksinään mittaamaan kognitiivista kuormitusta.</p>			
Avainsanat Hävittäjäohjaaja, toimintakyky, kognitiivinen kuormitus, respiraatiotiheys			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Technology Competence Management	
Author(s) Mikko Fingerroos	
Title of Thesis Fighter Pilot's Respiration Rate as a Measure of Mental Workload	
Date May 30 th 2024	Pages/Appendices 60/3
Client Organisation /Partners Finnish Defence Forces / Insta Oy	
<p>The F/A-18 fighter pilot operates in a cognitively demanding environment while performing flight missions. The mental workload may occasionally exceed the fighter pilot's cognitive capacity. In these cases, the mission success is jeopardized or even a fatal accident might occur. Real-time measurement and analysis of the mental workload would enable the training of the fighter pilots to be optimized to the appropriate level for all the student pilots. This would enhance training and could enable the prevention of cognitive overload situations for fighter pilots.</p> <p>Heart activity and respiration rate react to the level of a person's mental workload via the autonomic nervous system. The aim of this study was to investigate the applicability of respiration rate to measure mental workload. In the study, the subjects' respiration rate was compared with their physiological and subjective mental workload values. Physiological mental workload values were measured by heart rate variability and subjective mental workload values were obtained using the NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration Task Load Index) method. Conclusions were made based on the comparison about the suitability of respiration rate for measuring pilots' mental workload.</p> <p>An experimental set-up was created for the research. In the set-up 16 test subjects performed two flight tasks of different mental workload levels in the F/A-18 flight simulator. During the tasks, subjects were measured for heart rate variability with the Firstbeat bodyguard 2 device and respiration rate with the IPBAM (Insta Pilot's Breath Air Monitor). In addition, subjects answered the NASA-TLX questionnaire, which provided a reference point for physiological measurements. Heart rate variability variables, NASA-TLX scores and respiration rate data were compared using a repeated measures t-test.</p> <p>According to the results, respiration rate responds to the increase in mental workload in the same way as the study's benchmarks heart rate variability and NASA-TLX score. According to the results of the study, respiration rate correlates with the compared cognitive load measurement data, and respiration rate can be reliably used to measure mental workload. However, respiration rate is sensitive to factors that are not directly related to mental workload. Therefore, when analyzing respiration rate, you must be able to distinguish possible external factors from actual mental workload factors. As a conclusion, it is recommended that respiration rate should be considered for use to support other measures of mental workload. This study does not fully support using respiration rate alone to measure mental workload.</p>	
Keywords Fighter pilot, performance, mental workload, respiration rate	

SISÄLLYS

LYHENTEET JA KESKEISET KÄSITTEET

1	JOHDANTO	8
1.1	Tutkimuksen tavoite.....	10
1.2	Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset	11
2	TOIMINTAKYKY JA KOGNITIIVINEN KUORMITUS	14
2.1	Toimintakyky	14
2.2	Kognitiivinen kuormitus	14
2.3	Ihmisen hermostollinen järjestelmä.....	16
2.3.1	Sykevälivaihtelu.....	16
2.4	Ihmisen hengityksen fysiologia	17
2.5	Respiraation ja sydämen sykkeen välinen toiminta	19
2.6	Kognitiivisen kuormituksen mittaaminen.....	20
2.6.1	Subjektiviset menetelmät kognitiivisen kuormituksen mittaamiseksi	21
2.6.2	Fysiologiset menetelmät kognitiivisen kuormituksen mittaamiseksi.....	24
3	KENTTÄKOE.....	29
3.1	Yleistä.....	29
3.2	Osallistujat	29
3.3	Koelaitteisto	29
3.4	Menetelmä	36
3.4.1	Ilmatankkaustehtävän arviointi	39
3.5	Kenttäkokeen kulku	40
3.6	Tulokset.....	41
4	DISKUSSIO	44
5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO.....	48
	LIITE 1: ARVIOINTILOMAKE	58
	LIITE 2: ESITIETOLOMAKE	59
	LIITE 3: NASA-TLX KYSELYLOMAKE.....	60

LYHENTEET JA KESKEISET KÄSITTEET

TERMI	LYHENNE	Suomenнос / selite
AIR TO AIR REFUELING	AAR	Ilmatankkaus
BASKET		Ilmatankkausletkun päässä olevat korimainen suppilo, joka auttaa hävittäjän ilmatankkauspuomin osu- mista ilmatankkausletkun päähän ja kiinnittymistä itse letkuun
ELEKTROKARDIOGRAFIA	EKG	Sydänfilmi
F-TESTISUURE		Kahden satunnaismuuttujan vari- anssien suhde
GREENHOUSE-GEISSER-KORJAUS		Tilastollinen menetelmä korjaamaan toistomittauksen varianssianalyysin sfäärisyyttä
HEART RATE	HR	Sydämen syke
HEART RATE VARIATION	HRV	Sydämen sykevälivaihtelu
HEART RATE VARIATION TRIANGULAR INDEX	HRVTRI	RR-välin histogrammin integraali ja- ettuna histogrammin korkeudella
HIGH FREQUENCY	HF	Korkeataajuus
ILMATANKKAUS		Ilmassa tapahtuva polttoaineen siirto lentokoneesta toiseen
INSTA PILOT'S BREATH AIR MONITOR	IPBAM	Hengitysilmamonitori
INTERBEAT INTERVAL	IBI	Sydämen lyöntien väli
KOGNITIIVINEN		Älyllinen ja psykologinen toiminta, jolla ihminen käsittelee tietoa ja ym- päristöä
LOW FREQUENCY	LF	Matalataajuus
MENTAL WORK LOAD	MWL	Kognitiivinen kuormitus
MODIFIED COOPER-HARDER SCALE	MCH	Subjektiiivinen menetelmä kognitiivi- sen kuormituksen mittaamiselle
NASA TASK LOAD INDEX	NASA TLX	Subjektiiivinen menetelmä kognitiivi- sen kuormituksen mittaamiselle
NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION	NASA	Yhdysvaltain liittohallituksen alainen ilmailu- ja avaruushallintovirasto
NORMAL TO NORMAL	NN	Sama kuin RR puhuttaessa sydämen toiminnasta

R-PEAK TO R-PEAK	RR	EKG:n kahden R-poikkeaman välinen aika puhuttaessa sydämen toiminnasta
RESPIIRAATIO		Hengitys
RESPIRATION FREQUENCY	RF	Hengitystaajuus
RESPIRATION RATE	RR	Hengitystiheys puhuttaessa hengityksestä
ROOT MEAN SQUARE OF THE SUCCESSIVE DIFFERENCES	RMSSD	RR intervallien keskineliövirheen neliöjuuri
STANDARD DEVIATION NORMAL TO NORMAL	SDNN	NN intervallien keskihajonta
STANDARD DEVIATION OF THE 5 MINUTE AVERAGE NN INTERVALS	SDANN	NN intervallien keskiarvon keskihajonta jokaisesta 5 min aikaikkunasta 24h HRV tallennuksen ajalta
STATISTICAL PACKAGE FOR SOCIAL SCIENCES	SPSS	Tilastollisten tietojen käsittelyohjelmisto
SUBJECTIVE WORKLOAD ASSESSMENT TECHNIQUE	SWAT	Subjekttiivinen menetelmä kognitiivisen kuormituksen mittaamiselle
T-TESTI		Tilastollinen testi kahden ryhmän keskiarvojen erolle
TOIMINTAKYKY		Ihmisen fyysinen, psyykinen ja sosiaalinen edellytys selviytyä hänelle itselleen merkityksellisistä ja välttämättömistä jokapäiväisen elämän toiminnoista
TURBULENSSI		Ilmakehässä tapahtuvaa ilman virtauksen suunnan nopea vaihtelua
ULTRA LOW FREQUENCY	ULF	Ultramatala taajuus
VAPAUASTELUKU		Luku, joka ilmaisee käytetyn testisuureen jakauman
VERY LOW FREQUENCY	VLF	Erittäin matala taajuus

1 JOHDANTO

Hävittäjäohjaajien lentokoulutus on suuressa murroksessa. Kallistuneet hävittäjien lentotuntihinnat ja kehittynyt teknologia puoltavat simulaattorikoulutukseen panostamista. Simulaattoreiden tuomat edut ovat kustannustehokkuus, turvallisuus ja teknologian tuomat mahdollisuudet rakentaa laitteistoja, jotka tukevat lentäjien monipuolista koulutusta. Simulaattoreilla voidaan harjoitella koulutustilanteita, joita oikeilla koneilla ei välttämättä pystytä tuottamaan lainkaan tai niiden tuottaminen olisi monimutkaista ja vaatisi paljon resursseja.

Kognitiivinen suorituskky tarkoittaa tiedon hankintaan, varastointiin ja käyttämiseen liittyvää toimintaa. Järvisen ja Rajajärven (2006, 1) mukaan kognitiivisia perustoimintoja ovat havaintotoiminnot, psykomotoriikka, tarkkaavuus, ajan ja tilan hahmottaminen, kielelliset toiminnot, toiminnanohjaus sekä muistaminen ja oppiminen. Monimutkaisemmat toiminnot kuten päätöksenteko, ongelmanratkaisu, ajattelu, päättely ja suunnittelu rakentuvat edellä mainituista perustoiminnoista. Ihmisen kognitiivisella kuormituksella (engl. Mental Workload, MWL) ja suorituskvyyllä (engl. Performance) on merkittävä rooli hävittäjälentämisessä. Hävittäjäohjaajien lentokoulutusohjelmien nousujohteisuus tutustuttaa ohjaajat vähitellen nykyaikaisen ilmataistelun vaatimusten mukaiseen ympäristöön ja ohjaajien kognitiivinen suorituskky kehittyy koulutuksen edetessä. Usein kognitiivinen suorituskky on silti rajoittava tekijä, kun tehtävät ovat vaativia ja ne halutaan suorittaa mahdollisimman tehokkaasti. Tämän vuoksi kognitiivista suorituskkyä ja sen mittaamista on tutkittu paljon.

Neljännän ja viidennen sukupolven hävittäjissä tehtäväkentän monimutkaisuus ja sen vaatimukset kognitiiviselle suorituskvyyllä voivat ylittää hävittäjäohjaajan kognitiivisen suorituskvyn. Kognitiivisen suorituskvyn rajojen ylittyminen voi vaarantaa tehtävän menestyksekkään suorittamisen tai jopa lentoturvallisuuden. Hävittäjällä lentäminen kuormittaa pääasiassa ihmisen kognitiivista suorituskkyä. Fyysisen kuormitus, jota aiheuttavat lähinnä pitkäaikaiset suuret kiihtyvyydet ja pitkäkestoiset tehtävät, on toki merkittävä vaikuttaja kokonaissuorituskvyyllä, mutta selkeästi pienemmässä roolissa kuin kognitiivinen kuormitus. Muun muassa hyvä simultaanikapasiteetti, eli kyky huomion jakamiseen samanaikaisten tehtävien suorittamisessa ja priorisoinnissa, on hävittäjäohjaajalle merkittävä ominaisuus. Samanaikaisten tehtävien suorittaminen ja priorisointi on merkittävä kognitiivisen kuormituksen lisääjä.

Näiden seikkojen vuoksi olisi tärkeää löytää reaaliaikainen, luotettava hävittäjäohjaajan kognitiivisen kuormituksen mittaustapa, jota voitaisiin käyttää lennon aikana. Mittaukseen käytettävä laitteisto tulisi pystyä integroimaan hävittäjäohjaajan lentovarusteisiin tai lentokoneeseen. Integroiminen ei saisi lisätä merkittävästi kustannuksia tai aiheuttaa suuria muutoksia lentovarusteisiin, jotka vaikuttaisivat esimerkiksi hävittäjäohjaajan liikkumiseen ohjaamon sisällä.

Cainin (2007) mukaan kognitiivisen kuormituksen mittaamisella pyritään arvioimaan ihmisen toimintakykyä tämän suorittaman työn tai tehtävän aikana. Kognitiivisen kuormituksen mittaamisen avulla voidaan analysoida ihmisen suorituskkyä ja kehittää sitä vastaamaan ympäristön, kuten ilmataistelu ympäristön, vaatimuksiin mahdollisimman hyvin. Kognitiivinen suorituskky on kaikilla ihmisillä rajallinen. Sen mittaamisella voidaan tunnistaa tutkittavan ihmisen kognitiiviset rajoitukset. Ihminen voi, omat rajansa tiedostaen, priorisoida eri tehtäviä kriittisillä hetkillä, jotta tehtävän koko suoritus ei vaarannu. Tärkeintä olisi, että ihminen itse tunnistaisi tilanteen, jossa oman kognitiivisen suorituskvyn raja tulee vastaan. Esimerkiksi hävittäjäohjaajan tulisi pystyä tunnistamaan tilanteet, joissa oman kognitiivisen suorituskvyn rajat tulevat vastaan, jottei tehtävien turvallinen ja tehokas toteuttaminen vaarannu. Näissä tilanteissa oikea menettelytapa on tehtävien priorisointi. Tehtävien priorisointiin tulisi käyttää ilmailuun yleisesti liittyvää perusoletusta "Aviate, Navigate, Communicate". Vapaasti suomennettuna tätä oletusta voisi luonnehtia seuraavasti:

1. Lennä konetta turvallisesti ("Aviate")
2. Suorita käsketty tehtävä ("Navigate")
3. Kommunikoi aikeistasi ("Communicate")

Bell:n ja Waag:n (1998) mukaan asevoimat käyttävät paljon resursseja kehittääkseen virtuaalisen maailman teknologioita, jotka mahdollistavat hävittäjälentämisessä vaadittavien taitojen harjoittelun lentosimulaattoreissa. Simulaattorikoulutus tulee olemaan kustannustehokkuutensa takia merkittävä osa suomalaisten F-35-hävittäjäohjaajien koulutusta. Myös F-35:n osalta simulaattorissa pystytään kouluttamaan ohjaajille tilanteita, joita oikeilla koneilla ei pystytä oikeassa maailmassa tarjoamaan.

Mohanavelun ym. (2020) mukaan teknologinen kehitys on parantanut ilmailun turvallisuutta, mutta samalla vaatimukset lentäjien kognitiiviselle suorituskvylle ovat kasvaneet taistelutehtävien vaatimusten kasvamisen myötä. Hävittäjien teknologinen kehittyminen erityisesti avioniikan ja lennettävyyden osalta ovat keventäneet lentäjien kognitiivista kuormitusta peruslentämisen osalta. Toisaalta taistelutehtävien monimutkaistuminen teknologian kehittymisen ja taistelukentän monimuotoisuuden lisääntyminen ovat lisänneet lentotehtävien kognitiivista vaativuutta. Simulaattoriteknologian kehittyminen on kuitenkin mahdollistanut hävittäjälentäjien turvallisen kouluttautumisen myös kaikkein vaativampiin tehtäviin.

Shashidhara ym. (2018) mukaan hävittäjällä lentäminen ja tehtävien monimutkaisuus vaativat entistä enemmän valmistelua ja harjoittelua maassa ennen varsinaista tehtävän suorittamista. Tämä vuoksi simulaattorikoulutus tulee olemaan tulevaisuudessa tärkeämmässä roolissa sen turvallisuutensa ja kustannustehokkuutensa vuoksi. Tämä osoittaa simulaattoreiden mahdollisuudet ja tarpeellisuuden nykyisin ja erityisesti tulevaisuudessa hävittäjäohjaajienkoulutuksessa ja siksi simulaattoreiden ja niihin liittyvien mahdollisuuksien kartoittaminen sekä koulutuksen kehittäminen ovat tarpeellisia. Tämä tutkimus vastaa osaltaan tähän tarpeeseen selvittämällä

mahdollisuuksia ottaa käyttöön uutta teknologiaa ja koulutusmahdollisuuksia simulaattoriympäristössä.

1.1 Tutkimuksen tavoite

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan, pystytäänkö Insta Oy:n IPBAM (Insta Pilot's Breath Air Monitor) -hengitysilmaamonitorilla mittaamaan hävittäjäohjaajien hengitystiheyttä niin, että siitä voitaisiin arvioida ohjaajan kognitiivista kuormitusta. IPBAM-hengitysilmaamonitorilla kerättyä dataa verrataan samassa tutkimustilanteessa kerättyyn sykevälivaihteludataan. Sykevälivaihtelu (engl. Heart Rate Variation, HRV). on yleisesti käytetty kognitiivisen kuormituksen mittausmenetelmä ja sitä on käytetty useissa tutkimuksissa mittaamaan hävittäjälentäjien kognitiivista kuormitusta (Mansikka, Virtanen, Harris & Simola 2016; Rautanen 2015; Kim ym. 2018).

Työ tehdään yhteistyössä Suomen ilmavoimien, Sotilaslääketieteen keskuksen, Insta Oy:n ja Aalto -yliopiston kanssa. Työ liittyy yhteistyössä tapahtuvaan simulaattorikoulutuksen ja teknii-
kan kehittämiseen.

Tällä hetkellä hävittäjäohjaajien kognitiivista kuormitusta pystytään mittaamaan luotettavasti sydämen sykkeestä (Heart Rate, HR) ja sykevälivaihtelusta saatavan datan perusteella. Sykevälivaihtelun mittaamisen haasteena on se, että tyypillisesti mittaukseen käytettävien laitteistojen integroiminen hävittäjäilmailun ympäristöön ei ole helppoa. IPBAM-hengitysilmaamonitori on hyväksytty lentovarusteisiin integroitava laite. Jos kognitiivisen kuormituksen taso olisi reaaliaikaisesti pääteltävissä ohjaajan hengitystiheydestä esimerkiksi simulaattorikoulutuksessa, siihen voitaisiin reagoida lisäämällä tai vähentämällä kuormitusta tilanteen ja tarpeen mukaan. Erityisesti hävittäjäsimulaattorikoulutuksessa kognitiivisen kuormituksen reaaliaikaisella mittaamisella pystyttäisiin tehostamaan ohjaajien koulutusta säätämällä kuormitus tilanteeseen ja yksilöön sopivalle tasolle.

Hävittäjäohjaajan koulutukseen kuuluu lukuisia tilanteita, joissa kognitiivinen kuormitus on suuri. Kognitiivisen kuormituksen ollessa liian suuri, ihmisen informaation käsittely voi romah-
taa. Hävittäjälentämisessä informaation tehokas käsittely on lentokoulutuksen kustannustehok-
kuuden ja lentoturvallisuuden perusta. Jos käytössä olisi laitteisto, joka tuottaisi tietoa ohjaajan kognitiivisesta kuormituksesta reaaliaikaisesti, olisi mahdollista vaikuttaa kuormituksen mää-
rään kriittisillä hetkillä ja näin tehostamaan ohjaajien oppimista.

Ohjaajien kognitiivisen kuorman reaaliaikainen seuraaminen simulaattorikoulutuksessa antaisi opettajille ja organisaatiolle mahdollisuuksia tehostaa koulutusta ja koulutettavien oppimista. Lisäksi jos ja kun jollakin järjestelmällä pystyttäisiin keräämään tietoa kognitiivisesta kuormituk-
sesta oikeiden lentojen aikana, se mahdollistaisi kognitiivisesti kriittisten tilanteiden havain-
noimisen ja analysoimisen. Analyysien avulla näistä tilanteista voitaisiin oppia, jotta vastaisuus-
dessa ohjaajat eivät joutuisi kognitiivisesti liian kriittisiin tilanteisiin.

Tutkimuksessa IPBAM-hengitysilmaamonitoria käytetään hävittäjäohjaajien simulaattorilennolla. Kenttäkokeissa ohjaajat suorittavat ilmatankkaustehtäviä erilaisissa olosuhteissa. Tehtävät jaetaan kahteen eri vaatimustasoon: helppo (jäljempänä EASY) ja vaikea (jäljempänä HARD). Tehtävien vaatimustasoa varioidaan manipuloimalla niiden aikana vallinneita valaistusolosuhteita ja turbulenssin voimakkuutta. Lisäksi tehtävien kognitiivista vaativuutta arvioidaan lennoilla käytettävällä arviointilomakkeella sekä kilpailunomaisella tilanteella. Ohjaajien on tarkoitus suorittaa mahdollisimman monta onnistunutta ilmatankkauskontaktia kahden minuutin aikana. Tehtävien aikana ohjaajien sykevälivaihtelua mitataan Firstbeat Bodyguard 2 -sykeanturilla ja respiraatiotiheys rekisteröidään IPBAM-hengitysilmaamonitorilla. Jokaisen suorituksen jälkeen on minuutin tauko, jonka aikana ohjaajat tekevät subjektiivisen arvion tehtävänäikaisesta kognitiivisesta kuormituksesta. Subjektiiviset arviot tehdään NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration Task Load Index) menetelmällä. Lennonopettaja arvioi suoritukset ja pisteittää ne suoritusten aikana. Suoritusarvoja ja NASA-TLX pisteitä verrataan sykevälivaihteludataan ja respiraatiotiheysdataan.

1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset

Tässä tutkimuksessa tutkitaan sykevälivaihtelun ja respiraatiotiheyden suhdetta sekä IPBAM-hengitysilmaamonitorin soveltuvuutta respiraatiotiheyden käyttöön kognitiivisen kuormituksen mittarina simuloidun lentotehtävän aikana.

Tutkimuksen nollahypoteesina (H_0) on, että sykevälivaihtelun ja respiraatiotiheyden suhde ei korreloi eikä respiraatiotiheyttä voida käyttää luotettavasti kognitiivisen kuormituksen mittaamisessa. Vastahypoteesina (H_1) on, että sykevälivaihtelu ja respiraatiotiheys korreloivat ja respiraatiotiheyttä voidaan käyttää luotettavasti kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen. Tutkimusraportissa kuvatulla simulaattoritestauksella tehdään kenttäkoe, jolla testataan hypoteesin paikkansapitävyyttä.

