

Kädet koholla työskentelyn keventäminen ulkoisen tukirangan avulla



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

Työterveyslaitos

Kädet koholla työskentelyn keventäminen ulkoisen tukirangan avulla

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

Työterveyslaitos
Oulu, Helsinki

Työterveyslaitos

Työkyky ja työurat

PL 40

00251 Helsinki

www.ttl.fi

Toimitus: Satu Mänttari

Valokuvat: Jutta Karkulehto, Ari-Pekka Rauttola, Johannes Tervo

© 2021 Työterveyslaitos ja kirjoittajat

Hanke on toteutettu Työsuojelurahaston ja yhteistyökumppaneiden (Ramirent Finland Oy, Talonrakennusteollisuus ry) tuella.

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

ISBN 978-952-261-985-3 (PDF)

TIIVISTELMÄ

Lähes 230 000 suomalaista työskentelee useita tunteja päivässä kädet koholla. Pitkäkestoinen kädet koholla työskentely on haitallista yläraajojen ja hartiaseudun lihaksistolle ja lisää liikuntaelinvaivojen riskiä. Perinteisesti fyysistä työkuormitusta on pyritty vähentämään erilaisilla apuvälineillä ja ergonomisilla ratkaisuilla. Yksi uusimmista on ulkoinen tukiranka, eksoskeleton. Sen potentiaali lihaksistoon ja liikuntaelimistöön kohdistuvan kuormituksen pienentämisessä voi olla merkittävä. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, kuinka paljon kädet koholla tehtävää työtä voidaan keventää eksoskeletonin avulla.

Vakioiduissa laboratorio-olosuhteissa tutkittiin ulkoisen tukirangan vaikutusta työkuormitukseen tekemällä sekä dynaamista yläraajan toistotyötä että staattista työtä ulkoisen tukirangan avustamana ja ilman sitä. Työtä tehtiin neljässä eri olkavarren kulmassa, 60, 90, 120 ja 150 astetta. Eksoskeletonin vaikutusta työkuormitukseen tutkittiin useilla fysiologisilla ja suorituskyky muuttujilla. Laboratoriotutkimuksen tulokset testattiin autenttisisa rakennusalan työtilanteissa.

Mittaustulosten perusteella eksoskeleton vähentää merkittävästi useiden kyynär- ja olkavarren ja selän lihasten kuormittuneisuutta sekä dynaamisessa että staattisessa työssä. Lihassähköinen aktiivisuus pienenee kaikissa mitatuissa olkavarren kulmissa, mutta selkein hyöty eksoskeletonista on, kun olkavarsi nousee työtä tehdessä yli vaakatason (olkavarren kulma 90°). Tutkittavien subjektiivinen arvio eksoskeletonin työkuormitusta vähentävästä vaikutuksesta oli samankaltainen mitattujen muuttujien kanssa.

Kenttätutkimuksen mittaustulokset noudattelivat pääosin laboratoriotutkimuksen tuloksia. Mitattujen lihasten kuormitus vähenee eksoskeletonia käytettäessä keskimäärin 23 %. Erityisesti olkapään lihasten lihassähköinen aktiivisuus laskee merkittävästi vähentäen olkanivelen kuormitusta huomattavasti.

Tämä tutkimus arvioi kokonaisvaltaisesti uuden, työtä keventävän apuvälineteknologian hyötyjä sekä standardi- että autenttisisa työympäristössä. Tutkimuksen perusteella eksoskeleton keventää lihaskuormitusta merkittävästi yläkätisissä töissä. Sen käyttöä voidaan suositella yli 90° olkavarren kulmassa tapahtuvien työtehtävien yhteyteen hetkellisesti.

ABSTRACT

Almost 230 000 Finnish employees are working several hours daily with elevated arms. Long-term working with elevated arms, or overhead work, is a risk factor for musculo-skeletal complaints and disorders. Traditional ways of reducing physical strain at work have consisted of using various mechanical aiding devices and/or applying various ergonomic solutions. One of the newest solutions is the so-called exoskeleton, a device that alleviates certain work movements. Its potential in reducing muscle strain during work can be considerable. The aim of this study was to measure how much muscle strain during work with elevated upper extremities can be reduced with the use of exoskeleton.

In the laboratory the study participants performed dynamic and static work with and without an exoskeleton in four different upper arm angles, 60, 90, 120 and 150 degrees. Several physiological and performance parameters were studied. The second phase of the study was performed in authentic working conditions in construction industry.

The laboratory results showed that the use of exoskeleton significantly reduced forearm, upper arm, and back muscle strain both in dynamic and static work. Reduction was found in every working angle, but most significantly when the arm elevation exceeded 90°. The participants' subjective rating of perceived exertion coincided with measured objective parameters.

The results obtained from authentic working conditions were similar to those in the laboratory. The average muscle strain reduction of all the eight measured muscles was 23 %. The highest reduction was found in the shoulder muscles (*m. deltoid, pars anterior et medialis*), being 42 %, indicating significantly smaller joint torque.

This study evaluated in a holistic manner the ability of new aiding device, exoskeleton; to reduce muscle strain in standardized laboratory and authentic working conditions. Based on the results it can significantly reduce muscle strain during work with elevated upper extremities. Its use can be especially recommended while working with angles exceeding 90°.

ALKUSANAT JA KIITOKSET

Kädet koholla työskentelyn keventäminen ulkoisen tukirangan avulla (EXO) -tutkimus-hanke sai alkunsa tarpeesta selvittää, voidaanko ulkoisella tukirangalla eli eksoskeletonilla keventää kädet kohoasennossa työskentelyä. Parhaimmillaan eksoskeleton voi olla nykyaikainen, yksinkertainen ja helppokäyttöinen menetelmä yläraaja- ja ylävartalokuormituksen pienentämiseksi. Jotta nykyaikaista tukirankateknologiaa voidaan tehokkaasti hyödyntää työn keventämisessä, tarvitaan kuitenkin mitattua tietoa niiden vaikutuksista työssä kuormittuneisuuteen. Tukirankoihin kohdistuva tutkimus on vielä vähäistä ja keskittyy lähinnä niiden tekniseen kehitykseen. Tässä raportissa kuvataan miten eksoskeleton vaikuttaa ihmisen kuormitusfysiologiaan ja suorituskykyyn, kun työtä tehdään kädet hartiatasolla tai sen yläpuolella.

