

## Nostotyön keventäminen ulkoisen tukirangan avulla



**Juha Oksa**  
**Ari-Pekka Rauttola**  
**Jutta Karkulehto**  
**Pihla Säynäjäkangas**  
**Jaro Karppinen**  
**Janne Halonen**  
**Satu Mänttari**

# **Nostotyön keventäminen ulkoisen tukirangan avulla**

Juha Oksa, Ari-Pekka Rauttola, Jutta Karkulehto, Pihla Säynäjäkangas, Jaro Karppinen,  
Janne Halonen, Satu Mänttari

Työterveyslaitos

Työkyky ja työurat

PL 40 Työkyky ja työurat

00251 Helsinki

[www.ttl.fi](http://www.ttl.fi)

Toimitus: Juha Oksa

Valokuvat: Jutta Karkulehto

© 2022 Työterveyslaitos ja kirjoittajat

Hanke on toteutettu Työsuojelurahaston ja Posti-konsernin tuella.

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain (404/61, siihen myöhemmin tehtyine muutoksineen) mukaisesti kielletty ilman asianmukaista lupaa.

ISBN 978-952-391-055-3 (PDF)

## TIIVISTELMÄ

Tässä tutkimuksessa selvitettiin selän eksoskeletonin työtä keventävää vaikutusta ensin laboratorioissa ja sen jälkeen autenttisissa työskentelyolosuhteissa Postin logistiikkakeskuksessa Vantaalla. Laboratoriotutkimuksessa 11 tutkittavaa teki dynaamista nostotyötä ergonomisella ja epäergonomisella nostotavalla ilman eksoskeletonia ja sen kanssa. Tämän lisäksi kahdeksan tutkittavaa teki staattista työtä 60 asteen eteenpäin kumartuneessa asennossa. Ergonomisella nostotavalla tehdyssä työssä eksoskeleton hieman pienensi kuormitusta neljässä lihaksessa seitsemästä mitatusta ja epäergonomisessa kolmessa. Staattisessa työssä nk. "takaketjun" (ylä- ja alaselkä, takareisi ja pohje) kuormittuneisuus pieneni systemaattisesti ja yläselän osalta merkittävästi. Subjektiiivisesti arvioituna tutkittavat kokivat eksoskeletonin käytön vähentävän kuormittuneisuutta.

Kenttätutkimuksessa 43 tutkittavaa tekivät normaalia työtänsä ilman eksoskeletonia ja sen kanssa. Tutkittavat työvaiheet olivat VDL syöttö (VanDerLande, laitevalmistaja) ja luisu sekä CP syöttö (CrisPlant, laitevalmistaja) ja luisu. Työn aikana mitattiin lihasten kuormittuneisuutta kahdeksasta lihaksesta. Keskimääräinen lihaksiston kuormittuneisuus pieneni VDL syötössä 9,1 % ja CP syötössä 2,5 %. Sen sijaan VDL ja CP luisutyössä eksoskeleton lisäsi kokonaiskuormittuneisuutta 6,9 % ja 12,3 %. Kaikilla linjoilla työskentelyä kokonaisuutena tarkasteltaessa eksoskeleton lisäsi hartian alaosan, yläselän ja säären kuormitusta merkittävästi. Hartian yläosan, alaselän, takareiden, etureiden ja pohkeen osalta erot kuormituksessa olivat vähäisiä. Tutkittavat myös arvioivat eksoskeletonin käytettävyyttä kymmenen eri väittämän pohjalta. Subjektiiivisen käytettävyysselvityksen perusteella eksoskeleton soveltuu kyseisiin työtehtäviin heikosti.

Johtopäätöksenä voidaan todeta tutkimuksessa käytetyn eksoskeletonin pienentävän lihaksiston kuormittuneisuutta nosto- ja logistiikkatyössä vain vähän ja osalla lihaksista jopa lisäävän kuormittuneisuutta. Paras hyöty apuvälineestä oli VDL syötössä työskenneltäessä, mutta molemmissa luisuissa työskenneltäessä se lisäsi kuormitusta. Eksoskeletonien käytettävyyden ja mekaanisten ominaisuuksien kehittyessä, niiden hyödyllisyys kyseisen kaltaisten tehtävien osalta on hyvä arvioida uudelleen.

## ABSTRACT

This study was conducted to evaluate to which extent back exoskeleton may reduce muscle loading in lifting and logistics work. The study was performed first in the laboratory and then in the field in authentic working conditions in a logistics center.

In the laboratory, 11 subjects performed lifting work with ergonomic and unergonomic lifting technique without and with a back exoskeleton. In addition, 8 subjects performed static work in a 60 degree forward bent posture. In ergonomic lifting work, muscle strain was reduced in four out of seven measured muscles when using the exoskeleton. In unergonomic work, muscle strain was reduced in three muscles, respectively. During static work, when using the exoskeleton, muscle strain was systematically reduced in the so called "back chain" (upper and lower back, hamstrings, and calf muscles). The reduction was statistically significant in the upper back. According to the subjects' personal evaluation, the use of exoskeleton was helpful in reducing muscle strain.

In the field experiment, 43 subjects performed their normal work without and with the exoskeleton. The measured work phases were lifting parcels onto a conveyer and away from it on two different lines (VDL and CP, VanDerLande and CrisPlant manufacturer). The difference between the lines was that on VDL the parcels were heavier and lighter on CP. During work muscle strain was measured from 8 different muscles. During lifting parcels onto a conveyer muscle strain was reduced with the exoskeleton by 9.1 and 2.5 % in VDL and CP, respectively. However, when lifting parcels away from the conveyer, muscle strain was increased with the exoskeleton by 6.9 and 12.3 % in VDL and CP, respectively. When considering all work phases together, the use of exoskeleton significantly increased muscle strain in lower trapezius, upper back and shin. In upper trapezius, lower back, thigh front and back and calf, the difference in muscle strain was non-significant. After working with the exoskeleton, the subjects filled System Usability Scale (SUS) questionnaire evaluating the usability of the device. The results of the SUS questionnaire indicated poor usability of the device.

In conclusion, during lifting and logistics work, the exoskeleton used in this study did not show major benefits in reducing muscle strain. In some muscles the exoskeleton actually increased muscle strain. The exoskeleton turned out to be helpful only in lifting parcels at VDL line. According to subjective evaluation, the usability of the device in authentic work conditions is poor. With the development of these devices, their benefits and usability should be reconsidered.

## ALKUSANAT JA KIITOKSET

Tämä tutkimus toteutettiin Työterveyslaitoksen kuormitusfysiologian laboratoriossa Oulussa ja Postin logistiikkakeskuksessa Vantaalla. Tutkimuksen kenttäosio Vantaalla suoritettiin 1.10.2021 - 1.4.2022 välisenä aikana ja tutkimukseen osallistui kaikkiaan 43 työntekijää. Tutkimukseen osallistujien määrä oli poikkeavan suuri, joka tutkimuksen luotettavuuden kannalta on merkittävä asia. Myös tutkijat saivat viettää kaikkiaan kuusi viikkoa logistiikkakeskuksen "laboratoriossa".

Tekijät kiittävät tutkimukseen osallistuneita työntekijöitä motivoituneesta ja positiivisesta asenteesta. Iso kiitos tutkimuksen käytännön seikkojen hoidosta ja tutkittavien rekrytoinnista kuuluu HSE Manager ja työsuojelupäällikkö Päivi Kylmäkorvelle. Kiitos kuuluu myös Vantaan logistiikkakeskuksen päällikkö Saku Pöyhöselle ja työhyvinvointijohtaja Anne Tallgrenille tutkimuksen mahdollistamisesta ja positiivisesta suhtautumisesta.

Tutkimuksen rahoitukseen osallistui Posti-konsernin työhyvinvointisäätiö, asiamies Esa Vilkunan johdolla. Tutkimusta rahoitti lisäksi Työsuojelurahasto ja Työterveyslaitos.

Oulussa 30.11.2022

Tekijät

# SISÄLTÖ

## TIIVISTELMÄ

1	JOHDANTO.....	3
2	TAUSTA.....	4
2.1	Eksoskeleton.....	4
2.2	Eksoskeletonien vaikutukset työn fyysiseen kuormitukseen .....	4
2.3	Tutkimuksen tarkoitus.....	5
3	MENETELMÄT .....	7
3.1	Eksoskeleton.....	7
3.2	Laboratoriomittaukset.....	8
3.2.1	Subjektiiivinen kuormittuneisuuden tunne.....	11
3.2.2	Lihassähköinen aktiivisuus (EMG).....	11
3.2.3	Lihaskudoksen happisaturaatio.....	12
3.2.4	Lihask rakenne ja lihaksen kimmo-ominaisuudet.....	12
3.3	Kenttämittaukset.....	12
3.3.1	Työn aikana mitatut muuttujat .....	13
3.3.2	Ennen työtä ja työn jälkeen mitatut muuttujat .....	13
3.4	Tilastollinen analyysi .....	14
4	TULOKSET.....	15
4.1	Laboratoriomittaukset.....	15
4.1.1	Työn kesto ja koettu kuormitus.....	15
4.1.2	Lihassähköinen aktiivisuus (EMG).....	19
4.1.3	Lihaskudoksen happisaturaatio.....	23
4.1.4	Lihask rakenne ja lihaksen kimmo-ominaisuudet.....	26
4.2	Kenttämittaukset.....	27
4.2.1	Työasennot.....	27
4.2.2	Lihassähköinen aktiivisuus (EMG).....	29

4.2.3	Lihaskudoksen happisaturaatio.....	33
4.2.4	Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus.....	33
4.2.5	Lihaksen kimmo-ominaisuudet.....	35
4.2.6	Lihaskeho .....	35
4.2.7	Subjektiiiset arviot .....	35
5	YHTEENVETO.....	37
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	40
7	PROJEKTIN VIESTINTÄ.....	41
	LÄHTEET .....	42
	LIITTEET	



# 1 JOHDANTO

Työhön liittyvät tuki- ja liikuntaelimestön vaivat ovat tavallisimpia työn aiheuttamia terveysongelmia Suomessa ja ovat useimmiten syynä sairauspoissaoloihin. Vuonna 2019 tuki- ja liikuntaelinsairaudet olivat eniten alkaneita sairauspoissaolokausia aiheuttava sairausryhmä ja niistä korvattiin sairauspäivärahoja noin 255 miljoonaa euroa [1]. Tuki- ja liikuntaelinvaivat aiheuttavat usein pysyvää työkyvyttömyyttä etenkin ikääntyneissä työntekijäryhmissä.

Suuri osa työkyvyttömyyseläkkeistä ja sairauspoissaoloista johtuu selkäsairauksista [2]. Naisista 41 % ja miehistä 35 % on kokenut selkäkipua viimeisen kuukauden aikana [1]. Syynä selän ongelmille on selän liiallinen kuormitus, kuten nostaminen, staattiset, kumarat tai kiertyneet asennot ja raskaiden taakkojen käsittely. Suomessa miehistä 17 % ja naisista 18 % työskentelee vähintään tunnin päivässä kumarassa tai muutoin hankalassa selän asennossa. Aloja, joissa ongelmallisia selän asentoja tai nostoja esiintyy ovat mm. teollisuus, rakennusala, logistiikka, maa- ja metsätalous, tukku- ja vähittäiskauppa sekä terveys- ja sosiaaliala [3].

Työergonomiaan liittyvät toimenpiteet ovat yksi keino ehkäistä tuki- ja liikuntaelinvaivoja työpaikoilla. Perinteisen työergonomian lisäksi nostotyön apuvälineenä voidaan käyttää ulkoisia tukirankoja, nk. eksoskeletooneja. Eksoskeletonien eli ulkoisten tukirankojen valmistajat suosittelevat laitetta työn keventämisen tehokkaana apuvälineenä, mutta tutkimusnäyttö autenttisissa työtilanteissa on puutteellista. Myös subjektiivisten arvioiden mukaan niillä on positiivisia vaikutuksia, mutta esimerkiksi painonsa vuoksi ne voivat vaikuttaa myös fyysistä kuormitusta lisäävästi.

Ulkoisten tukirankojen potentiaali tuki- ja liikuntaelimestöön kohdistuvan kuormituksen pienentämisessä voi olla merkittävä. Jotta nykyaikaista tukirankateknologiaa voidaan tehokkaasti hyödyntää työn keventämisessä, tarvitaan mitattua tietoa eksoskeletonien vaikutuksista kuormittuneisuuteen autenttisissa työtilanteissa. Tämä tutkimus yhdistää standardoiduissa laboratorio-olosuhteissa ja autenttisissa työtilanteissa tehdyt mittaukset ja antaa siten kattavan kuvan selän tukirangan vaikutuksista nostotyön keventämisessä. Laboratoriomittauksissa tehtiin sekä staattista että dynaamista työtä erilaisilla nostotekniikoilla, jotta tulokset olisivat yleistettävissä mahdollisimman monenlaisiin työtehtäviin.

## 2 TAUSTA

Selkää kuormittava työ, etenkin toistuva nostaminen, hankalat työasennot ja tärinä ovat yhteydessä selkäongelmien yleisyyteen. Yksi alaselkävivun syy on fyysisesti kuormittava työ, johon sisältyy raskaita nostoja ja hankalia selän asentoja. Selän ylikuormittumiseen vaikuttavat muun muassa taakan muoto ja paino sekä sen sijainti suhteessa vartaloon noston aikana. Usein toistuvat nostot aiheuttavat selän kumuloituvaa kuormittumista ja lisäävät edelleen ylikuormittumisen riskiä. Äkilliset ja kontrolloimattomat liikkeet noston yhteydessä esimerkiksi otteen livetessä voivat vaurioittaa lihaksia, niveliä tai jänteitä [4].

### 2.1 Eksoskeleton

Fyysisesti raskaan nostotyön kuormitusta vähentämään on kehitetty apuväline, ulkoinen tukiranka eli eksoskeleton. Kyseessä on päälle puettava mekaaninen tuki, joka jousi- ja nivelrakenteen avulla vähentää alaselän kuormitusta nostoissa tai pitkään etukumarassa työskenneltäessä. Eksoskeleton helpottaa kumartumista ja pystyasentoon nousemista, sillä reisissä ja rinnan päällä olevat tuet pitävät asennon kohdallaan ja ohjaavat lihastyötä reisille selän sijaan.

Eksoskeletonit luokitellaan toimintaperiaatteensa mukaan aktiivisiin ja passiivisiin. Aktiiviset tukirangat toimivat moottorien, hydraulisten tai pneumaattisten järjestelmien avulla. Passiiviset eksoskeletonit antavat fyysistä tukea kehon eri osille. Edistyneempien eksoskeletonien toiminta perustuu käyttäjän liike-energian varastoitumiseen jousi- ja nivelrakenteisiin ja energian vapauttamiseen, mikä avustaa työasentojen tukemisessa tai raskaiden taakkojen nostamisessa [5].

### 2.2 Eksoskeletonien vaikutukset työn fyysiseen kuormitukseen

Laboratoriossa eksoskeletonin vaikutusta on tutkittu erilaisten nostojen yhteydessä ja etukumarassa asennossa työskenneltäessä. Tutkimusten mukaan alaselän lihaksistoa tukeva ja nostoja helpottava eksoskeleton vähentää alaselän lihasten kuormitusta sekä staattisissa [6–10] että dynaamisissa [11–20] tehtävissä. Alaselän lihasaktiivisuuden vähennykset ovat tutkimuksissa olleet merkittäviä, tutkimuksesta riippuen jopa 20–40 % [6, 10–13, 17–20]. Tukirangan vaikutusten suuruuteen saattavat vaikuttaa useammat tekijät, kuten työskentelyasento, sukupuoli, kehon koko ja mittasuhteet [10]. Tukiranka myös ehkäisee paikallista lihasväsymystä [21], pidentää kestävyysaikaa ja vähentää alaselän koettua epämukavuutta staattisissa suorituksissa [6, 8] sekä vähentää selkärangan kohdistuvia voimia [9, 19, 22]. Eksoskeletonin on havaittu pienentävän energieettistä

kuormitusta nostotyön aikana [7, 14, 17, 19, 23–25], vaikkakin kaikissa tutkimuksissa ei ole havaittu eksoskeletonin käytön vaikuttavan sykkeeseen tai hapenkulutukseen [18, 21].