Tutkimuskysymykset

1. Millaisella kenttäkokeella voidaan tutkia sykevälivaihtelun ja respiraatiotiheyden korrelaatiota hävittäjäohjaajilla?
2. Kuinka hyvin respiraatiotiheys soveltuu kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen?

Tutkimuskysymykseen 1 vastataan luvussa 3 Kenttäkoe, jossa esitellään kenttäkokeen toteutus ja siinä käytettävät menetelmät.

Tutkimuskysymykseen 2 vastataan alaluvussa 3.6. Tulokset, jossa eri kognitiivisen kuormituksen mittaamenetelmien (sykevälivaihtelu ja NASA-TLX) dataa verrataan respiraatiotiheyden dataan.

Tutkimuksessa käytetyt menetelmät

Tämä tutkimus on tapaustutkimus, jossa tutkimuksien tulokset tulkitaan kvantitatiivisella tarkastelulla. Tutkimuksessa selvitetään, miten respiraatiotiheys muuttuu kognitiivisen kuorman kasvaessa. Kvantitatiivisessa tutkimuksessa mitataan eroja havaintoyksiköiden välillä. Koehenkilöt eli hävittäjäohjaajat lentävät hävittäjäsimulaattorissa ilmatankkaustehtävän, joka sisältää kaksi eri vaikeustason suoritusta (jäljempänä ”osio”). Tehtävän osioiden vaikeustasoa manipuloidaan muuttamalla suoritusten aikana vallitsevia sää- ja valaistusolosuhteita. Tehtävän aikana koehenkilöiltä mitataan kognitiivisen kuormituksen taso sykevälivaihtelun ja NASA-TLX:n avulla. Lisäksi koehenkilöiltä mitataan respiraatiotiheys IPBAM-hengitysilmamonitorilla. Sykevälivaihtelun ja NASA-TLX tuloksia verrataan respiraatiitiheyden tuloksiin. Tuloksia analysoidaan tilastollisin menetelmin.

Tilastollisessa analyysissä pyritään testauksen avulla selvittämään hypoteesien paikkansapitävyyttä. Merkitsevyystason avulla arvioidaan tuloksien luotettavuutta eli sitä, kuinka todennäköistä on, että havaittu hypoteesi on todellinen eikä pelkkää satunnaisvaihtelua. Eli ennen kuin otoksesta saatuja tuloksia voi pyrkiä yleistämään, ero tai riippuvuus on osoitettava tilastollisesti merkittäväksi. Nollahypoteesi (H_0) on hypoteesin testauksen lähtökohtana. Nollahypoteesi oletetaan oikeaksi, ellei tutkimuksesta löydy todisteita sitä kumoamaan. Jos otos antaa riittävät todisteet nollahypoteesia vastaan, niin nollahypoteesi hylätään (Taanila 2012, 2.)

Nollahypoteesi on perusolettamus ja se jää voimaan ilman riittäviä todisteita sitä vastaan. Jos testauksen tuloksena nollahypoteesi päätetään hylätä, vaikka se olisi totta, puhutaan hylkäämisvirheestä. (Taanila 2012, 3.) Hylkäämisvirheen todennäköisyydestä, tai tilastollisten testien avulla laskettavasta merkitsevyystasosta käytetään nimitystä p -arvo (Nummenmaa, Holopainen & Pulkkinen 2014, 175). P -arvo on siis todennäköisyyshänke sille sisältääkö tutkimusdata todisteita nollahypoteesin suuntaan vai pystytäänkö vaihtoehtoisen hypoteesin väite todistamaan riittävällä uskottavuudella (Tutkijaportti 2015).

Tavanomaisimmat merkitsevyystasot ovat seuraavat (Mellin 2006, 134):

- tilastollisesti melkein merkitsevä ($p < 0.05$)
- tilastollisesti merkitsevä ($p < 0.01$)
- tilastollisesti erittäin merkitsevä ($p < 0.001$)

Tämän tutkimuksen p -arvot ovat

- $p = 1 \text{ ‰}$: hypoteesi pitää paikkansa 99.9 % todennäköisyydellä
- $p = 1 \text{ ‰}$: hypoteesi pitää paikkansa 99.0 % todennäköisyydellä
- $p = 5 \text{ ‰}$: hypoteesi pitää paikkansa 95.0 % todennäköisyydellä

Tutkimuksessa käytetään p -arvoa 5 %. Tulosten p -arvoista ja hypoteesien todennäköisyyksistä huolimatta yli kriittisen p -arvon jäävä vaihtoehtoinen hypoteesi ei tarkoita, etteikö tämä pitäisi paikkansa. Kriittistä p -arvoa lähestyvä tulos on suuntaa antava tulos. Nummenmaa ym. (2014, 176) mukaan tilastollinen merkitsevyys ei välttämättä tarkoita, etteikö sillä olisi käytännön merkitystä.

2 TOIMINTAKYKY JA KOGNITIIVINEN KUORMITUS

2.1 Toimintakyky

THL:n (2023) mukaan ihmisen toimintakyky tarkoittaa ihmisen fyysisiä, psyykkisiä ja sosiaalisia edellytyksiä selviytyä hänelle itselleen merkityksellisistä ja välttämättömistä jokapäiväisen elämän toiminnoista. THL:n (2023) mukaan toimintakyky jaetaan usein seuraaviin ulottuvuuksiin: Fyysinen, psyykkinen, kognitiivinen ja sosiaalinen toimintakyky. Toimintakyvyn monet ulottuvuudet ovat kytköksissä toisiinsa, ympäristöön ja ihmisen terveydentilaan sekä muihin henkilökohtaisiin ominaisuuksiin. Tässä tutkimuksessa käsitellään pääasiassa ihmisen kognitiivista toimintakykyä. THL:n (2023) mukaan kognitiivinen toimintakyky on tiedonkäsittelyn eri osa-alueiden yhteistoimintaa, joka mahdollistaa ihmisen normaalin suoriutumisen arjessa.

Puolustusvoimien (2024) mukaan sotilaan toimintakyky on osaamisen ohella keskeinen tekijä sotilaalla vaadittujen tehtävien suorittamiseen. Sotilaan tulee olla toimintakykyinen sekä fyysisesti, psyykkisesti, sosiaalisesti että eettisesti. Alavillamon (1997) mukaan nämä sotilaan toimintakyvyn pääosat ovat tasapainoisessa riippuvuussuhteessa toisiinsa nähden. Lisäksi sotilaan toimintakykyyn vaikuttavat ulkoiset muuttujat kuten toimintaympäristö, olosuhteet, tehtävä ja tilanne.

Kognitiivisesti kuormittavan tehtävän suorittaminen kuluttaa ihmisen kognitiivisia resursseja. Tehtävän kognitiivisten vaatimusten kasvaessa ihmisen on suoritustason ylläpitämiseksi allokoitava tehtävään lisää kognitiivisia resursseja (Gaillard & Wientjes 1994). Resurssien allokointi on vapaaehtoista ja edellyttää ponnisteluja. Hävittäjäohjaajan toimintaympäristö on moniulotteinen ja kognitiivisesti sekä fyysisesti vaativa. Lisäksi hävittäjien modernisoitumisen myötä ympäristö, jossa hävittäjäohjaaja toimii, on muuttunut edelleen haastavammaksi kuin ennen. Hävittäjäohjaajan tehtäväkenttä on myös vaihteleva. Hävittäjäohjaajan tehtävä voi olla yksinkertainen suoritus, mikä on suunniteltu etukäteen huolellisesti ja suoritetaan suunnitelman mukaan. Toisaalta tehtävä voi olla monimutkainen, suunnittelematon ja arvaamatonkin. Kaikkia tilanteita, joihin hävittäjäohjaaja voi joutua tehtävänsä aikana, ei voi valmistella etukäteen. Kognitiiviset toiminnot ovat THL:n (2023) mukaan tiedon vastaanottoon, käsittelyyn, säilyttämiseen ja käyttöön liittyviä toimintoja ja niihin voidaan lukea esimerkiksi: muisti, oppiminen, keskittyminen, tarkkaavaisuus, hahmottaminen, orientaatio, tietojen käsittely, ongelmien ratkaisu, toiminnanohjaus ja kielellinen toiminta. Toimintaympäristö, jossa hävittäjäohjaaja toimii, on haasteellinen lähes kaikille edellä mainituille kognitiivisille toiminnoille.

2.2 Kognitiivinen kuormitus

Eggemeierin & Wilsonin (1991) mukaan kognitiivisella kuormituksella viitataan ihmisen tiedonkäsittelykapasiteetin osaan tai resursseihin, joita vaaditaan vastaamaan suoritettavan tehtävän vaatimuksia. Kognitiivinen kuormitus tarkoittaa ihmisen kykyä käsitellä tietoa. Kognitiivisen

kuormituksen määrä riippuu siitä, kuinka paljon ärsykeitä, sääntöjä ja vastauksia on käsiteltävänä. (Gopher & Donchin 1986.) Kognitiivisella kuormituksella tarkoitetaan yleensä ihmisen työmuistin, eli välittömän, lyhytaikaismuistin (Nienstedt 1977, 562), kuormitusta. Suuret kognitiiviset ponnistelut aiheuttavat parasympaattisen hermoston passivoitumista ja sympaattisen hermoston aktivoitumista. Nämä puolestaan aiheuttavat puolestaan perifeerisiä reaktioita sykkeessä, hengitystiheydessä ja verenpaineessa. (Gawron, Schifflett & Miller, 1989; Aasman, Mulder & Mulder 1987.)

Kognitiivisen kuormituksen merkitys hävittäjälentämisessä on oleellinen. Lentäjä saa tehtävän suorittamisen aikana informaatiota toimintaympäristöstä useista eri lähteistä; lentokoneen teknisiltä järjestelmiltä, sensoreilta ja radioliikenteestä sekä visuaalisista havainnoista. Näiden taisteluun kulkuun vaikuttavien informaationsyötteiden lisäksi lentäjän täytyy lentää hävittäjää ja samalla käsitellä mielessään havaintojensa merkitystä. Yksittäisen lentotehtävän aikana lentäjän kognitiivisen kuormituksen määrä vaihtelee suuresti.

Paxion, Galy ja Berhelon (2014, 1344) esittävät Wickensin (1984) määritelmän moniresurssi-teoriasta. Teorian mukaan ihmisillä on rajoitettu joukko resursseja käytettävissä kognitiivisiin prosesseihin. Näitä resursseja voidaan pitää varastona, jota käytetään erilaisiin kognitiivisiin toimintoihin aistitason prosessoinnista aina konkreettiseen toimintaan, kuten vaaditun tehtävän suorittamiseen. Tämä jaettu resurssivarasto on allokoitu eri tehtäviin. Teorian mukaan samaa resurssia käyttävien tehtävien suorittaminen samaan aikaan kuormittaa ihmistä enemmän kuin sellaisten samanaikaisten tehtävien suorittaminen, jotka kuormittavat eri resursseja. Ihminen käyttää tehtävään vaikuttavien ärsykkeiden vastaanottamiseen eri informaatiokanavia. Nämä kanavat jaetaan visuaalisiin- (näkö) ja audio kanaviin (kuulo). Jos tehtävien prosessoimisessa käsitellään samasta informaatiokanavasta tulevia ärsykeitä, kognitiivinen kuormitus kasvaa enemmän kuin jos käsitellään eri informaatiokanavista tulevia ärsykeitä. Kyky suorittaa samanaikaisesti useita tehtävää riippuu myös tehtävien määrästä sekä siitä, miten paljon keskittymistä yksittäiset tehtävät vaativat. Jos yksittäisen tehtävän suorittaminen on automaattista, se vaatii silloin vähän resursseja ja useamman tehtävän samanaikainen suorittaminen on mahdollista. Kun yksittäisen tehtävän suorittaminen vaatii keskittymistä, se vaatii silloin paljon resursseja ja usean tehtävän samanaikainen suorittaminen näissä tilanteissa on haastavaa. Tämä kasvattaa kognitiivista kuormitusta.

Moniresurssiteoria tukee ajatusta, että valmistautumalla tuleviin tehtäviin joko tutustumalla mahdollisiin tuleviin tehtävän osa-alueisiin tai, mikäli mahdollista, harjoittelemalla itse tehtävää etukäteen, voidaan kognitiivisen kuormituksen taso pitää varsinaisen tehtävän suorituksen aikana matalampana kuin ilman valmistautumista. Etukäteen harjoiteltu tai tuttu tehtävän osa-alue voidaan suorittaa mahdollisesti automaattitasolla, joten kapasiteettia muihin osa-alueisiin jää vapaaksi. NASA:n (2023) mukaan kognitiivisella kuormituksella tarkoitetaan käyttäjän koke-

maa henkisen ponnistuksen tasoa, johon vaikuttaa erityisesti tehtävän vaativuus ja tehtäväsuunnittelu. Lentäjät pystyvät vähentämään lentotehtävän aiheuttamaa kognitiivista kuormitusta valmistautumalla sille ennen lentoa. Tehtävän huolellinen suunnittelu on osa tätä valmistautumista. Suunnittelussa käydään läpi mahdollisimman kattavasti lennolla mahdollisesti eteen tulevat tilanteet ja oikeat toimintatavat niissä. Monesti hävittäjäohjaajat kokevat hyvin etukäteen läpikäydyn tehtävän kognitiivisesti vähemmän kuormittavaksi kuin valmistelemattomat tehtävät ja näin pystyvät kohdentamaan kognitiiviset resurssinsa tehtävän suorittamisen aikana muihin tehtävään liittyviin asioihin.

2.3 Ihmisen hermostollinen järjestelmä

Ihmisen hermostollinen järjestelmä ohjaa sydämen toimintaa ja hengitysjärjestelmää monimutkaisten toimintojen kautta. Hermostollisen järjestelmän eri osat vaikuttavat sykevälivaihteluun sekä respiraatiotiheyteen. Ihmisen hermosto koostuu keskushermostosta ja ääreishermostosta. Ääreishermostossa on kaksi pääosaa; tahdonalainen ja autonominen hermosto. Tahdonalainen hermosto keskittyy pääasiassa liikkeisiin ja tuntemuksiin (Myllymäki 2014, 2). Autonominen hermosto toimii itsenäisesti nimensä mukaisesti. Sen toimintaan ei voi vaikuttaa suoraan tahdon avulla (Nienstedt ym. 1977, 538). Autonominen hermoston useat eri tekijät vaikuttavat sydämen sykkeeseen ja sykevälivaihteluun (Schipke, Arnold & Pelzer 1999). Autonominen hermosto jakautuu sympaattiseen ja parasympaattiseen hermostojärjestelmään.

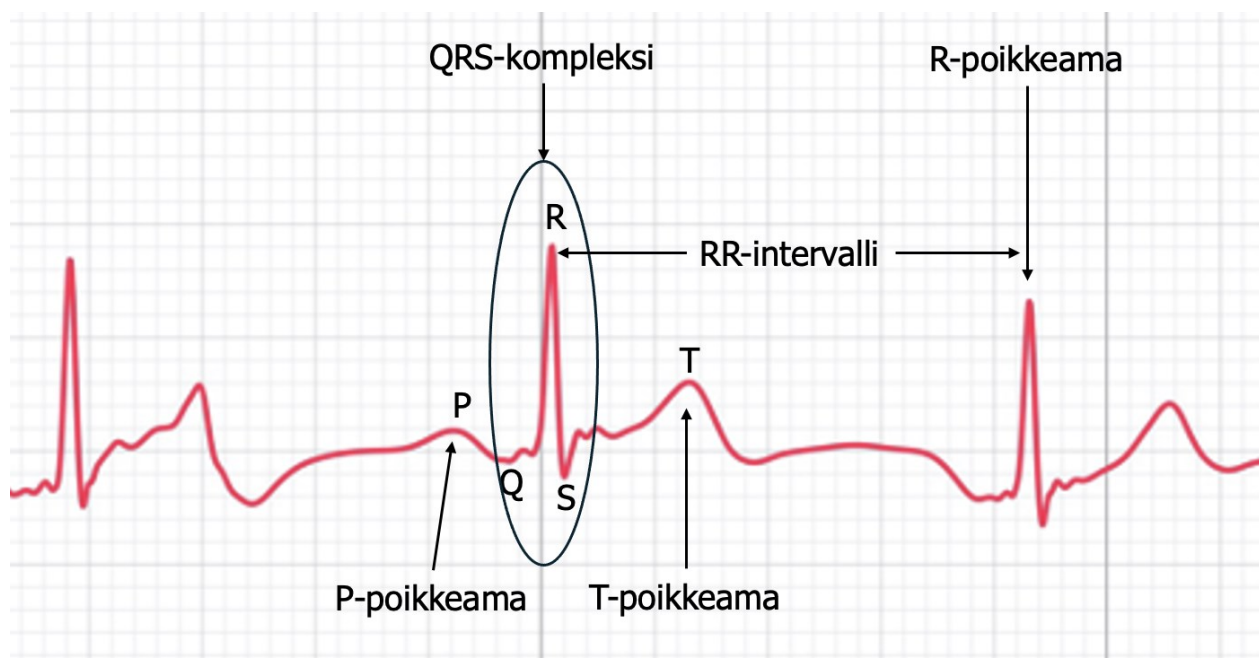
Sympaattisen ja parasympaattisen hermoston ytimet alkavat keskushermostosta ja päätyvät eri elimiin ympäri ihmisen vartaloa. Parasympaattinen osa vastaa pääasiassa ihmisen rentoutumiseen liittyvistä tekijöistä ja sympaattinen hermosto valmistaa elimistön taistelemaan kiihdyttämällä elimistön toimintoja kuormitustilanteissa. Fyysisten ja kognitiivisten kuormitustilanteiden seurauksena parasympaattinen hermosto aktivoituu ja sympaattisen hermoston aktiivisuus vähenee. Tämä aiheuttaa yleensä sydämen peräkkäisten lyöntien välisen ajan vaihtelun pienenemistä eli sykevälivaihtelu pienenee. (Myllymäki 2014, 3)

2.3.1 Sykevälivaihtelu

Sydäntä ohjaavaa autonominen hermoston parasympaattista hermoa kutsutaan vagushermonksi. Autonominen hermosto lähettää viestin vagushermon kautta sydämeen stimuloidakseen sydämen sykkeen vaihtelua normaalialueella. Tämä havaitaan sykevälivaihteluna. (Tiwari, Kumak, Malik, Raj & Kumar 2021.) Sykevälivaihtelulla tarkoitetaan ajallista vaihtelua, joka tapahtuu peräkkäisten sydämenlyöntien välissä. Tätä sydämenlyöntien välistä aikaa mitataan millisekunnissa (ms). Sydämen sähköistä toimintaa kuvastaa elektrokardiografia (EKG) (KUVA 1). EKG:sta käytetään arkikielessä nimitystä sydänfilmi, josta voidaan nimetä ja tunnistaa erilaisia poikkeamia ja poikkeamien ryhmiä, eli komplekseja.

Normaalista EKG:sta on tunnistettavissa P-poikkeama, QRS-kompleksi ja T-poikkeama (KUVA 1). P-poikkeama syntyy depolarisaatiovirrasta, joka edeltää eteisten supistumista. QRS-kompleksin yksi osa on R-poikkeama, joka johtuu sydämkammioiden depolarisaatiosta juuri ennen niiden supistumista. T-poikkeama muodostuu sydämkammioiden lepojännitteen palautumisesta eli repolarisaatiosta.

EKG:sta katsottuna sykevälivaihtelu mitataan helpoiten R-poikkeamien välisenä aikana. R-poikkeamien välisestä ajasta käytetään yleensä nimitystä RR-intervalli (KUVA 1). Jos esimerkiksi kahden R-poikkeaman välinen intervalli on keskimäärin 0.83 sekuntia, vastaa se 72 sydämenlyöntiä minuutissa (Guyton & Hall 1996, 131). Terveellä ihmisellä sydämenlyöntien välinen aika vaihtelee. Sykevälivaihtelulla tarkoitetaan siis tarkemmin määriteltynä RR-intervallien ajallista vaihtelua (Pumprla, Howorka, Groves, Chester, & Nolan 2002)



KUVA 1. EKG, josta eroteltuna P-, T- ja R-poikkeamat sekä RR-intervalli ja QRS-kompleksi (Fingerroos 2024, CC-BY)

Sykevälivaihtelusta voidaan analysoida ihmisen kognitiivisen kuormituksen tasoa, stressitasoa ja palautumisen tilaa ja se voi kertoa myös ihmisen hyvinvoinnista. Vähäinen sykevälivaihtelun määrä voi viestiä mahdollisesta stressistä ja ennakoida eri sairauksia, kun taas korkeampi sykevälivaihtelu kertoo ihmisen autonomisen hermoston olevan tasapainossa. (Jaakkola 2018, 47.)

2.4 Ihmisen hengityksen fysiologia

Tissarin (2019, 11) mukaan hengitys, eli respiraatio jaetaan usein ulkoiseen ja sisäiseen hengitykseen. Ulkoinen hengitys tarkoittaa kehon hapensaannin ja hiilidioksidin poiston välistä syk-

listä vaihtelua kokonaisuutena, ja sisäinen hengitys tarkoittaa kehomme solujen kykyä hyödyntää hengityksen mukana vereen sitoutunutta happea ja poistaa soluissa syntyvää hiilidioksidia. Nienstedt ym. (1977, 259) taas määrittelee, että respiraatiolla tarkoitetaan kaasujen vaihtumista: hapen siirtymistä ilmasta soluihin ja hiilidioksidin siirtymistä soluista ilmaan.