Hankkeessa yhdistettiin standardoitu laboratoriotutkimus ja kenttätutkimus. Laboratorio-osioon osallistui 21 vapaaehtoista tutkittavaa. Kiitämme lämpimästi kaikkia laboratoriotutkimukseen osallistuneita henkilöitä. Kenttätutkimus kohdistui rakennusalalle ja siihen osallistui useita organisaatioita. Haluamme kiittää Inlook Oy:tä, Muurausliike Sami Vanne Oy:tä ja Ramirent Finland Oy:tä sekä niiden yhteyshenkilöitä Petri Eklundia (Inlook Oy), Topias Kauppilaa (Muurausliike Sami Vanne) ja Teemu Lehmikangasta (Ramirent Finland Oy). Erityisesti kiitämme näiden organisaatioiden työntekijöitä, jotka osallistuivat tutkittavina hankkeeseen.

Kiitämme kumppaniorganisaatioitamme, Rakennusteollisuus ry:tä ja Ramirent Finland Oy:tä, sekä heidän edustajiaan hankkeen ohjausryhmässä, Juha Suvantoa ja Jani Bolotinia, tuloksetkaasta yhteistyöstä.

Lopuksi tutkimusryhmä haluaa kiittää hankkeen rahoittajia, Työsuojelurahastoa, Rakennusteollisuus ry:tä ja Ramirent Finland Oy:tä, tutkimuksen mahdollistamisesta ja hyvästä yhteistyöstä sekä joustavuudesta koronapandemian keskellä.

Oulussa 26.10.2021

EXO-tutkijaryhmä

SISÄLTÖ

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | JOHDANTO | 3 |
| 2 | TAUSTA | 4 |
| 2.1 | Eksoskeleton | 4 |
| 2.2 | Eksoskeletonien vaikutukset työn fyysiseen kuormitukseen | 4 |
| 2.3 | Tutkimuksen tarkoitus | 7 |
| 3 | MENETELMÄT | 8 |
| 3.1 | Eksoskeleton | 8 |
| 3.2 | Tutkimusasetelma | 9 |
| 3.2.1 | Dynaaminen toistotyö | 9 |
| 3.2.2 | Staattinen työ | 10 |
| 3.3 | Mitatut muuttujat | 10 |
| 3.3.1 | Lihassähköinen aktiivisuus (EMG) | 10 |
| 3.3.2 | Lihassoima | 12 |
| 3.3.3 | Lihaskudoksen happisaturaatio | 12 |
| 3.3.4 | Liharakenne ja lihaksen kimmo-ominaisuudet | 12 |
| 3.3.5 | Hermostollinen säätely | 13 |
| 3.3.6 | Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus | 13 |
| 3.3.7 | Subjekttiivinen kuormittuneisuuden tuntemus | 14 |
| 3.3.8 | Kenttämittaukset | 14 |
| 3.3.9 | Tilastollinen analyysi | 16 |
| 4 | TULOKSET | 17 |
| 4.1 | Työn kesto ja koettu kuormitus työn aikana | 17 |
| 4.2 | Nivelkulmat | 19 |
| 4.3 | Tuki- ja liikuntaelimeistöön kohdistuva kuormitus | 22 |
| 4.3.1 | Lihassoima | 22 |
| 4.3.2 | Lihassähköinen aktiivisuus (EMG) | 22 |

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| 4.3.3 | Lihaskudoksen happisaturaatio | 26 |
| 4.3.4 | Lihaskudoksen happisaturaatio | 27 |
| 4.3.5 | Hermostollinen säätely..... | 28 |
| 4.4 | Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus..... | 29 |
| 4.5 | Eksoskeletonin käytettävyys..... | 31 |
| 5 | EKS@ - EKSOSKELETONIN HYÖTYJEN ARVIOINTITYÖKALU KÄDET HARTIATASON YLÄPUOLELLA TEHTÄVÄSSÄ TYÖSSÄ..... | 33 |
| 5.1 | Tarpeellisuuden arviointikysely..... | 33 |
| 5.2 | Käytettävyyskysely..... | 34 |
| 6 | YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET | 35 |
| 7 | TULOSTEN MERKITYS | 37 |
| 7.1 | Suositukset työelämälle | 38 |
| 7.2 | Suositukset työterveyshuollolle ja työsuojeluorganisaatiolle..... | 38 |
| 7.3 | Huomioita eksoskeletonien valmistajille ja maahantuojuille..... | 39 |
| 8 | PROJEKTIN VIESTINTÄ..... | 40 |
| LÄHTEET | | 42 |
| LIITTEET | | 47 |

1 JOHDANTO

Pitkäkestoinen kädet koholla työskentely on haitallista yläraajojen ja hartiasitudun lihaksistolle sekä lisää tuki- ja liikuntaelinvaivojen riskiä. Riskiä on pyritty pienentämään mm. työergonomialla ja tauottamisella, mutta kuormituksen vähentämisen tarve on edelleen olemassa. Norjassa 13 %, Ruotsissa 17 % ja Tanskassa 20 % työvoimasta työskentelee yli neljänneksen työajasta kädet hartiatasolla tai sen yläpuolella [1]. Suomessa 9 % työvoimasta työskentelee päivittäin enemmän kuin 1–2 tuntia kädet hartiatasolla tai sen yläpuolella [2]. Asennustyöt, maalaaminen sekä rakennus-, auto- ja metalliteollisuuden työtehtävät ovat tyypillisiä käsien kohoasentoa vaativia töitä. Muutkin ammattiryhmät, kuten hammaslääkärit ja parturi-kampaajat altistuvat kädet koholla tehtävälle työlle [3].

Kädet koholla työskentely on yhteydessä niska-hartiasitudun vaivoihin [4–8]. Laajassa, 33 ammattiryhmästä koostuvassa tutkimussarjassa havaittiin haitallinen yhteys käden kohoamisen ja diagnosoidun niska-hartiasitudun vaivan välillä [9]. Olkavarret yli 90° kulmassa tehtävä työ kasvattaa olkapään pinneoireyhtymän riskiä, vaikka työtä tehtäisiin vain alle tunti päivässä [10].

Nyt ihmisen avuksi fyysisessä työssä tekevät tuloaan keinotekoiset ulkoiset tukirangat, eksoskeletoinit. Tukirankoihin kohdistuva tutkimus on vielä vähäistä ja se on keskittynyt lähinnä tukirankojen tekniseen kehitykseen sekä selkätukirankojen vaikutuksiin nostotyön kuormituksen vähentämisessä. Tutkimuksissa on kuitenkin havaittu positiivisia yhteyksiä tukirankojen käytön ja pienentyneen kuormitusfysiologisen vasteen välillä sekä selän että yläraajan tukirankojen osalta. Lisäksi ei-tieteellisissä kokeiluissa autoteollisuudessa ulkoisten tukirankojen käyttö näyttää vähentävän työntekijöiden niska- ja olkapääkipuja sekä lisäävän työn tuottavuutta [11].