Eksoskeletonin käytöllä voi olla myös epäedullisia vaikutuksia. Käyttö voi olla työntekijälle epämiellyttävää epäsovivuuden tai painon johdosta [22]. Tukiranka voi rajoittaa liikkeitä ja aiheuttaa epämukavuutta esimerkiksi hankauksesta johtuen joissain asennoissa [26]. On myös mahdollista, että tukiranka siirtää rasitusta muualle kehoon esimerkiksi laitteiston painon vuoksi ja joissakin tilanteissa jopa lisää selän alueen kuormitusta [10, 27]. Vaikka eksoskeleton vähentää energieettistä kuormitusta nostotyön aikana, on sen havaittu lisäävän energiankulutusta yhtä paljon kävellessä ylimääräisen painon ja vastuksen vuoksi [24]. Yksi suurimmista puutteista eksoskeletonien tutkimuksessa on kuitenkin pidempikestoisten ja todellisissa työtilanteissa tehtyjen tutkimusten niukkuus.

Selkäeksoskeletonia on tutkittu autenttisissa työolosuhteissa mm. maanviljelyssä [28–29], teollisuudessa [30–32], logistiikassa [33] ja roskienkerääjillä [34]. Kenttätutkimuksissa mittauksen kestot ovat olleet varsin lyhyitä ja vaihdelleet 3 minuutista kahteen tuntiin. Vain Ziaei ym. [34] mittasivat eksoskeletonin vaikutuksia fyysiseen kuormitukseen 7–8 tunnin työpäivän aikana. Selän eksoskeleton on vähentänyt selän lihasten lihasaktiivisuutta [28–30, 33] ja selkärangan kuormitusta [30, 34] myös autenttisissa työolosuhteissa. Subjektiiiset arviot eksoskeletonin käytettävyydestä käytännön työtehtävissä ovat olleet positiivisia [30, 33–34], mutta tutkittavat ovat myös raportoineet lisääntyneestä epämukavuudesta rinnan alueella ja alavartalossa [28, 32]. Myös pidempiaikaisissa kokeiluissa subjektiiiset kokemukset ovat olleet samankaltaisia: eksoskeleton vähentää alaselän väsymystä, mutta lisää epämukavuutta rinnan alueella [31]. Tuore systemaattinen kirjallisuuskatsaus [35], jossa oli mukana 15 selkäeksoskeletonien vaikutusta tarkastelevaa kenttätutkimusta, tukee näitä havaintoja: eksoskeletonista on hyötyä fyysisen kuormituksen vähentämisestä autenttisissa työtehtävissä, mutta subjektiiiset arviot (käytettävyys, epämukavuus) ovat välillä ristiriidassa mitattujen fysiologisten hyötyjen kanssa. Kenttätutkimusten perusteella eksoskeleton on lupaava työkalu selän kuormituksen vähentämiseen, mutta lisää tutkimustietoa tarvitaan monipuolisesti eri aloilta sekä pidempikestoista mittauksista, jotka vastaavat paremmin todellista työntekeä.

## 2.3 Tutkimuksen tarkoitus

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, kuinka paljon nostotyötä voidaan keventää ulkoisen tukirangan (eksoskeleton) avulla laboratorio-olosuhteissa ja autenttisessa työympäristössä, sekä selvittää kohdistuuko eksoskeletonin vaikutus vain nostotyötä

tekeviin lihaksiin. Lisäksi tavoitteena on antaa suositukset, milloin ja minkä tyyppisissä nostotöissä eksoskeletonin käyttö on perusteltua ja suositeltavaa.

Tutkimuskysymykset ovat:

1. Mikä on työkuormituksen mitattu määrä käytettäessä eksoskeletonia? Paljonko kuormitus pienenee verrattuna ilman apuvälinettä tehtävään työhön?
2. Miten kuormituksen määrä muuttuu kohdelihaksissa? Kuormittaako eksoskeleton muita kuin kohdelihaksia?
3. Mitkä ovat ne työvaiheet, joihin eksoskeletoneja ensisijaisesti suositellaan käytettäväksi?

## 3 MENETELMÄT

Tutkimus jakaantui kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa tehtyihin mittauksiin ja autenttisissa työolosuhteissa tehtyihin kenttämittauksiin kahdella eri pakettilajittelulinjalla. Tutkimuksella on Pohjois-Pohjanmaan sairaanhoitopiirin eettisen toimikunnan myöntämä lupa (EETTMK 14/2021 §55). Ennen mittausten alkua tutkittavat allekirjoittivat kirjallisen suostumuksen tutkimukseen osallistumisesta.

### 3.1 Eksoskeleton

Tässä tutkimuksessa käytettiin BackX V3 (SuitX Inc, USA, kuva 1) selkäeksoskeletonia, joka on suunniteltu keventämään toistoluonteista tai staattista nostotyötä. Eksoskeletonin rintatukeen nojatessa kuorma siirtyy vipuvaikutuksella reisitukiin, mikä keventää alaselkään kohdistuvaa kuormaa. Tukiranka säädettiin yksilöllisesti jokaiselle sopivaksi, jolloin se antaa parhaan tuen ja toimivuuden.



Kuva 1. BackX V3 selkäeksoskeleton.

### 3.2 Laboratoriomittaukset

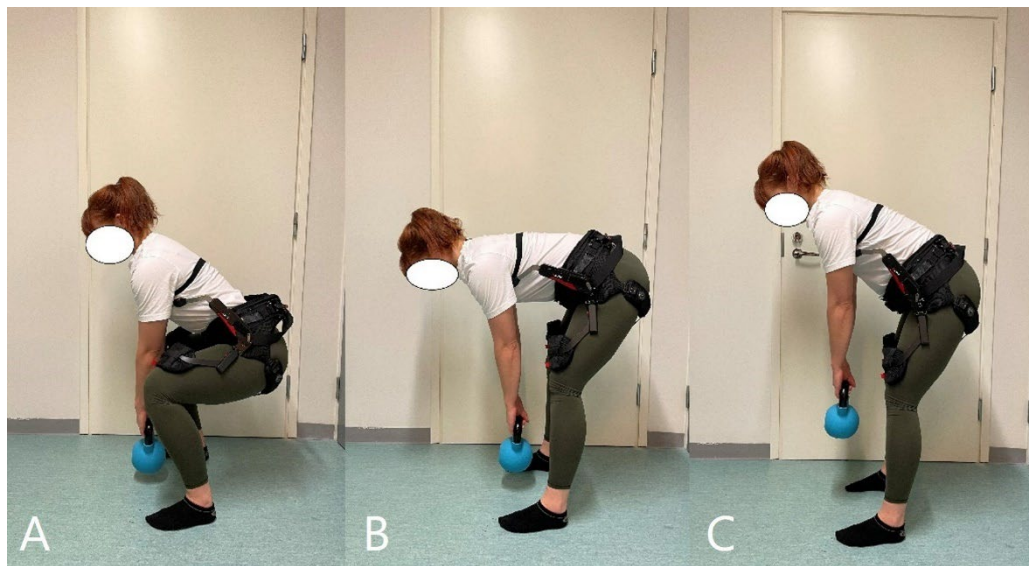
Laboratoriotutkimukseen osallistui 19 vapaaehtoista ja tervettä henkilöä (taulukko 1). Ennen tutkimusta varmistettiin, ettei heillä ole viimeisen kuuden kuukauden aikana ollut tuki- ja liikuntaelinvammoja tai -sairauksia. 11 tutkittavaa (5 naista, 6 miestä) osallistui dynaamisen työn ja 8 tutkittavaa (6 naista, 2 miestä) staattisen työn tutkimukseen.

Taulukko 1. Tutkimuksen laboratorio-osioon osallistuneiden tutkittavien ikä, pituus, paino, kehon painoindeksi (BMI) ja asteikolla 0–10 arvioitu aktiivisuusluokka, jossa arvo 5 tarkoittaa 30–60 minuuttia viikossa raskasta liikuntaa, kuten hölkäämistä, aerobicia tai korkean intensiteetin pyöräilyä (keskiarvo ± keskihajonta).

	n	Ikä (v)	Pituus (cm)	Paino (kg)	BMI (kg/m <sup>2</sup> )	Aktiivisuus- luokka
Dynaaminen työ	11	27,0 ± 4,2	175,3 ± 10,6	74,5 ± 15,4	24,0 ± 2,4	6,5 ± 1,5
Staattinen työ	8	35,0 ± 16,8	165,3 ± 4,6	73,4 ± 14,0	26,9 ± 5,4	5,0 ± 2,1

Laboratoriotutkimus koostui kahdesta osiosta: dynaaminen toistoluonteinen nostotyö ja staattinen työ. Mittauksia tehtiin yhteensä 60:

- Dynaaminen nostotyö ilman eksoskeletonia ja sen kanssa ergonomisella (kuva 2a) ja epäergonomisella (kuva 2b) nostotekniikalla.
- Staattinen 60 astetta eteenpäin kumartunut työ ilman eksoskeletonia ja sen kanssa (kuva 2c).



Kuva 2: Laboratoriotutkimuksessa käytetyt nostotekniikat: ergonominen nostotekniikka (A), epäergonominen nostotekniikka (B) ja staattisen pidon työasento (C).

Mittausjärjestys satunnaistettiin tukirangan käytön ja nostotavan osalta dynaamisessa työssä, staattisessa työssä mittaus suoritettiin ensin ilman eksoskeletonia työskentelyajan pituuden määrittämiseksi.

*Dynaaminen toistotyö.* Tutkittavat tekivät nostotyötä viidellä eripainoisella (4, 10, 16, 18 ja 20 kg) kahvakuulalla. Tutkittava nosti kahvakuulan lattialta tutkittavan oikealla puolella olevalle 68 cm korkealle pöytätasolle ja pöydältä takaisin lattialle (kuva 3). Kahvakuulaa nostettiin kahdella eri tekniikalla; ergonomisessa nostotekniikassa kahvakuula nostettiin ja laskettiin kyykistyen ja epäergonomisessa nostotekniikassa kumartuen. Nosto- ja las- kutyö tehtiin kullakin painolla 10 kertaa peräkkäin, omassa tahdissa. Kuulan paino kasvoi työn edetessä, jolloin ensimmäinen työjakso tehtiin 4 kg ja viimeinen 20 kg kahvakuulalla. Dynaaminen työ tehtiin molemmilla nostotekniikoilla eksoskeletonin kanssa ja ilman sitä. Mittauskertojen väli oli vähintään 48 tuntia.



Kuva 3. Tutkittava suorittamassa dynaamista epäergonomista nostotyötä.

*Staattinen työ.* Staattisen työn osiassa tutkittavat kannattelivat 10 kg kahvakuulaa ylävar- talo 60° eteenpäin kumartuneena, kunnes saavutettiin RPE-taulukolla (rating of per- ceived exertion) [36] arvioitu kuormituksen taso "erittäin raskas" (RPE = 18). Staattinen



työ tehtiin ensin ilman eksoskeletonia ja toisella kerralla ulkoisen tukirangan avustamana. Työn kesto oli molemmissa mittauksissa sama ja työn kesto määritettiin mittauksessa ilman eksoskeletonia. Mittauskertojen väli oli vähintään 48 tuntia.

### 3.2.1 Subjekttiivinen kuormittuneisuuden tunne

Dynaamisessa työssä koetun kuormittuneisuuden arvio kysyttiin jokaisella painolla tehdyn työn jälkeen. Staattisessa työssä koettua kuormittuneisuutta arvioitiin työn aikana 30 sekunnin välein. Arviointiin käytettiin RPE-taulukkoa asteikolla 6–20, jossa 6 = ei räsitystä ja 20 = maksimaalinen räsitys [36].

### 3.2.2 Lihassähköinen aktiivisuus (EMG)

Dynaamisen nostotyön ja staattisen pidon aikana mitattiin lihassähköistä aktiivisuutta (elektromyografia, EMG, Bittium Oy, Suomi) seitsemästä lihaksesta kehon oikealta puolelta. Tutkitut lihakset olivat:

1. hartia, epäkäslihaksen yläosa, *m. trapezius (pars descendes)*
2. yläselkä, epäkäslihaksen alaosa, *m. trapezius (pars transversa)*
3. alaselkä, pitkä selkälihas, *m. longissimus dorsi*
4. takareisi, kaksipäinen reisilihas, *m. biceps femoris*
5. pohje, kaksoiskantalihas, *m. gastrocnemius*
6. etureisi, nelipäinen reisilihas, *m. quadriceps femoris*
7. sääri, etumainen sääri-lihas, *m. tibialis anterior*

Mittaus suoritettiin laittamalla tutkittavan lihaksen päälle (lihasrunkoon) iholle kaksi mitaavaa bipolaarista pintaelektrodiä ja yksi nk. maaelektrodi (BlueSensor M-00-S, Ambu, Tanska). Näytteenottotaajuus oli 1000 Hz, kaistanleveys 40–500 Hz ja vahvistus x2000. EMG-mittaukset tallennettiin ja analysoitiin MegaWin-ohjelmalla (Mega Electronics Oy, Suomi).

Työn aikana mitattu aktiivisuus suhteutettiin ennen työtä mitattuun maksimaaliseen lihassähköiseen aktiivisuuteen (maksimaalinen lihassupistus), jolloin työn aikainen lihaksiston kuormittuneisuuden taso voitiin määrittää. Tulos ilmaistaan prosentteina maksimaalisesta lihasaktiivisuudesta (%MEMG). EMG-datasta poistettiin outlier-arvot (2 x keskihajonta ± keskiarvo). Lisäksi analysoitiin nk. mikrotauot, jotka ovat tahdosta riippumattomia hyvin lyhyitä (0,1–1 s) lihaksen lepohehtä.

### 3.2.3 Lihaskudoksen happisaturaatio

Happisaturaatiota mitattiin lähi-infrapunaspektroskopian avulla (NIRS, PortaMon, Artinis Medical Systems, Alankomaat) dynaamisen työn aikana etureidestä ja staattisen työn aikana takareidestä sekä selän ojentajalihaksesta (alaselkä) kehon vasemmalta puolelta. Laite toimii aallonpituudella 760–850 nm ja tunkeutuu kudokseen 3 cm syvyyteen. NIRS-sensori kiinnitettiin teipillä lihaksen päälle ja peitettiin tummalla kankaalla. Kudoksen happisaturaatioindeksi (tissue saturation index, TSI%) on luku, joka ilmaisee, montako prosenttia hemoglobiinin (verenpunan) hapensitomiskohdista on liittänyt itseensä hapetta. Näin se ilmaisee kudoksen happipitoisuuden suhteessa sen maksimaaliseen happipitoisuuteen.

### 3.2.4 Lihask rakenne ja lihaksen kimmo-ominaisuudet

Lihask rakenteen muutoksia nostotyön seurauksena tarkasteltiin ultraäänilaitteella (Logiq-5, GE Medical Systems Inc., Yhdysvallat). Ultraäänilaitteella otettiin pitkittäis- ja poikittaiskuva oikean etu- ja takareiden keskiosasta, ja kuvista analysoitiin lihaksen poikkileikkauspinta-ala ja pennaatiokulma (lihaksen ylimmän ja alimman kalvon välinen kulma). Tyypillisesti lihasväsymys aiheuttaa pinta-alan ja pennaatiokulman kasvua.

Lihasten elastisuutta, jäykkyyttä ja kiinteyttä mitattiin myotonometrillä (Myoton-3, Müemeetria, Viro). Mittausmenetelmä perustuu pehmeään kudokseen aiheutetun värähtelyn vaimenemiseen. Laite antaa viisi peräkkäistä vakiosuuruista (0,5 N) iskua ihon pintaan. Vaimenemisnopeuden ja suuruuden perusteella laite laskee pehmeän kudoksen (tässä tapauksessa lihaksen) elastisuutta, jäykkyyttä ja kiinteyttä, eli kudoksen kimmo-ominaisuuksia. Kimmo-ominaisuuksia mitattiin kehon oikealta puolelta samoista lihaksista kuin lihassähköisen aktiivisuuden mittausta (hartia, ylä- ja alaselkä, etu- ja takareisi, pohje ja sääri).

## 3.3 Kenttämittaukset

Kenttämittaukset autenttissa työtehtävissä suoritettiin lokakuun 2021 ja maaliskuun 2022 välisenä aikana Postin Vantaan logistiikkakeskuksessa CP- (CrisPlant, laitevalmistaja) ja VDL-pakettilajittelulinjoilla (VanDerLande, laitevalmistaja). Kenttämittauksiin osallistui yhteensä 43 vapaaehtoista logistiikkakeskuksen työntekijää (taulukko 2). Keskimääräinen työskentelyaika lajittelulinjoilla oli 3 h 55 min ± 1 h 8 min ilman eksoskeletonia ja eksoskeletonin kanssa 3 h 34 min ± 1 h 14 min.

CP-lajittelulinjalla paketit olivat kevyempiä (ka 3,4 kg) kuin VDL-linjalla (ka 7,5 kg), ja CP-linjalla käsitelty pakettien kappalemäärä oli noin viisinkertainen verrattuna VDL-linjaan.