Hengitys toteuttaa keuhkotuuletusta. Keuhkotuuleuksessa sisäänhengityksellä saadaan keuhkoihin happirikasta ulkoilmaa ja uloshengityksellä poistetaan hiilidioksidia. Ihmisen ravinto muutetaan kehon tarvitsemaksi energiaksi solujen välityksellä. Tämän sivutuotteena soluissa syntyy hiilidioksidia. Soluhengitys (Nienstedt ym. 1977, 259) tai solujen kaasujen vaihto tarkoittaa hapen ja hiilidioksidin vaihtoa solujen ja veren välillä (Tissari 2019, 12).

Nienstedt ym. (1977, 259) mukaan hengityselimistöön kuuluvat hengitystiet sekä keuhkot. Hengitystiet jaetaan Leppäluodon ym. (2013, 164) mukaan ylempiin ja alempiin hengitysteihin, joiden rajana pidetään kurkunpäättä. Ylemmät hengitystiet muodostuvat nenäontelosta, nenänielusta ja nielusta. Henkitorvi, henkitorvesta jakautuvat keuhkoputket ja alveolit eli keuhkorakkulat kuuluvat alempiin hengitysteihin (Nienstedt 1977, 259–274).

Hengitykseen liittyy monimutkainen vuorovaikutus keskushermoston, hengitykseen liittyvien motoristen neuronien ja hengityslihasten välillä (Sowho, Amatoury, Kirkness, & Patil 2014). Hengityselinten tehokkuus riippuu myös verenkiertoelimistöstä eli sydäimestä ja verisuonista (Elstad, O’Callaghan, Smith, Ben-Tal, & Ramchandra 2018). Hengitykseen liittyvät motoriset neuronit hermottavat hengityspumppulihaksia hallitakseen keskushermoston syötteen perusteella hengitysnopeutta ja hengityksen tilavuuden tuotantoa, eli ventilaatiota (Liu, Allen, Zheng, & Chen 2019).

Hengitystä säätelee keskushermostossa ydinjatkeessa oleva hengityskeskus (Nienstedt ym. 1977, 286). Hengityskeskuksen toiminta säätelee riittävän ventilaation mahdollistavaa kerta-hengitystilavuutta ja hengitystaajuutta (Tissari 2019, 15).

Hengityskeskus (engl. respiration center) koostuu useista hermosoluryhmistä, jotka sijaitsevat molemmin puolin ydinjatketta. Alueet jaetaan niiden sisältämien hermosolujen perusteella kolmeen pääryhmään, jotka ovat:

1. Selänpuolinen hengitysryhmä (engl. Dorsal respiratory group), joka sijaitsee selkäytimen selkäpuolisessa osassa ja vastaa pääasiassa sisäänhengityksestä
2. Vatsanpuolinen hengitysryhmä (engl. Ventral Respiratory Group), joka sijaitsee selkäytimen vatsanpuolisessa osassa ja vastaa sisään- ja uloshengityksen mukaan minkä ryhmän hermosolut ovat stimuloituina
3. Pneumotaksinen keskus (engl. Pneumotaxic center), joka sijaitsee selkäytimen selkäpuolisen osan yläosassa ja vastaa hengityksen nopeudesta ja tiheydestä. Pneumotaksisen keskuksen pääasiallinen tehtävä on rajoittaa sisäänhengitystä. Tällä on toissijainen vaikutus

kiihdyttää hengitystiheyttä, koska sisäänhengityksen lyhentäminen lyhentää myös uloshengitystä ja näin koko hengityssykliä. (Guyton & Hall 2000, 474–476.)

2.5 Respiraation ja sydämen sykkeen välinen toiminta

Sydämen sykkeen säätöjärjestelmä on monimutkainen mekanismi, johon vaikuttaa useat eri toimijat. Autonomisen hallintajärjestelmän dynaamisuus vaikuttaa epälineaarisesti sydämen toiminnan rytmisyyteen. Šipinková, ym. (1997) tutkimuksessa todettiin eri stressihormonien (adrenaliini, glukagoni ja kortisolin) lisäämisen aiheuttavan dynaamisia muutoksia koehenkilöiden respiraatiotiheydessä johtuen todennäköisesti pääasiassa adrenaliinin lisääntymisestä kehossa. Tyypillinen ihmisen reaktio kognitiivisesti stressaavaan tilanteeseen on nopea respiraatiotiheyden nousu, joka voi johtua mm. kylmästä, valppauden lisääntymisestä tai kivusta.

Myös fysiologiset tekijät, kuten kehon asento ja hengitystapa, voivat aiheuttaa autonomisia muutoksia sydämeen. Esimerkiksi hengitystiheyden muutokset vaikuttavat vegaalisen hermoston viestintään sydämeen ja verenpaineeseen. Lisäksi nämä muutokset voivat lisätä sympaattisen hermoston vaikutusta sydämeen. (Šipinková ym. 1997.)

Guyton & Hall (2000, 134) mukaan rauhallisen respiraation aikana ihmisen sydämen syke vaihtelee maksimissaan 5 %, mutta raskaan respiraation seurauksena syke voi nousta ja laskea jopa 30 % jokaisen respiraationsyklin aikana. Tätä kutsutaan respiratoriseksi sinus arrhythmiksi. (Guyton & Hall, 2000, 134). Rogers, B., Schaffarczyk & Gronwald (2022, 2) mukaan sinus arrhythmiaa rintaontelon laajeneminen sisäänhengityksen aikana aiheuttaa rintakehän sisäisen paineen laskun ja sekundaarisen verenpaineen laskun. Tämä johtaa sydämen parasympaattisen voiman vähenemiseen, mikä saa sykkeen nousemaan. Toisaalta rintaontelon tilavuuden supistuminen uloshengityksen aikana johtaa parasympaattisen voiman palautumiseen ja sykkeen hidastumiseen (Grossman, Karemaker & Wieling 1991). Hengityksen vaikutus sydämen sykkeeseen välittyy vagushermon kautta, jonka toimintaa hengityksen rytmissä tapahtuva sykevälivaihtelu kuvaa. Mitä suurempi hengityksen rytmissä tapahtuva sykevälivaihtelu havaitaan, sitä voimakkaampi vagusstimulaatio sydämeen kohdistuu. (Duodecim 2023.)

Hengityksellä pystytään vaikuttamaan sykevälivaihteluun, sillä sisäänhengityksen aikana syke kasvaa ja uloshengityksen aikana laskee. Keuhkoissa sijaitsevien venytysreseptoreiden ja sydämen autonomisten hermojen vuorovaikutus aiheuttaa sykkeen vaihtelun. Rauhallinen hengitys vähentää todistetusti sympaattisen hermoston toimintaa ja aktivoi parasympaattista hermostoa. Rauhallisella hengitystaajuudella sekä syvällä hengityksellä voidaan vaikuttaa sykevälivaihteluun sydämen autonomiseen säätelytoiminnan välityksellä. (Chinagudi ym 2014.)

Respiraatiotiheyden vaikutus sykevälivaihteluun on yleisesti hyväksytty ilmiö (Schipke ym. 1999). Etenkin nuorten ihmisten sydämen sykkeen muutokset ovat suurempia sisäänhengityksen kuin uloshengityksen aikana (sinus arrhythmia) (Nienstedt ym. 1977, 193). Hengittäminen vaikuttaa siis sykkeeseen seuraavasti: Sisäänhengityksen aikana sydämen syke nousee, kun

taas syke laskee uloshengityksen aikana. Sykkeen nouseminen aiheuttaa sykevälivaihtelun laskemista ja sykkeen laskeminen aiheuttaa sykevälivaihtelun kasvua. Tämän vuoksi voidaan todeta, että uloshengityksen aikana sykevälivaihtelu kasvaa ja sisäänhengityksen aikana pienee.

2.6 Kognitiivisen kuormituksen mittaaminen

Vaikka kognitiivista kuormitusta ei pystytä mittaamaan suoraan, on olemassa useita eri menetelmiä, joita voidaan käyttää kognitiivisen kuormituksen epäsuoraan arvioimiseen. Wierwille ja Eggemeier (1993) mukaan kognitiivisen kuormituksen mittaamisen menetelmät voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan:

1. Subjektiiiset mittaustekniikat, jotka perustuvat operaattorin arvioihin tehtävän tai toiminnon suorittamiseen liittyvästä kognitiivisesta kuormituksesta
2. Suorituskykyyn perustuvat arvioinnit, jotka arvioivat kognitiivista kuormitusta käyttäjän kyvyn perusteella suorittaa tehtäviä tai toimintoja
3. Fysiologisiin mittauksiin perustuvat tekniikat, jotka arvioivat käyttäjän fysiologista vastetta tehtävän vaatimuksiin.

Tässä tutkimuksessa käytetään kahden eri kategorian tekniikoita referenssinä respiraation mittaustuloksiin: NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration Task Load Index) (subjektiiivinen mittaustekniikka) ja sykevälivaihtelun mittaamista (fysiologisiin mittauksiin perustuva tekniikka). Sykevälivaihtelun mittaamiseen käytetään FirstBeat Bodyguard 2 -sykeanturia. Sykevälivaihtelusta tarkastellaan erityisesti HF (High Frequency) -alueen tietoja suhteessa kognitiiviseen kuormitukseen ja respiraatiotiheyteen, koska sen on todettu korreloivan hyvin niiden välisiä muutoksia (Task Force 1996).

Fysiologisista menetelmistä sykevälivaihtelun (engl. Heart Rate Variation, HRV) mittaaminen on yleinen menetelmä kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen. Hermoston aktivoituminen lähettää elektronisia impulsseja sydämeen ja näitä voidaan tallentaa ja analysoida EKG:sta. Sydämen sykettä (engl. Heart Rate, HR) ja sykevälivaihtelua on käytetty menestyksekkäästi hävittäjäohjaajien kognitiivisen kuormituksen mittaamisessa simulaattorilentojen yhteyksissä (Mansikka ym. 2016).

Sykevälivaihtelun analysoinnissa EKG:sta tunnistetaan sydämen lihassolujen eroavat depolarisaatio- ja repolarisaatiovaiheet tai poikkeamat. R-poikkeama on yleensä voimakkain, ja kun R-poikkeama tunnistetaan QRS-kompleksista (KUVA 1), erot peräkkäisten R-poikkeamien esiintymisaikojen eli sykevälivaihtelun välillä voidaan tunnistaa ja analysoida käyttämällä aika-alue-, taajuusalue- tai geometrisia menetelmiä. Näistä menetelmistä kerrotaan tarkemmin tämän tutkimuksen alaluvussa 2.6.2. *Fysiologiset menetelmät kognitiivisen kuormituksen mittaamiseksi*. Vaikka nämä eri mittaustavat tuottavat kovinkin erilaisia tuloksia, ne kaikki osoittavat sydänlihaksen polarisaatiovaiheiden vaihtelua, joissa matalampi sykevälivaihtelu indikoi korkeampaa

kognitiivisen kuormituksen tasoa. Nykyiset syke- ja sykevälivaihtelumittauksiin käytettävät menetelmät vaativat laitteistoa, joiden käyttö oikeissa hävittäjälentokoneissa lentojen aikana on rajattua tai lähes mahdotonta.

Subjektiiivisissa kognitiivisen kuormituksen menetelmissä, kuten NASA-TLX:ssa ei ole edellä mainittua rajoitusta. NASA-TLX on moniulotteinen subjektiivinen mittaustapa, jossa kognitiivista kuormitusta arvioidaan kuuden eri ulottuvuuden kautta. NASA-TLX:sta kerrotaan tarkemmin tämän tutkimuksen alaluvussa 2.6.1 *Subjektiiiviset menetelmät kognitiivisen kuormituksen mittaamiseksi*. Vaikka Mansikka ym. (2016) on osoittanut NASA-TLX:n ja sykevälivaihtelun yhteyden, subjektiivisissa mittaustavoissakin on rajoituksensa. Esimerkiksi, vaikka NASA-TLX:ää voidaan käyttää lennon aikana tehokkaasti ja turvallisesti (Mansikka ym. 2016), se on altis ohjaajien ennako-odotuksille ja voi antaa vain keskimääräisen arvion ohjaajan kognitiivista kuormitustasosta lentotehtävän aikana. Lisäksi ohjaajat raportoivat herkästi kognitiivisen kuormitustasonsa pelkästään tehtävän kuormittavimmista osuuksista sekä tehtävän loppuosasta.

Veltmanin & Gaillardin (1996) mukaan kognitiivinen kuormitus on korkea, kun tehtävän vaatimusten ja operaattorin kognitiivisen kapasiteetin erotus on pieni. Ihmisellä on näissä tapauksissa vähintäänkin pieni epävarmuus, pystyykö suorittamaan vaaditun tehtävän onnistuneesti. Analysoitaessa tehtävän vaatimuksia suhteessa ihmisen edellytyksiin suoriutua tehtävästä, kannattaa kognitiivisen kuormituksen arvioimisen lisäksi tehdä tehtäväänalyysi eli analysoida tehtävän vaatimuksia. Tehtävän vaatimusten analysointi mahdollistaa näkemyksen, mitkä ovat korkean kognitiivisen kuormituksen syyt ja kapasiteetin mittaaminen mahdollistaa tiedon tehtävään käytetyn kognitiivisen kuorman määrästä.

2.6.1 Subjektiiiviset menetelmät kognitiivisen kuormituksen mittaamiseksi

Subjektiiiviset menetelmät kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen jaetaan yksiulotteisiin (engl. unidimensional) ja moniulotteisiin (engl. multidimensional). Yksiulotteiset menetelmät ovat yksikertaisempia ja käyttävät nimensä mukaan yhtä ulottuvuutta arvioinnin luomiseksi. Moniulotteiset menetelmät käyttävät yleisesti kolmesta kuuteen eri ulottuvuutta kognitiivisen kuormituksen arvioimiseen ja ovat näin monimutkaisempia käyttää, mutta diagnostisempia. (Miller 2001.)

Esimerkkinä yksiulotteisista menetelmistä on Modified Cooper-Harder Scale (MCH). MCH-asteikko on yksiulotteinen subjektiivinen kognitiivisen kuormituksen mittari. Sitä käytetään arvioimaan yleensä lentäjän kokemaa kuormitusta. Se perustuu lentäjän omiin havaintoihin ja tunteisiin lennon aikana. Lentäjä arvioi erilaisia tekijöitä, kuten kuormituksen fyysisiä ja psyykkisiä vaikutuksia, ja antaa niille numeerisen arvon asteikolla 1–10. MCH-asteikossa 1 tarkoittaa erittäin matalaa kognitiivista kuormitustasoa ja 10 niin korkeaa, että tehtävän suorittaminen on

mahdotonta. Arviot voivat vaihdella lennon eri vaiheissa ja tilanteissa. Tämä mittari auttaa lentäjiä tunnistamaan ja arvioimaan omaa kuormitustaan lennon aikana. (Casali & Wierwille 1983.)

Esimerkkejä moniulotteisesta menetelmästä ovat SWAT (engl. Subjective Workload Assessment Technique) ja NASA-TLX. SWAT-menetelmässä käytetään kolmea ulottuvuutta: ajallinen kuormitus (engl. time load), henkinen kuormitus (engl. mental effort load) ja fysiologinen stressi (engl. physiological stress). SWAT-menetelmässä kuormitus arvioidaan erikseen kunkin kolmen ulottuvuuden suhteen. Arviot annetaan asteikolla 1–3, jossa 1 tarkoittaa matalaa, 2 keskikorkeaa ja 3 korkeaa kognitiivista kuormitusta. Näitä pisteitä voidaan sitten yhdistää kokonaisarvioon yksilön työkuormituksesta. Tämä menetelmä auttaa ymmärtämään, miten eri tekijät vaikuttavat yksilön kokemaan kuormitukseen ja auttaa tunnistamaan mahdollisia kuormitusta aiheuttavia tekijöitä työympäristössä. (Hill ym. 1992.)

Tässä tutkimuksessa käytetään subjektiivisena menetelmänä NASA-TLX:ää. NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration Task Load Index) on kognitiivisen kuormituksen menetelmä, jonka avulla tutkijat voivat suorittaa subjektiivisia arviointeja erilaisten ihmisen ja koneen rajapintajärjestelmien kanssa työskenteleville käyttäjille. NASA Ames Research Centerin (ARC) Sandra Hartin 1980-luvulla kehittämä NASA-TLX:n kynällä täytettävästä versiosta on tullut standardi menetelmä subjektiivisen työmäärän mittaamiseen (Hart 2020). NASA-TLX on laajasti käytetty kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen ja tutkimukseen käytetty mittaustapa (Wei, Bolton, & Humphrey 2020; Bogg ym. 2021; Murali & Lakhal 2021; Mansikka, Virtanen, & Harris 2019; Schreiter, Müller, Luckner, & Manzey 2019).

NASA-TLX jaetaan kuuteen eri ulottuvuuteen. Ulottuvuuksien selitteet on avattu Taulukossa 1:

- Henkinen vaativuus (engl. Mental Demand)
- Fyysinen vaativuus (engl. Physical Demand)
- Ajallinen vaativuus (engl. Temporal Demand)
- Suoritus (engl. Performance)
- Vaivannäkö/ponnistelu (engl. Effort)
- Turhautuminen (engl. Frustration)

TAULUKKO 1. NASA-TLX-ulottuvuuksien määritelmät.

ULOTTUVUUS (DIMENSION)	ARVIONTI	MÄÄRITELMÄ
Henkinen vaativuus (Mental Demand)	vähän/paljon	Kuinka paljon tehtävä vaati havainnointia, päätöksentekoa, ajattelua, etsimistä, muistamista, laskemista jne? Oliko tehtävä helppo ja yksinkertainen vai vaativa ja monimutkainen?
Fyysinen vaativuus (Physical Demand)	vähän/paljon	Kuinka paljon tehtävä vaati fyysistä toimintaa, esim. kantamista, nappien painamista, vetämistä, työntämistä jne? Oliko tehtävä helppo vai vaativa, hidas tai rivakka, löysä tai rasittava, levollinen vai työläs?
Ajallinen vaatimus (Temporal Demand)	vähän/paljon	Kuinka paljon aikapainetta tunsit tehtävän aikana? Oliko tehtävä hidas-, sopiva- vai nopearytmisen?
Suoritus (Performance)	hyvä/huono	Kuinka tyytyväinen olet toimintaasi tavoitteiden saavuttamisessa? Kuinka hyvin mielestäsi saavutit tehtävän tavoitteet?
Vaivannäkö/Ponnistelu (Effort)	vähän/paljon	Kuinka paljon sinun täytyi ponnistella henkisesti ja fyysisesti tehtävän aikana?
Turhautuminen (Frustration)	vähän/paljon	Kuinka rasittunut, ärsyyntynyt tai turhautunut olit tehtävän suorituksen aikana?

Alkuperäisessä NASA-TLX-menetelmässä henkilö antaa jokaisesta ulottuvuudesta kahdenlaista tietoa; painon ja pisteet. Paino edustaa jokaisen ulottuvuuden subjektiivista merkitystä kognitiivisen kuormituksen lähteenä suoritettavassa tehtävässä. Pisteet ilmaisevat itsearviota kognitiivisen kuormituksen kunkin ulottuvuuden suhteen. Kukin ulottuvuus arvioidaan asteikolla 0–100, jossa 0 edustaa alinta mahdollista kuormitusta ja 100 korkeinta mahdollista kuormitusta. Kun kaikki kuuden ulottuvuuden arviot on saatu, voidaan laskea niiden keskiarvo, jotta saadaan kokonaisarvio kognitiivisesta kuormituksesta. Painotusta voidaan käyttää, jos jokin ulottuvuus katsotaan tärkeämmäksi kuin toiset. Esimerkiksi jos ajallinen vaatimus ja fyysinen vaatimus ovat erityisen tärkeitä, niille voidaan antaa suurempi painoarvo kokonaisarviota laskettaessa. Tämä voi auttaa keskittymään niihin näkökohtiin, jotka vaikuttavat eniten tehtävän kuormitukseen tietyssä tilanteessa.

NASA-TLX:n parivertailu on menetelmä, jota käytetään arvioimaan kuormituksen eri ulottuvuuksia suhteessa toisiinsa. Se auttaa arvioijaa vertaamaan, kuinka paljon yksi ulottuvuus kuormittaa verrattuna toiseen ulottuvuuteen. Parivertailussa henkilöä pyydetään vertaamaan kahta eri ulottuvuutta ja päättämään, kumpi niistä on kuormittavampi tai vaativampi antamalla

niille numeeriset arvot. Parivertailun avulla voidaan selvittää, mitkä ulottuvuudet vaikuttavat eniten kuormitukseen tietyssä tilanteessa. Esimerkiksi, jos arvioija katsoo, että mentaalinen vaatimus on suurempi kuin fyysinen vaatimus tietyssä tehtävässä, hän voi antaa suuremman arvon tai pituuden mentaaliselle vaatimukselle parivertailussa. Parivertailua käytetään apuna NASA-TLX menetelmän ulottuvuuksien arvioinnissa, ja se auttaa tarkentamaan kuormituksen kokonaisarviota paremmin heijastamaan todellista tilannetta.