Ulkoisilla tukirangoilla on suuri potentiaali lihaksistoon ja liikuntaelimistöön kohdistuvan kuormituksen pienentämisessä. Jotta nykyaikaista tukirankateknologiaa voidaan tehokkaasti hyödyntää työn keventämisessä, tarvitaan mitattua tietoa tukirankojen vaikutuksista työssä kuormittuneisuuteen. Tässä raportissa kuvataan ulkoisen tukirangan vaikutusta kädet koholla tehtävän työn kuormituksen pienentämiseen sekä laboratorio- että autenttisissa työolosuhteissa. Tämän tutkimuksen vahvuus on sekä dynaamisen että staattisen työn mittaaminen laboratoriossa, ja lisäksi mittausten suorittaminen kenttäolosuhteissa. Edellä mainitulla tutkimusasetelmalla saadaan kattavaa tietoa eksoskeletonien hyödyllisyydestä erilaisissa tilanteissa ja työtehtävissä.

2 TAUSTA

Kädet koholla työskentely aiheuttaa niska-hartiaseudun lihasten jännitystilaa. Lihasten aktivaatio nostaa lihaksen sisäistä painetta, mikä heikentää lihasten verenkiertoa [12–13]. Yläraajan lihasten voimantuotto taakkoja kannateltaessa lisää myös olkanivelen jänteisiin kohdistuvaa kuormitusta [14]. Niskan ja hartioiden pitkittynyt lihasjännitys aiheuttaa kumuloituvaa lihasväsymystä [15] sekä mahdollisen tulehdusreaktion lihaskudokseen [16]. Lihaskudoksen ja nivelten liiallinen biomekaaninen kuormitus aiheuttaa tyypillisesti kiputiloja ja alentaa hermo-lihasjärjestelmän toimintakykyä [17]. Lihasten ja jänteiden kuormittumisen lisäksi kädet sydämen tasolla tai sen yläpuolella työskentely kuormittaa hengitys- ja verenkiertoelimistöä korkeamman verenpaineen vuoksi [18]. Kohonnut verenpaine on yksi keskeisimmistä sydän- ja verisuonisairauksien vaaratekijöistä.

2.1 Eksoskeleton

Kädet koholla tehtävän työn kuormitusta voidaan vähentää ns. ulkoisen tukirangan eli eksoskeletonin avulla. Ylävartalon eksoskeletoneissa käytetään yleensä kiinteitä mekaanisia rakenteita, joilla ohjataan yläraajoihin ja vartaloon (esim. olkavarsiin, kyynärvarsiin, hartioihin ja alaselkään tai käteen/sormiin) kohdistuvia voimia muualle. Ylävartalon eksoskeleton on tyypillisesti liivin tavoin päälle puettava mekaaninen tukirakenne. Eksoskeletonit luokitellaan toimintaperiaatteensa mukaan aktiivisiin ja passiivisiin. Aktiiviset tukirangot toimivat moottorien, hydraulisten tai pneumaattisten järjestelmien avulla. Passiiviset eksoskeletonit antavat fyysistä tukea kehon eri osille. Edistyneempien yläraajoja tukevien eksoskeletonien toiminta perustuu käyttäjän liike-energian varastoitumiseen jousi- ja nivelrakenteisiin [19]. Tukiranka ei rajoita tarkkuutta vaativia käden liikkeitä, joten työnteekijä voi käyttää käsiään vapaasti [20].

2.2 Eksoskeletonien vaikutukset työn fyysiseen kuormitukseen

Eksoskeletonin merkitystä on tutkittu lähinnä etukumarassa asennossa työskenneltäessä. Tutkimusten mukaan alaselän lihaksistoa tukeva ja nostoja helpottava eksoskeleton vähentää alaselän lihasten kuormitusta [21], ehkäisee paikallista lihasväsymystä [22] ja pienentää selkärankaan kohdistuvia voimia [23].

Tutkimuksia yläraajojen eksoskeletonien vaikutuksista kuormittumiseen on tehty selkää tukevia rakenteita vähemmän. Yläraajojen tukirankoja käsitteleviä tutkimuksia on tehty lähinnä laboratorio-olosuhteissa, eikä tutkimustietoa yläraajojen eksoskeletonien vaikutuksista työn keventämiseen autenttisissa työolosuhteissa juurikaan ole.

Yläraajojen eksoskeletonien on havaittu vähentävän subjektiivista kuormittumisen ja epä-mukavuuden tunnetta, niska-hartiaseudun lihasten aktiivisuutta ja olkaniveleen kohdistuvia voimia [24–37]. Myös aineenvaihdunnallisen kuormituksen on havaittu olevan pienempää eksoskeletonia käytettäessä, mikä on ilmennyt alhaisempana syketasona ja hapen- sekä energiankulutuksena työskentelyn aikana [27, 34, 35]. Taulukossa 1 on esitetty yhteenveto ylävartalon eksoskeletonien vaikutuksista fyysiseen toimintakykyyn tämänhetkiseen kirjallisuuteen perustuen.

Taulukko 1. Yhteenveto ylävartalon eksoskeletonien vaikutuksesta fyysiseen toimintakykyyn.

| Tutkimus | Vaikutus toimintakykyyn | Eksoskeleton |
|---|--|---|
| Alabdulkarim ym. 2019a [24], 2019b [25] | hartialihaksen lihasaktiivisuus ja piikkikuormitus ↓ | passiivinen SuitX ja passiivinen ShoulderX |
| Blanco ym. 2019 [26] | mitattujen lihasten keskimääräinen kuormitus ↓ | aktiivinen prototyyppi, MovilFrio |
| de Bock ym. 2021 [27] | epäkäslihas: kuormitus 30-46 % ↓ (lab), 8-26 % ↓ (työ), syke ↓ | passiivinen ShoulderX ja passiivinen Skelex |
| de Vries ym. 2021 [28] | agonistilihakset: kuormitus ↓, antagonistilihakset: ↔ | passiivinen Skelex |
| Hall & Crouch 2020 [29] | olkavarren kohottajat: kuormitus ↓, olkavarren laskijat: ↔ | passiivinen ei-kaupallinen |
| Huysamen ym. 2018 [30] | hauslihas: kuormitus 49 % ↓, hartialihäs: 62 % ↓, suora vatsalihas: 13 % ↓, subjektiivinen arvio kuormituksesta (RPE) 41 % ↓ | passiivinen, tarkempaa mallia ei kerrottu |
| Hyun ym. 2019 [31] | mitattujen lihasten keskimääräinen kuormitus ↓ | passiivinen H-VEX |
| Iranzo ym. 2020 [32] | hartialihäs: kuormitus 34 % ↓, epäkäslihas: 18 % ↓ | Levitate AIRFRAME |
| Kim ym. 2018 [33] | olkapään lihaksiston piikkikuormitus ↓ | passiivinen prototyyppi |
| Maurice ym. 2020 [34] | epäkäslihas: kuormitus 55 % ↓, energiankulutus 33 % ↓, syke 19 % ↓ | passiivinen PAEXO |
| Schmalz ym. 2019 [35] | mitattujen lihasten keskimääräinen kuormitus 22-61 % ↓, hapenkulutus 11-12 % ↓, syke 5-6 % ↓ | passiivinen PAEXO |
| Theurel ym. 2018 [36] | hartialihäs: kuormitus 54-73 % ↓, kolmipäinen olkalihas (antagonisti): 95-116 % ↑ | passiivinen EXHAUSS Stronger |
| Yin ym. 2020 [37] | hartialihäs: kuormitus 45 % ↓ | passiivinen ei-kaupallinen |