Taulukko 2. Tutkimuksen kenttätutkimukseen osallistuneiden tutkittavien ikä, pituus, paino, kehon painoindeksi (BMI) ja asteikolla 0–10 arvioitu aktiivisuusluokka, jossa arvo 5 tarkoittaa 30–60 minuuttia viikossa raskasta liikuntaa, kuten hölkkäämistä, aerobicia tai korkean intensiteetin pyöräilyä (keskiarvo ± keskihajonta).

	n	Ikä (v)	Pituus (cm)	Paino (kg)	BMI (kg/m <sup>2</sup> )	Aktiivisuusluokka
Kaikki	43	34,4 ± 12,0	174,3 ± 9,7	76,8 ± 15,8	25,0 ± 4,1	4,8 ± 2,0
Miehet	30	32,9 ± 11,2	178,6 ± 8,4	80,9 ± 15,9	25,1 ± 4,1	4,6 ± 2,1
Naiset	13	37,8 ± 13,5	164,8 ± 4,2	67,4 ± 11,0	24,9 ± 4,4	5,2 ± 2,0

### 3.3.1 Työn aikana mitatut muuttujat

Kenttätutkimusosiossa selän liikekulmia työn aikana mitattiin vasemmalle puolelle ylä- ja alaselkään asetetuilla sensoreilla (MPower, Fibrux Oy, Suomi) näyttөөnottotaajuudella 17 Hz. Tulokset analysoitiin Tulefix-ohjelmalla (Työterveyslaitos, Suomi).

Työn aikaista lihassähköistä aktiivisuutta (ME6000, Bittium Oy, Suomi) mitattiin kehon oikealta puolelta samoista lihaksista kuin laboratorio-osiossa, lisättynä hartialihaksen alaosan mittauksella (ks. 3.2.2). Selän ojentajalihasten (alaselkä, vasen puoli) happisaturatiota työn aikana mitattiin kuten laboratoriomittauksissa (ks. 3.2.3).

Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitusta mitattiin Bodyguard 2 -mittalaitteella (Firstbeat Technologies Oy, Suomi), joka kiinnitettiin kahdella EKG-elektrodilla (BlueSensor VL-00-S, Ambu, Tanska) tutkittavan rintakehälle. Laite mittaa sydämen sykintätaajuutta (krt/min) sekä sykintätaajuuden perusteella laskettua MET-yksikköä, joka kuvastaa energiankulutuksen eli aineenvaihdunnallisen kuormituksen tasoa. Yksi MET vastaa henkilön perusaineenvaihduntaa levossa. Laite mittaa myös sykevälivaihtelua, eli kahden peräkkäisen sydämen lyönnin välisen ajan vaihtelua. Sykevälivaihtelumuuttujien avulla voidaan tarkentaa syketaajuuteen perustuvaa arviota aineenvaihdunnallisesta kuormituksesta työn aikana [37].

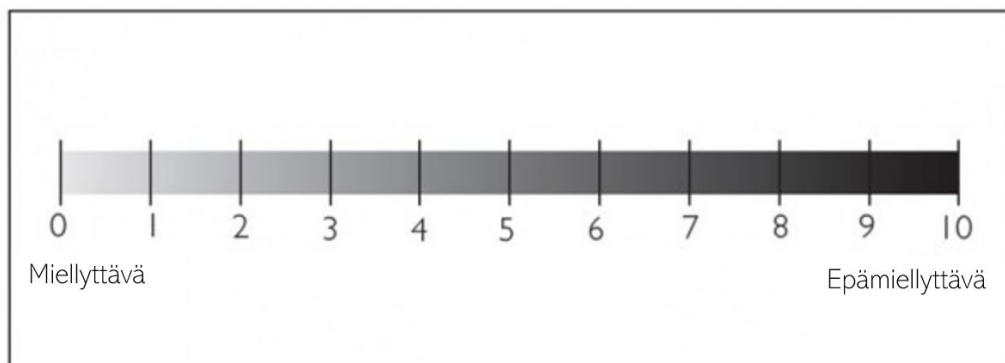
### 3.3.2 Ennen työtä ja työn jälkeen mitatut muuttujat

Lihasten elastisuutta, jäykkyyttä ja kiinteyttä mitattiin ennen työtä ja sen jälkeen myotonometrillä (Myoton-3, Müemeetria, Viro). Mittaukset tehtiin kehon oikealta puolelta, samoista lihaksista kuin lihassähköisen aktiivisuuden mittausta.

Maksimaalinen käden puristusvoima mitattiin venymäliuska-anturia käyttävällä puristusvoimamittarilla (Gloway EH101, Gloway Invent Oy, Suomi) ennen työtä ja sen jälkeen

oikeasta kädestä. Mittaus tehtiin istuen kyynärvarsi tuettuna 90° kulmassa. Puristusvoiman mittaamisen tarkoituksena oli mitata työpäivän aiheuttamaa hermo-lihasjärjestelmän väsymystä, mikä ilmenee maksimivoiman laskuna.

Työn aikaista koettua kuormittuneisuutta kysyttiin RPE-taulukolla [36] ja koettua epämukavuutta VAS-janalla (Visual Analogue Scale, kuva 4) molempien työvuorojen jälkeen. Eksoskeletonin kanssa tehdyn työvuoron jälkeen tutkittavat vastasivat vastasivat eksoskeletonin käytettävyyttä koskevaan kyselyyn (System Usability Scale -SUS, liite 2). SUS-kysely sisältää laitteen käytettävyyttä koskevia kysymyksiä, joista parittomat ovat positiivisia väittämiä ja parilliset negatiivisia. Vastausten perusteella lasketaan kokonaispisteet välille 0–100, joista keskimääräinen pistesumma on 68. Yli 68 pisteellä käytettävyys on hyvä ja alle 68 pisteen tuloksella käytettävyydessä on parannettavaa [38–39]. SUS-kyselyn lisäksi tutkittavilta kysyttiin lihasten väsymystasosta, epämukavuudesta ja liikkuvuudesta eksoskeletonin kanssa ja eksoskeletonin yleisestä käyttömukavuudesta 7-portaisilla asteikoilla (liite 3).



Kuva 4. Koetun epämukavuuden mittaamiseen käytetty VAS-jana (Visual Analogue Scale).

### 3.4 Tilastollinen analyysi

Tilastolliset analyysit tehtiin SPSS Statistics 27 -ohjelmalla (IBM, Yhdysvallat). Aineisto todettiin normaalijakautuneeksi Kolmogorov-Smirnov-testillä. Lihassähköisen aktiivisuuden sekä subjektiivisen kuormittuneisuuden (RPE) eroja ryhmien (työ eksoskeletonin kanssa ja ilman) välillä sekä ennen työtä ja työn jälkeen mitattujen muutosmuuttujien eroja tarkasteltiin kahden riippuvan otoksen t-testillä. Kudoksen happisaturaatiomuutoksia ajan suhteen tarkasteltiin toistettujen mittausten kovarianssianalyysillä (ANCOVA), jossa kovariaattina oli lähtötason arvo. Tulos katsotaan tilastollisesti merkitseväksi, kun  $p < 0,05$ .

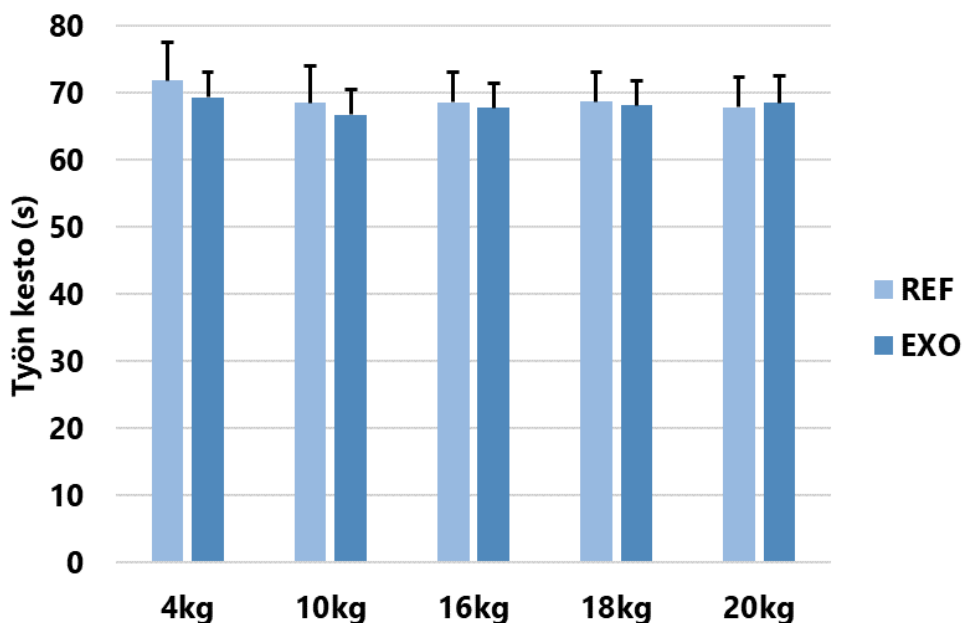
## 4 TULOKSET

Tutkimuksen kaikki tilastollisesti merkitsevät tulokset löytyvät liitteestä 1.

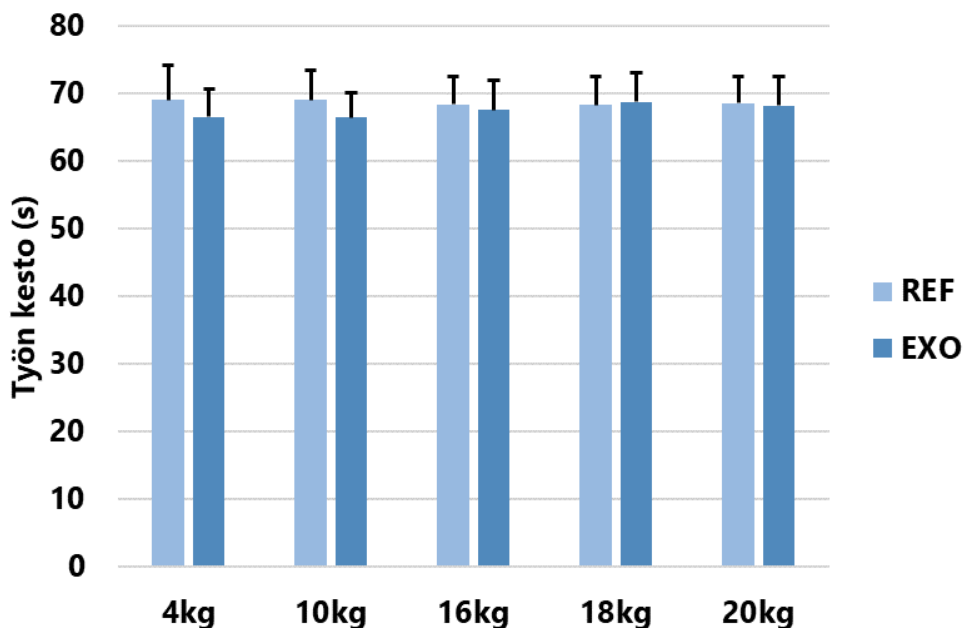
### 4.1 Laboratoriomittaukset

#### 4.1.1 Työn kesto ja koettu kuormitus

Dynaamisen toistotyön kesto viidellä eri painoisella kahvakuulalla ilman eksoskeletonia (REF) ja sen kanssa (EXO) on esitetty kuvissa 5 (ergonominen työ) ja 6 (epäergonominen työ). Kahvakuulan paino ja eksoskeletonin käyttö eivät vaikuttaneet työn kestoön tilastollisesti merkitsevästi.

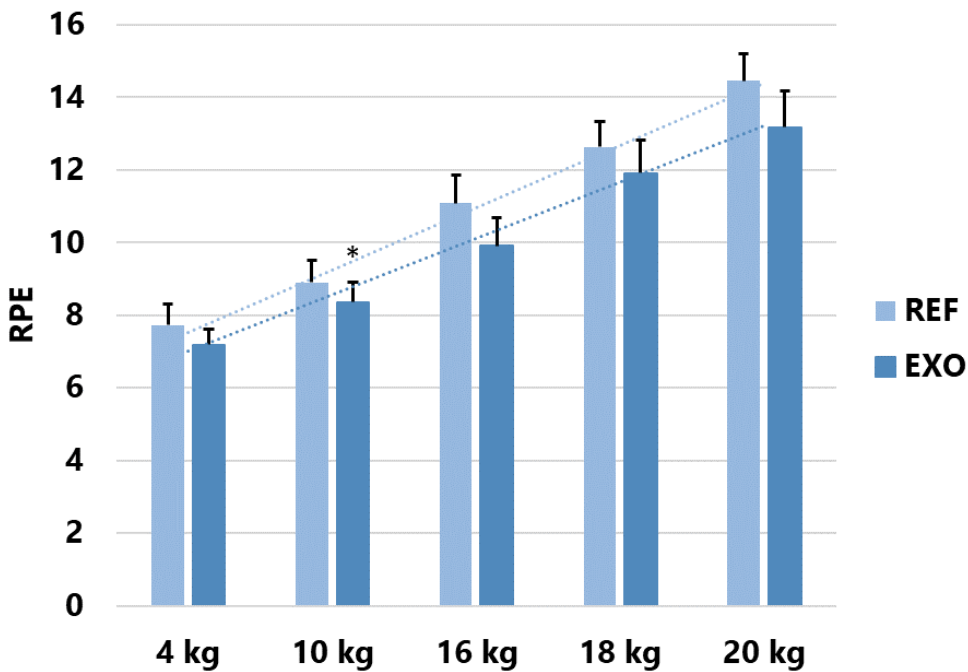


Kuva 5. Työn kesto dynaamisessa ergonomisessa toistotyössä eri painoisilla kahvakuulilla ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo ± keskivirhe).

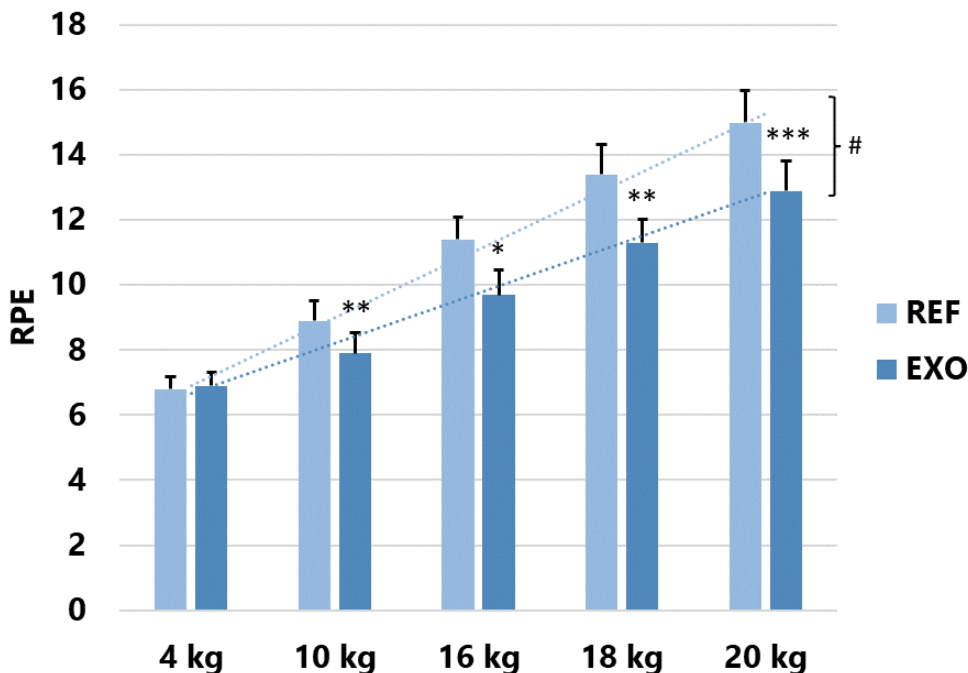


Kuva 6. Työn kesto dynaamisessa epäergonomisessa toistotyössä eri painoisilla kahvakuulilla ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo ± keskivirhe).

Koettu kuormitus oli eksoskeletonin kanssa tilastollisesti merkitsevästi matalampaa dynaamisessa ergonomisessa työssä 10 kg painolla (kuva 7) ja epäergonomisessa työssä 10, 16, 18 ja 20 kg painoilla (kuva 8). Lisäksi koetun kuormituksen kasvu kahvakuulan painon kasvaessa oli tilastollisesti merkitsevästi pienempää eksoskeletonin kanssa dynaamisessa epäergonomisessa työssä.