Painoarvoja käytetään tilanteissa, missä ulottuvuuksien ei oleteta olevan tarkalleen yhtä tärkeitä. Vaikka NASA TLX ja sen painotusmenetelmä on hyvin tunnettu ja laajalti käytetty, alkuperäisessä painotusmenetelmässä on haasteensa. Kuten Virtanen ym. (2022) toteavat, alkuperäinen NASA-TLX-painotus ei mahdollista kahden tai useamman ulottuvuuden ilmaisemista yhtä tärkeinä. Lisäksi, jos parivertailut suoritetaan johdonmukaisesti, ulottuvuuksille on olemassa vain yksi mahdollinen tärkeysjärjestys. Johdonmukaisesti suoritettussa parivertailussa tärkeimmälle ulottuvuudelle annetaan lopuksi keinotekoisesti painoarvo 0,33. Tästä syystä tämän tutkimuksen kenttäkokeessa osallistujat antavat NASA-TLX ulottuvuuksien painoarvot käyttämällä swing -painotusmenetelmää. Swing on helppo ja yksinkertainen käyttää, ja se voi tarjota korkealaatuista tietoa päätöksentekijän mieltymyksistä (Bottomley & Doyle 2001). Swing-menetelmässä arvotetaan päätöksentekokriteerit vähiten tärkeästä tärkeimpään ja painoarvot annetaan niiden mukaan johdonmukaisesti. Päätöksentekokriteereinä ovat NASA-TLX:n ulottuvuudet. Tärkeimmälle ulottuvuudelle annetaan 100 pistettä ja vähemmän tärkeille ulottuvuuksille 99–0 pistettä. Yhtä tärkeille ulottuvuuksille annetaan yhtä paljon pistettä. Tämän seurauksena Swing-pisteet voidaan nähdä prosentteina. Tässä tutkimuksessa käytetään Virtanen ym. (2022) suosituksen mukaisesti NASA-TLX Swing -painotusmenetelmää ja koehenkilöt täyttävät painoarvot ennakkotietolomakkeeseen (LIITE 2).

2.6.2 Fysiologiset menetelmät kognitiivisen kuormituksen mittaamiseksi

Sykevälivaihtelun mittaaminen

On olemassa useita menetelmiä mitata sykevälivaihtelua. Tässä alaluvussa kerrotaan yleisimmistä sykevälivaihtelun mittaamiseen käytettävistä menetelmistä. Niitä ovat aikakenttämenetelmä (engl. time domain) eli sykevälivaihtelun muutosten tarkastelu ajan funktiona ja taajuuskenttämenetelmä (engl. frequency domain) eli sydämen taajuuspiiriin sidottu menetelmä.

Aikakenttämenetelmässä analysoidaan sydämen EKG:sta tunnistettujen parametrien avulla mitausjakson RR-intervallien vaihteluita. Yleisimpiä aikakenttämenetelmän muuttujia ovat sykevälien keskijakauma SDNN (Standard Deviation of NN intervals), peräkkäisten RR-intervallien erojen neliöiden keskiarvon neliöjuuri RMSSD (Root Mean Square of the Successive Differences) ja pNN50, joka kertoo yli 50 ms eroavien RR-intervallien osuuden mitausjakson kaikista RR-intervalleista (TAULUKKO 2). Nämä menetelmien tulokset korreloivat vahvasti toistensa kanssa (Miettinen 2020, 8. Aikakenttämenetelmänalyysissä. R-poikkeamaa pidetään normaalina

(engl. normal). Tästä syystä RR-intervallista käytetään myös nimitystä NN-intervalli ja R-poikkeamasta nimitystä N-poikkeama. Tripathin (2004) mukaan aikakenttämenetelmässä sykeväli-vaihtelu voidaan johtaa suorista RR-välien mittauksista tai RR-välien eroavaisuuksista.

Kognitiivisen kuormituksen mittaamisessa keskeiset aikakenttäanalyysin muuttujat ovat NN-intervallien keskiarvo, keskihajonta ja keskineliövirheen neliöjuuri (TAULUKKO 2). Kognitiivisen kuormituksen kasvaessa näiden muuttujien arvot laskevat (Rautanen 2015).

TAULUKKO 2. HRV aikakenttämuuttujat (Shaffer & Ginsberg 2017, 258)

MUUTTUJA YKSIKKÖ		KUVAUS	MUUTOS KOGNITIIVISEN KUORMAN KASVAESSA
SDNN	ms	NN intervallien keskihajonta	Laskee
SDANN	ms	NN intervallien keskiarvon keskihajonta jokaisesta 5 min aikaikkunasta 24h HRV tallennuksen ajalta	Laskee
RMSDD	ms	RR intervallien erojen keskineliövirheen neliöjuuri	Laskee
pNN50	%	Osuus yli 50ms eroavien peräkkäisten RR intervallien määrästä	Laskee

Taajuuskenttämenetelmässä sykevälivaihtelusta kerätty data muunnetaan algoritmien avulla neljälle eri taajuusalueelle (Tripathi 2004). Nämä taajuusalueet ovat: korkeataajuuksiseen (engl. High Frequency, HF) 0.15- 0.4 Hz, matalataajuuksiseen (engl. Low Frequency, LF) 0.04- 0.15 Hz, erittäin matalataajuuksiseen (engl. Very Low Frequency, VLF) <0.04Hz ja ultra-matalataajuuksiseen (engl. Ultra-Low Frequency, ULF) <0.003 Hz (Task Force 1996).

ULF-kaista indeksoi IBI:n (Inter beat interval) vaihtelut ajanjaksolla 5 minuutista 24 tuntiin ja sitä mitataan 24 tunnin tallennuksilla (Kleiker 2005). VLF-kaista koostuu 25 ja 300 sekunnin sykerytmeistä, eli sydämen lyöntien välisistä aikaväleistä. LF-kaista koostuu 7 ja 25 sekunnin sykerytmeistä. Viiden minuutin näytteessä on 12–45 täydellistä RR-intervallia (Kuusela 2013). LF/HF-suhteella voidaan arvioida sympaattisen ja parasympaattisen hermoston aktiivisuuden välistä suhdetta kontrolloiduissa olosuhteissa. (Shaffer, McCraty, & Zerr 2014).

TAULUKKO 3. HRV taajuuskenttä muuttujia (Shaffer & Giensberg 2017)

MUUTTUJA	YKSIKKÖ	KUVAUS	MUUTOS KOGNITIIVISEN KUORMAN KASVAESSA
LF	ms2	Matalataajuuksinen spektritiheys	Nousee
HF	ms2	Korkeataajuuksinen spektritiheys	Laskee
LF/HF		LF / HF suhde	Nousee

Sykevälivaihtelua on käytetty useissa tutkimuksissa mittaamaan hävittäjälentäjien kognitiivista kuormitusta. Useiden tutkimusten (Mansikka ym. 2016; Rautanen 2015; Kim ym. 2018) mukaan sykevälivaihtelu pienenee kognitiivista kuormitusta kasvatettaessa. Sykevälivaihtelu soveltuu kuormituksen mittaamiseen myös lentosimulaattorissa. Mansikka ym. (2016) tutkimuksessa sykevälivaihtelun aikakenttämenetelmällä havaittiin tilastollisesti erittäin merkittäviä tuloksia koehenkilöiden kognitiivisen kuormituksen muutoksissa (Mansikka ym. 2016). Sykettä ja sykevälivaihtelua on tutkittu runsaasti sotilas- ja ilmailuympäristössä osana sotilaan ja lentäjän suorituskykyä 1970-luvulta lähtien (Roscoe 1992; Jorna 1993).

Tässä tutkimuksessa näistä taajuusalueista keskitytään LF (Low Frequency), HF (High Frequency) ja LF/HF (Ratio of LF-to-HF Power) -muuttujiin (TAULUKKO 3), jotka ovat yleisempiä taajuuskenttämenetelmän parametrejä. Nämä kolme muuttujaa saadaan Tripathin (2004) mukaan lyhytaikaisista tallennuksista saatujen RR-intervallien spektrianalyysistä. Korkean taajuuden vaihtelua säätelee vahvasti hengitysrytmi ja HF arvon on todettu laskevan respiraatiotiheyden lisääntyessä (Task Force 1996).

Respiraatiotiheys ja sen mittaaminen

Tässä tutkimuksessa tutkitaan hengitys- eli respiraatiotiheyttä kognitiivisen kuormituksen mitta-
rina ja respiraatiotiheyden mittaamiseen käytetään IPBAM-hengitysilmaamonitoria. Respiraatiotiheydestä voidaan joskus käyttää termiä hengitystaajuus (engl. Respiration Frequency, RF). Respiraatiotiheydestä puhuttaessa käytetään yksikköä BPM (engl. Breaths per Minute) tai RR (engl. Respiration Rate) ja hengitystaajuudesta puhuessa yksikkönä käytetään hertsejä (Hz) (Tissari 2019, 16). Tämän tutkimuksen tuloksissa puhuttaessa respiraatiotiheydestä käytetään myös termiä hengitystaajuus, RF.

Nienstedt ym. (1977, 276) mukaan respiraatiotiheys kuvaa tarkastelujakson aikana toteutuneiden tai toteutuvien sisään- ja uloshengityskertojen (hengityssykliä) lukumäärää, eli sitä kuinka monta kertaa ihminen hengittää tarkastelujakson aikana. Yleisesti tarkastelujaksona käytetään

ytä minuuttia. Levossa ihminen hengittää noin 12–14 krt/min. Kliinisesti RR määritellään yleensä minuutin aikana havaituiksi hengityskerroiksi (hengityksiä minuutissa tai BPM).

Chu ym. (2019) luettelee eri tapoja respiraation lääketieteellisen mittaamiseen. Yleisimmät metodit ovat erilaiset keuhkojen toimintakokeet. Esimerkkinä yksinkertainen spirometrikoe, jolla arvioidaan koehenkilön kaasujen vaihtuvuutta keuhkoista. Monimutkaisempaa mittaustapaa edustaa pletnismografia (Criée ym. 2011), joka on keuhkoissa olevan veren määrän muutoksesta aiheutuvien tilavuuden muutoksien mittausta, jolla arvioidaan keuhkojen tilavuutta. Muita menetelmiä ovat valtimoverinäytteenotto ja diffuusiokapasiteetti (Ruppel 2012). Chu ym. (2019) mukaan nämä eri mittaustavat ovat tehokkaita arvioitaessa henkilöiden hengitystiheyttä laboratorio-olosuhteissa, mutta eivät sovellu luotettaviin mittauksiin laboratorion ulkopuolisissa olosuhteissa.

Massaroni ym. (2019) mukaan respiraatiitiheyden mittaamiseen käytetyt laitteet voidaan luokitella kontaktipohjaisiin ja kontaktoimattomiin laitteisiin. Kontaktipohjaiset laitteet ovat nimensä mukaisesti kontaktissa koehenkilön vartaloon. Kontaktipohjaiset teknologiat käyttävät yleensä seuraavia tekniikoita: Hengityksen virtaus, hengitysäänet, ilman lämpötila, ilman kosteus, ilman komponentit, rintarangan liikkeet ja sydämen toiminnan modulaatio. (Massaroni ym. 2019.)

Tässä tutkimuksessa hengitystiheyden mittaamiseen käytetään IPBAM-hengitysilmaamonitoria. IPBAM-hengitysilmaamonitorista kerrotaan tarkemmin tämän tutkimuksen alakappaleessa 3.3. *Koelaitteisto*. IPBAM-hengitysilmaamonitori on kontaktoimaton laite, joka käyttää hengityksen virtausta mittaamaan hengitystiheyttä. Koehenkilö ei ole kontaktissa varsinaiseen IPBAM-hengitysilmaamonitoriin, vaan pelkästään lentovarusteisiin kuuluvaan hengitysmaskiin. Hengitysvirtauksen mittaaminen tapahtuu IPBAM-laitteen sisällä olevan vastuksen avulla. Virtausmittari sisältää paine-eroanturin (Massaroni ym. 2019).

Respiraatiitiheys kognitiivisen kuormituksen mittarina

Respiraation on todettu olevan herkkä mittari kognitiivisen kuorman muutoksille (Backs & Seljos 1994). Vaikka ajatus respiraatiitiheyden käyttämisestä kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen ei ole uusi (Roscoe 1992), sillä on kuitenkin omat rajoituksensa. Respiraatiitiheyteen voi vaikuttaa monet muutkin tekijät, kuten esimerkiksi puhe (Brookings ym. 1996; Roscoe 1992) ja fyysinen aktiivisuus (Jorna 1993). Roscoen (1992) mukaan fyysinen aktiivisuus kohottaa hengitystiheyttä ja syvyyttä. Toisaalta ihmismielen muutokset tunnepuolella, kuten kohonnut mielentila, kasvattavat normaalisti respiraatiitiheyttä, mutta laskevat hengityssyvyyttä. Respiraation ja sen tiheyden mittaamiseen on kehitetty Roscoen (1992) teoksen ilmestymisen jälkeen useita eri laitteistoja, mutta käytännössä ne eivät sovellut lentokonekäyttöön ilman kaltaisia modifiointeja.

Hengitys vaikuttaa peräkkäisten sykevälien vaihteluun taajuudella 0,15–0,4 Hz. RMSSD, SDNN ja HF (0,15–0,4 Hz) -muuttujat, jotka mittaavat lyhytaikaista sykevälivaihtelua, kuvaavat hyvin

vagushermon toimintaa (Duedecim 2003). Schipke ym. (1999) suosittelee SDNN mittaustapaa sykevälivaihtelun arvioinnissa, kun sitä verrataan respiraatiomuutoksiin. Hengitys vaikuttaa selvästi sykevälivaihtelun taajuusvälivaihteluun respiratorisen sinus arrhythmian vaihtelujen välityksellä. RMSSD ja pNN50 tuloksilla on suhteellisen iso hajonta eivätkä ole yleisesti käytössä lyhytaikaisisten mittausten analysoinnissa. (Schipke 1999.)

Useiden tutkimusten (Jorna 1993; Veltman & Gaillard 1996; Wilson 1992) mukaan respiraatiotiheys mittarina on herkkä muille tekijöille kuin kognitiiviselle kuormitukselle voi aiheuttaa ongelmia tulosten luotettavuudelle ja johdonmukaisuudelle. Respiraatiotiheys vaikuttaa muihinkin kognitiivisen kuorman mittareihin, kuten sydämen sykkeen muuttujiin, joten respiraatiotiheyttä tulisi mitata yhdessä sykevälivaihtelun kanssa, jotta näiden kahden muuttujan virhemarginaalit saadaan minimoitua (Jorna 1993; Veltman & Gaillard 1996; Wilson 1992).

Millerin (2001) mukaan useissa tutkimuksissa on käytetty respiraatiotiheyttä kognitiivisen kuormituksen mittarina. Saman tutkimuksen mukaan respiraatiotheyden mittaaminen on erittäin helppo ja huomaamaton kognitiivisen kuormituksen mittausmenetelmä ja mittaus voi tapahtua joko laboratoriossa tai kenttäolosuhteissa. Myös Masaokan & Homman (1997) tutkimuksessa tutkittiin kognitiivisen kuormituksen vaikutusta respiraatiotiheyteen. Koehenkilöiden respiraatiotiheys, minuuttihengitysmäärä ja sykeväli kohosivat tehtävän vaatimustason kasvaessa.

Tässä tutkimuksessa käytettävä IPBAM-hengitysilmaamonitori on valmistettu seuraamaan hävitäjäohjaajien hengitysilmauksen puhtautta. Siinä oleva ohjelmisto mittaa myös respiraatiotiheyttä ja tutkimuksessa käytetyt laitteet on modifioitu seuraamaan hengitystä normaalia suuremmalla taajuudella, jotta respiraatiotheyden muutokset olisivat tarkemmin havaittavissa tutkimusdatasta.

3 KENTTÄKOE

3.1 Yleistä

Tässä työssä tutkittiin kognitiivisen kuormituksen mittaamista respiraation avulla. Kenttäko-
keessa verrattiin NASA-TLX:sta ja sykevälivaihteludatasta saatuja kognitiivisen kuormituksen
arvoja respiraatiodataan.

Tutkimuskysymyksiin haettiin vastauksia 16 hävittäjäohjaajan otannalla niin, että jokainen lensi
samankaltaisen simulaattorilennon, joka sisälsi kaksi eri osiota. Osiot erosivat toisistaan sää- ja
valaistusolosuhteiden osalta. Koehenkilöiltä kerättiin sykevälivaihtelu- ja respiraatiodata lentoa
edeltäneen lepovaiheen ajalta ja itse simulaattorilentotehtävän suorituksen ajalta. NASA-TLX-
data kerättiin välittömästi lentotehtävän osioiden suoritusten jälkeen. Sykevälivaihtelun ja
NASA-TLX pisteiden osoittamaa kognitiivista kuormitusta verrattiin respiraatiodataan. Tulosten
tilastolliseen analysointiin käytettiin IBM SPSS -ohjelmistoa. Koeasetelmalla testattiin tutkimuk-
sen hypoteesin paikkansapitävyyttä. Tutkimuksen hypoteesina (H_0) oli, että sykevälivaihtelun ja
respiraation suhde ei korreloi eikä respiraatiotiheyttä voida käyttää luotettavasti kognitiivisen
kuormituksen mittaamisessa. Vastahypoteesina (H_1) oli, että sykevälivaihtelu ja respiraatioti-
heys korreloivat ja respiraatiotiheyttä voidaan käyttää luotettavasti kognitiivisen kuormituksen
mittaamiseen.

3.2 Osallistujat

Kenttäkokeen osallistujat olivat Suomen ilmavoimien Karjalan Lennoston Hävittäjälentolaivue
31:n F/A-18 tyypikoulutettuja ohjaajia. Testaustapahtumaan osallistui 16 F/A-18 Hornet-oh-
jaajaa. Kaikki ohjaajat olivat miehiä, joiden keskimääräinen ikä oli 29,6 vuotta ($SD=2,3$). Oh-
jaajien lentotuntikertymä F/A-18-kalustolla oli keskimäärin 412 tuntia ($SD=220$). Kaikilla ohjaa-
jilla oli voimassa oleva kelpuutus suorittaa ilmatankkaus.

3.3 Koelaitteisto

F/A-18 WTSAT -Hävittäjäsimulaattori

Shashidhara ym. (2018) mukaan simulaatio viittaa reaaliaikaisen prosessin imitaatioon tietoko-
neen tai vastaavan teknologisen laitteen avulla. Teknisesti simulaattori on harjoitteluväline,
jolla voidaan replikoida kaikki tai suurin osa jonkin järjestelmän toiminnoista.

Tässä tutkimuksessa koeasetelman ilmatankkaustehtävät toteutettiin Karjalan lennoston
Weapons Tactics and Situational Awareness Training System (WTSAT) F/A-18 simulaatto-
rilla. Suomen ilmavoimien lennostojen hävittäjälentolaivueiden F/A-18 WTSAT -hävittäjäsimu-
laattoreita (KUVA 2) käytetään hävittäjäohjaajien perus- ja jatkokoulutukseen sekä hätätoimen-
pidelentojen suorittamiseen. Simulaattori koostuu ohjaamosta, visuaalista ja lennonopettajan
ohjauspaneelistä. Ohjaamo on kopio oikean F/A-18 hävittäjän ohjaamosta. Visuaali koostuu

neljästä näytöstä, jotka luovat ohjaajalle noin 180 asteen visuaalisen näytön. Lennonopettajan ohjauspaneeli on Windows -pohjainen tietokone, josta pystyy hallitsemaan simulaatioympäristöä; lentävää konetta, sääolosuhteita ja mahdollisia muita simulaatioon osallistuvia simulaattoreita tai simuloituja entiteettejä.



KUVA 2. WTSAT F/A-18 simulaattori (Fingerroos 2024, CC-BY)

Firstbeat Bodyguard 2 -mittalaite

Tässä tutkimuksessa kognitiivisen kuormituksen fysiologisiin mittauksiin käytettiin sykeväli-vaihtelun osalta Firstbeat Bodyguard 2 -laitteistoa (KUVA 3). Firstbeat Bodyguard 2 -laitteen tuottama data perustuu sykkeen ja sykeväli vaihtelun mittaamiseen kahden elektrodin avulla. Fysiologisten tilojen mittaaminen perustuu sykeväli vaihteluun. Mittaus tunnistaa sykeväli vaihtelun ja sykkeen sekä analysoi niiden avulla autonomisen hermoston tilaa. (Firstbeat 2014.)



KUVA 3. Firstbeat Bodyguard 2 -laite (Fingerroos 2024, CC-BY)

Firstbeat Bodyguard 2-laite mittaa sykettä jatkuvasti ja käsittelee saadun tiedon, josta se erittelee sykevälivaihtelun. Lisäksi datan analyysissä tunnistetaan parasympaattisen tai sympaattisen hermoston aktiivisuus, jonka avulla voidaan eritellä stressi- tai palautumisreaktiot (Katainen, A., & Karvinen, L. 2021).

Firstbeat Bodyguard 2 -mittalaitteen tekniset tiedot (Firstbeat 2015).

- Ladattavan akun kesto noin 144 h (6 vuorokautta)
- Tallennuskapasiteetti noin 480 h (20 vuorokautta)
- Mittaustarkkuus sykemittauksessa 1 ms (1000 Hz)
- Mittaustarkkuus, liikeanturi:
- Näytteenottotaajuus 12,5 Hz o Resoluutio 8 Bit
 - Maksimi G-voima 4 G
 - Paino 24 g
- IP-luokka IP52 (mittauksen aikana, IP22 kun kaapeli irti)
- Mittauslämpötila +5 - +50 °C

- Säilytyslämpötila -20 - +60 °C
- Mittaustiedon purku suoraan Firstbeat Hyvinvointianalyysi- ja SPORTS- ohjelmistoihin
- Mittaustiedon purku ja akun lataus USB-portista ilman erillistä kaapelia

Laite kiinnitetään kehoon kahdella elektrodilla, jotka asetetaan oikean puolen solisluun alle ja vasemman puolen kylkiluiden päälle (KUVA 4).