Eksoskeletonin käytöllä voi olla myös epäedullisia vaikutuksia. Käyttö voi olla työntekijälle epämiellyttävää puvun epäsovivuuden tai painon vuoksi [23]. Tukiranka voi myös siirtää rasiasta haitallisesti muualle kehoon työkalun, mekaanisen varren ja käytetyn liivin painon vuoksi [38]. Joissain tutkimuksissa ylävartalon eksoskeletonin haitallisia vaikutuksia on arvioitu mittaamalla alaselän kuormitusta. Näissä tutkimuksissa ei ole havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja alaselän lihasaktiivisuudessa tai koetussa kuormittumisessa [30, 32, 34]. Kim ym. [39] sen sijaan raportoivat yläraajan tukirangan vähentävän alaselän kuormitusta jopa 30 %. Haastatteluissa yläraajoja tukeva eksoskeleton on subjektiivisesti koettu hyödylliseksi ja käytettäväksi työkaluksi työkuormituksen vähentämisessä [34]. Kuitenkin erityisesti ihmisen rakenteellisesti liikkuvin nivel, olkanivel, asettaa haasteita eksoskeletonin rakenteelle ja toiminnalle. Eksoskeleton voi rajoittaa olkanivelen liikelaajuutta [39] ja osa käyttäjistä on raportoinut eksoskeletonin olevan kömpelö ja asettavan rajoitteita liikkuvuudelle [30, 32]. Lisäksi eksoskeletonin vaikutus lihaskuormituksen vähentämisessä on kenttämittauksissa ollut lupaavia laboratoriotuloksia pienempi [27].

Tämänhetkisen kirjallisuuden perusteella eksoskeletonit ovat potentiaalisia vaihtoehtoja kädet koholla tehtävän työskentelyn ergonomian parantamiseksi sekä yläraajojen ja niska-hartiaseudun lihaskuormituksen vähentämiseksi.

2.3 Tutkimuksen tarkoitus

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää missä määrin kädet koholla tehtävää työtä voidaan keventää eksoskeletonin avulla laboratorio-olosuhteissa ja autenttisissa työtilanteissa sekä selvittää onko eksoskeletonin käytöllä negatiivisia vaikutuksia työkuormitukseen. Lisäksi tavoitteena on määrittää ne kriittiset tasot, joiden ylittyessä yläraajan ja niska-hartiaseudun lihasten ylikuormittumisen riski kasvaa. Tutkimustulosten pohjalta laaditaan arviointityökalu, jonka avulla määritellään, milloin ja minkä tyyppisessä kädet koholla tehtävässä työssä eksoskeletonin käyttö on perusteltua ja suositeltavaa.

Tutkimuskysymykset olivat:

1. Keventääkö eksoskeleton kohdelihasten kuormitusta kädet koholla työskenneltäessä?
2. Kuormittaako eksoskeleton muita kuin kohdelihaksia haitallisesti?
3. Miten käden kohoasennon kulma, hetkittäinen ja kokonaiskesto sekä kohoasentojen lukumäärä/aikayksikkö vaikuttavat yläraajan ja niska-hartiaseudun kuormittumiseen?
4. Miten eksoskeletonin suositustasot voidaan luokitella? Voidaanko käyttää luokittelua "vihreä" = eksoskeletonin käytöstä ei välttämättä ole hyötyä, "keltainen" = eksoskeletonin käytöstä on jonkin verran hyötyä, "punainen" = eksoskeletonin käytöstä selvää hyötyä?
5. Onko arviointityökalu validi ja sovellettavissa käytäntöön?

3 MENETELMÄT

Tämä tutkimus jakaantuu kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa tehtyihin mittauksiin ja autenttisissa työolosuhteissa tehtyihin kenttämittauksiin.

Laboratoriotutkimukseen osallistui 21 vapaaehtoista ja tervettä henkilöä (taulukko 2). Ennen tutkimusta varmistettiin, ettei heillä ole viimeisen kuuden kuukauden aikana ollut ylävartalon tai yläraajojen vammoja tai sairauksia. Viisitoista tutkittavaa (6 naista, 9 miestä) osallistui dynaamisen työn tutkimuksen, kuusi (5 naista, 1 mies) teki tutkimuksessa staattista työtä. Yksi dynaamisen työn tutkimukseen osallistuneista tutkittavista oli vasenkätinen, kaikki muut oikeakätisiä (95,2 %).

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

| | n | Ikä (v) | Pituus (cm) | Paino (kg) | BMI (kg/m ²) | Aktiivisuusluokka |
|----------------|----|-----------|-------------|-------------|--------------------------|-------------------|
| Dynaaminen työ | 15 | 28,9 ± 8 | 176,6 ± 9,5 | 77,4 ± 15,5 | 24,6 ± 3,4 | 4,9 ± 2,3 |
| Staattinen työ | 6 | 47,3 ± 13 | 164,2 ± 7,3 | 64,6 ± 11,0 | 23,9 ± 2,8 | 5,5 ± 1,4 |

Tutkimuksella on Pohjois-Pohjanmaan sairaanhoitopiirin eettisen toimikunnan myöntämä lupa no. EETTMK 70/2019 §215.