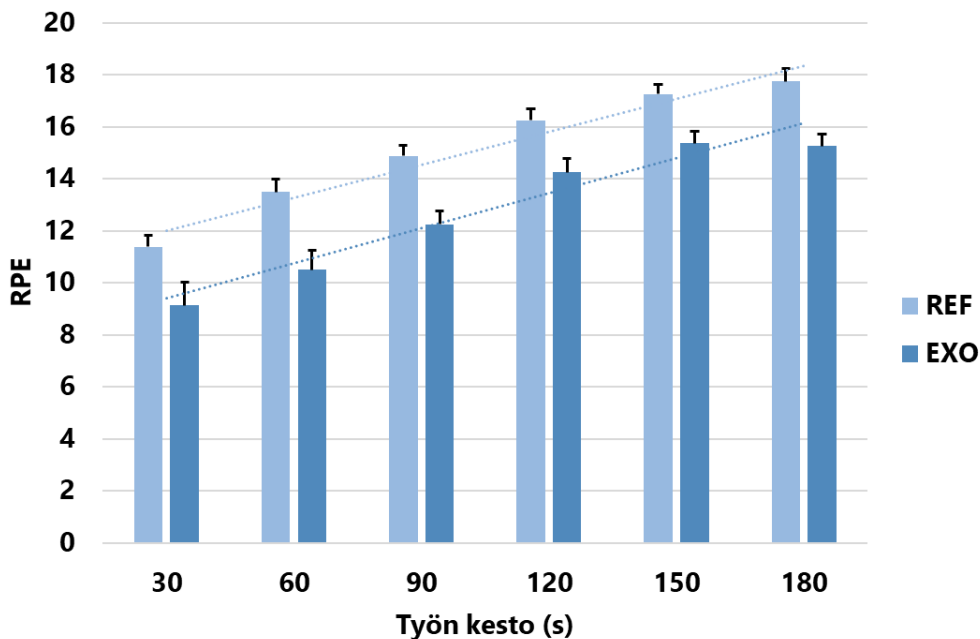
Kuva 7. Koettu kuormitus (RPE) asteikolla 6-20 dynaamisessa ergonomisessa toistotyössä eri painoisilla kahvakuvilla ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo ± keskivirhe). \* = Koettu kuormitus oli tilastollisesti merkitsevästi pienempää eksoskeletonin kanssa,  $p < 0,05$ .



Kuva 8. Koettu kuormitus (RPE) asteikolla 6-20 dynaamisessa epäergonomisessa toistotyössä eri painoisilla kahva-kuulilla ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo  $\pm$  keskivirhe). \* = Koettu kuormitus oli tilastollisesti merkitsevästi pienempää eksoskeletonin kanssa, \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$ ; # = Koetun kuormituksen kasvu oli tilastollisesti merkitsevästi pienempää eksoskeletonin kanssa verrattuna ilman eksoskeletonia tehtyyn työhön,  $p < 0,01$ .

Staattisen työn kesto oli keskimäärin  $171,5 \pm 32$  sekuntia. Työn kesto oli sama ilman eksoskeletonia ja eksoskeletonin kanssa. Staattisen työn koettu kuormitus oli matalampaa eksoskeletonin kanssa, mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä (kuva 9).

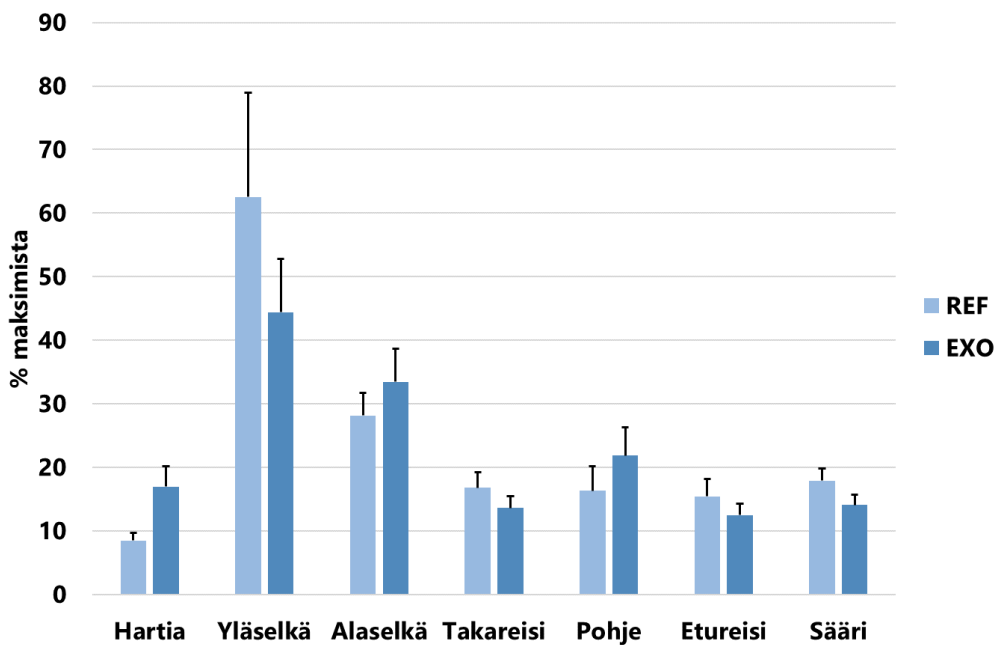




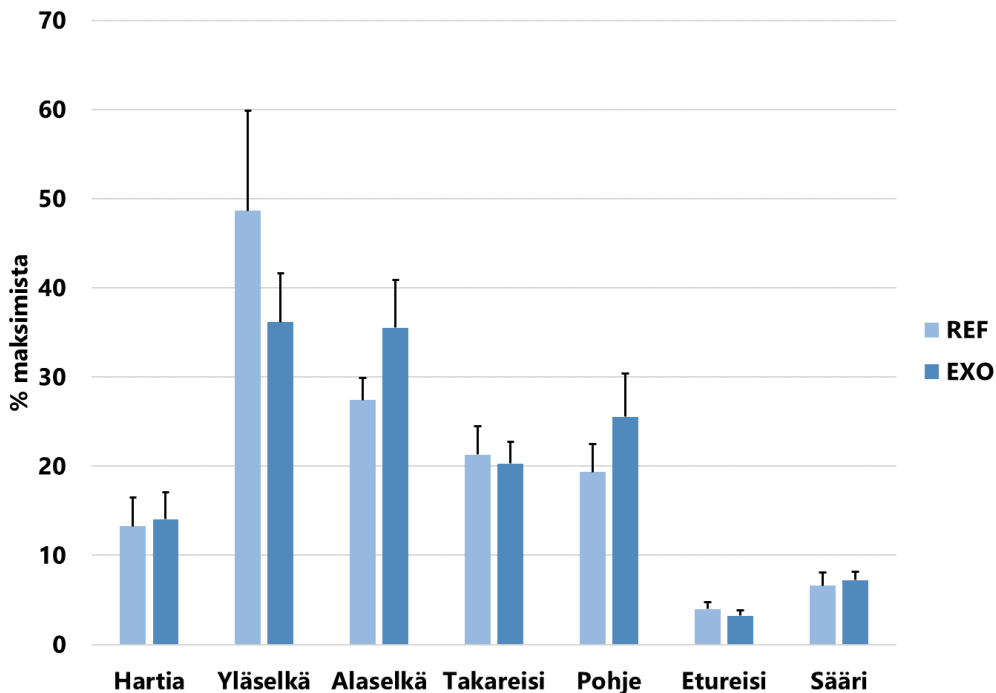
Kuva 9. Koettu kuormitus (RPE) asteikolla 6-20 laboratoriotutkimuksen staattisessa työssä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo  $\pm$  keskivirhe).

#### 4.1.2 Lihassähköinen aktiivisuus (EMG)

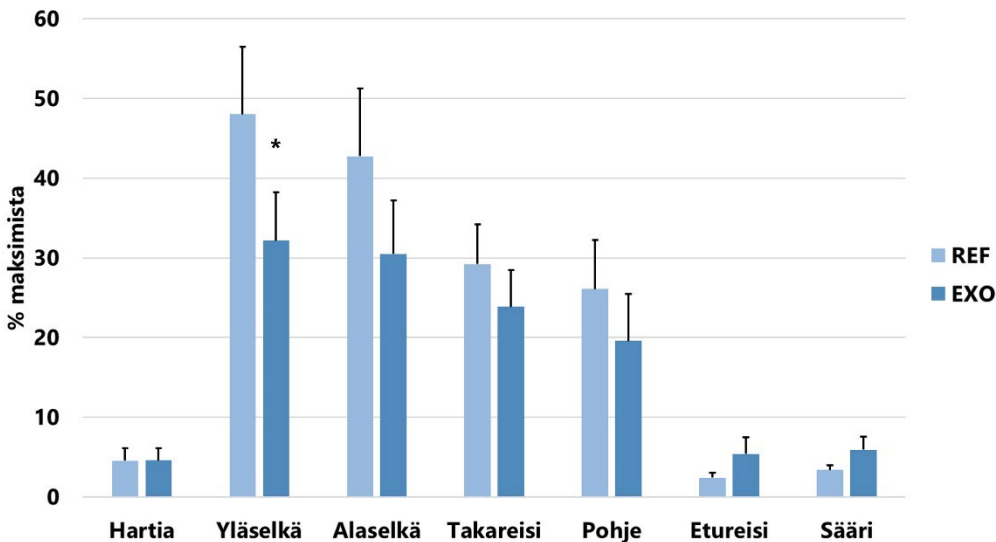
Lihaksen sähköistä aktiivisuutta mitattiin työn aikana seitsemästä lihaksesta. Dynaamisessa työssä lihassähköisessä aktiivisuudessa ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja ilman eksoskeletonia ja eksoskeletonin kanssa suoritettussa työssä (kuva 10 ja 11). Staattisessa työssä yläselän lihasaktiivisuus laski tilastollisesti merkitsevästi (32,9 %) eksoskeletonin kanssa työskenneltäessä (kuva 12).



Kuva 10. Lihassähköinen aktiivisuus lihaksittain verrattuna maksimaaliseen aktiivisuuteen dynamisessa työssä ergonomisella nostotavalla ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo ± keskivirhe).

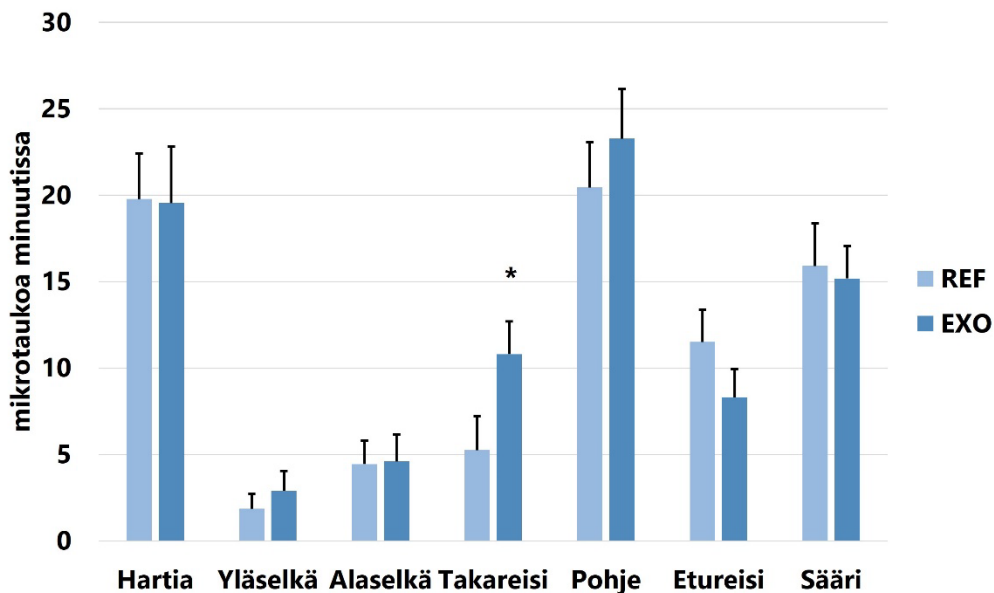


Kuva 11. Lihassähköinen aktiivisuus lihaksittain verrattuna maksimaaliseen aktiivisuuteen dynaamisessa työssä epäergonomisella nostotavalla ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo ± keskivirhe).

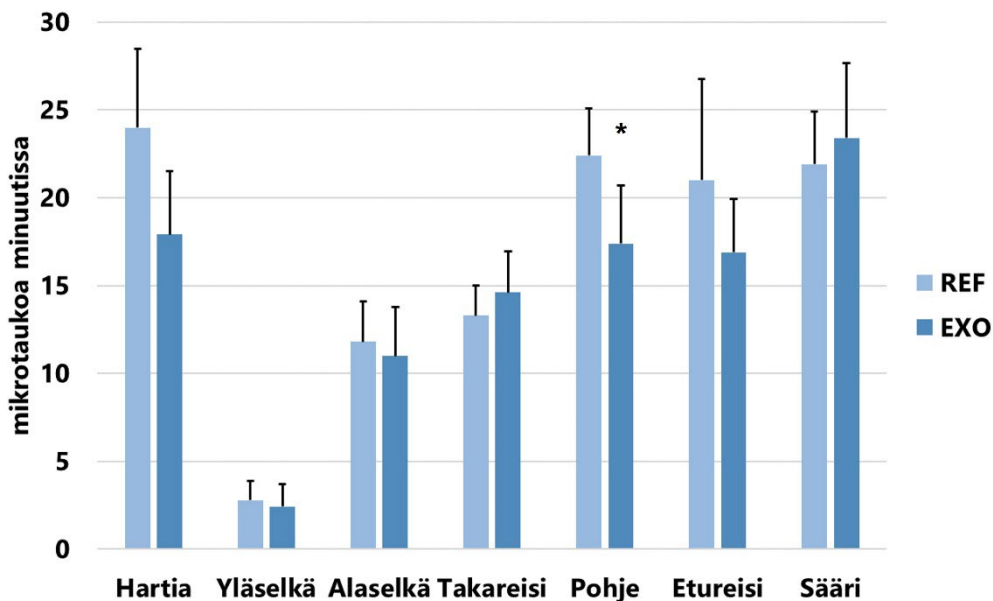


Kuva 12. Lihassähköinen aktiivisuus lihaksittain verrattuna maksimaaliseen aktiivisuuteen staattisessa työssä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo ± keskivirhe). \* = Lihaskäyttö oli tilastollisesti merkitsevästi pienempää eksoskeletonin kanssa verrattuna ilman eksoskeletonia tehtyyn työhön,  $p < 0,05$ .

Lihassähköisestä toiminnasta analysoitiin myös mikrotaukojen lukumäärä minuutissa. Ergonomisessa dynaamisessa työssä (kuva 13) mikrotaukoja oli tilastollisesti enemmän (144 %) takareidessä eksoskeletonia käytettäessä. Epäergonomisessa dynaamisessa työssä (kuva 14) pohkeen mikrotauot vähenivät eksoskeletonia käytettäessä (22,3 %).



Kuva 13. Mikrotaukojen määrä (keskiarvo  $\pm$  keskivirhe) ergonomisessa dynaamisessa työssä. \* = Mikrotaukojen määrä oli tilastollisesti merkitsevästi suurempaa eksoskeletonin kanssa verrattuna ilman eksoskeletonia tehtyyn työhön,  $p < 0,05$ .



Kuva 14. Mikrotaukojen määrä (keskiarvo  $\pm$  keskivirhe) epäergonomisessa dynaamisessa työssä. \* = Mikrotaukojen määrä oli tilastollisesti merkitsevästi pienempää eksoskeletonin kanssa verrattuna ilman eksoskeletonia tehtyyn työhön,  $p < 0,05$ .

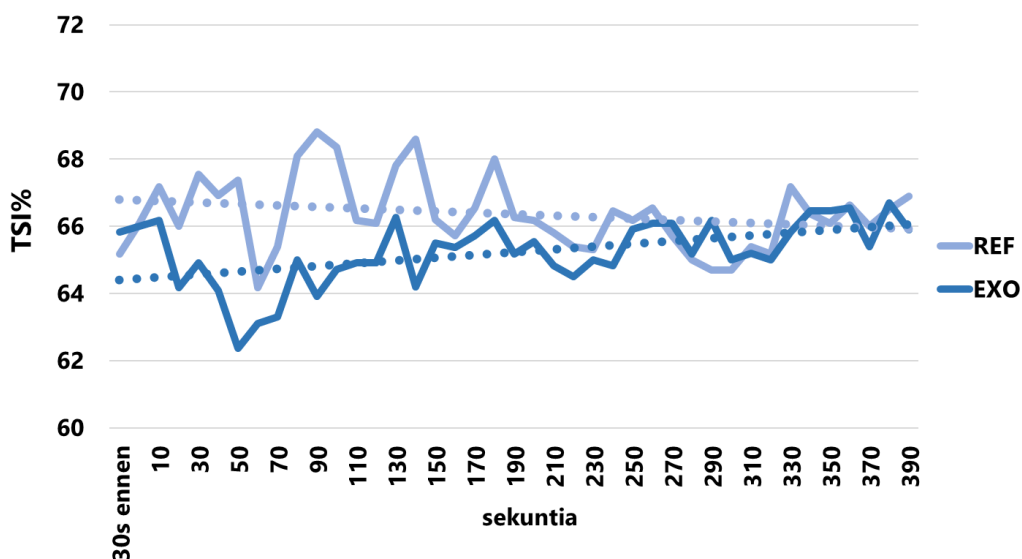
#### 4.1.3 Lihaskudoksen happisaturaatio

Lihaksen happisaturaatiota eli happikylläisyyttä mitattiin lähi-infrapunaspektrometrialla. Kudoksen happisaturaatioindeksi (TSI%) ilmaisee kudoksen happipitoisuuden suhteessa sen maksimaaliseen happipitoisuuteen. Mittaukset tehtiin laboratoriotutkimuksen dynaamisen työn osassa reidestä ja staattisessa osassa lisäksi myös vasemmalta alaselästä.