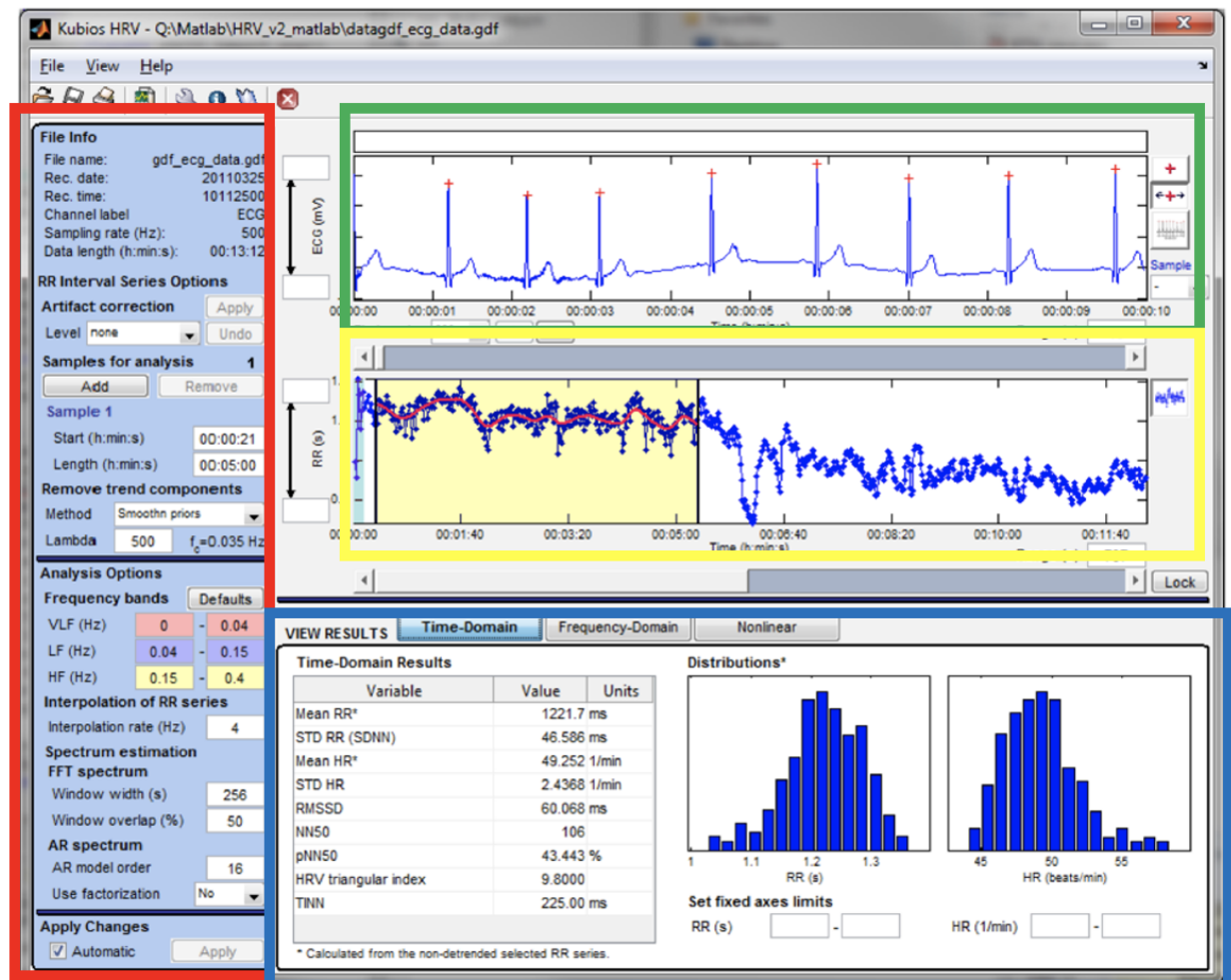
KUVA 4. Firstbeat Bodyguard-laitteen asennus (Fingerroos 2024, CC-BY)

Kubios HRV

Tässä tutkimuksessa käytettiin sykevälivaihtelun tulosten analysointiin Kubios HRV -ohjelmaa (Kubios Oy, Kuopio, Suomi) (versio 3.5.0). Ohjelmalla analysoitiin Firstbeat Bodyguard 2 -mittalaitteen tuottama syke.

Kubios HRV on Itä-Suomen Yliopiston soveltavan fysiikan laitoksen Biosignaalianalyysin ja lääketieteellisen kuvantamisen tutkimusryhmän (BSAMIG) kehittämä sykevälivaihtelun analyysiohjelma. Tarvaisen & Niskasen (2012) mukaan Kubios HRV on edistynyt työkalu sykevälivaihtelun tutkimiseen. Ohjelmistossa on laajat analyysivaihtoehdot ja se sopii hyvin tutkijoille (KUVA 5). Ohjelmisto on suunniteltu pääasiassa sykevälivaihtelun analysointiin. Kubios HRV sisältää kaikki

yleisesti käytetyt sykevälivaihtelun aika- ja taajuusaluemuuttujat (KUVA 5, sinisellä rajattu neliö). Lisäksi käyttöliittymästä näkee koehenkilön yleistiedot (KUVA 5, punaisella rajattu neliö), EKG:n (KUVA 6, vihreällä rajattu neliö). Sykevälivaihtelun (KUVA 5, keltaisella rajattu neliö) osalta käyttöliittymästä voidaan valita haluttu ajanjakso mittausajalta (KUVA 5, keltainen tausta)



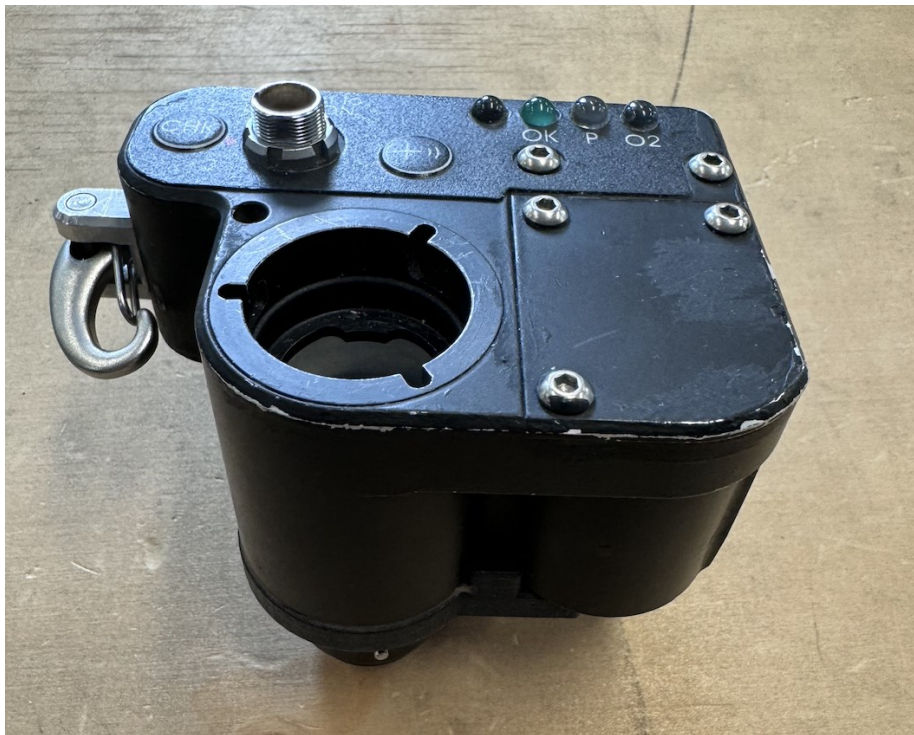
KUVA 5. Kubios HRV käyttöliittymä (Tarvainen & Niskanen 2012)

IPBAM hengitysilvamonitori

Tässä tutkimuksessa hengitystiheyden mittaamiseen käytettiin IPBAM-hengitysilvamonitoria. Hävittäjäilmailussa lentokoneet lentävät useilla korkeusalueilla, lentokoneen tyypistä riippuen jopa 20 km korkeudella. Ylemmässä ilmakehässä hapen määrä on liian vähäinen ylläpitääkseen ihmisen fysiologisen toiminnan. Happivaje voi aiheuttaa ihmiselle hypoksian, joka heikentää ihmisen toimintakykyä merkittävästi ja voi aiheuttaa hengenvaaran. Lentokoneisiin on kehitetty

ohjaamojen painejärjestelmät ja happijärjestelmät, jotka mahdollistavat hapen saannin ja toimintakyvyn ylläpidon. Näiden järjestelmien vikatilanteiden havaitseminen on usein ohjaajalle haastavaa.

Instan Oy:n kehittämä ja patentoima lentäjän hengitysilmamonitori IPBAM (KUVA 6) tarkkailee hävittäjälentäjän sisään ja uloshengittämiä kaasuja ja osaa ennakoida happivajeen vaaran. IPBAM on luotu alun perin ehkäisemään lentäjien happivaje- eli hypoksiatapauksia. IPBAM hengitysilmamonitori on osa lentäjän varusteita eikä vaadi integrointia tai muutoksia lentokoneeseen tai simulaattoriin. Lisäksi se on tällä hetkellä ainoa operatiivisessa käytössä oleva hypoksiasta varoittava laite. (Insta 2023).



KUVA 6. IPBAM-hengitysilmamonitori (Fingerroos 2024, BY-CC)

IPBAM hengitysilmamonitori seuraa hävittäjälentäjän hengitysilman painetta ja paineenmuutoksia välillä 70 ja 1200 hPa (TAULUKKO 4). IPBAM mittaa hengitysilman painetta ja happipitoisuutta sekä laskee näistä hapen osapaineen keuhkoissa. Laite valvoo myös ohjaamon painetta ja lämpötilaa. Ennakkovaroituksen lisäksi järjestelmä tallentaa keräämänsä datan yli 30 tunnin ajalta 1Hz taajuudella ja yli 3 tuntia 10 Hz taajuudella (TAULUKKO 4). Tallennusajan osalta laitteesta voidaan purkaa tiedot, jotta niitä voidaan käyttää tukemaan tehtävän analysoimista (Insta 2023).

TAULUKKO 4. IPBAM-hengitysilmamonitorin tekniset tiedot (Insta 2023)

IPBAM TEKNISET TIEDOT	
Hälytykset	Hapen osapaine keuhkoissa, ohjaamopaineen muutokset
Sensorit	Hengitysilman konsentraatio (0...100%), Hengitysilman paine (70...1200hPa), Ohjaamopaine (70...1200hPa), lämpötila
Tietojen tallennus	>30h @ 1 Hz taajuudella, >3h @ 10Hz taajuudella
Paino	260 g
Mitat	78 x 65 x 60 mm (LxKxS)
Yhteensopivuus	MS27796 yhteensopiva 3-pinnin regulaattorilla ja happiletkun kiinnityksellä
Virtalähde	Li-Akku, 200 h toiminta-aika
Toimintaympäristö	-10°C...+50°C käyttö, -40°C...+60°C varastointi
Testiympäristö	MIL-STD-810G (Env.), MIL-STD-461F (EMI), DO-160G (ESD), tuulitunnelitestattu

IPBAM-hengitysilmamonitori kiinnitetään hävittäjälentäjän lentovarusteisiin paineilimaliivin regulaattorin ja hengitysilmaletkun väliin (KUVA 7, punaisella kehystetty neliö). Hävittäjälentokoneen happijärjestelmä tuottaa paineliiviin hengitysilmaa, joka IPBAM:n kautta kulkee hengitysilmaletkuun ja siitä happinaamarin kautta hävittäjälentäjälle.

Kevyen rakenteensa ja helpon asentamisen vuoksi IPBAM-hengitysilmamonitori soveltuu tutkimusvälineeksi lentäjän tehtävänäikaiseen hengityksen mittaamiseen. Lisäksi datan tallentamisoimaisuus mahdollistaa hävittäjälentäjän tehtävänäikaisen hengityskäyttäytymisen analysoinnin jälkikäteen (Insta 2023).



KUVA 7. IPBAM-hengitysilmaamonitori kiinnitettynä hävittäjäohjaajan lentovarusteisiin (Fingerroos 2024, BY-CC).

3.4 Menetelmä

Hävittäjäohjaajien tehtävänä tutkimuksen koetilanteessa oli suorittaa kaksi kertaa kahden minuutin mittaiset ilmatankkaustehtävät (=tehtävän osiot). Kummankin osion aikana tuli suorittaa mahdollisimman monta onnistunutta kontaktia hävittäjäsimulaattorin ilmatankkauspuomilla ilmatankkauskoneen polttoaineletkuun. Aikaa itse suoritukseen oli kaksi minuuttia, minkä jälkeen oli minuutin mittainen tauko. Osioden vaativuutta manipuloitiin varioimalla niiden aikaista turbulenssia ja valoisuutta.

Ilmatankkaus suoritetaan yleensä korkeudella 3000 m – 30 000 m riippuen olosuhteista. Vaikuttavat olosuhteet ovat mm. pilvisyys, turbulenssi tai muu sääilmiö. Lisäksi erilaisilla konetyypeillä, kuten ilmatankkauskone tai hävittäjä, voi olla tiettyjä rajoituksia, jotka määrittävät ilmatankkauksen korkeusalueen (esim. konetyypin maksimi lentokorkeus). Ilmailun yhteydessä turbulenssilla tarkoitetaan Ilmatieteenlaitoksen (Traficom 2020) mukaan hetkellisiä tuulen nopeuden ja suunnan muutoksia. Turbulenssin voimakkuus jaetaan heikkoon, kohtalaiseen ja kovaan turbulenssiin. Turbulenssilla on erittäin suuri vaikutus ilmatankkauksen haastavuuteen vaikeuttamalla hävittäjän ja ilmatankkauskoneen välisen kontaktin saamista ja ilmatankkauspaikan säi-

lyttämistä. Kovalla turbulenssilla ilmatankkauslento, ilmatankkausletku ja hävittäjä liikkuvat vertikaalisesti ja horisontaalisesti toisiinsa nähden jatkuvasti. Vertikaaliseen näkyvyyteen vaikuttavat pilvisuus ja valaistusolosuhteet. Lennettäessä pilvessä ja/tai pimeällä, ilmatankkaussuoritus on lähtökohtaisesti haastavampi kuin päivällä kirkkaalla ilmalla visuaalisten referenssien rajoituneisuuden vuoksi.

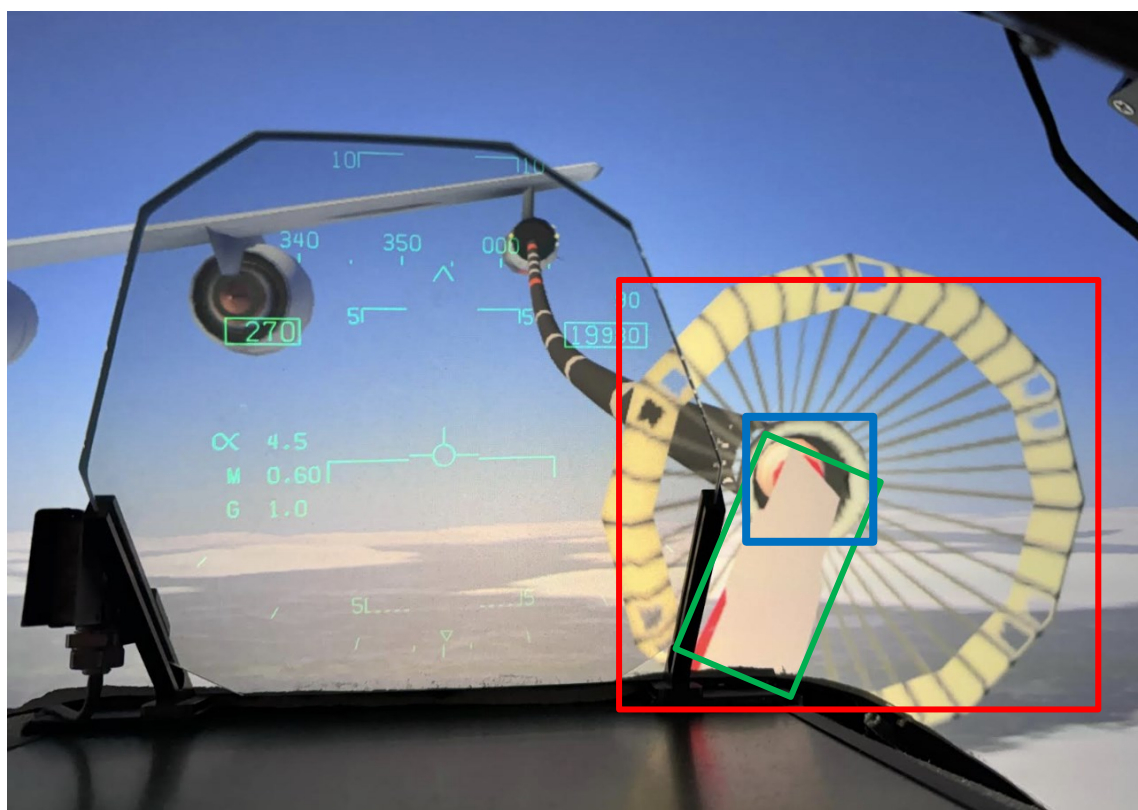
Lentotehtävän aikaista turbulenssia ja valaistusolosuhteita varioimalla muodostettiin kaksi vaativuudeltaan erilaista osiota: helppo (jäljempänä EASY) ja vaikea (jäljempänä HARD). EASY osiossa vallitsi päivä, eikä lennolla ollut turbulenssia. HARD vaihtoehdossa vallitsi yö ja lennolla oli kohtalaista turbulenssia. Ohjaajat lensivät molemmat osiot ennalta arvotussa järjestyksessä, jota ei kerrottu ohjaajille ennen suoritusta. Lentotehtävän osiot oli tallennettu WTSAT simulaattorin tehtävätietokantaan valmiiksi vakioetäisyyksille ja lentoarvoille, mistä opettaja latasi ne ohjaajille valmiiksi osioiden alussa.

Ilmatankkaus

Ilmatankkauksessa lentokoneella otetaan polttoainetta toisesta koneesta. Ilmatankkausta voidaan suorittaa useasta eri konetyypistä useaan eri konetyyppiin. Yleisin tapa on ottaa polttoainetta ilmatankkauslentoa hävittäjäkoneeseen, mutta ilmatankkaus on mahdollista myös ilmatankkauslentoa kuljetuskoneisiin, pommituskoneisiin tai helikoptereihin. Ilmatankkaaminen on mahdollista myös hävittäjästä toiseen. Tämän tutkimuksen kenttäkokeessa lennettiin pelkästään tankkausta hävittäjäkoneella ilmatankkauslentoa. Yksinkertaistettuna ilmatankkauksessa hävittäjäkone yhdistää oman ilmatankkauspuominsa ilmatankkauslentoa polttoaineletkuun ja polttoaine virtaa ilmatankkauslentoa letkun ja puomin kautta hävittäjäkoneen tankkeihin. Ilmatankkaamalla hävittäjä ilmassa sen toimintamatkaa ja -aikaa saadaan lisättyä merkittävästi, joka mahdollistaa hävittäjän monipuolisen käytön eri tehtäviin.

Ilmatankkauksessa polttoainetta vastaanottava lentokone (tässä tapauksessa hävittäjäkone) hakeutuu polttoainetta luovuttavan ilmatankkauslentoa läheisyyteen. Yleensä ensimmäinen paikka ilmatankkauslentoa lähellä on odotuspaikka joko vasemman siiven jatkeella tai ilmatankkauslentoa takana, erikseen määritetyiden ohjeiden mukaisesti. Kun polttoainetta siirtävä polttoaineletkulla ei ole muita tankkaavia koneita on ja ilmatankkauslento valmis luovuttamaan polttoainetta vastaanottajalle, antaa ilmatankkauslento hävittäjäkoneelle luvan siirtyä odotuspaikalta ilmatankkausletkun (KUVA 9, punaisella kehystetty nelikulmio) jatkeelle. Hävittäjän ollessa ilmatankkausletkun jatkeella noin 2–4 metrin päässä ilmatankkausletkun päässä olevasta basketista (KUVA 8, punaisella kehystetty neliö), ilmoittaa hävittäjän ohjaaja ilmatankkauslentoa valmiuden aloittaa kiinnittymisen ilmatankkausletkuun. Kun ilmatankkauslentoa valvova ilmatankkausoperaattori on valmis, tämä antaa luvan hävittäjälle ottaa kontaktin hävittäjän ilmatankkauspuomilla (KUVA 8, vihreällä kehystetty nelikulmio) ilmatankkauslentoa polttoaineletkuun. Luvan saatuaan hävittäjäohjaaja ohjaa hävittäjän siten, että hävittäjän ilmatank-

kauspuomin osuu baskettiin ja kiinnittyy basketin keskellä olevaan kiinnikkeeseen (KUVA 8, sinisellä kehystetty neliö). Hävittäjän ilmatankkauspuomin asettuminen kiinnikkeeseen avaa ilmatankkausletkun venttiilin. Kiinnittyttyään polttoaineletkuun, ohjaaja lisää hävittäjän nopeutta 2–3 km/h, jolloin hän työntää hävittäjällä ilmatankkausletkua 2–5 m matkan ilmatankkauskoneen siiven alla olevan kelan sisään. Kun hävittäjä on oikealla etäisyydellä ilmatankkauskoneesta, polttoainetta alkaa virtaamaan polttoaineletkun ja ilmatankkauspuomin kautta hävittäjän polttoainejärjestelmään (KUVA 9). Tankattuaan haluamansa polttoainemäärän, ohjaaja vähentää nopeuttaan. Ilmatankkauspuomin ollessa edelleen kytkettynä basketin kiinnikkeeseen, hävittäjän hidastaessa nopeutta ilmatankkauskoneen polttoaineletku kelautuu ulos. Kun polttoaineletku on tullut maksimimittaansa ja hävittäjän nopeus on edelleen pienempi kuin ilmatankkauskoneen, ilmatankkauspuomi irtaa polttoaineletkusta. Ohjaajan saadessa ilmatankkausoperaattorilta luvan siirtyä poistumispaikalle tankkerin oikealle siivelle, hän lentää hävittäjän sinne. Lopuksi ohjaaja poistuu tankkerin siiveltä ja ilmatankkausoperaatio on päätöksessä.