3.1 Eksoskeleton

Tässä tutkimuksessa käytetty ulkoinen tukiranka Skelex 360 (Skelex, Alankomaat, kuva 1) on suunniteltu toistoina tapahtuviin ja staattisiin työtehtäviin, joissa kädet ovat hartiatasolla tai sen yläpuolella. Tukiranka ei ole nostotyöväline ja suositeltu käsien taakka (esim. työkalut) on noin viisi kiloa. Nostavana elementtinä toimii kaksi hiilikuitujousta, jotka keventävät käsien kuormaa, kun kädet ovat kohotettuina. Nostovoimaa voidaan säätää portaattomasti (0,5–3,5 kg / käsi). Käsien ollessa alhaalla nostovoimaa ei ole. Tukiranka ei rajoita käsivarsien liikeratoja eikä muutenkaan rajoita yläkehon liikkeitä. Skelex 360 -tukiranka säädetään yksilöllisesti jokaiselle sopivaksi, jolloin se antaa parhaan tuen ja toimivuuden. Tukirangan käsiä kohottava voima suhteutetaan käyttäjän kehon painoon. [40]



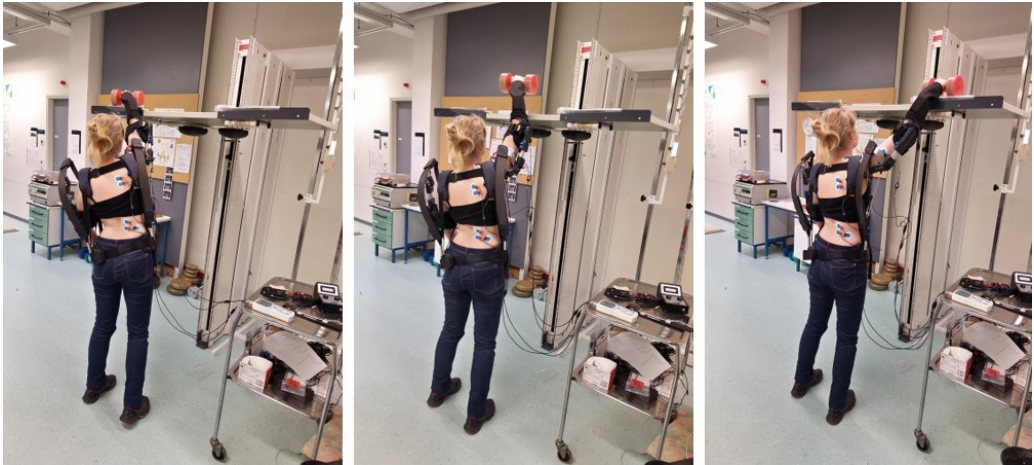
Kuva 1. Skelex 360 –tukiranka käyttövalmiina ja päälle puettuna.

3.2 Tutkimusasetelma

Laboratoriotutkimus koostui kahdesta osiosta, joissa suoritettiin työtä kädet koholla: dynaaminen yläraajan toistotyö ja staattinen työ. Mittauksia tehtiin yhteensä 168: neljä eri olkavarren kulmaa, työ eksoskeletonin kanssa ja ilman, kaksi koeasetelmaa: dynaaminen ja staattinen (yhteensä 21 tutkittavaa). Mittausjärjestys satunnaistettiin olkavarren työskentelykulman osalta.

3.2.1 Dynaaminen toistotyö

Tutkittavat tekivät maalausta simuloivaa toistotyötä vakioidulla nopeudella siirtämällä 2 kg käsipainoa edessään olevalla työtasolla vaakatasossa 50 cm matkan (kuva 2). Painoa siirrettiin työtason reunasta toiseen, merkityille alueille, irrottamatta välillä otetta painosta. Työ tehtiin dominantilla kädellä metronomin tahdissa taajuudella 35 krt/min. Painoa siirrettiin maksimissaan viiden minuutin ajan tai kunnes lihaksistoon kohdistui koehenkilön oman arvion perusteella kuormittavuuden taso 18, ”erittäin raskas”. Arviointiin käytettiin RPE-taulukkoa (rating of perceived exertion) asteikolla 6–20 [41].



Kuva 2. Dynaaminen työ simuloi maalausta. Työtä tehtiin maksimissaan viisi minuuttia tai kunnes lihaksistoon kohdistuva työkuormittavuuden taso oli subjektiivisesti arvioituna tasolla "erittäin raskas". Kuvan työskentelykulma on 120° ja työ tehtiin eksoskeletonin avustamana.

Työtä tehtiin neljässä olkavarren kulmassa: 60°, 90°, 120° ja 150°. Oikea työskentelykulma tarkistettiin kulmamittarilla, kun käsivarsi oli suorana ja ote oli työtasolla olevassa painossa. Eri kulmissa suoritettuja mittauksia tehtiin eri päivinä ja mittauspäivien välillä oli vähintään 48 tuntia. Samassa olkavarren kulmassa tehtävä työ suoritettiin aina ensin ilman eksoskeletonia. Eksoskeletonin kanssa tehtävä työ määriteltiin kestoltaan ja työskentelytasoltaan samaksi kuin ilman eksoskeletonia tehty työ.

3.2.2 Staattinen työ

Staattisen työn osiossa tutkittavat kannattelivat dominantti käsi suorana edessään 2 kg painoa, samoissa kulmissa kuin dynaamisen toistotyön osiossa, kunnes saavutettiin RPE-
taulukolla arvioiden kuormituksen taso 18, "erittäin raskas". Osiot tehtiin ulkoisen tukirangan avustamana ja ilman sitä.