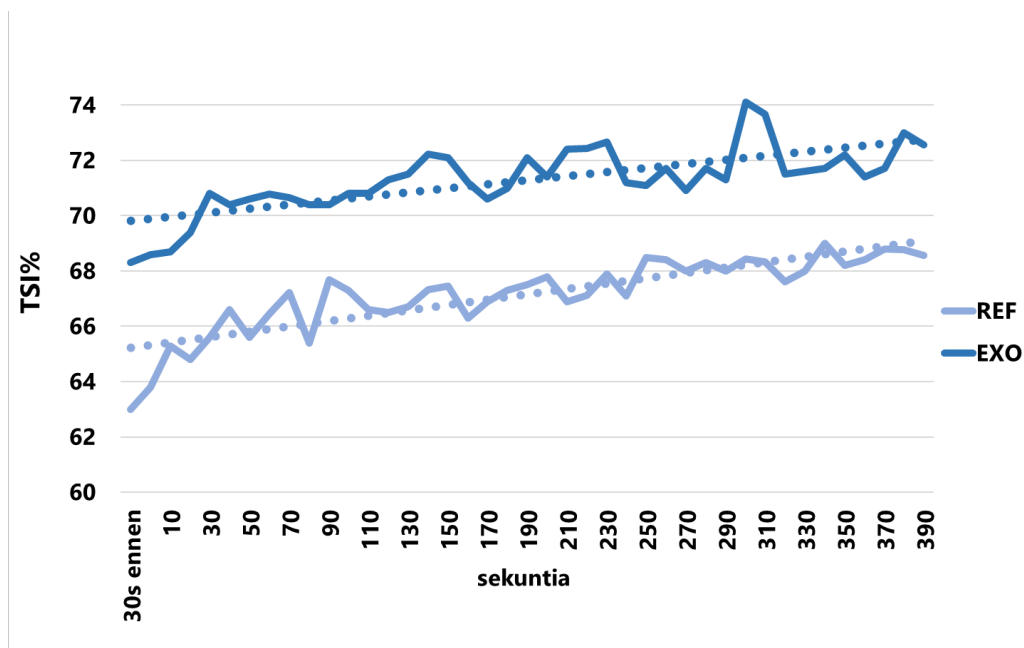
Happisaturaatiossa ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja eksoskeletonin kanssa ja ilman sitä tehdyn työn välillä (taulukko 3). Reiden keskimääräinen happisaturaatio dynaamisen ergonomisen ja epäergonomisen työn aikana on esitetty kuvissa 15 ja 16, ja selän keskimääräinen happisaturaatio staattisessa työssä kuvassa 17. Staattisessa työssä selän TSI% laski nopeammin ilman eksoskeletonia.

Taulukko 3. Lihasten keskimääräinen happisaturaatio dynaamisen ergonomisen ja epäergonomisen sekä staattisen työn aikana ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo ± keskihajonta).

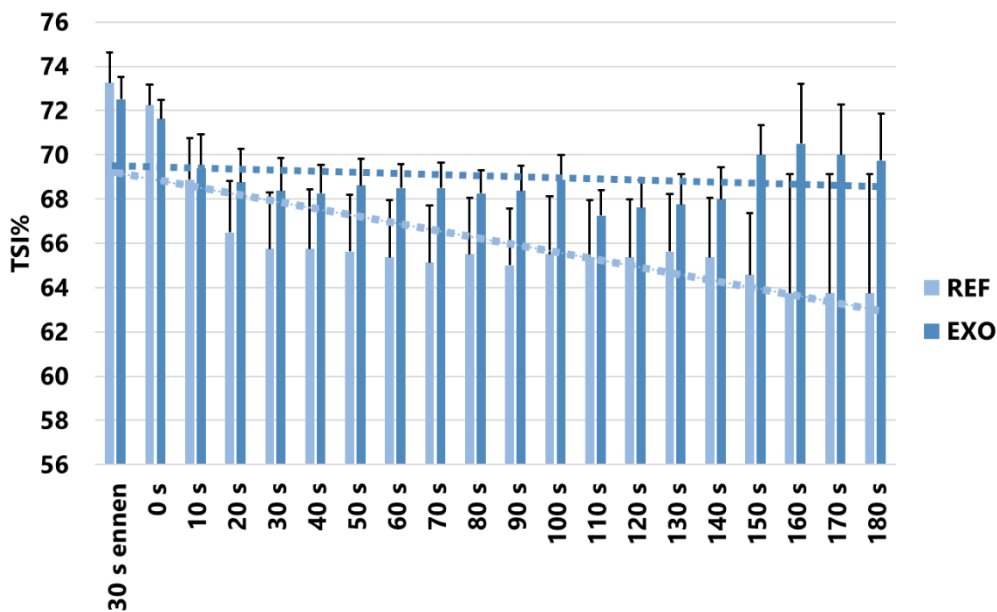
Mittaus	Mittauspaikka	REF	EXO
Ergonominen	Etureisi	65,6 ± 5,6 %	64,7 ± 5,3 %
Epäergonominen	Etureisi	67,1 ± 3,8 %	71,3 ± 5,1 %
Staattinen	Alaselkä	65,8 ± 7,5 %	69,1 ± 3,9 %
Staattinen	Takareisi	68,1 ± 8,4 %	68,3 ± 7,4 %



Kuva 15. Reiden happisaturaatio (TSI%) ergonomisessa työssä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).



Kuva 16. Reiden happisaturaatio (TSI%) epäergonomisessa työssä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).



Kuva 17. Selän happisaturaatio (TSI%) staattisessa työssä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo ± keskivirhe).

#### 4.1.4 Lihask rakenne ja lihaksen kimmo-ominaisuudet

Lihaskudoksen rakenne luo edellytykset sen toiminnalle ja tästä syystä lihaksen hetkelliset rakenteelliset muutokset raskaan fyysisen työn ja väsymisen seurauksena vaikuttavat välittömästi lihaksen toimintaan. Lihaksen pennaatiokulma on koko lihaksen päällimmäisen kalvon ja yksittäisten lihassäikeiden kalvojen välinen kulma. Mitä suurempi kulma on, sen isompi on nk. lihaksen fysiologinen poikkipinta-ala ja kyky tuottaa voimaa. Pennaatiokulman kasvaminen työn aikana kertoo lihaksen väsymisen aiheuttamasta kompensoitavasta maksimaalisen voimatason ylläpitämiseksi. Takareiden pennaatiokulma kasvoi eksoskeletonia käytettäessä dynaamisessa työssä, sekä ergonomisella että epäergonomisella nostotavalla (taulukko 4).

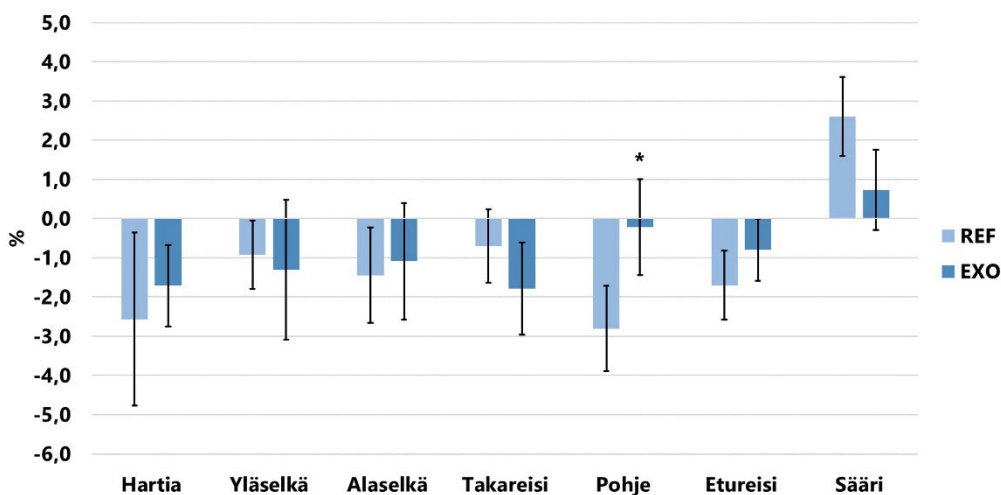
Ultraäänellä mitatuista lihasrakenteen muuttujista lihaksen poikkipinta-ala kasvaa tyypillisesti fyysisen työn seurauksena johtuen lihaksen akuutista turvotuksesta. Dynaamisessa työssä ergonomisella nostotavalla havaittiin pinta-alan kasvua takareidessä (taulukko 4). Pennaatiokulman ja poikkipinta-alan muutoksissa ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevää eroa eksoskeletonin kanssa ja ilman sitä suoritettun työn välillä.

*Taulukko 4. Etu- ja takareiden lihassolujen pennaatiokulma ja lihaksen poikkipinta-ala ennen ja jälkeen dynaamisen ergonomisen ja epäergonomisen sekä staattisen työn ilman eksoskeletonia ja eksoskeletonin kanssa (keskiarvo ± keskihajonta).*

Pennaatiokulma (°)	Lihaks	Ilman eksoskeletonia		Eksoskeletonin kanssa	
		Ennen	Jälkeen	Ennen	Jälkeen
<b>Ergonominen työ</b>	Etureisi	10,4 ± 2,4	9,4 ± 2,3	8,7 ± 2,5	9,3 ± 2,1
	Takareisi	9,3 ± 2,7	8,9 ± 1,5	8,3 ± 1,1	10,0 ± 2,5
<b>Epäergonominen työ</b>	Etureisi	8,6 ± 1,2	9,6 ± 2,4	9,1 ± 2,2	8,8 ± 1,0
	Takareisi	9,3 ± 2,3	9,4 ± 1,4	7,8 ± 1,9	9,6 ± 2,0
<b>Staattinen työ</b>	Etureisi	9,4 ± 2,1	9,0 ± 0,2	10,1 ± 2,0	10,0 ± 1,0
	Takareisi	9,1 ± 1,1	9,2 ± 1,5	9,4 ± 1,5	9,3 ± 1,5
Poikkipinta-ala (mm <sup>2</sup> )	Lihaks	Ennen	Jälkeen	Ennen	Jälkeen
<b>Ergonominen työ</b>	Etureisi	2,6 ± 0,7	2,4 ± 0,7	2,5 ± 0,6	2,4 ± 0,6
	Takareisi	1,3 ± 0,4	1,2 ± 0,2	1,2 ± 0,4	1,3 ± 0,5
<b>Epäergonominen työ</b>	Etureisi	2,3 ± 0,4	2,3 ± 0,6	2,4 ± 0,6	2,4 ± 0,4
	Takareisi	1,3 ± 0,4	1,1 ± 0,4	1,3 ± 0,6	1,7 ± 1,2
<b>Staattinen työ</b>	Etureisi	1,8 ± 0,3	1,8 ± 0,4	1,8 ± 0,6	1,7 ± 0,5
	Takareisi	1,5 ± 0,3	1,4 ± 0,3	1,6 ± 0,6	1,4 ± 0,3



Lihaksen kimmo-ominaisuuksia tutkittiin myotonometrin avulla. Elastisuudessa ja jäykkyydessä ei havaittu tilastollisesti merkitseviä muutoksia missään mitatuissa lihaksissa. Ainoastaan pohjelihaksen kiinteydessä havaittiin kasvua eksoskeletonia käytettäessä ergonomisessa työssä (kuva 18). Ilman eksoskeletonia työskennellessä pohkeen kiinteyden muutos oli  $-2,8\% \pm 1,1\%$ , eksoskeletonin kanssa se oli  $-0,2\% \pm 1,2\%$ .

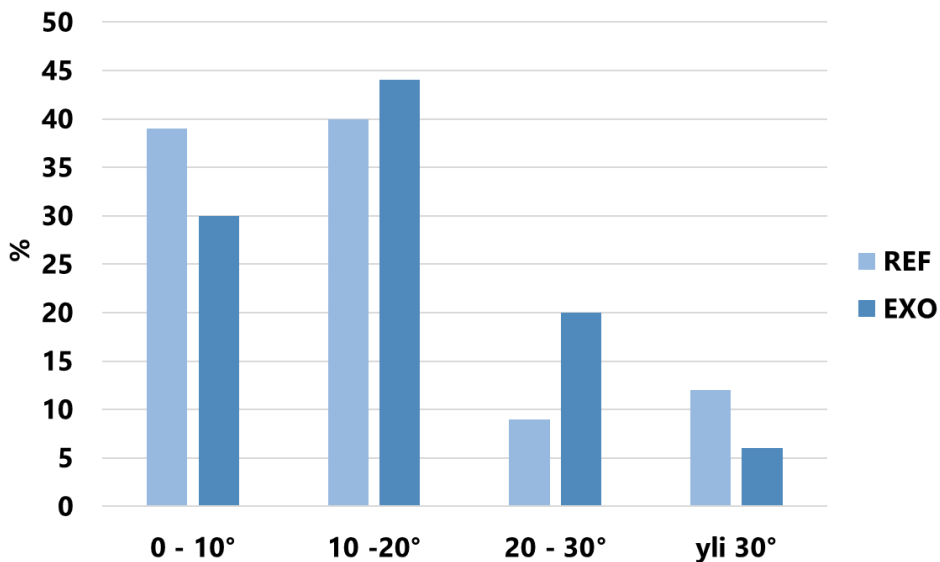


Kuva 18. Dynaamisen ergonomisen työn aiheuttamat prosentuaaliset kiinteyden muutokset ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo  $\pm$  keskivirhe). \* = Kiinteyden muutos oli tilastollisesti merkitsevästi pienempää eksoskeletonin kanssa verrattuna ilman eksoskeletonia tehtyyn työhön,  $p < 0,05$ .

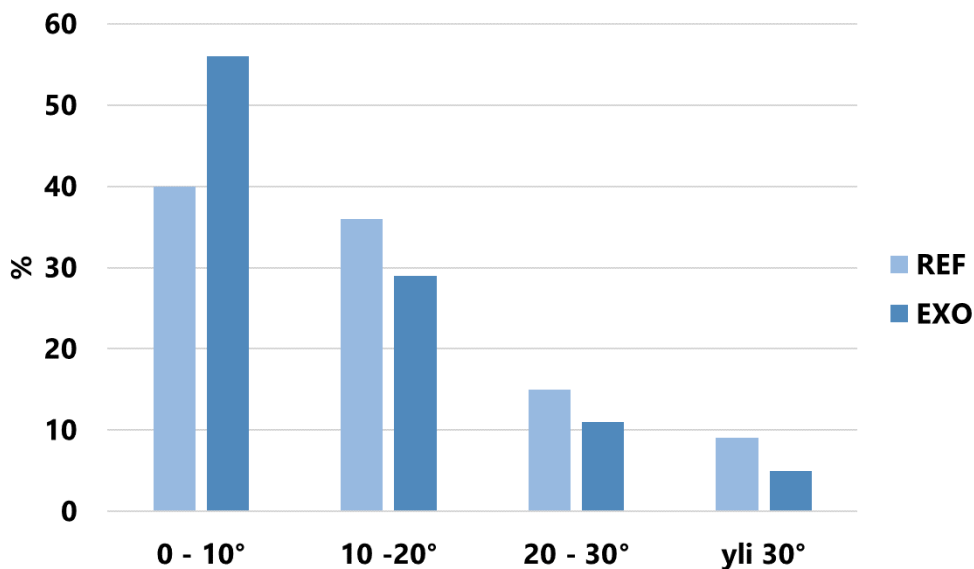
## 4.2 Kenttämittaukset

### 4.2.1 Työasennot

Kenttätutkimuksessa työskentelyn aikaisia selän liikekulmia mitattiin vasemmalle puolelle ylä- ja alaselkään kiinnitetyillä sensoreilla (kuvat 19 ja 20). Yläselän mittauspiste oli epäkäsilias (*m. trapezius*) *processus transversus* TH6- TH8. Alaselän mittauspiste oli pitkä selkälihas (*m. longissimus thoracis*) *processus transversus* L4-L5. Yläselässä on havaittavissa eksoskeletoniin nojaamista, jolloin alaselkä on pienessä  $0-10^\circ$  etunojassa yli puolet työajasta.