KUVA 8. Ilmatankkaus F/A-18 simulaattorin ohjaamosta nähtynä. Punaisella kehystettynä basket, vihreällä hävittäjän ilmatankkauspuomi ja sinisellä ilmatankkausletkun kiinnike, johon ilmatankkauspuomi kiinnittyy (Fingerroos 2024, CC-BY).



KUVA 9. Ilmatankkauskone KC-135 WTSAT simulaattorin visuaalista kuvattuna. Punaisella kehytetty ilmatankkauskoneen ilmatankkausletku (Fingerroos 2024, CC-BY)

Jokainen suomalainen hävittäjäohjaaja saa ilmatankkauskoulutuksen osana jatkolentokoulusta. Jotta ilmatankkauskoulutus voidaan aloittaa, ohjaaja tulee todeta lennonopettajien toimesta tarpeeksi kyvykkääksi koulutukseen ja ohjaajalla tulee olla 100 F/A-18 lentotuntia lentokoke-
musta. Ilmatankkauskoulutukseen sisältyy lentokoulutusohjelman mukaiset simulaattorilennot ja oikealla koneella suoritettavat koulu- ja harjoituslennot. Ilmatankkauskelpuutuksen saatuaan ohjaajan tulee ylläpitää kelpuutuksiaan ½-1 vuoden välein simulaattorilla ja oikealla koneella suoritettavilla harjoituslennoilla.

3.4.1 Ilmatankkaustehtävän arviointi

Koehenkilöiden suorittamat ilmatankkaustehtävän osiot arvioitiin lennonopettajan toimesta arviointilomakkeella. Suorituksen haastavuuden ja onnistumisen tason perusteella opettaja pisteytti jokaisen osion. Pisteytys määräytyi seuraavasti:

- Onnistuneiden ilmatankkaussuoritusten määrä:
 - o EASY 1p
 - o HARD 3p
- Kontaktien osumat, eli mihin kohtaan basketia ilmatankkauspuomi osui:
 - o basketin keskelle 5p
 - o basketin sisemmälle kehälle 3p
 - o basketin reunaan 1p
 - o ohi basketista 0p

- Basketin kontrolloimaton osuma hävittäjäkoneeseen (muuhun kohtaan kuin ilmatankkauspuomiin):
 - o EASY -3p
 - o HARD -1p

Suoritusten pisteytyksellä tavoiteltiin hävittäjäohjaajien välille kilpailuasetelmaa ja pyrittiin näin luomaan enemmän henkistä painetta suoritusten onnistumiselle. Lennonopettaja laski kokonaispisteet jokaisen suorituksen jälkeen.

3.5 Kenttäkokeen kulku

Tutkimukseen koehenkilönä osallistuneet hävittäjäohjaajat saapuivat ennen omaa lentotehtäväänsä simulaattoriin noin 10–15 min ennen oman vuoronsa alkua. Ennen lentotehtävää ohjaajat saivat selvityksen tutkimuksesta, jonka jälkeen he allekirjoittivat suostumuksen kenttäkokeeseen osallistumisesta. Suostumus osana esitietolomaketta ja on tämän opinnäytetyön liitteenä 2.

Kun osallistujat tulivat simulaattoritilaan, heihin kiinnitettiin Firstbeat Bodyguard 2 -elektrodeilla. Laite käyttää kahta elektrodia; yksi oikean solisluun alla ja yksi vasemman alemman lateraalin alla rintakehälle. Kun elektrodit on kiinnitetty, sydämen syke- ja sykevälivaihtelunäytteet otetaan automaattisesti 1024 Hz:n taajuudella ja tallennetaan laitteen sisäiseen muistiin.

Lennonopettaja antoi ohjaajille lentotehtävän ilmatankkauslennosta. Ohjaajat siirtyivät WTSAT-hävittäjäsimulaattoriin pässään Collins Aerospaceen valmistama Joint Helmet Mounted Cueing System -kypärä (JHMCS) ja naamallaan Gentex Corporationin valmistama happinaamari. IP-BAM-hengitysilmaamonitori oli kiinnitetty happinaamarin letkun ja ohjaajan paineliivin regulaattorin väliin. Simulaattoriin asettautumisen aikana lennonopettaja laittaa simulaattorin valmiiksi ilmatankkaustehtävää varten.

Ohjaaja aloitti tehtävän suorituksen istumalla simulaattorissa kolme minuuttia tekemättä mitään. Tänä levon aikana (myöhemmin Rest) kerättyä dataa sykkeestä, sykevälivaihtelusta ja hengitystiheydestä käytettiin vertailuun eri osioiden arvoihin. Kolmen minuutin levon jälkeen tehtävä käynnistettiin ja ohjaaja aloitti ilmatankkaustehtävän lentämisen.

Lentotehtävä sisälsi kaksi eri osiota, joista kumpikin kesti noin kaksi minuuttia. Kumpaakin kahden minuutin osiota seurasi minuutin lepoaika. Kummassakin osiossa ohjaajien tehtävänä oli suorittaa WTSAT F/A-18:lla mahdollisimman monta ilmatankkauskontaktia simuloidun ilmatankkauskoneen basketin kanssa kahden minuutin aikana. Jokaisen onnistuneen suorituksen jälkeen ohjaajien oli irrotettava yhteys ilmatankkausletkusta lentämällä takaisin ilmatankkausletkun jatkeelle paikkaan, joka on muutaman metrin päässä ilmatankkausletkusta. Tehtävän ai-

kana tankkeri lensi suoraa vaakalentoa 20000 jalan korkeudessa 270 solmun nopeudella. Kummassakin osioissa näkyvyys oli yli 10 kilometriä ja taivas selkeä, muuten olosuhteet vaihtelivat alakappaleen 3.4. mainittujen vaikeustasojen mukaan.

Lennonopettaja laski kummankin eri osion yhteydessä tehtyjen kontaktien määrän ja arvioi jokaisen kontaktin laadun etukäteen luodulla arviointilomakkeella (LIITE 1). Kummankin kahden minuutin suorituksen välillä simulaattori pysäytettiin minuutiksi ja ohjaaja arvioi oman kognitiivisen kuormituksen NASA-TLX-lomakkeen avulla ja lennonopettaja kirjasi arvot ylös arviointikaavakkeeseen.

Kun lentotehtävä oli ohi, simulaattori pysäytettiin ja ohjaaja nousi pois simulaattorista. Ohjaajalta riisuttiin lentovarusteet ja elintoimintoja mitanneet anturit. Sydämen syke-, sykevälivaihtelu- ja IPBAM-data purettiin tietokoneille ja lento tallennettiin simulaattorin omaan datapankkiin.

3.6 Tulokset

Tutkimuksen hypoteesina (H_0) oli, että sykevälivaihtelun ja respiraation suhde ei korreloi eikä respiraatiotiheyttä voida käyttää luotettavasti kognitiivisen kuormituksen mittaamisessa. Vastahypoteesina (H_1) oli, että sykevälivaihtelu ja respiraatiotiheys korreloivat ja respiraatiotiheyttä voidaan käyttää luotettavasti kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen. Merkitsevyytensä tutkimuksessa käytettiin p -arvoa 5 %, eli hypoteesi pitää paikkansa 95.0 % todennäköisyydellä.

Kerätty aineisto analysoitiin käyttämällä IBM SPSS -ohjelmistoa (versio 29). Aineistoa analysoitaessa käytettiin kokeeseen osallistuneiden hävittäjäohjaajien ilmatankkaustehtävien suoritusarvioiden tietoja, NASA-TLX-yleispisteiden tietoja, respiraatiotiheyden ja valittujen sykevälivaihtelukomponenttien arvojen tietoja. Sykevälivaihtelutiedot rajoituivat NN-intervallien keskiarvoon (MEANRR), keskisykkeeseen (MEANHR), NN-intervallien keskihajontaan (SDNN), sykevälivaihtelun kolmioindeksiin (HRVTRI), matalataajuisten (LF) ja korkeataajuisten (HF) komponenttien tehon väliseen suhteeseen sykevaihteluista (LF/HF). Nämä komponentit valittiin analyysiin koska niitä on aiemmin käytetty hävittäjäohjaajien kognitiivisen kuormituksen arvioimiseen simuloidun lentotehtävän aikana (Mansikka ym. 2016). Tallennettujen sykevälivaihtelutietojen analysointiin käytettiin Kubios-ohjelmistoa. Firstbeat-laitteen mahdollisesti virheellisesti tunnistamien R-poikkeamien automaattiseen tunnistamiseen ja korjaamiseen käytettiin Kubios-ohjelmiston algoritmia (Tarvainen ym. 2014, Lipponen & Tarvainen 2021).

Tuloksia analysoitiin käyttämällä toistomittausten varianssianalyysiä. Varianssianalyysi (engl. analysis of variance, ANOVA) on tilastollinen menetelmä, joka soveltuu tutkimuskysymyksiin, joissa tutkitaan miten eri tekijät vaikuttavat analyysoitavaan määrälliseen vasteeseen eli miten ne selittävät vastemuuttujan vaihtelua (Tähtinen ym. 2011, 140). Toistomittausten varianssianalyysillä voidaan erottaa ryhmien sisäisestä vaihtelusta lohkojen välinen vaihtelu ja muu osa ryhmien sisäisestä vaihtelusta luetaan virhevaihteluksi (Taanila 2013).

TAULUKKO 4. Yhteenveto koehenkilöiden valittujen sykevälivaihtelukomponenttien keskiarvoista (M), keskihajonnoista (SD), ilmatankkauksen (AAR performance) suorituspisteistä, NASA-TLX:n kognitiivisen kuormituksen pisteistä (MWL), hengitystaajuudesta (RF), NN-intervallien keskiarvosta (MEANRR), keskisykkeestä (MEANHR), NN-intervallien keskihajonnasta (SDNN), sykevaihdelun kolmioindeksistä (HRVTI) ja matalataajuisten (LF) ja korkeataajuisten (HF) komponenttien tehon välisestä suhteesta sykevaihdeluista (LF/HF). M = keskiarvo, SD = standardipoikkeama. N=16.

	Rest		Easy		Hard	
	M	SD	M	SD	M	SD
AAR performance	-	-	7,53	13,50	6,11	9,63
NASA-TLX, overall MWL	-	-	43,80	19,17	51,11	20,84
RF	10,68	2,67	14,47	2,70	15,10	2,40
MEANRR	760,32	134,48	617,32	105,55	615,21	84,97
MEANHR	81,37	15,28	100,21	17,96	99,37	14,95
SDNN	60,72	23,48	28,69	12,58	30,50	13,87
HRVTI	12,62	4,54	6,81	2,83	6,62	2,47
LF/HF	4,08	4,31	3,01	2,48	2,55	1,84

TAULUKKO 5. Toistomittauksen tulokset hengitystaajuudesta (RF), NN-intervallien keskiarvo (MEANRR), keskisykkeestä (MEANHR), keskiarvo NN-intervallien keskihajonnasta (SDNN), Sykevaihdelun kolmioindeksistä (HRVTI), matalataajuisten (LF) ja korkeataajuisten (HF) komponenttien tehon välisen suhteen sykevaihdeluista (LF/HF). Vapausasteluku = df, Error = Greenhouse-Geisser-virhe, F = F-arvo, p = p -arvo, η^2 = Ryhmittelevän muuttujan vaikutus, N=16.

	df	Error	F	p	η^2
RF	1,28	22,97	49,04	<0.001	0.731
MEANRR	1,37	24,74	40,91	<0.001	0.694
MEANHR	1,68	29,83	30,52	<0.001	0.629
SDNN	1,35	24,37	37,50	<0.001	0.676
HRVTI	1,20	21,67	29,06	<0.001	0.618
LF/HF	1,42	25,59	1,88	>0.05	0.094

TAULUKKO 6. Parillista t-testiä käytettiin MWL: n, RF: n ja valittujen sykevälivaihtelukomponenttien vertailuihin. Parivertailun tulokset on esitetty taulukossa 6, josta löytyvät parivertailun keskiarvot (M) ja vakiovirheet (SE) valituista arvoista sekä vastaavat testitilastot (t) parivertailuista levon (Rest) ja HARD sekä EASY-olosuhteiden välillä. ilmatankkaussuorituskyvyn ja NASA-TLX-arvojen parivertailu suoritettiin EASY ja HARD-olosuhteiden välillä. AAR = Ilmatankkaussuorituskykykypistemäärä, NASA-TLX = NASA-TLX kognitiivisen kuormituksen arvo, RF = hengitystaajuus, MEANRR = NN-intervallien keskiarvo, MEANRR=keskisyke, SDNN = NN-intervallien keskihajonta, HRVTI = Sykevaihdelun kolmioindeksi, LF/HF = matalataajuisten (LF) ja

korkeataajuisten (HF) komponenttien tehon välinen suhde sykevaihteluista. *** = tilastollisesti erittäin merkitsevä, ** = tilastollisesti merkitsevä, * = tilastollisesti melkein merkitsevä.

	Rest - Easy				Rest - Hard				Easy - Hard		
	M	SE	t		M	SE	t		M	SE	t
AAR									1,42	2,61	0,54
NASA-TLX									-7,30	3,40	-2,15 *
RF	-3,79	0,54	-7,05	***	-4,42	0,59	-7,482	***	-0,62	0,25	-2,53 *
MEANRR	143,00	21,26	6,73	***	145,11	21,28	6,819	***	2,11	10,49	0,20
MEANHR	-18,84	3,06	-6,12	***	-18,00	2,98	-6,045	***	0,84	2,01	0,42
SDNN	32,03	5,03	6,37	***	30,22	4,57	6,615	***	-1,81	2,37	-0,76
HRVTI	5,81	0,10	5,87	***	6,00	1,12	5,361	***	0,19	0,41	0,47
LF/HF	1,07	0,80	1,34		1,54	1,02	1,509		0,46	0,55	0,83

4 DISKUSSIO

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia, soveltuuko respiraatiotiheys hävittäjäohjaajien kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen käyttäen IPBAM-hengitysilmaamonitoria. Koehenkilöiden respiraatiodataa verrattiin sykevälivaihtelun ja NASA-TLX:n tuloksiin kognitiivisesta kuormituksesta sekä ilmatankkaussuorituksen suoritusarviointiin. Tutkimus toteutettiin kenttäkokeena, jossa tutkimuksien tulokset tulkittiin kvantitatiivisella tarkastelulla. Kenttäkokeeseen osallistui 16 hävittäjäohjaajan otanta. Kaikki ohjaajat lensivät samanlaisen koeasetelman.

Tutkimuksen nollahypoteesina (H_0) oli, että sykevälivaihtelun ja respiraation suhde ei korreloi eikä respiraatiota voida käyttää luotettavasti kognitiivisen kuormituksen mittaamisessa. Vastahypoteesina (H_1) oli, että sykevälivaihtelu ja respiraatio korreloivat ja respiraatiota voidaan käyttää luotettavasti kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen.

Tutkimuskysymykset olivat

1. Millaisella kenttäkokeella voidaan tutkia sykevälivaihtelun ja respiraatiotiheyden korrelaatiota hävittäjäohjaajilla?
2. Kuinka hyvin respiraatiotiheys soveltuu kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen?

Varianssianalyysin tulokset (TAULUKKO 5) puolsivat vastahypoteesia p -arvon ollessa respiraatiotiheyden suhteen alle 0.001, eli tilastollisesti erittäin merkitsevä. Sama p -arvo todettiin myös muista indikaattoreista pois lukien LF/HF-sykevälivaihteludata, jonka p -arvo oli alle 0.05, eli tilastollisesti melkein merkitsevä. Tulosten mukaan nollahypoteesi voidaan hylätä ja vastahypoteesi ”sykevälivaihtelu ja respiraatio korreloivat ja respiraatiota voidaan käyttää luotettavasti kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen” pitää paikkaansa 99.9 % todennäköisyydellä.

Parivertailu (TAULUKKO 6) osoitti tilastollisesti merkitsevät levon ja eri tehtävien suorittamisen välillä. Eri haastavuustasojen osioiden välinen (TAULUKKO 6: Easy-Hard) ero sykevälivaihtelussa ei ollut tilastollisesti merkitsevä ja ero respiraatiotiheydessä oli tilastollisesti melkein merkitsevä. Koeasetelmalla pyrittiin vastaamaan kysymykseen 1 ja tämän tutkimuksen koeasetelman ilmatankkaustehtävän osioiden kognitiiviset vaatimustasot eivät eronneet tarpeeksi, jotta tilastollisesti merkitseviä eroja kognitiivisen kuormituksen mitattuihin arvoihin olisi saatu osioiden (TAULUKKO 6: Easy-Hard) välillä. Toinen mahdollisuus näiden erojen pienuuteen voi olla koehenkilöiden luovuttaminen liian haastavan tehtävän takia. Mahdolliseen luovuttamiseen on voinut vaikuttaa myös simulaatiomaailma, joka ei tarjoa reaaliympäristöä vastaavaa kognitiivisesti haastavaa ympäristöä. Levon ja osioiden (TAULUKKO 6: Rest-Easy, Rest-Hard) välillä kognitiivisen kuormituksen sykevälivaihtelun mittausarvot muuttuivat tilastollisesti erittäin merkitsevästi aikaisempien tutkimusten (Mansikka ym. 2016; Rautanen 2015; Kim, ym. 2018) mukaisesti ja respiraatio muuttui tilastollisesti erittäin merkitsevästi vastahypoteesia tukien aikaisempien tutkimusten (Brookings ym., 1996; Fournier, Wilson, & Swain, 1999; Roscoe, 1992; Veltman & Gaillard, 1996) mukaisesti.

Taulukoiden 4 ja 6 tuloksissa oli havaittavissa selkeästi vastahypoteesia tukevia lukemia. Sykevälivaihtelu laski verrattaessa lepoarvoja (Rest) kognitiivisesti haastavampien osioiden (Easy, Hard) arvoihin. Sykevälivaihteluarvot muuttuivat näin ollen aikaisempien tutkimusten (Mansikka ym. 2016; Rautanen 2015; Kim, ym. 2018) mukaisesti. Vastaavasti respiraatiotiheys kasvoi verrattaessa lepoarvoja (Rest) kognitiivisesti haastavampien osioiden (Easy, Hard) arvoihin. Respiration arvot mukailivat sykevälivaihtelun muutoksia vastahypoteesia tukien kuten aikaisemmat tutkimuksetkin ovat osoittaneet (Brookings ym., 1996; Fournier, Wilson, & Swain, 1999; Roscoe, 1992; Veltman & Gaillard, 1996). Muutokset respiraatiotiheydessä kognitiivisesti kuormitavimpien tehtävien aikana korreloi tilastollisesti erittäin merkitsevästi sykevälivaihtelun ja NASA-TLX arvoihin (TAULUKKO 4, 5 ja 6). Respiraatiotiheyden arvot mukailivat sykevälivaihtelun muutoksia kognitiivisen kuormituksen kasvaessa (TAULUKKO 4), mutta muutokset respiraatiotiheydessä olivat pieniä. Tämän tutkimuksen mukaan respiraatiotiheydestä voidaan saada viitteitä kognitiivisen kuormituksen tasosta ja tämä vastasi osittain tutkimuskysymykseen 2: ”Kuinka hyvin respiraatiotiheys soveltuu kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen?” Tutkimuksen lähteiden mukaan respiraatiotiheys on kuitenkin herkkä ulkoisille ärsykeille, kuten puheelle (Brookings ym. 1996; Roscoe, 1992) ja fyysiselle ponnistelulle (Jorna 1993). Myös tutkimukseen käytettyjen lähteiden mukaan respiraatiotiheyttä ei tulisi käyttää ainoana hävittäjäohjaajien kognitiivisen kuormituksen mittarina, vaan sitä tulisi käyttää yhdessä sykevälivaihtelun kanssa (Jorna 1993; Veltman & Gaillard 1996; Wilson 1992; Wickens 2008).

Tämän tutkimuksen perusteella vaikuttaa siltä, että ylimääraisten ärsykkeiden vuoksi kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen kannattaa käyttää useita eri mittareita. Pelkästään analysoimalla koko tehtävän aikaista respiraatiodataa ei voida aukottomasti todeta ajanjaksoja, joissa kognitiivinen kuormituksen kasvaminen on aiheuttanut muutoksen respiraatiotiheydessä. Jotta tuloksia voitaisiin analysoida luotettavasti, olisi muut mahdolliset respiraatiotiheyteen vaikuttavat ulkoiset ärsykkeet eroteltava kokonaisdatasta. Tämä tulee huomioida tutkimuskysymyksissä 1 ja 2. Sellaisenaan respiraatiotiheyttä voidaan käyttää täydentämään muita kognitiivisen kuormituksen mittareita.