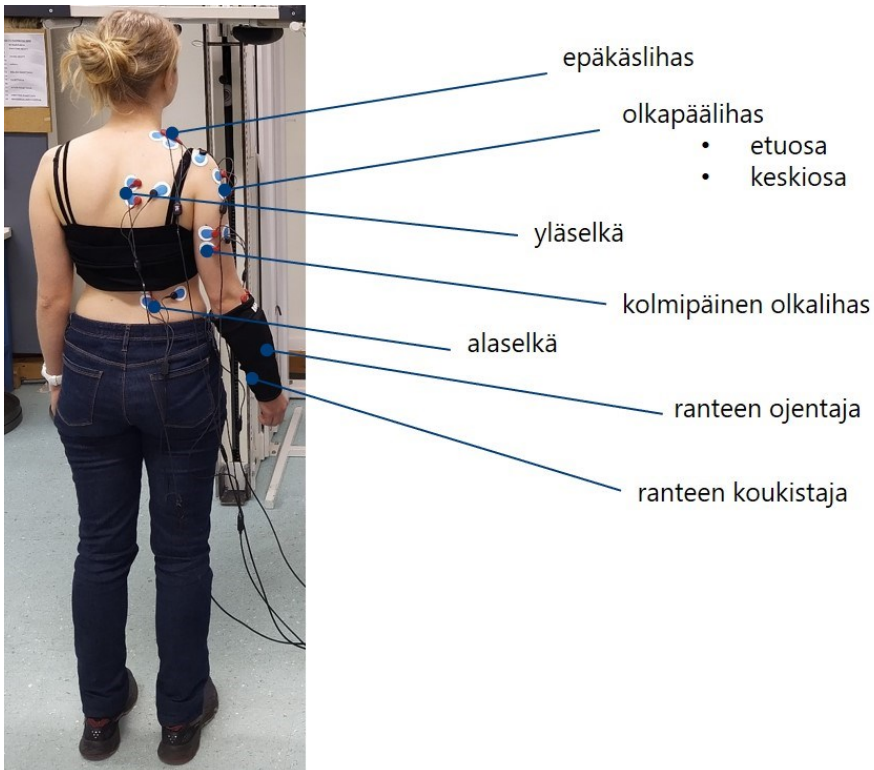
3.3 Mitatut muuttujat

3.3.1 Lihassähköinen aktiivisuus (EMG)

Dynaamisen toistotyön ja staattisen työn aikana mitattiin lihassähköistä aktiivisuutta (elektromyografia, EMG, Bittium Oy, Suomi) kahdeksasta eri lihaksesta (kuva 3). Tutkitut lihakset olivat:

1. ranteen ojentaja, *m. extensor carpi radialis*
2. ranteen koukistaja, *m. flexor carpi radialis*
3. kolmipäinen olkalihas, *m. triceps brachii*

4. olkapäälihaksen keskiosa, *m. deltoideus (intermediate)*
5. olkapäälihaksen etuosa, *m. deltoideus (anterior)*
6. epäkäslihakseen yläosa, *m. trapezius (pars descendes)*
7. yläselkä, epäkäslihakseen alaosa, *m. trapezius (pars transversa)*
8. alaselkä, pitkä selkälihas, *m. longissimus dorsi*



Kuva 3. EMG-laitteistolla mitattiin tutkittavan lihassähköistä aktiivisuutta kahdeksasta eri lihaksesta. Lihakset olivat epäkäslihakseen yläosa, olkapäälihaksen keskiosa, olkapäälihaksen etuosa, yläselkä, kolmipäinen olkalihas, alaselkä, ranteen ojentaja ja ranteen koukistaja.

Mittaus suoritettiin laittamalla tutkittavan lihaksen päälle (lihaskuntoon) iholle kaksi mitaavaa bipolaarista pintaelektrodiä ja yksi nk. maaelektrodi (BlueSensor M-00-S, Ambu). Eri mittauskerroilla elektrodit asetettiin samaan kohtaan tutkittavalle tehdyn anatomisen kartan perusteella. Näytteenottotaajuus oli 1000 Hz, kaistanleveys 40–500 Hz ja vahvistus x2000. EMG-data tallennettiin ja analysoitiin MegaWin-ohjelmalla (Mega Electronics Ltd, Suomi).

Työn aikana mitattu aktiivisuus suhteutettiin ennen testiä mitattuun maksimaaliseen lihassähköiseen aktiivisuuteen (maksimaalinen lihassupistus), jolloin työn aikainen lihaksiston kuormittuneisuuden taso voitiin määrittää. Tulos on ilmaistu prosentteina maksimaalisesta lihasaktiivisuudesta (%MEMG).

EMG-signaalista analysoitiin keskitajuus (MF, median frequency, Hz), tehon keskitajuus (MPF, mean power frequency, Hz), nollatason ylitystaajuus (ZCR, zero crossing rate, Hz), keskiarvoistettu/aikaintegroitu EMG (AEMG, average electromyogram value, μV) ja tehospektrin amplitudien summa (SPA, sum of power spectrum amplitude, $\mu\text{V/s}$).

3.3.2 Lihassoima

Lihassoiman osalta mitattiin maksimaalinen käden isometrinen puristusvoima ennen ja jälkeen työn. Maksimipuristusvoima mitattiin oikeasta kädestä, käsivarsi tuettuna penkin käsinojan avulla 90° kulmaan. Puristusvoimaa (maximum voluntary contraction, MVC) mitattiin venymäliuska-anturia käyttävällä Newtest Force -mittauslaitteella (Newtest Grip Strength, Newtest Oy, Suomi). Mittauslaitteessa on digitaalinen, reaaliaikainen numero-näyttö, josta lukema taltioitiin mittauspöytäkirjaan.

3.3.3 Lihaskudoksen happisaturaatio

Kudoksen happisaturaatio (SpO_2) eli happikylläisyys ilmaisee kudoksen happipitoisuuden suhteessa sen maksimaaliseen happipitoisuuteen [42]. Ranteen ojentajalihaksen happisaturaatiota työn aikana mitattiin lähi-infrapunaspektroskopian avulla (NIRS, Porta-Mon, Artinis Medical Systems, Alankomaat). NIRS-sensori kiinnitettiin teipillä lihaksen päälle ja peitettiin tummalla kankaalla. Ennen työn aloittamista määritettiin happisaturaation perustaso rentoutuneesta lihaksesta minuutin ajan. Happisaturaation palautumista rentoutuneesta lihaksesta seurattiin minuutin ajan myös työn lopettamisen jälkeen.

3.3.4 Lihasarakenne ja lihaksen kimmo-ominaisuudet

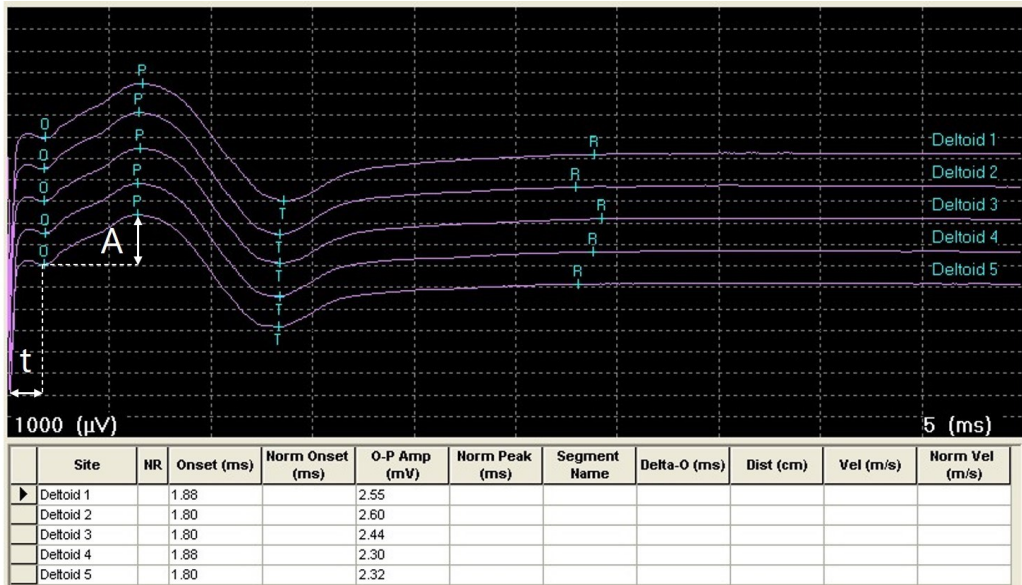
Lihasarakenteen muutoksia ennen työtä ja työn jälkeen tarkasteltiin ultraäänilaitteella (Logiq-5, GE Medical Systems Inc, Yhdysvallat). Ultraäänilaitteella otettiin pitkittäis- ja poikittaiskuva olkapäälihaksen keskiosasta ja kuvista analysoitiin lihaksen keskimääräinen poikileikkauspinta-ala ja pennaatiokulma (lihaksen ylimmän ja alimman/lihassolun kalvon välinen kulma). Tyypillisesti väsymys 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 pehmeään kudoksen (tässä tapauksessa lihaksen) elastisuutta, jäykkyyttä ja kiinteyttä, eli kudoksen kimmo-