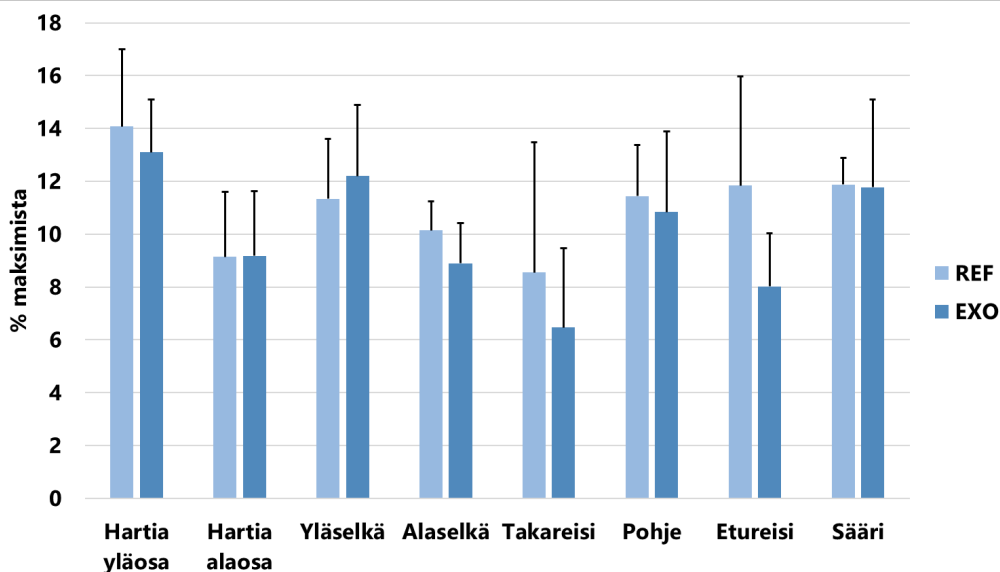
Kuva 19. Koko työajalla mitatut yläselän kulmat (% työajasta) ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).



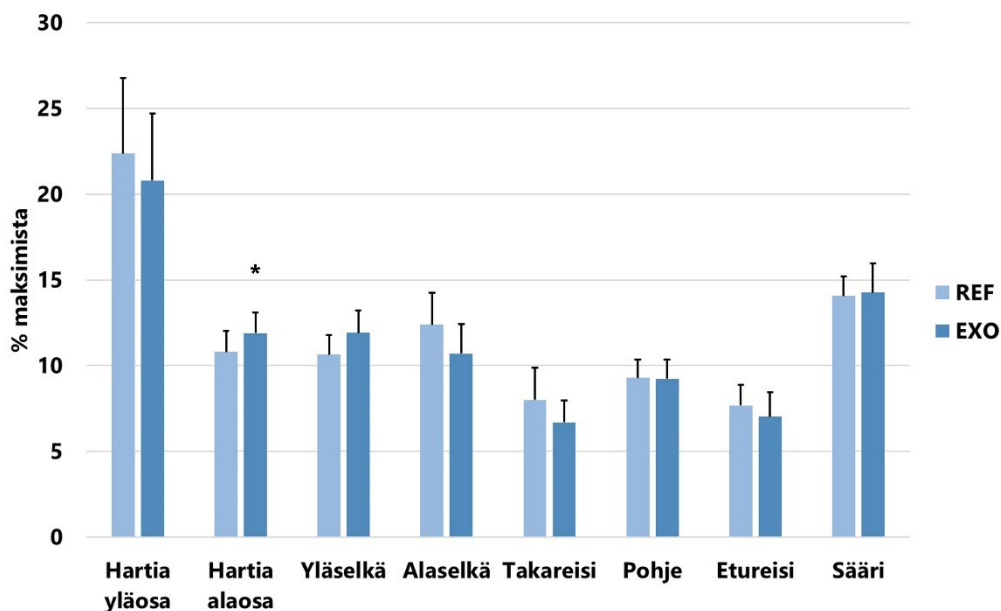
Kuva 20. Koko työajalla mitatut alaselän kulmat (% työajasta) ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).

#### 4.2.2 Lihassähköinen aktiivisuus (EMG)

Autenttisissa työoloissa eksoskeleton kevensi kokonaiskuormitusta VDL syöttö -linjalla (kuva 21) 9,1 % ± 0,6 %. CP syöttö -linjalla (kuva 22) kokonaiskuormitus keveni 2,5 % ± 0,5 % eksoskeletonia käytettäessä, mutta hartian alaosan kuormitus kasvoi tilastollisesti merkitsevästi 10,2 %.

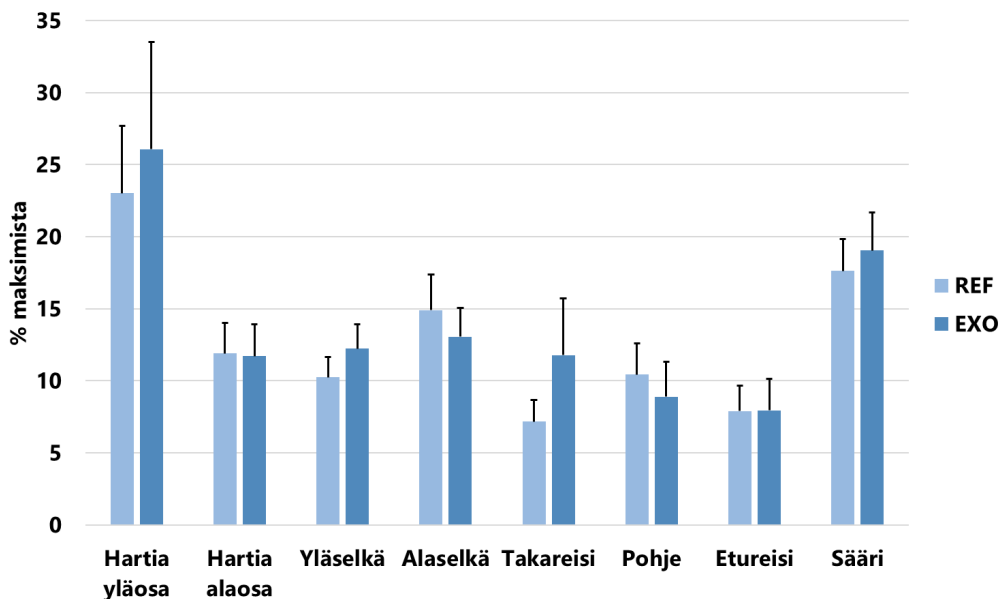


Kuva 21. Kenttätutkimuksessa VDL syöttö -linjalla (n=6) mitattu lihassähköinen aktiivisuus lihaksittain verrattuna maksimaaliseen aktiivisuuteen ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) työskenneltäessä (keskiarvo ± keskvirhe).

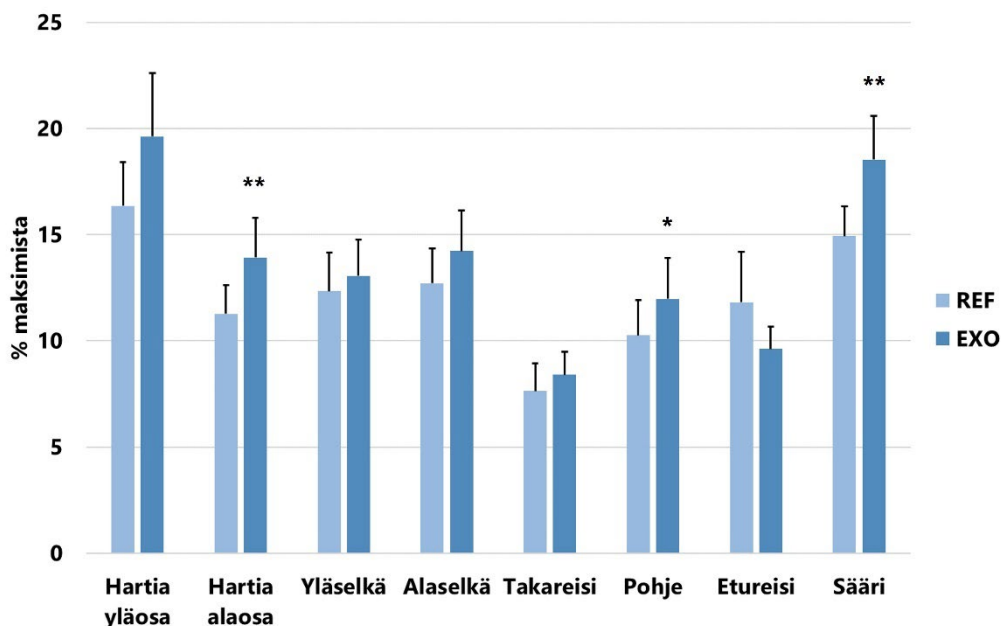


Kuva 22. Kenttätutkimuksessa CP syöttö -linjalla ( $n=12$ ) mitattu lihassähköinen aktiivisuus lihaksittain verrattuna maksimaaliseen aktiivisuuteen ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) työskenneltäessä (keskiarvo  $\pm$  keskivirhe). \* = Lihassähköinen aktiivisuus oli tilastollisesti merkitsevästi suurempaa eksoskeletonin kanssa,  $p<0,05$ .

Eksoskeleton lisäsi kokonaiskuormitusta VDL luisu -linjalla (kuva 23)  $6,9\% \pm 0,8\%$  ja CP luisu -linjalla (kuva 24)  $12,3\% \pm 0,5\%$ . Kuormitus lisääntyi tilastollisesti merkitsevästi hartian alaosassa (23,0%), pohkeessa (16,5%) ja sääressä (24,2%) CP luisulla työskenneltäessä.

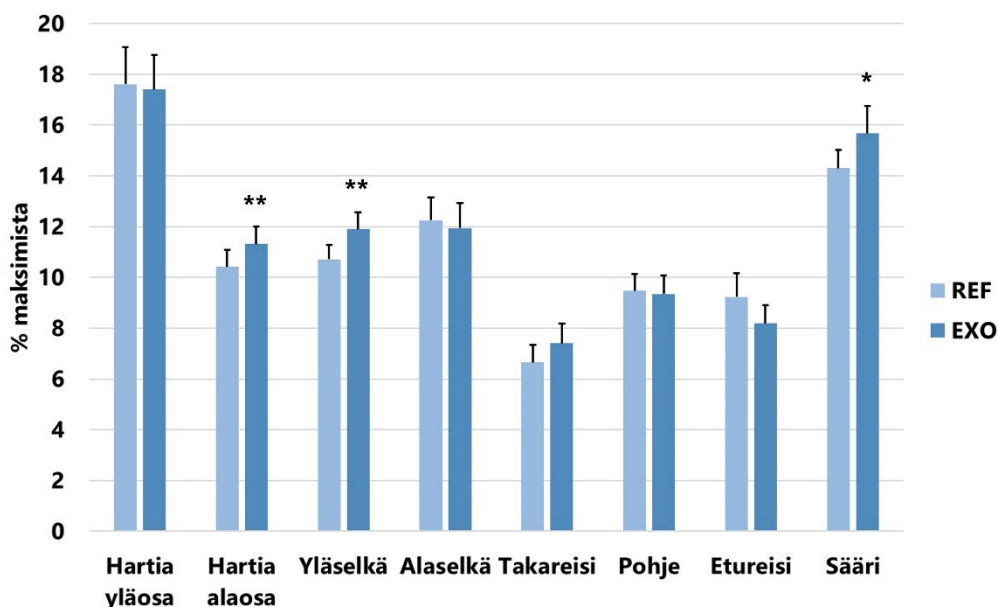


Kuva 23. Kenttätutkimuksessa VDL luisu -linjalla (n=7) mitattu lihassähköinen aktiivisuus lihaksittain verrattuna maksimaaliseen aktiivisuuteen ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) työskenneltäessä (keskiarvo ± keskivirhe).



Kuva 24. Kenttätutkimuksessa CP luisu -linjalla ( $n=17$ ) mitattu lihassähköinen aktiivisuus lihaksittain verrattuna maksimaaliseen aktiivisuuteen ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) työskenneltäessä (keskiarvo  $\pm$  keskiarvo). \* = Lihassähköinen aktiivisuus oli tilastollisesti merkitsevästi suurempaa eksoskeletonin kanssa,  $*p<0,05$ ,  $**p<0,01$ .

Kaikilla linjoilla työskentelyä kokonaisuutena tarkasteltaessa eksoskeleton lisäsi hartian alaosan (11,8 %), yläselän (9,7 %) ja säären (11,6 %) kuormitusta (lihassähköistä aktiivisuutta) tilastollisesti merkitsevästi (kuva 25).



Kuva 25. Kenttätutkimuksessa mitattu lihassähköinen aktiivisuus lihaksittain verrattuna maksimaaliseen aktiivisuuteen ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) kaikilla linjoilla työskenneltäessä (keskiarvo  $\pm$  keskivirhe). \* = Lihassähköinen aktiivisuus oli tilastollisesti merkitsevästi suurempaa eksoskeletonin kanssa, \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ .

#### 4.2.3 Lihaskudoksen happisaturaatio

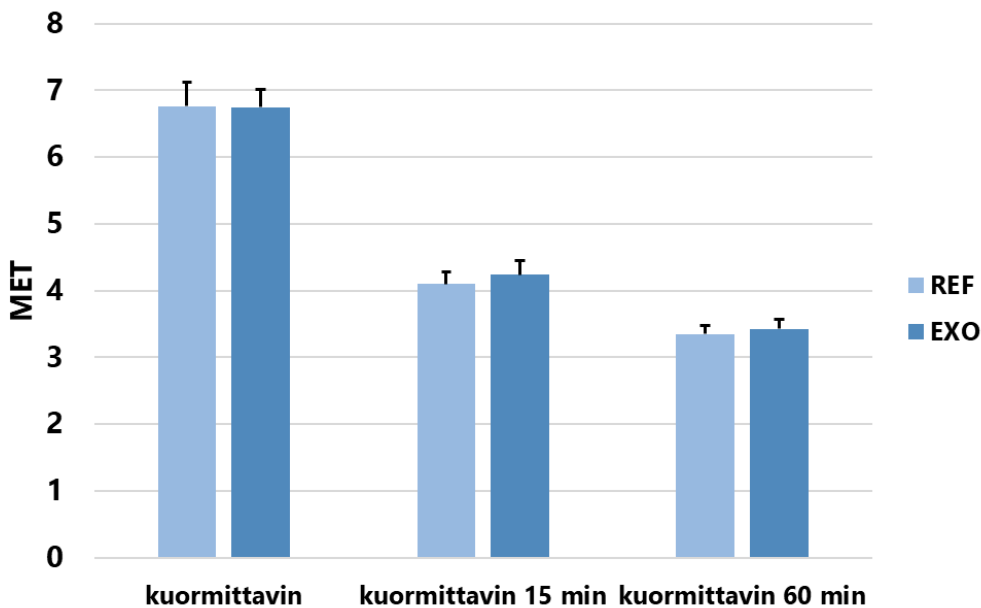
Autenttisissa työoloissa selkälihaksen TSI%:n mittaus oli teknisesti haastavaa ja analyysikelpoista dataa kertyi vain 7 tutkittavalta. Kenttätutkimuksessa alaselän happisaturaatiossa ei havaittu eroja eksoskeletonin kanssa ja ilman sitä tehdyn työn välillä. TSI% oli keskimäärin  $80,0 \pm 2,8$  % ilman eksoskeletonia ja  $79,7 \pm 2,2$  % eksoskeletonin kanssa.

#### 4.2.4 Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus

Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitusta arvioitiin sydämen sykkeen sekä aineenvaihduntaa kuvaavan MET-yksikön avulla. Autenttisissa työolosuhteissa eksoskeleton ei vaikuttanut hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormituksen tasoon. Tarkastelua tehtiin myös sukupuolen ja pituuden suhteen (taulukko 5). Pakettilajittelutyön piikkikuormitus ilman eksoskeletonia ja sen kanssa on nähtävissä kuvassa 26.

Taulukko 5. Kenttätutkimuksen pakettilajittelutyön keskimääräinen syketaso ja MET kaikilla tutkittavilla, miehillä ja naisilla sekä alle ja yli 175 cm pituisilla tutkittavilla ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo ± keskihajonta).