Koska kognitiivista kuormitusta ei voida mitata suoraan, on sen arvioimiseksi kehitetty erilaisia menetelmiä (Wierwille ja Eggemeier 1993). Wierwille ja Eggemeier (1993) mukaan kognitiivisen kuormituksen mittaamisen menetelmät voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan: suorituskyyneen perustuviin, subjektiivisiin tai fysiologisiin. Jos tässä tutkimuksessa arvioidun hävittäjäohjaajan ilmatankkaussuorituskyvyn katsotaan edustavan suorituskyyneen perustuvaa kognitiivisen kuormituksen mittaria, tässä tutkimuksessa käytettiin kaikkia kolmea kognitiivisen kuormituksen mittaamenetelmää. Tämän tutkimuksen koeasetelma antaa näin vastauksen tutkimuskysymykseen 1 tiettyjen rajoitteiden kanssa.

Tutkimustuloksissa tulee huomioida, että huolimatta modernien hävittäjäsimulaattoreiden tarjoamista monipuolisista mahdollisuuksista ja realismista, niistä puuttuu kognitiiviseen kuormitukseen vaikuttavia tekijöitä oikealla hävittäjällä lentämiseen verrattuna. Simulaattorin tarjoama turvallisuuden tunne vähentää usein ohjaajien kokemaa kognitiivista kuormitusta. Sama koskee henkistä painetta tehtävän onnistuneen suorittamisen suhteen. Esimerkiksi ilmatankkaustehtävän epäonnistumisen aiheuttama pelko simulaattorissa ei ole verrannollinen saman tehtävän epäonnistumiseen oikealla koneella. Kilpailuasetelmalla pyrittiin lisäämään tehtävien onnistumisen painetta ja näin lisäämään kognitiivista kuormitusta.

Kun haetaan vastausta tutkimuskysymykseen 1, on myös huomioitava, että F/A-18 WTSAT hävittäjäsimulaattorin ohjaustuntuma poikkeaa oikean koneen ohjaustuntumasta ja ohjaajat harjoittelevat ilmatankkausta simulaattorilla harvemmin kuin oikealla koneella. Tällä on saattanut olla vaikutusta parivertailutuloksiin (TAULUKKO 6). Eri osioiden (Easy-Hard) välisen kognitiivisen kuormituksen erot voivat olla osaltaan pienempiä, koska ensimmäisenä suoritettussa osiossa ohjaaja on saanut kokemusta simulaattorin ohjaustekniikasta ja toisessa osiossa ohjaustekniikka on ollut tutumpaa ja näin kognitiivinen kuormitus pienempää huolimatta osion vaikeustasosta. Tämä tukee Wickensin (1984) teoriaa moniresurssiteoriasta. Moniresurssiteorian mukaan valmistautumalla tuleviin tehtäviin joko tutustumalla mahdollisiin tulevan tehtävän osa-alueisiin tai, mikäli mahdollista, harjoittelemalla itse tehtävää etukäteen kognitiivinen kuormitus itse tehtävä aikana on matalampi (Wickens 1984).

Aikaisemmin mainitulla kilpailuasetelmalla pyrittiin tuottamaan lisää kognitiivista painetta koehenkilöille. Tässä merkittävänä havaintona oli, että eri ihmiset kokevat kilpailutilanteen erilaisina. Riippuen ohjaajan kokemuksesta, iästä ja asenteesta, kaikki eivät ponnistelleet suorituksen onnistumiseksi yhtä lujasti kuin toiset. Jatkotutkimuksissa kannattaisi tutkia miten eri osioiden isommat erot kognitiivisten vaatimusten välillä, simulaattoreiden rajoitteiden huomioiminen ja isompi otanta koehenkilöitä vaikuttaisivat tutkimuskysymyksen 1 vastaukseen. Tämän tutkimuksen koeasetelma voi toimia hyvänä pohjana tulevien koeasetelmien rakentamista ajatellen.

Julkisen tutkimuksen tekeminen hävittäjätoiminnan kognitiivisesta kuormittavuudesta on haasteellista. Koeasetelmat eivät voi sisältää turvaluokiteltua toimintaa tai materiaalia. Koeasetelmien tulee sisältää näissä tapauksissa pääosin peruslentämistä. Todellisuudessa kognitiivisesti haastavimmat lentotehtävät sisältävät turvaluokiteltua dataa, taktiikkaa ja tekniikkaa. Haastavissa, useiden lento-osastojen monimaaliympäristössä suoritettavat tehtävät, olisivat hyvä mahdollisuus tutkia hävittäjäohjaajien kognitiivista kuormitusta ja sen mittaamista. Paras ympäristö kognitiivisen kuormituksen mittaamiselle olisi oikeat ilmaoperaatiot oikeilla hävittäjillä. Niissä poistettaisiin aikaisemmin mainitut simulaattorimaailman luomat haasteet ja rajoitukset.

Kognitiivisen kuormituksen mittarina respiraatiotiheydellä on rajoituksia. Vaikka respiraatiotiheys itsessään näyttää olevan diagnostinen, se on herkkä ulkoisille ärsykeille, jotka eivät suo-

raan liity kognitiiviseen kuormitukseen. Esimerkiksi korkeat G-kuormitukset, painehengitysjärjestelmä ja radioon puhuminen voivat suuresti vaikuttaa hävittäjäohjaajien hengitystiheyteen. Hetket, jolloin ohjaajat puhuvat radiossa, voidaan kuitenkin helposti tunnistaa IPBAM:lla ja ne voidaan siten sulkea pois analyysistä. Myös korkeat G-kuormitukset pystytään erottelemaan lentojen tehtävädatasta ja näin sulkemaan pois respiraatioanalyysistä. Ilmaoperaation aikana on myös paljon ajanjaksoja, jolloin G-kuormat ovat minimaalisia ja kognitiivinen kuormitus korkea. Nämä ajanjaksot tulisi siis kyetä tunnistamaan ja erotella, jos halutaan analysoida respiraatiotiheyttä mahdollisimman häiriöttömillä hetkillä.

Verrattuna moniin muihin kognitiivisen kuormituksen mittareihin, respiraatiotiheydellä on monia etuja. Respiraatiotiheyden mittaaminen IPBAM:lla ei aiheuta minkäänlaista häiriötekijää hävittäjäohjaajalle. Tätä näkökulmaa ei pidä unohtaa, kun kognitiivista kuormitusta mitataan operatiivisessa ja turvallisuuskriittisessä ympäristössä. Lisäksi IPBAM:n käyttöönoton vaativat tekniset muutostyöt ovat vähäisiä, sillä IPBAM ei vaadi minkäänlaista asentamista itse lentokoneeseen vaan on osa hävittäjäohjaajan lentovarusteita. Mahdollinen haaste on, että itse käyttäjän hyväksyntäprosessi laitteelle voi vähentää tämän mittausmenetelmän tehokkuutta. Kun IPBAM -hengitysilmamonitoria on testattu eri länsimaiden ilmavoimissa, validoinnit ja käyttäjätason hyväksyntävaatimukset ovat olleet erittäin korkeat. Kokemukset ovat kuitenkin osoittaneet, että Suomessa, ja muidenkin maiden ilmavoimissa, ohjaajat usein lentävät mielellään IPBAM:n kanssa, koska se antaa heille tarvittaessa varhaisen varoituksen lähestyvistä hypoksiasta (Insta 2023).

Tilastokeskuksen (2023) mukaan tutkimuksen valideetti ilmaisee kuinka hyvin tutkimuksessa käytetty mittausmenetelmä mittaa juuri sitä tutkittavan ilmiön ominaisuutta, mitä on tarkoituksella mitattu. Hiltusen (2009) mukaan valideetti on hyvä silloin, kun tutkimuksen kohderyhmä ja kysymykset ovat oikeat. Sykevälivaihtelu mitattiin Firstbeat Bodyguard 2-mittarilla, respiraatiotiheys mitattiin IPBAM:lla ja NASA-TLX-pisteet saatiin koehenkilöille suoritettuna kyselylomakkeen avulla. Sykevälivaihteluista ja NASA-TLX:sta tehtyjen tutkimusten mukaan ne ovat luotettavia mittareita kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen (Mansikka ym. 2016; Rautanen 2015, Liu ym. 2018) ja mahdollistivat tässä tutkimuksessa luotettavan vertailudatan käytön suhteessa tutkittavaan respiraatiodataan. IPBAM-hengitysilmamonitorin teknisten tietojen (TAULUKKO 4) mukaan laite soveltuu respiraatiotiheyden mittaamiseen ja tallentamiseen. Tutkimuksen simulaattoriasettelussa otantaan kuuluivat Suomen ilmavoimien Karjalan Lennoston Hävittäjälentolaivue 31:n F/A-18 tyyppikoulutetut lentäjät.

Testaustapahtumaan osallistui 16 F/A-18 Hornet-ohjaajaa. Ohjaajien lentotuntikertymä F/A-18-kalustolla oli keskimäärin 412 tuntia (SD=220). Kaikilla ohjaajilla oli voimassa oleva kelpuutus suorittaa ilmatankkaus. Kaikki koehenkilöt saivat ennen lentotehtävää selvityksen tutkimuksesta, jonka jälkeen he allekirjoittivat suostumuksen (LIITE 2) tutkimukseen osallistumisesta. Tutkimuksessa noudatettiin Tutkimuskunnan eettistä ohjetta (2019) ja haettiin tutkimuslupa

Ilmavoimilta sekä eettiseltä lautakunnalta. Koehenkilöiden tietoja käsiteltiin luottamuksellisesti ja turvallisesti. Opinnäytetyö on tarkastettu plagioinnin osalta Turnitin Feedback Studio -ohjelmalla. Otannan ja tutkimusmenetelmien voidaan todeta olleen oikeat tämän tutkimuksen luotettavuuden ja eettisyyden osalta.

Hiltusen (2009, 18) mukaan validiteetin arvioinnissa voidaan kysyä myös, kuinka hyvin tutkimusote ja siinä käytetyt menetelmät vastaavat tutkittavaa ilmiötä. Koeasetelma oli valmisteltu kokeneen hävittäjälennonopettajan toimesta ja menetelmien osalta käytettiin hyväksi aikaisempia hävittäjäsimulaattorissa tehtyjä kognitiivisen kuormituksen mittaukseen liittyviä tutkimuksia (Mansikka ym. 2016, Rautanen 2015). Edellä mainitut toimenpiteet tukivat tutkimuksen luotettavuutta koeasetelman ja menetelmien osalta

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen tulokset antavat vahvaa tukea vastahypoteesille, jonka mukaan sykevälivaihtelu ja respiraatiotiheys korreloivat sekä respiraatiotiheyttä voidaan käyttää luotettavasti kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen. Varianssianalyysin perusteella havaittiin, että respiraatiotiheyden ja sykevälivaihtelun suhde oli tilastollisesti erittäin merkitsevä (p -arvo < 0.001), tukien vastahypoteesia vakuuttavasti. Samanlainen tilastollisesti merkitsevä tulos saatiin myös muista indikaattoreista lukuun ottamatta LF/HF-sykevälivaihteludataa, jonka p -arvo oli alle 0.05. Näin ollen nollahypoteesi voidaan hylätä ja vastahypoteesi hyväksyä 99.9 % todennäköisyydellä.

Parivertailu osoitti myös tilastollisesti merkitsevät erot levon ja eri tehtävien suorittamisen välillä. Kuitenkin eri haastavuustasojen osioiden välillä havaitut erot sykevälivaihtelussa ja respiraatiotiheydessä olivat vähäisiä. Tämä saattaa johtua siitä, että koeasetelman ilmatankkaustehtävän osioiden kognitiiviset vaatimustasot eivät eronneet tarpeeksi tilastollisesti merkitsevällä tavalla, jotta eroja kognitiivisen kuormituksen mitatuissa arvoissa olisi voitu havaita.

Tulokset osoittivat, että respiraatiotiheyden arvot muuttuivat tilastollisesti merkitsevästi levon ja kognitiivisesti haastavampien tehtävien välillä. Sykevälivaihtelun mittausarvot muuttuivat samoin tilastollisesti erittäin merkitsevästi eri tehtävien välillä. Erityisesti levon ja kognitiivisesti haastavampien tehtävien välillä havaitut muutokset tukivat aikaisempien tutkimusten havaintoja.

Vaikka respiraatiotiheydestä saadaan viitteitä kognitiivisen kuormituksen tasosta, tulokset osoittavat, että se ei yksinään ole riittävä mittari kognitiivisen kuormituksen arvioimiseen hävittäjäohjaajilla. Useiden eri mittareiden käyttöä suositellaan, ja respiraatiotiheyttä voidaan hyödyntää täydentämään muita kognitiivisen kuormituksen mittareita. Lisäksi on huomioitava, että respiraatiotiheyden herkkyys ulkoisille ärsykeille saattaa vaikuttaa tuloksiin, ja ylimääräiset ärsykkeet tulisi huomioida jo mahdollista koeasetelmaa suunniteltaessa ja viimeistään analyysissä.

Tutkimuksen perusteella on selvää, että kognitiivisen kuormituksen mittaaminen on monimutkaista ja vaatii huolellista harkintaa eri mittareiden käytössä koeasetelmaa suunniteltaessa. Tulevaisuuden tutkimuksissa olisi hyödyllistä tutkia, miten erilaiset koeasetelmat ja suurempi otanta koehenkilöitä vaikuttavat tuloksiin. Lisäksi reaalimaailman olosuhteissa suoritettut tutkimukset voisivat tarjota arvokasta tietoa kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen.

Vaikka tämän alustavan tutkimuksen tulokset ovat lupaavia, jatkotutkimuksia tarvitaan edellisessä luvussa mainittujen respiraatiotiheyteen liittyvien herkkyyss- ja selektiivisyyso Ongelmien ratkaisemiseksi. Koeasetelma on merkittävässä roolissa ja sen suunnitteluun tulisi panostaa, jotta respiraatiotiheyden herkkyys ulkoisille ärsykeille pystyttäisiin ennakoimaan. Lisäksi suuremmalla otannalla voitaisiin saada mahdollisesti tilastollisesti merkitsevämpiä tuloksia. Jos ja kun tällaiset tutkimukset tehdään reaalimaailmassa simulaattorin sijaan, IPBAM on potentiaalinen järjestelmä, koska se ei häiritse hävittäjäohjaajan työskentelyä eikä se vaadi minkäänlaista modifikaatiota itse hävittäjäkoneeseen.

Yhteenvetona voidaan todeta, että vaikka respiraatiotiheys tarjoaa arvokasta tietoa kognitiivisen kuormituksen tasosta, sen käyttöä tulisi harkita yhdessä muiden mittareiden kanssa hävittäjäohjaajien kognitiivisen kuormituksen mittaamisessa. Lisätutkimukset ovat tarpeen hävittäjäohjaajien respiraatiotiheyden käyttämiseen kognitiivisen kuormituksen mittaamisen ymmärtämiseksi paremmin ja optimaalisten mittareiden sekä koeasetelmien löytämiseksi kognitiivisen kuormituksen arvioimiseen hävittäjäilmailualalla.

LÄHTEET

- Aasman, Jans, Mulder, Gijsbertus, & Mulder, Lambertus.J. 1987. Operator effort and the measurement of heart-rate variability. *Human factors*, 29(2), 161–170.
<https://doi.org/10.1177/001872088702900204>. Viitattu 23.3.2024
- Alavillamo, Jukka 1999. Sotilaan toimintakyky. Diplomityö. Maanpuolustuskorkeakoulu.
<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/156100/Y2162.pdf?sequence=1>. Viitattu 18.1.2024
- Backs, Richard W., & Seljos, K. A. 1994. Metabolic and cardiorespiratory measures of mental effort: the effects of level of difficulty in a working memory task. *International journal of psychophysiology*, 16(1), 57-68. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(94\)90042-6](https://doi.org/10.1016/0167-8760(94)90042-6). Viitattu 12.3.2024
- Bell, Herbert H., & Waag, Wayne L. 1998. Evaluating the Effectiveness of Flight Simulators for Training Combat Skills: A Review. *The International Journal of Aviation Psychology*, 8(3), 223-242. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA484153.pdf>. Viitattu 29.1.2024
- Bogg, Adam, Birrell, Stewart, Bromfield, Michael A., & Parkes, Andrew M. 2021. Can we talk? How a talking agent can improve human autonomy team performance. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 22(4), 488-509. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2020.1827080>. Viitattu 5.2.2024.
- Bottomley, Paul A., & Doyle, John R. 2001. A comparison of three weight elicitation methods: good, better, and best. *Omega*, 29(6), 553-560. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(01\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(01)00044-5). Viitattu 15.4.2024.
- Brookings, Jeffrey B., Wilson, Glenn F., & Swain, Caroline R. 1996. Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Biological psychology*, 42(3), 361-377. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05167-8](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05167-8). Viitattu 18.3.2024
- Cain, Brad 2007. A review of the mental workload literature. *DTIC Document*. https://www.researchgate.net/publication/235159082_A_Review_of_the_Mental_Workload_Literature. Viitattu 18.2.2024
- Casali, John G. & Wierwille, Walter. W 1983. A comparison of rating scale, secondary task, physiological, and primary task workload estimation techniques in a simulated flight task emphasising communications load. *Human factors*, 35, 623–641.
<https://doi.org/10.1177/001872088302500602>. Viitattu 24.3.2024
- Chinagudi, Surekharani, Badami, Sukanya, Herur, Anita, Patil, Shailaja, Shashikala, G. V., & Ankad, Roopa. 1970. Immediate effect of short duration of slow deep breathing on heart rate variability in healthy adults. *National Journal of Physiology, Pharmacy and Pharmacology*, 4(3),

233-233. https://www.researchgate.net/publication/273226055_Immediate_effect_of_short_duration_of_slow_deep_breathing_on_heart_rate_variability_in_healthy_adults. Viitattu 26.3.2024

Chu, Michael, Nguyen, Thao, Pandey, Vaibhav, Zhou, Yongxiao, Pham Hoang N., Bar-Yoseph, Ronen, Radom-Aizik, Shlomit, Jain, Ramesh, Cooper, Dan M. & Khine, Michelle 2019. Respiration rate and volume measurements using wearable strain sensors. *NPJ digital medicine*, 2(1), 8. DOI: 10.1038/s41746-019-0083-3. Viitattu 15.3.2024

Criée, C. P., Soricther, S., Smith, H. J., Kardos, P., Merget, R., Heise, D., Berdel, D., Köhler, D., Magnussen, H., Marek, W., Mitfessel, H., Rasche, K., Rolke, M., Worth, H. & Jörres, R. A. 2011. Body plethysmography—its principles and clinical use. *Respiratory medicine*, 105(7), 959–971. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2011.02.006>. Viitattu 20.3.2024

Duodecim 2023. Sykeväilivaihtelun kliininen merkitys. Verkkojulkaisu. Lääketieteellinen aikakauskirja Duodecim. Päivitetty 23.08.2023. <https://www.duodecimlehti.fi/duo17781>. Viitattu 25.3.2024

Eggemeier, F. Thomas, & Wilson, Glenn F. 2020. Performance-based and subjective assessment of workload in multi-task environments. *Multiple task performance*, 207. DOI:10.1201/9781003069447-13. Viitattu 18.3.2024

Elstad, Maja, O'Callaghan, Erin L., Smith, Alex J., Ben-Tal, Alona, & Ramchandra, Rohit 2018. Cardiorespiratory interactions in humans and animals: rhythms for life. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 315(1), H6-H17. DOI: 10.1152/ajpheart.00701.2017. Viitattu 27.3.2024

Firstbeat 2014. Stress and Recovery Analysis Method Based on 24-hour Heart Rate Variability. Verkkojulkaisu. Päivitetty 4.11.2014. https://www.firstbeat.com/wp-content/uploads/2015/10/Stress-and-recovery_white-paper_20145.pdf. Viitattu 9.4.2024.

Firstbeat 2015. Firstbeat Bodyguard. 2-laitteen tekniset tiedot. Verkkojulkaisu. <https://assets.firstbeat.com/firstbeat/uploads/2015/10/BG2-tech-specs-FIN.pdf>. Viitattu 9.3.2024.

Firstbeat julkaisuaika tuntematon. Kuva. <https://www.firstbeat.com/en/blog/what-is-heart-rate-variability-hrv>. Viitattu 16.4.2024

Fournier, Lisa R., Wilson, Glenn F., & Swain, Carolyne R. 1999. Electrophysiological, behavioral, and subjective indexes of workload when performing multiple tasks: manipulations of task difficulty and training. *International Journal of Psychophysiology*, 31(2), 129-145. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(98\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(98)00049-X). Viitattu 24.3.2024

Gaillard, A. W. K., & Wientjes, C. J. E. 1994. Mental load and work stress as two types of energy mobilization. *Work & Stress*, 8(2), 141-152. <https://doi.org/10.1080/02678379408259986>. Viitattu 15.3.2024

Gawron, V. J., Schiflett, S. G., & Miller, J. C. 1989. Measures of in-flight workload. <https://psycnet.apa.org/record/1990-97199-011>. Viitattu 24.3.2024

Gopher, Daniel, & Donchin, Emanuel (1986). Workload: An examination of the concept. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance*, Vol. 2. Cognitive processes and performance. John Wiley & Sons, 1-49. <https://psycnet.apa.org/record/1986-98619-019>. Viitattu 24.3.2024

Grossman, Paul, Karemaker, John & Wieling, Wouter 1991. Prediction of tonic parasympathetic cardiac control using respiratory sinus arrhythmia: The need for respiratory control. *Psychophysiology*. 28, 201–216. DOI:10.1111/j.1469-8986.1991.tb00412.x. Viitattu 26.2.2024

Guyton, Arthur C., & Hall, John E. 2000. *Textbook of medical physiology—tenth edition—*. WB Saunders company, Philadelphia.