ominaisuuksia. Mittaukset tehtiin ranteen ojentajasta ja koukistajasta, olkapäälihaksen keskiosasta, epäkäslihaksesta, yläselästä ja alaselästä.

3.3.5 Hermostollinen säätely

Hermostollista säätelyä mitattiin nk. suoran motorisen vasteen (M-vaste) avulla. Ennen työtä ja työn jälkeen mitattiin liikehermon (kainalohermo, *n. axillaris*) johtumisnopeutta olkavarresta (Sierra II Wedge, Sierra, Yhdysvallat). Mittauslaitteiston stimulaattorilla annettiin vakiosuuruinen ärsyke (20–30 mV) kainalohermoon. Vaadittava ärsykevirta määritettiin ensimmäisellä mittauskerralla ärsykevirtaa lisäämällä, kunnes hyvä hermovaste havaittiin. Ärsyksen aiheuttaman vasteen viive (latenssi, ms) ja voimakkuus (amplitudi, mV) mitattiin olkapäälihaksesta (kuva 4). Tyypillisesti väsymyksen seurauksena viive hidastuu (osoittaen hermon johtumisnopeuden hidastumista) ja voimakkuus pienenee (osoittaen lihassupistuksen heikkenemistä). Mittaustulos on viiden toiston keskiarvo.



Kuva 4. Hermon johtumisnopeuden mittaus. Sähköisen ärsyksen aiheuttaman vasteen viive eli latenssiaika (t) ja vasteen voimakkuus eli amplitudi (A).

3.3.6 Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus

Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitusta mitattiin Bodyguard2-mittalaitteella (Firstbeat Technologies, Suomi), joka kiinnitettiin kahdella elektrodilla tutkittavan rintakehälle. Mittarilla mitattiin sydämen sykintätaajuutta (krt/min) sekä sydämen sykkeen perusteella laskettua hapenkulutusta (VO_2 , ml/kg/min). Laite mittaa myös sykevälivaihtelua, eli kahden peräkkäisen sydämen lyönnin välisen ajan vaihtelua (heart rate variability,

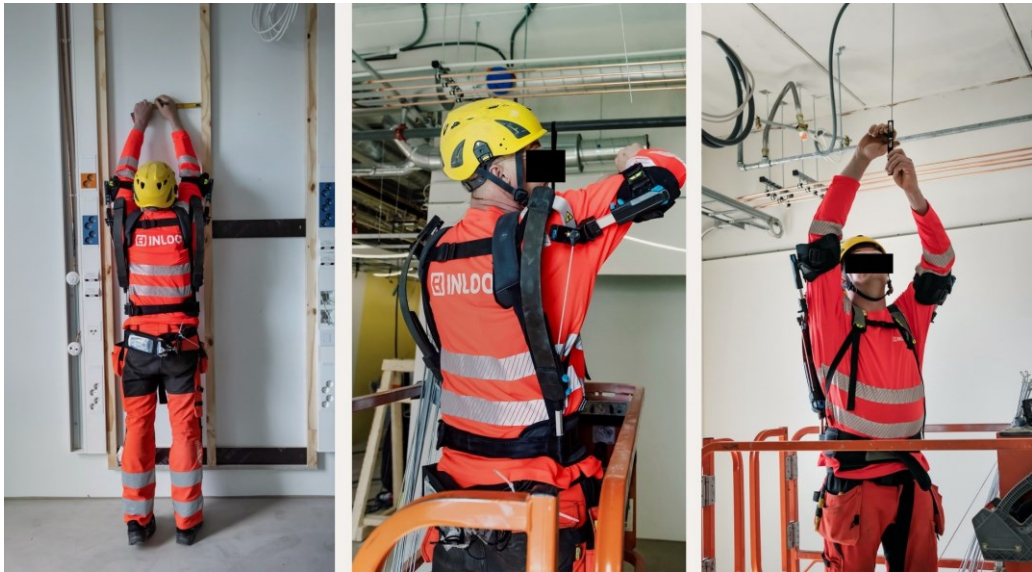
HRV). Sykevälivaihtelumuuttujien avulla voidaan tarkentaa syketaajuuteen perustuvaa arviota työn hengitys- ja verenkiertoelimistöön kohdistuvasta kuormituksesta, eli hapenkulutuksesta työn aikana [43].

3.3.7 Subjekttiivinen kuormittuneisuuden tuntemus

Työn aikana puolen minuutin välein ja työn päätyttyä tutkittavia pyydettiin arvioimaan koettu fyysisen kuormittuneisuuden tasonsa käyttäen vakioitua asteikkoa (RPE, rating of perceived exertion) välillä 6–20 [41].

3.3.8 Kenttämittaukset

Kenttämittaukset autenttisissa työtehtävissä (kuva 5) suoritettiin helmikuun ja kesäkuun 2021 välisenä aikana rakennustyömailla Lohjalla, Oulussa ja Vaasassa (taulukko 3). Tutkitavista (taulukko 4) viisi oli alakattoasentajia, neljä telineasentajia, kolme rakentajia, kaksi muuraria ja yksi tasoittaja. Kaikki tutkittavat olivat miehiä.



Kuva 5. Kentällä tehty mittaukset sisälsivät monipuolisesti kädet koholla tehtäviä työvaiheita.