Syke	Kaikki	Naiset	Miehet	< 175 cm	> 175 cm
	n = 33	n = 10	n = 23	n = 18	n = 14
REF	100,2 ± 11,1	100,9 ± 13,6	99,8 ± 9,9	100,9 ± 11,7	98,3 ± 10,2
EXO	101,7 ± 9,9	101,5 ± 6,9	101,7 ± 10,9	100,6 ± 8,7	101,2 ± 9,6
MET	Kaikki	Naiset	Miehet	< 175 cm	> 175 cm
	n = 33	n = 10	n = 23	n = 18	n = 14
REF	2,8 ± 0,6	2,6 ± 0,5	2,9 ± 0,6	2,9 ± 0,7	2,7 ± 0,4
EXO	2,9 ± 0,6	2,5 ± 0,3	3,0 ± 0,6	2,9 ± 0,6	2,9 ± 0,6



Kuva 26. Pakettilajittelutyön piikkikuormitus (korkein hetkellinen, 15 ja 60 minuutin keskiarvo ± keskivirhe) meta-bolisena ekvivalenttina (MET) ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) työskenneltäessä.



#### 4.2.5 Lihaksen kimmo-ominaisuudet

Lihasten hienorakenteessa ei havaittu tilastollisesti merkittäviä muutoksia kiinteydessä, elastisuudessa tai jäykkyydessä.

#### 4.2.6 Lihassoima

Ennen neljän tunnin todellisessa työympäristössä työskentelyä tutkittavien maksimipuristusvoima oli  $39,8 \pm 9,7$  kg. Työn jälkeen mitattu maksimipuristusvoima ei muuttunut ja puristusvoima oli samanlainen sekä ilman eksoskeletonia ( $40,7 \pm 10,3$  kg) että eksoskeletonin kanssa ( $39,5 \pm 9,5$  kg) työskentelyn jälkeen.

#### 4.2.7 Subjektiiiset arviot

Pakettilajittelutyön keskimääräinen koettu kuormitus oli subjektiivisten arvioiden perusteella "kevyt" (RPE 11) (taulukko 6). Kuormittuneisuuden taso laski eksoskeletonia käytettäessä miehillä ja yli 175 cm pituisilla henkilöillä, mutta nousi naisilla ja alle 175 cm pituisilla henkilöillä. Koetun epämiellyttävyyden arvioinnissa naiset ja alle 175 cm pituiset henkilöt arvioivat eksoskeletonin kanssa työskentelyn hiukan epämiellyttävämmäksi, mutta yleisesti arviot olivat keskimäärin neutraaleja.

*Taulukko 6. Kenttätutkimuksen pakettilajittelutyön koettu kuormittuneisuus (RPE) ja epämiellyttävyys (VAS) kaikilla tutkittavilla, miehillä ja naisilla sekä alle ja yli 175 cm pituisilla tutkittavilla ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo  $\pm$  keskihajonta).*

RPE	Kaikki n = 41	Naiset n = 12	Miehet n = 29	< 175 cm n = 21	> 175 cm n = 19
REF	11,0 $\pm$ 2,7	11,2 $\pm$ 2,1	11,0 $\pm$ 2,9	10,3 $\pm$ 2,5	11,6 $\pm$ 2,7
EXO	10,6 $\pm$ 3,0	11,6 $\pm$ 1,9	10,1 $\pm$ 3,3	11,3 $\pm$ 2,2	10,2 $\pm$ 3,1
VAS	Kaikki n = 41	Naiset n = 12	Miehet n = 29	< 175 cm n = 21	> 175 cm n = 19
REF	4,3 $\pm$ 2,9	3,9 $\pm$ 2,9	4,5 $\pm$ 3,0	3,1 $\pm$ 2,5	5,7 $\pm$ 2,9
EXO	4,6 $\pm$ 2,5	5,5 $\pm$ 2,2	4,2 $\pm$ 2,5	4,7 $\pm$ 2,3	4,6 $\pm$ 2,7

SUS-kyselyn tulosten perusteella vahvimmin oltiin samaa mieltä (3,8/5) väittämästä "Luu-  
len, että useimmat oppisivat eksoskeletonin käytön hyvin nopeasti." SUS-kyselyn kokonaispisteiden keskiarvo oli  $53,9 \pm 18,0$  pistettä, tarkoittaen, että eksoskeleton soveltuu työtehtävään heikosti. Yli 175 cm pituiset henkilöt arvioivat käytettävyyden hiukan

paremmaksi ( $57,7 \pm 18,9$  pistettä) kuin alle 175 cm pituiset ( $51,1 \pm 16,3$ ). Miesten ja naisten välillä eroa ei ollut eroja eksoskeletonin käytettävyyssarviossa.

Lihasten väsymystaso oli eksoskeletonin käytön jälkeen subjektiivisesti arvioiden keskimäärin 2,1/6 asteikolla 0 "ei ollenkaan väsyneet" – 6 "erittäin väsyneet". Liikkuvuus arvioitiin olevan eksoskeletonin kanssa keskimäärin 2,7/6 asteikolla 0 = "normaali" – 6 = "hyvin vaikeaa". Yleinen epämukavuustaso oli eksoskeletonin käytön kanssa keskimäärin 3,4/6 asteikolla 0 = "ei lainkaan epämukava" – 6 = "erittäin epämukava" ja käyttömukavuus arvioitiin keskimäärin tasolle -0,7 asteikolla -3 = "hyvin epämiellyttävä" – 3 = "hyvin miellyttävä".

Yleisiä huomioita kenttätutkimukseen osallistuneilta:

"Liikkuvuus rajoittunut, vaikea nousta häkkeihin. Jalan nosto, jalka suorana -toiminto rajoittunut eksoskeletonilla."

"Rintapanssari hankasi."

"Ehkä väärä työpiste eksoskeletonin hyötyjen saamiseksi."

"Vaikea nostaa laatikoita."

"Painavien (laatikoiden) kanssa toimi paremmin."

"Eksoskeleton on tielläni. Auttaa jalkoja, mutta selkää ei niinkään."

## 5 YHTEENVETO

Tämän hankekokonaisuuden tutkimushypoteesi oli, että ulkoisen tukirangan, eksoskeletonin, avulla työntekijän sekä tuki- ja liikunta- että hengitys- ja verenkiertoelimistöön kohdistuva kuormitus pienenee. Tulokset kokonaisuudessaan kuitenkin osoittivat tutkimushypoteesin vääräksi. Tulosten pohjalta voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset.

Laboratoriotutkimuksen osalta:

- Ilman eksoskeletonia tehdyssä dynaamisessa nostotyössä kaikkien lihasten keskimääräinen kuormitus oli ergonomisen nostotekniikan osalta 24,4 % ja epäergonomisen 17,4 %MEMG. Staattisessa eteenpäin kumartuneessa työssä kuormitus oli 26,0 %MEMG.
- Eksoskeletonin kanssa tehdyssä työssä vastaavat arvot olivat 22,5 %, 18,6 % ja 19,7 %MEMG
- Mitatuista lihaksista yläselkä kuormittui eniten, ergonomisessa työssä 62 %, epäergonomisessa 49 % ja staattisessa työssä 48 %MEMG ilman eksoskeletonia työskenneltäessä
- Eksoskeletonin kanssa työskenneltäessä vastaavat arvot olivat 44 %, 36 % ja 32 %MEMG osoittaen, että yläselän osalta eksoskeletonin käytöstä oli hyötyä.
- Ergonomisessa nostotyössä eksoskeleton vähensi kuormitusta neljässä (yläselkä, takareisi, etureisi, sääri) ja lisäsi kolmessa lihaksessa (hartia, alaselkä, pohje). Erot yläselän lihaksia lukuun ottamatta olivat pieniä.
- Epäergonomisessa nostotyössä eksoskeleton vähensi kuormitusta kolmessa (yläselkä, takareisi, etureisi) ja lisäsi neljässä lihaksessa (hartia, alaselkä, pohje, sääri). Erot olivat hieman vähäisemmät verrattuna ergonomiseen nostotyöhön.
- Staattisessa nostotyössä eksoskeleton vähensi selkeästi ns. takaketjun (yläselkä, alaselkä, takareisi, pohje) kuormitusta. Yläselän osalta muutos oli merkitsevä.
- Nostotyössä eksoskeletonin käytöllä oli positiivisia vaikutuksia reisilihaksen happisaturaatioon.
- Alaselän lihasten happisaturaatio pysyi korkeammalla tasolla staattisessa työssä eksoskeletonia käytettäessä.
- Eksoskeletonin käytöllä ei ollut vaikutusta lihaksen rakenteeseen tai kimmo-ominaisuuksiin.
- Eksoskeletonin käytöllä ei ollut vaikutusta työn keston.

- Subjektiiivinen arvio työn kuormittavuudesta oli matalampaa eksoskeletonia käytettäessä kaikilla työtavoilla. Suurin vaikutus oli epäergonomisessa nostotyössä.

Kenttätutkimuksen osalta:

- Autenttisessa työympäristössä eksoskeletonin käytöllä oli sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia. Lihaksiston keskimääräinen kuormittuneisuus kaikkien työvaiheiden ajalta oli 12,0 % ilman eksoskeletonia ja 12,6 %MEMG eksoskeletonin kanssa.
- VDL syöttö: Lihaksiston keskimääräinen kuormittuneisuus oli 11,0 % ilman eksoskeletonia ja 10,0 %MEMG eksoskeletonin kanssa. Kuormituksen pienenemä oli 9,1 %.
- VDL luisu: Lihaksiston keskimääräinen kuormittuneisuus kaikkien työvaiheiden ajalta oli 13,0 % ilman eksoskeletonia ja 13,9 %MEMG eksoskeletonin kanssa. Kuormituksen kasvu oli 6,9 %.
- CP syöttö: Lihaksiston keskimääräinen kuormittuneisuus kaikkien työvaiheiden ajalta oli 11,8 % ilman eksoskeletonia ja 11,5 %MEMG eksoskeletonin kanssa. Kuormituksen pienenemä oli 2,5 %.
- CP luisu: Lihaksiston keskimääräinen kuormittuneisuus kaikkien työvaiheiden ajalta oli 12,2 % ilman eksoskeletonia ja 13,7 %MEMG eksoskeletonin kanssa. Kuormituksen kasvu oli 12,3 %.
- Liikekulmamittaus osoitti, että eksoskeletonia käytettäessä alaselkä pysyi suorempana mutta yläselkä taipui enemmän työvuoron aikana.
- Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus oli 2,8 MET. Tämän perusteella mitattu työ oli keskimäärin kevyttä (<3 MET). Yksilöllinen vaihtelu kuitenkin osoitti, että työ voidaan joidenkin työntekijöiden kohdalla luokitella keskiraskaaksi.
- Yksittäisten lyhyiden (muutamia minutteja) piikkikuormitusten MET-arvo oli 6,8 (vastaa raskasta työtä). Vastaavat MET-arvot kuormittavimmalle 15 ja 60 minuutin työjaksolle olivat 4,1 ja 3,3 MET. Kuormittavimmat 15 ja 60 minuuttia vastasivat kuormittavuudeltaan keskiraskasta työtä.
- Eksoskeletonilla ei ollut aineenvaihdunnallista kuormitusta lisäävää vaikutusta.
- Subjektiiivinen arvio työn kuormittavuudesta oli keskimäärin kevyttä (RPE 11,0) ja jossain määrin epämiellyttävää (VAS 4,3). Eksoskeletonin kanssa tehdyn työn kuormittavuus ja miellyttävyys oli samalla tasolla.
- Naiset arvioivat eksoskeletonin käytön epämiellyttävämmäksi kuin miehet.

- Naisilla ja alle 175 cm pitkällä työntekijöillä eksoskeletonin käyttö nosti koettua kuormittavuutta ja käytön epämiellyttävyyttä. Sen sijaan miehet ja yli 175 cm pitkät työntekijät kokivat asian päinvastaisena.
- Keskimäärin eksoskeletonin käytettävyys arvioitiin heikoksi. Työntekijän pituudella oli lievä käytettävyttä parantava merkitys.
- Laitteen säätömahdollisuudet, puettavuus ja käytettävyys olivat rajalliset. Tämä saattoi vaikuttaa tuloksiin negatiivisesti.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Eksoskeletonien eli ulkoisten tukirankojen valmistajat suosittelevat laitetta työn keventämisen tehokkaana apuvälineenä. Toistaiseksi mitattu tieto niiden käytön vaikutuksista on ollut hyvin vähäistä. Aiempien subjektiivisten arvioiden mukaan niillä on positiivisia vaikutuksia, mutta esimerkiksi painonsa vuoksi niillä voi olla myös negatiivisia vaikutuksia. Tässä tutkimuksessa selvitettiin useilla fysiologisilla mittauksilla ja subjektiivisilla arvioilla kuinka ulkoinen tukiranka vaikuttaa työssä kuormittuneisuuteen.

Hankkeen laboratoriotutkimuksen tulosten perusteella eksoskeletonin käyttöä voidaan suositella selkeästi eteenpäin kumartuneissa, staattisissa työasennoissa tehtävään työhön. Nostotyössä apuvälineen vaikutus oli ristiriitainen: ergonomisella nostotavalla kuormitus hieman pieneni ja epäergonomisella kasvoi, jolloin sen käyttöä nostotyöhön ei voida yksiselitteisesti suositella.

Kenttätutkimuksen tulosten perusteella apuvälineen käyttöä voidaan suositella vain työskennellessä VDL syöttölinjalla. Tässäkin tapauksessa on suositeltavaa käyttää harkintaa ja erityisesti arvioida mahdollisia hyötyjä yhdessä työntekijöiden kanssa. VDL ja CP luisulinjoilla eksoskeleton lisäsi lihaksiston kuormittuneisuutta ja näin ollen sen käyttöä kyseisissä töissä ei voida suositella. CP syöttölinjalla apuvälineen merkitys ei ollut merkittävä positiiviseen tai negatiiviseen suuntaan. On kuitenkin hyvä muistaa, että tutkittu laite on kehityskaarensa alkuvaiheissa (kuten muutkin vastaavat) ja laitteistojen käytettävyyden, mekaanisten ominaisuuksien ja puettavuuden kehittyessä niiden käytön tarpeellisuutta ja hyötyjä on syytä arvioida uudelleen.

## 7 PROJEKTIN VIESTINTÄ

Hankkeesta on viestitty seuraavasti:

- Eksoskeleton – uutta tekniikkaa kädet koholla tehtävän työn keventämiseen. Webinaari, Meditas 04/21.
- Exoskeletons in work – preliminary research results from Finland. Webinaari, Meditas 8.9.2021.
- Eksoskeletonit työssä. Yle Asia / Tiedeykkönen 11.10.2021.
- Ranka lihasten tueksi. Tekniikka&Talous 04/21.
- Eksoskeletoneista yleisellä tasolla ja teollisen työn kuormittavuudesta. Ilkka – Pohjalainen 16.6.2021.
- Eksoskeletoneista yleisellä tasolla ja teollisen työn kuormittavuudesta. TTL- uutiskirje 06/21.
- Tukiranka auttaa, kun tekee työtä kumarassa ja kurottaen. HS- Tiede, 17.8.2021.
- Kevennä työn fyysistä kuormitusta rakennusalalla – webinaariluento, 5.4.2022. Euroopan työterveys- ja turvallisuusviraston ”Turvallinen työ” kampanja.
- Eksoskeletonin hyödyntäminen työkuormituksen hallinnassa. Teknologia hyvinvointia luomassa- webinaari 1.3.2022.
- Eksoskeletonien standardointityöryhmässä toimiminen 2.6.2022 -
- Eksoskeletonin hyödyntäminen työkuormituksen hallinnassa. Sosiaali- ja terveydenhuoltoalan ergonomiaverkoston Sotergon seminaari 10.6.2022.
- Eksoskeleton seminaari TTL / Seinäjoen ammattikorkeakoulu 4.5.2022.
- Eksoskeletonin hyödyntäminen työkuormituksen hallinnassa. Sosiaali- ja terveydenhuoltoalan ergonomiaverkoston Sotergon seminaari 10.6.2022.
- Eksoskeletonit työkuormituksen hallinnan työkaluna? Palautetilaisuus Postin logistiikkakeskuksen henkilökunnalle, työsuojeluorganisaatiolle ja esihenkilöille. Postin logistiikkakeskus, Vantaa 15.6.2022.