Hart, Sandra. G. 2006. NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 50, No. 9, pp. 904-908). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage publications. <https://doi.org/10.1177/154193120605000909>. Viitattu 28.1.2024

Hill, Susan G., Iavecchia, Helene P., Byers, James C., Bittner Alvah C., Zaklade, Allen L., & Christ, Richard E. 1992. Comparison of four subjective workload rating scales. *Human factors*, 34(4), 429-439. <https://doi.org/10.1177/001872089203400405>. Viitattu 20.1.2024

Hiltunen, Leena 2009. Validiteetti ja reliabiliteetti. *Graduryhmä*, 18, 2009. PDF-tiedosto. http://www.mit.jyu.fi/ope/kurssit/Graduryhma/PDFt/validius_ja_reliabiliteetti.pdf. Viitattu 15.4.2024

Insta Oy 2023. Lentäjän hengitysilmamonitori IPBAM. Verkkojulkaisu. <https://www.insta.fi/fi/puolustus-ja-ilmailu/palvelut/tuotteet-lentajalle/lentajan-hengitysilmamonitori-ipbam>. Viitattu 15.4.2024.

Jaakkola, Kaisa 2018. *Palaudu ja vahvistu*. Tammi. Viitattu 15.1.2024

Jorna, P. G. A. M. 1993. Heart rate and workload variations in actual and simulated flight. *Ergonomics*, 36(9), 1043–1054. DOI: 10.1080/00140139308967976. Viitattu. 18.3.2024

Järvinen, Nina & Rajajärvi, Elina 2006. Kognitiivinen kehitys sekä metamuistin, itsearvioidun terveyden ja mielialan yhteys kognitiiviseen suorituskkyyn iäkkäillä ihmisillä. *Psykologian laitos*. Jyväskylän Yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:juu-2007309>. Viitattu 22.2.2024

- Katainen, Aliisa, & Karvinen, Laura 2021. Luonnon vaikutus sykevälivaihteluun ja koettuun palautumiseen työikäisillä: kvantitatiivinen tapaustutkimus. Terveys ja hyvinvointiala. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021111220163>. Viitattu 18.2.2024
- Kauranen Kari 2018. Fysioterapeutin käsikirja. 1–2 painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- Kim, Hye-Geum, Cheon, Eun-Jin, Bai, Dai-Seg, Lee, Young Hwaan, & Koo, Bon-Hoon 2018. Stress and heart rate variability: a meta-analysis and review of the literature. *Psychiatry investigation*, 15(3), 235. DOI:10.30773/pi.2017.08.17. Viitattu 6.3.2024
- Kuusela, Tom 2013. Methodological aspects of heart rate variability analysis. *Heart rate variability (HRV) signal analysis: Clinical applications*, 10-42. DOI:10.1201/b12756-4. Viitattu 25.2.2024
- Leppäluoto, Juhani, Kettunen, Raimo, Rintamäki, Hannu, Vakkuri, Olli, Vierimaa, Heidi, & Lätti, Sole 2013. *Anatomia ja fysiologia–Rakenteesta toimintaan*. Helsinki: Sanoma Pro Oy. 164
- Lipponen, Jukka A., & Tarvainen, Mika. 2021. Accuracy of Kubios HRV software respiratory rate estimation algorithms. PDF-tiedosto. https://www.kubios.com/downloads/RESP_white_paper.pdf. Viitattu 10.3.2024
- Liu, Haipeng, Allen, John, Zheng, Dingchang & Chen, Fei 2019. Recent development of respiratory rate measurement technologies. *Physiological measurement*, 40(7). DOI:10.1088/1361-6579/ab299e. Viitattu 18.2.2024
- Tutkijaportti 2015. Tilastolliset menetelmät. Verkkojulkaisu. [Tutkijaportti.fi](https://www.tutkijaportti.fi) Suomalaisen Lääkäriseuran Duodecimin ja Suomen Lääketieteen Säätiön ylläpitämä palvelu. <https://www.tutkijaportti.fi/syvarit/tilastolliset-menetelmat/>. Viitattu 18.4.2024.
- Mansikka, Heikki, Simola, Petteri, Virtanen, Kai, Harris, Don, & Oksama, Lauri 2016. Fighter pilots' heart rate, heart rate variation and performance during instrument approaches. *Ergonomics*, 59(10), 1344-1352. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1136699>. Viitattu 15.2.2024
- Mansikka, Heikki, Virtanen, Kai, & Harris, Don 2019. Comparison of NASA-TLX scale, modified Cooper–Harper scale and mean inter-beat interval as measures of pilot mental workload during simulated flight tasks. *Ergonomics*, 62(2), 246-254. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1471159>. Viitattu 25.3.2024
- Masaoka, Yuri, & Homma, Ikuo 1997. Anxiety and respiratory patterns: their relationship during mental stress and physical load. *International Journal of Psychophysiology*, 27(2), 153-159. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(97\)00052-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(97)00052-4). Viitattu 24.3.2024

- Massaroni, Carlo, Nicolò, Andrea, Lo Presti, Daniela, Sacchetti, Massimo, Silvestri, S., & Schena, Emiliano 2019. Contact-based methods for measuring respiratory rate. *Sensors*, 19(4), 908. <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/4/908>. Viitattu 29.1.2024
- Mellin, Ilkka 2006. Tilastolliset menetelmät. PDF-tiedosto. Teknillinen korkeakoulu, Matematiikan laboratorio, 134. <https://math.aalto.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/TilastMenetSisalto.pdf>. Viitattu 18.4.2024
- Miller, Sarah 2001. Workload measures. National Advanced Driving Simulator. PDF-tiedosto. Iowa City, United States. <http://www.nads-sc.uiowa.edu/publication-Storage/200501251347060.N01-006.pdf>. Viitattu 23.3.2024
- Mohanavelu, K., Poonguzhali, Srinivasan, Ravi, Dhanushiya, Singh, Pushpendra K., Mahajabin, Mistu, Ramachandran, K., Upendra Kumar Singh & Jayaraman, Srinivasan 2020. Cognitive Workload Analysis of Fighter Aircraft Pilots in Flight Simulator Environment. *Defence Science Journal*, 70(2). <https://doi.org/10.14429/dsj.70.14539>. Viitattu 15.3.2024
- Mourali, Héla, & Lakhal, Lassaad 2021. Mental workload measurement, the case of stock market traders. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 22(4), 409-433. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2020.1818866>. Viitattu 24.3.2024
- Myllymäki, T. 2014. Stress and recovery analysis method based on 24-hour heart rate variability. PDF-tiedosto. Firstbeat Technologies Ltd. 2-4. https://assets.firstbeat.com/firstbeat/uploads/2015/11/Stress-and-recovery_white-paper_20145.pdf. Viitattu 19.3.2024
- NASA 2023. NASA-STD-3001 Technical Brief Cognitive Workload. Verkkojulkaisu. Päivitetty 13.11.2023. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/12/ochmo-tb-032-cognitive-workload.pdf>. Viitattu 21.1.2024
- NASA 2020. NASA TLX: Task Load Index. Verkkojulkaisu. Päivitetty 15.12.2020. <https://human-systems.arc.nasa.gov/groups/tlx/>. Viitattu 28.1.2024
- Nienstedt, Walter, Hänninen, Osmo, & Arstila, Antti A. 1977. Ihmisen fysiologia ja anatomia. Söderström.
- Nummenmaa, Lauri, Holopainen, Martti, & Pulkkinen, Pekka 2014. Tilastollisten menetelmien perusteet. Helsinki: Sanoma Pro Oy, 18, 174-175.
- Paxion, Julie, Galy, Edith, & Berthelon, Catheryn 2014. Mental workload and driving. *Frontiers in psychology*, 5, 1344. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01344>. Viitattu 29.3.2024
- Puolustusvoimat 2024. Taistelijan mieli ja taistelijan keho. Verkkojulkaisu. <https://puolustusvoimat.fi/taistelijan-mieli-ja-taistelijan-keho> 2024. Viitattu 15.3.2024

- Pumpila, Jiri, Howorka, Kinga, Groves, David, Chester, Michael & Nolan, James 2002. Functional assessment of heart rate variability: physiological basis and practical applications. *International journal of cardiology*, 84(1), 1-14. [https://doi.org/10.1016/S0167-5273\(02\)00057-8](https://doi.org/10.1016/S0167-5273(02)00057-8). Viitattu 29.3.2024
- Rautanen, Niko 2015. Sykevälivaihtelu kognitiivisen kuormituksen mittarina virtuaalisimulaatorissa suoritettujen lentotehtävien aikana. Maanpuolustuskorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2015100214579>. Viitattu 19.1.2024
- Rogers, Bruce, Schaffarczyk, Marcelle, & Gronwald, Thomas 2022. Estimation of Respiratory Frequency in Women and Men by Kubios HRV Software Using the Polar H10 or Movesense Medical ECG Sensor during an Exercise Ramp. *Sensors*, 22(19), 7156. <https://doi.org/10.3390/s22197156>. Viitattu 21.2.2024
- Roscoe, A. H. 1992. Assessing pilot workload. Why measure heart rate, HRV and respiration? *Biological psychology*, 34(2-3), 259-287. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(92\)90018-P](https://doi.org/10.1016/0301-0511(92)90018-P). Viitattu 24.2.2024
- Ruppel, Gregg L., & Enright, Paul L. 2012. Pulmonary function testing. *Respiratory care*, 57(1), 165–175. <https://doi.org/10.4187/respcare.01640>. Viitattu 10.3.2024
- Schipke, Jochen D., Arnold, G., & Pelzer, M. 1999. Effect of respiration rate on short-term heart rate variability. PDF-tiedosto. *Journal of Clinical and Basic Cardiology*, 2(1), 92–95. <https://www.kup.at/kup/pdf/39.pdf>. Viitattu 12.2.2024
- Schreiter, Karolin, Müller, Simon, Luckner, Robert, & Manzey, Dietrich 2019. A flight simulator study of an energy control system for manual flight. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 49(6), 672-683. DOI:10.1109/THMS.2019.2938138. Viitattu 23.2.2024
- Shaffer, Fredric & Ginsberg, J. P. 2017. An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in public health*, 258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>. Viitattu 23.3.2024
- Shaffer, Fredric, McCraty, Rollin, & Zerr, Christopher L. 2014. A healthy heart is not a metronome: an integrative review of the heart's anatomy and heart rate variability. *Frontiers in psychology*, 5, 1040. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01040>. Viitattu 19.3.2024
- Shashidhara, B. P., Chandrasekaran, R., Bhatia, Y., Magesh, G., Bineshkumar, K., & Kumar, H. V. 2018. Development of a Full Mission Simulator for Pilot Training of Fighter Aircraft. *Defence Science Journal*, 68(5). <https://doi.org/10.14429/dsj.68.12235>. Viitattu 18.1.2024
- Špinková, I., Hahn, G., Meyer, M., Tadlanek, M., & Hajek, J. 1997. Effect of respiration and posture on heart rate variability. PDF-tiedosto *Physiol. Res*, 46, 173-179. Viitattu 20.2.2024

- Sowho, Mudiaga, Amatoury, Jason, Kirkness, Jason P., & Patil, Susheel P. 2014. Sleep and respiratory physiology in adults. *Clinics in Chest Medicine*, 35(3), 469–481. <https://doi.org/10.1016/j.ccm.2014.06.002>. Viitattu 18.2.2024
- Taanila, Aki. 2013. Analysointi - Toistomittausten varianssianalyysi. Akin menetelmäblogi. Päivitetty 25.4.2019. <https://tilastoapu.wordpress.com/2013/02/10/toistomittausten-varianssianalyysi>. Viitattu 15.4.2024.
- Tarvainen, Mika P. & Niskanen, Juha- Pekka 2012. Kubios HRV. PDF-tiedosto. Finland: Biosignal Analysis and Medical Imaging Group (BSAMIG), Department of Applied Physics, University of Eastern Finland, 39. http://www.michaelgaebler.com/wp-content/uploads/2019/06/Kubios_HRV_2.2_Users_Guide.pdf. Viitattu 10.3.2024
- Tarvainen, Mika P., Niskanen, Juha-Pekka, Lipponen, Jukka A., Ranta-Aho, Perttu O., & Karjalainen, Pasi A. 2014. Kubios HRV–heart rate variability analysis software. *Computer methods and programs in biomedicine*, 113(1). <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.07.024>. Viitattu 10.3.2024
- Tilastokeskus 2023. Tietoa tilastoista. Verkkojulkaisu. Päivitetty 5.4.2023. <https://www.stat.fi/meta/kas/validiteetti.html>. Viitattu 8.4.2024
- Tutkimuseettisen neuvottelukunnan ohje 2019. Verkkojulkaisu. https://tenk.fi/sites/default/files/2021-01/Ihmistieteiden_eettisen_ennakkoarvioinnin_ohje_2020.pdf. Viitattu. 22.4.2024
- Task Force of the European Society of Cardiology 1996. the North American Society of Pacing and Electrophysiology (1996) PDF-tiedosto. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, 93(5), 1043–1065. <https://www.escardio.org/static-file/Escardio/Guidelines/Scientific-Statements/guidelines-Heart-Rate-Variability-FT-1996.pdf>. Viitattu. 20.1.2024
- THL 2023. Mitä toimintakyky on. Verkkojulkaisu. Päivitetty 20.12.2023 <https://thl.fi/aiheet/toimintakyky/mita-toimintakyky-on>. Viitattu 8.1.2024
- Tissari, Tuomas 2019. Hengityssimulaattorin suunnittelu ja toteutus hengitystiheyttä termistorien avulla mittaavan laitteen testaamiseksi. Sähkötekniikan korkeakoulu. Aalto Yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201910275804>. Viitattu 12.3.2024
- Tiwari, Reena, Kumar, Ravinda, Malik, Sujata, Raj, Tilak, & Kumar, Punit 2021. Analysis of heart rate variability and implication of different factors on heart rate variability. *Current cardiology reviews*, 17(5). DOI: 10.2174/1573403X16999201231203854. Viitattu 15.3.2024
- Traficom 2020. Lentosääoppia harrasteilmailijoille. Ilmatieteenlaitos. Verkkojulkaisu. Päivitetty 1.5.2020. https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Lentosääoppia%20harrasteilmailijoille%202020-06-08_v2.pdf. Viitattu 12.2.2024

- Tripathi, K. K. 2004. Respiration and heart rate variability: A review with special reference to its application in aerospace medicine. PDF-tiedosto. *Indian Journal of Aerospace Medicine*, 48(1), 64-75. https://psicolibra.it/wp-content/uploads/2013/10/respiration_and_heart_rate_variability.pdf. Viitattu 19.1.2024
- Tähtinen, Juhani, Laakkonen, Eero, & Broberg, Mari 2011. Tilastollisen aineiston käsittelyn ja tulkinnan perusteita. PDF-tiedosto. Turun yliopiston kasvatustieteiden tiedekunnan julkaisuja C, 140. https://www.utupub.fi/bitstream/handle/10024/149687/Tilastollisen_aineiston_kasittelyn_ja_tulkinnan_perusteita_2020.pdf?sequence=5&isAllowed=y. Viitattu 12.4.2024
- Veltman, J. A., & Gaillard, A. W. K. 1996. Physiological indices of workload in a simulated flight task. *Biological psychology*, 42(3), 323–342. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05165-1](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05165-1). Viitattu 26.3.2024
- Virtanen, Kai, Mansikka, Heikki, Kontio, Helmiina, & Harris, Don 2022. Weight watchers: NASA-TLX weights revisited. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 23(6), 725–748. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2021.2000667>. Viitattu 12.4.2024
- Wei, Jiajun, Bolton, M. L., & Humphrey, Laura 2020. The level of measurement of trust in automation. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 22(3), 274–295. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2020.1766596>. Viitattu 22.3.2024
- Wierwille, Walter W., & Eggemeier, F. Thomas 1993. Recommendations for mental workload measurement in a test and evaluation environment. *Human factors*, 35(2), 263-281. <https://doi.org/10.1177/001872089303500205>. Viitattu 15.3.2024

LIITE 1: ARVIOINTILOMAKE

ARVIOINTILOMAKE

OHJAAJA _____

PVM/AIKA _____

PISTEET _____

LEVEL 1KONTAKTIEN MÄÄRÄ (TUKKIMIEHEN KIRJANPITO) 1p/KONTAKTI _____KONTAKTIEN OSUMAT 5p / 3p / 1pBASKETIN OSUMAT KONEESEEN (TUKKIMIEHEN KIRJANPITO) -3p/OSUMA _____

OMA ARVIO (TLX)

___/___/___/___/___/___

LEVEL 2KONTAKTIEN MÄÄRÄ (TUKKIMIEHEN KIRJANPITO) 3p/KONTAKTI _____KONTAKTIEN OSUMAT 5p / 3p / 1pBASKETIN OSUMAT KONEESEEN (TUKKIMIEHEN KIRJANPITO) -1p/OSUMA _____

OMA ARVIO (TLX)

___/___/___/___/___/___

LIITE 2: ESITIETOLOMAKE

ESITIETOLOMAKE

Kiitos kun osallistut opinnäytetyöni tutkimukseen. Opinnäytetyössäni ei tulla julkaisemaan kenenkään henkilötietoja

PERUSTIEDOT

Lentoerote: _____

Ikä: _____

Pituus: _____

Paino: _____

Hornet -lentotunnit: _____

OHJAAJAN HENKINEN TYÖKUORMA - OMA ARVIO

Arvioi dimensioiden tärkeyttä tyypillisellä AAR -lennolla. Anna **tärkeimmälle dimensiolle 100 pistettä**. Anna muille dimensioille **100-0 pistettä** niiden suhteellisen tärkeyden mukaan. Dimensioilla voi olla sama määrä pisteitä.

Esim. *Physical Demand* 100 pistettä, *Mental Demand* 100 pistettä, *Temporal Demand* 50 pistettä, *Own Performance* 50 pistettä, *Frustration* 25 pistettä ja *Effort* 10 pistettä. Tällöin *Physical Demand* ja *Mental Demand* ovat tärkeimpiä, *Temporal Demand* ja *Own Performance* ovat keskenään yhtä tärkeitä ja puolet kahden tärkeimmän dimensioiden tärkeydestä jne.

<u>Physical Demand</u>	<u>Mental Demand</u>	<u>Temporal Demand</u>	<u>Own Performance</u>	<u>Frustration</u>	<u>Effort</u>
How much mental and perceptual activity is required (e.g., thinking, deciding, calculating, remembering, looking, searching, etc.)? Is the task easy or demanding, simple or complex, exacting or forgiving?	How much physical activity is required (e.g., pushing, pulling, turning, controlling, activating, etc.)? Is the task easy or demanding, slow or brisk, slack or strenuous, restful or laborious?	How much time pressure do you feel due to the rate or pace at which the tasks or task elements occurred? Is the pace slow and leisurely or rapid and frantic?	How successful do you think you are in accomplishing the goals of the task set by the experimenter (or yourself)? How <u>satisfied you</u> think you are with your performance in accomplishing these goals?	How hard do you have to work (mentally and physically) to accomplish your level of performance?	How insecure, discouraged, irritated, stressed and annoyed versus secure, gratified, content, relaxed and complacent do you feel during the task?
LO 0.....100 HI	LO 0.....100 HI	LO 0.....100 HI	GOOD 0....100 POOR	LO 0.....100 HI	LO 0.....100 HI

SUOSTUMUS

Opinnäytetyön tekijä arvioi ilmatankkaussuoritukset laatimallaan arvioititaulukolla.

Tulokseni saa olla mukana testiryhmän ohjaajien vertailussa ja minulle sopii, että paras tulos julkaistaan HÄVLLV31 -ohjaajien kesken:

KYLLÄ

EI

AIKA JA PAIKKA

ALLEKIRJOITUS

LIITE 3: NASA-TLX KYSELYLOMAKE

NASA-TLX.**HENKINEN VAATIMUSTASO**

Oliko tehtävä helppo ja yksinkertainen vai vaativa ja monimutkainen? Kuinka paljon tehtävä vaati päätöksentekoa, ajattelua, etsimistä, muistamista, laskemista jne.?

VÄHÄN 1.....10.....20.....30.....40.....50.....60.....70.....80.....90.....100 **PALJON**

FYYSINEN VAATIMUSTASO

Kuinka paljon tehtävä vaati fyysistä toimintaa, esim. kantamista, nappien painamista jne.?

VÄHÄN 1.....10.....20.....30.....40.....50.....60.....70.....80.....90.....100 **PALJON**

AJALLINEN VAATIMUSTASO

Oliko tehtävä hidas-, sopiva- vai nopearytmisen? Kuinka paljon aikapainetta tunsit tehtävän aikana?

VÄHÄN 1.....10.....20.....30.....40.....50.....60.....70.....80.....90.....100 **PALJON**

SUORITUS

Kuinka tyytyväinen olet toimintaasi tavoitteiden saavuttamisessa? Kuinka hyvin mielestäsi saavutit tehtävän tavoitteet?

HYVÄ 1.....10.....20.....30.....40.....50.....60.....70.....80.....90.....100 **HUONO**

PONNISTELU

Kuinka paljon sinun täytyi ponnistella henkisesti ja fyysisesti tehtävän aikana?

VÄHÄN 1.....10.....20.....30.....40.....50.....60.....70.....80.....90.....100 **PALJON**

TURHAUTUMINEN

Olitko rasittunut ja turhautunut tehtävän suorituksen aikana?

VÄHÄN 1.....10.....20.....30.....40.....50.....60.....70.....80.....90.....100 **PALJON**