## LÄHTEET

- [1] Tuki ja liikuntaelinliitto ry (2020) TULE-kustannukset. (Viitattu 3.3.2022) <https://suomentule.fi/tule-kustannukset/>
- [2] Tuki- ja liikuntaelinliitto ry. Selkäsairaudet. (Viitattu 3.3.2022) <https://suomentule.fi/tule-terveys/tule-terveyteen-vaikuttavat-tekijat/tule-sairaudet/nivelsairaudet/selkasairaudet/>
- [3] Työterveyslaitos (2013) Työ ja terveys Suomessa 2012 – Seurantatietoa työoloista ja työhyvinvoinnista. Teoksessa: Kauppinen T, Mattila-Holappa P, Perkiö-Mäkelä M, Saalo A, Toikkanen J, Tuomivaara S, Uuksulainen S, Viluksela M, Virtanen S (toim.) Tampere: Tammerprint Oy, s. 146–147.
- [4] Lehtelä J (2011) Taakkojen käsittely. Teoksessa: Launis M, Lehtelä J (toim.) Ergonomia. Tampere: Tammerprint Oy, s. 185–194.
- [5] de Looze MP, Bosch T, Krause F, Stadler KS, O'Sullivan LW (2016) Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics* 59(5): 671–681.
- [6] Bosch T, van Eck J, Knitel K, de Looze MP (2016) The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Appl Ergon* 54: 212–217.
- [7] Bär M, Luger T, Seibt R, Rieger MA, Steinhilber B (2022) Using a Passive Back Exoskeleton During a Simulated Sorting Task: Influence on Muscle Activity, Posture, and Heart Rate. *Hum Factors* 187208211073192. Advance online publication.
- [8] Giustetto A, Dos Anjos V, Gallo F, Monferino R, Cerone G, Di Pardo M, Gazzoni M, Cremasco M (2021) Investigating the effect of a passive trunk exoskeleton on local discomfort, perceived effort and spatial distribution of back muscles activity. *Ergonomics* 64(11): 1379–1392.
- [9] Koopman AS, Kingma I, Faber GS, de Looze MP, van Dieen JH (2019) Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back in static holding tasks. *J Biomech* 83: 97–103.
- [10] Madinei S, Alemi MM, Kim S, Srinivasan D, Nussbaum MA (2020) Biomechanical Evaluation of Passive Back-Support Exoskeletons in a Precision Manual Assembly Task: "Expected" Effects on Trunk Muscle Activity, Perceived Exertion, and Task Performance. *Hum Factors* 62(3): 441–457.



- [11] Abdoli-Eramaki M, Agnew MJ, Stevenson JM (2006) An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. *Clin Biomech* 21(5): 456–465.
- [12] Abdoli-Eramaki M, Stevenson JM (2008) The effect of on-body lift assistive device on the lumbar 3D dynamic moments and EMG during asymmetric freestyle lifting. *Clin Biomech* 23(3): 372–380.
- [13] Alemi MM, Geissinger J, Simon AA, Chang SE, Asbeck AT (2019) A passive exoskeleton reduces peak and mean EMG during symmetric and asymmetric lifting. *J Electromyogr Kinesiol* 47: 25–34.
- [14] Baltrusch SJ, van Dieën JH, Koopman AS, Näf MB, Rodriguez-Guerrero C, Babič J, Houdijk H (2020) SPEXOR passive spinal exoskeleton decreases metabolic cost during symmetric repetitive lifting. *Eur J Appl Physiol* 120(2): 401–412.
- [15] Koopman AS, Kingma I, de Looze MP, van Dieen JH (2020) Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back during symmetric lifting. *J Biomech* 102: 109486.
- [16] Luger T, Bär M, Seibt R, Rimmele P, Rieger MA, Steinhilber B (2021) A passive back exoskeleton supporting symmetric and asymmetric lifting in stoop and squat posture reduces trunk and hip extensor muscle activity and adjusts body posture - A laboratory study. *Appl Ergon* 97: 103530.
- [17] Madinei S, Alemi MM, Kim S, Srinivasan D, Nussbaum MA (2020) Biomechanical assessment of two back-support exoskeletons in symmetric and asymmetric repetitive lifting with moderate postural demands. *Appl Ergon* 88: 103156.
- [18] Qu X, Qu C, Ma T, Yin P, Zhao N, Xia Y, Qu S (2021) Effects of an industrial passive assistive exoskeleton on muscle activity, oxygen consumption and subjective responses during lifting tasks. *Plos One* 16(1): e0245629.
- [19] Schmalz T, Colienne A, Bywater E, Fritzsche L, Gärtner C, Bellmann M, Reimer S, Ernst M (2022) A Passive Back-Support Exoskeleton for Manual Materials Handling: Reduction of Low Back Loading and Metabolic Effort during Repetitive Lifting. *IJSE Trans Occup Ergon Hum Factors* 10(1): 7–20.
- [20] Yong X, Yan Z, Wang C, Wang C, Li N, Wu X (2019) Ergonomic Mechanical Design and Assessment of a Waist Assist Exoskeleton for Reducing Lumbar Loads During Lifting Task. *Micromachines* 10(7): 463.

- [21] Godwin AA, Stevenson JM, Agnew MJ, Twiddy AL, Abdoli-Eramaki M, Lotz CA (2009) Testing the efficacy of an ergonomic lifting aid at diminishing muscular fatigue in women over a prolonged period of lifting. *Int J Ind Ergon* 39(1): 121–126.
- [22] Abdoli-Eramaki M, Stevenson JM, Reid SA, Bryant TJ (2007) Mathematical and empirical proof of principle for an on-body personal lift augmentation device (PLAD). *J Biomech* 40(8): 1694–1700.
- [23] Alemi MM, Simon AA, Geissinger J, Asbeck AT (2022) Modeling the metabolic reductions of a passive back-support exoskeleton. *J Appl Physiol* 132(3): 737–760.
- [24] Baltrusch SJ, van Dieen JH, Bruup SM, Koopman AS, van Bennekom CAM, Houdjik H (2019) The effect of a passive trunk exoskeleton on metabolic costs during lifting and walking. *Ergonomics* 62(7): 903–916.
- [25] Erezuma UL, Espin A, Torres-Unda J, Esain I, Irazusta J, Rodriguez-Larrad A (2021) Use of a passive lumbar back exoskeleton during a repetitive lifting task: effects on physiologic parameters and intersubject variability. *Int J Occup Saf Ergon* 1–8. Advance online publication.
- [26] Kim S, Madinei S, Alemi MM, Srinivasan D, Nussbaum MA (2020) Assessing the potential for “undesired” effects of passive back-support exoskeleton use during a simulated manual assembly task: Muscle activity, posture, balance, discomfort, and usability. *Appl Ergon* 89: 103194.
- [27] Weston EB, Alizadeh M, Knapik GG, Wang X, Marras WS (2018) Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading of the lumbar spine. *Appl Ergon* 68: 101–108.
- [28] Dewi NS, Komatsuzaki M (2018) On-body personal assist suit for commercial farming: effect on heart rate, EMG, trunk movements, and user acceptance during digging. *Int J Ind Ergon* 68: 290–296.
- [29] Thamsuwan O, Milosavljevic S, Srinivasan D, Trask C (2020) Potential exoskeleton uses for reducing low back muscular activity during farm tasks. *Am J Ind Med* 63(11): 1017–1028.
- [30] Graham RB, Agnew MJ, Stevenson JM (2009) Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task: Assessment of EMG response and user acceptability. *Appl Ergon* 40(5): 936–942.
- [31] Hensel R, Keil M (2019) Subjective evaluation of a passive industrial exoskeleton for lower-back support: a field study in the automotive sector. *IIEE Trans Occup Ergon Hum Factors* 7(3–4): 213–221.

- [32] Amandels S, het Eyndt HO, Daenen L, Hermans V (2019) Introduction and testing of a passive exoskeleton in an industrial working environment. Teoksessa: Kacprzyk J (toim.) *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 820. Sveitsi: Springer, s. 387–392.
- [33] Motmans R, Debaets T, Chrispeels S (2019) Effect of a passive exoskeleton on muscle activity and posture during order picking. Teoksessa: Kacprzyk J (toim.) *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 820. Sveitsi: Springer, s. 338–346.
- [34] Ziaei M, Choobineh A, Ghaem H, Abdoli-Eramaki M (2021) Evaluation of a passive low-back support exoskeleton (Ergo-Vest) for manual waste collection. *Ergonomics* 64(10): 1255–1270.
- [35] Kuber PM, Abdollahi M, Alemi MM, Rashedi E (2022) A Systematic Review on Evaluation Strategies for Field Assessment of Upper-Body Industrial Exoskeletons: Current Practices and Future Trends. *Ann Biomed Eng* 50: 1203–1231.
- [36] Borg GA (1982) Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 14(5): 377–381.
- [37] Firstbeat Technologies Oy (2014) Stress and Recovery Analysis Method Based on 24-hour Heart Rate Variability – Firstbeat White Paper [Internet]. (Viitattu 10.8.2022) <https://www.firstbeat.com/fi/stress-recovery-analysis-method-based-24-hour-heart-rate-variability-firstbeat-white-paper/>
- [38] Brooke J (1996) SUS: a “quick and dirty” usability scale. Teoksessa: Jordan PW, Thomas B, McClelland IL, Weerdmeester B (toim.) *Usability Evaluation in Industry*. Lontoo: Taylor and Francis, s. 189–194.
- [39] Lewis J, Sauro J (2018) Item Benchmarks for the System Usability Scale. *J Usability Stud* 13(3): 158–167.

## LIITTEET

LIITE 1. Eksoskeletonin käytön tilastollisella analyysillä todetut vaikutukset ja niiden suunta mitatuissa muuttujissa. Kenttä tarkoittaa työtä autenttisisessa ympäristössä keskimäärin neljän tunnin ajan.

		Vaikutus	p-arvo
<b><u>Lihassähköinen aktiivisuus:</u></b>			
<b>%MEMG (prosenttia maksimaalisesta lihasaktiivisuudesta)</b>			
hartia yläosa		ei	NS
hartia alaosa	kenttä	11,8 % korkeampi exon kanssa	0,002**
	kenttä (CPsy)	6,93 % korkeampi exon kanssa	0,047*
	kenttä (CPlu)	23,0 % korkeampi exon kanssa	0,003**
yläselkä	staat	32,9 % matalampi exon kanssa	0,049*
	kenttä	9,7 % korkeampi exon kanssa	0,007**
alaselkä		ei	NS
takareisi		ei	NS
pohje	kenttä (CPlu)	16,5 % korkeampi exon kanssa	0,026*
etureisi		ei	NS
sääri	kenttä	11,6 % korkeampi exon kanssa	0,045*
	kenttä (CPlu)	24,2 % korkeampi exon kanssa	0,020**
<b>Mikrotaukojen lukumäärä minuutissa</b>			
hartia yläosa		ei	NS
hartia alaosa		ei	NS
yläselkä	dyn, epäe.	28,6 % vähemmän exon kanssa	0,018*
alaselkä		ei	NS
takareisi	dyn, ergon.	125,3 % enemmän exon kanssa	0,041*
	dyn, ergon./min	144,0 % enemmän exon kanssa	0,011*
pohje	dyn, epäe.	23,5 % vähemmän exon kanssa	0,019*

dyn, epäe./min 22,3 % vähemmän exon kanssa 0,040\*

etureisi	ei	NS
sääri	ei	NS
<b><u>Lihsrakenne:</u></b>		
<b>Poikkipinta-ala</b>	ei	NS
<b>Pennaatiokulma</b>	ei	NS
<b>Jäykkyys</b>	ei	NS
<b>Elastisuus</b>	ei	NS
<b><u>Kiinteys</u></b>		
hartia	ei	NS
yläselkä	ei	NS
alaselkä	ei	NS
takareisi	ei	NS
pohje	↑ exon kanssa, ergon.	0,004*
etureisi	ei	NS
sääri		NS
<b><u>Lihaksen happitaso</u></b>		
k	ei	NS
R <sup>2</sup>	ei	NS
<b><u>Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus:</u></b>		
<b>Syke</b>	ei (kenttä)	NS
<b>Hapenkulutus</b>	ei (kenttä)	NS

**Subjekttiivinen tuntemus:****RPE (koettu kuormitus, rating of perceived exertion)**

10 kg kahvakuula	↓ exon kanssa, ergon.	0,050*
10 kg kahvakuula	↓ exon kanssa, epäergon.	0,004**
16 kg kahvakuula	↓ exon kanssa, epäergon.	0,016*
18 kg kahvakuula	↓ exon kanssa, epäergon.	0,002**
20 kg kahvakuula	↓ exon kanssa, epäergon.	0,001***
dynaaminen	k pienempi exon kanssa, ergon.	0,002**
staattinen	ei	NS
kenttä	ei	NS

**Työskentelyaika:**

kahvakuulan paino	ero työskentelyajassa	NS
kokonaistyöskentelyaika	exo vs. ref	NS

---

LIITE 2. Kenttätutkimuksessa käytetty käytettävyysskysely (System Usability Scale, SUS).

**Arvioi seuraavat väittämät ympyröimällä mielipidettäsi parhaiten kuvaava vaihtoehto.**

1. Käyttäisin mielelläni tätä eksoskeletonia usein.
2. Mielestäni eksoskeleton oli tarpeettoman monimutkainen.
3. Eksoskeletonia oli mielestäni helppo käyttää.
4. Luulen että tarvitsisin opastusta, jotta osaisin käyttää eksoskeletonia.
5. Mielestäni eksoskeletonin eri osat toimivat keskenään hyvin yhteen (ts. toimiva kokonaisuus).
6. Mielestäni eksoskeletonissa ja sen käytössä oli liikaa epäjohtamukaisuutta.
7. Luulen, että useimmat oppisivat eksoskeletonin käytön hyvin nopeasti.
8. Mielestäni eksoskeletonia oli hankala käyttää.
9. Tunsin itseni hyvin varmaksi käyttäessäni eksoskeletonia.
10. Minun täytyisi oppia paljon uusia asioita ennen kuin pystyisin käyttämään eksoskeletonia.

Täysin eri mieltä					Täysin samaa mieltä
1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	

LIITE 3. Kenttätutkimuksessa lihasten väsymyksen, epämukavuuden, liikkuvuuden sekä käyttömukavuuden selvittämiseen eksoskeletonin kanssa käytetyt asteikot.

### Lihasten väsymys

0	<b>Ei ollenkaan</b>
1	
2	<b>Vähän</b>
3	
4	<b>Kohtalaisesti</b>
5	
6	<b>Erittäin väsyneet</b>

### Epämukavuus

0	<b>Ei ollenkaan</b>
1	
2	<b>Vähän</b>
3	
4	<b>Kohtalaisesti</b>
5	
6	<b>Erittäin epämukava</b>

### Liikkuvuus

0	<b>Normaali</b>
1	
2	<b>Hieman vaikeaa</b>
3	
4	<b>Vaikeaa</b>
5	
6	<b>Hyvin vaikeaa</b>

### Käyttömukavuus

3	<b>Hyvin helppo liikkua tai miellyttävä</b>
2	
1	
0	<b>Neutraali</b>
-1	
-2	
-3	<b>Hyvin vaikea liikkua tai epämukava</b>



Työhön liittyvät tuki- ja liikuntaelimestön vaivat ovat tavallisimpia työn aiheuttamia terveysongelmia Suomessa. Suuri osa työkyvyttömyyseläkkeistä ja sairauspoissaoloista johtuu selkäsairauksista, joiden työperäisinä syinä pidetään selän liiallista kuormitusta, mm. nostamisesta johtuen. Työergonomiaan liittyvät toimenpiteet ovat yksi keino ehkäistä tuki- ja liikuntaelinvaivoja työpaikoilla. Perinteisen työergonomian lisäksi nostotyön apuvälineenä voidaan käyttää ulkoisia tukirankoja eli eksoskeletoneja.

Ulkoisten tukirankojen potentiaali tuki- ja liikuntaelimestöön kohdistuvan kuormituksen pienentämisessä voi olla merkittävä. Jotta nykyaikaista tukirankateknologiaa voidaan tehokkaasti hyödyntää työn keventämisessä, tarvitaan mitattua tietoa eksoskeletonien vaikutuksista kuormittuneisuuteen autenttisissa työtilanteissa. Tämä tutkimus yhdistää standardoiduissa laboratorio-olosuhteissa ja autenttisissa työtilanteissa tehdyt mittaukset ja antaa siten kattavan kuvan selän tukirangan vaikutuksista nostotyön keventämisessä. Tämä raportti on tarkoitettu erityisesti niille työhyvinvointia kehittäville tahoille, jotka toimivat raskasta nostotyötä sisältävien alojen parissa.



Työsuojelurahasto  
Arbetskyddsfonden  
The Finnish Work Environment Fund

Työterveyslaitos  
Arbetshälsoinstitutet  
Finnish Institute of Occupational Health

PL 40, 00032 Työterveyslaitos

[www.ttl.fi](http://www.ttl.fi)

ISBN 978-952-391-055-3 (PDF)