Taulukko 3. Kenttämittausten kohteet, ajankohdat, ympäristön lämpötilat, tuuliolosuhteet ja ilman suhteellinen kosteus (keskiarvo ± keskihajonta, minimi- ja maksimiarvot).

| Kohde | lämpötila (°C) | min (°C) | max (°C) | tuuli (m/s) | min (m/s) | max (m/s) | kosteus (%) |
|----------------------------------|-------------------|-------------|-------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Lohja 16.-17.2.2021 (sisätyö) | 21,1 ± 0,6 | | | 4,1 | | | |
| Lohja 16.-17.2.2021 (ulkotyö) | -10,1 ± 6,7 | -25,6 | -3,0 | 8,8 ± 6,3 | 2,0 | 14,5 | 78,6 |
| Oulu 20.-23.4.2021 (ulkotyö) | 5,9 ± 4,6 | 0,4 | 12,8 | 5,3 ± 1,6 | 2,2 | 9,3 | 66,3 ± 27,7 |
| Vaasa 15.-17.6.2021 (sisätyö) | 19,5 ± 7,4 | 8,7 | 23,5 | | | | |

Taulukko 4. Tutkimukseen osallistuneiden tutkittavien ikä, pituus, paino, kehon painoindeksi (BMI) ja asteikolla 0-10 arvioitu aktiivisuusluokka, jossa arvo 5 tarkoittaa, että henkilö harrastaa 30-60 minuuttia viikossa raskasta ruumiillista liikuntaa, kuten hölkkäämistä, aerobicia tai korkean intensiteetin pyöräilyä (keskiarvo ± keskihajonta).

| | n | Ikä (v) | Pituus (cm) | Paino (kg) | BMI (kg/m ²) | Aktiivisuus- luokka |
|-------------|----|------------|-------------|-------------|-----------------------------|------------------------|
| koehenkilöt | 15 | 40,4 ± 9,6 | 182,1 ± 4,8 | 90,0 ± 14,6 | 27,1 ± 3,8 | 3,9 ± 1,8 |

Työn aikana mitattiin lihassähköistä aktiivisuutta (ME6000, Bittium Oy, Suomi) samoista lihaksista kuin laboratorio-osiossa (ks. kuva 3). Lisäksi kenttämittaukseen otettiin mukaan hauislihaksen (*m. biceps brachii*) lihassähköisen aktiivisuuden mittaus (MPower, Fibrox Oy, Suomi). Aktiivisuus suhteutettiin kunkin lihasryhmän maksimaaliseen aktiivisuuteen, jolloin työn aikainen kuormittuneisuuden taso voidaan määrittää. Maksimitasot määriteltiin lihaksittain ensimmäisellä mittauskerralla.

Olkavarren liikekulmia mitattiin molempiin olka- ja kyynärvarsiin asetetuilla sensoreilla (MPower, Fibrox Oy, Suomi) näytteenottotaajuuksella 14 Hz. Tulokset analysoitiin Tulefix-ohjelmalla (Työterveyslaitos, Suomi).

Ranteen ojentajalihaksen happisaturaatiota työn aikana mitattiin lähi-infrapunaspektroskopian avulla (NIRS, PortaMon, Artinis Medical Systems, Alankomaat). NIRS-sensori kiinnitettiin teipillä lihaksen päälle ja peitettiin tummalla kankaalla. Lihasten elastisuutta, jäykkyyttä ja kiinteyttä mitattiin myotonometrillä (Myoton-3, Müemeetria, Viro). Mittaukset tehtiin ranteen ojentajasta ja koukistajasta, olkapäälihaksen keskiosasta, epäkäslihaksesta,

yläselästä ja alaselästä. Lihasvoiman osalta mitattiin maksimaalinen käden puristusvoima ennen ja jälkeen työn. Sydämen sykintätaajuus- ja sykevariaatiorekisteröinti tehtiin Bodyguard2-laitteella (Firstbeat Technologies, Suomi).

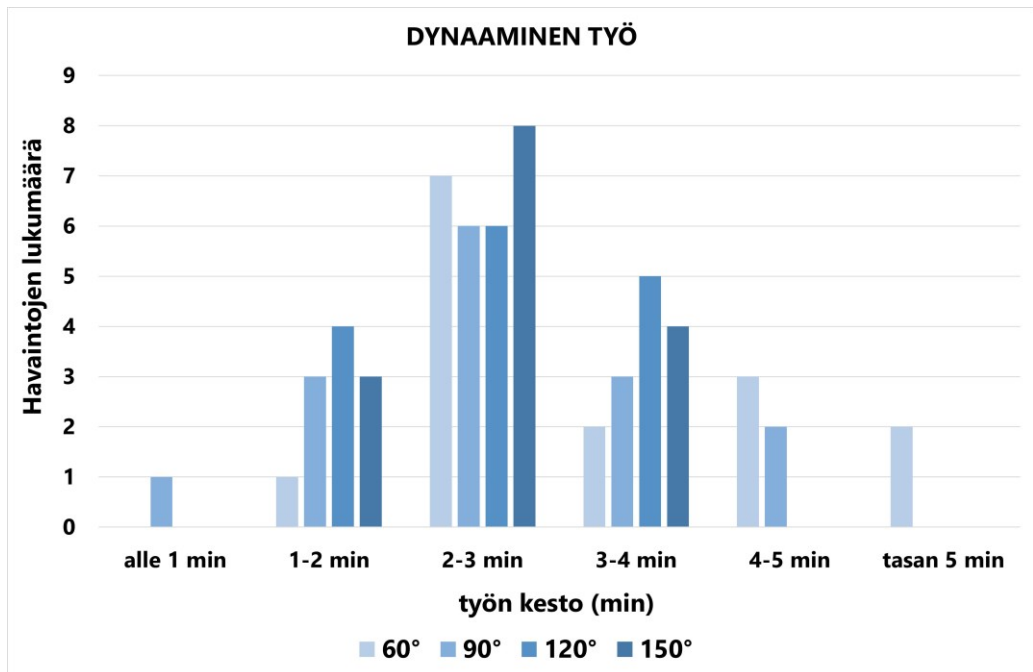
3.3.9 Tilastollinen analyysi

Aineisto todettiin normaalijakautuneeksi Kolmogorov-Smirnov-testin avulla (SPSS Statistics 27, IBM, Armonk, Yhdysvallat). 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-testin avulla. Maksimityöskentelyaikojen eroja olkavarren eri kulmissa testattiin yksisuuntaisella varianssianalyysillä (ANOVA) ja Bonferronin jälkitestillä. Kudoksen happisaturaatiomuutoksia ajan suhteen tarkasteltiin toistettujen mittausten kovarianssianalyysillä (ANCOVA), jossa kovariaattina oli lähtötason arvo. Tulos katsotaan merkitseväksi, kun $p < 0,05$.

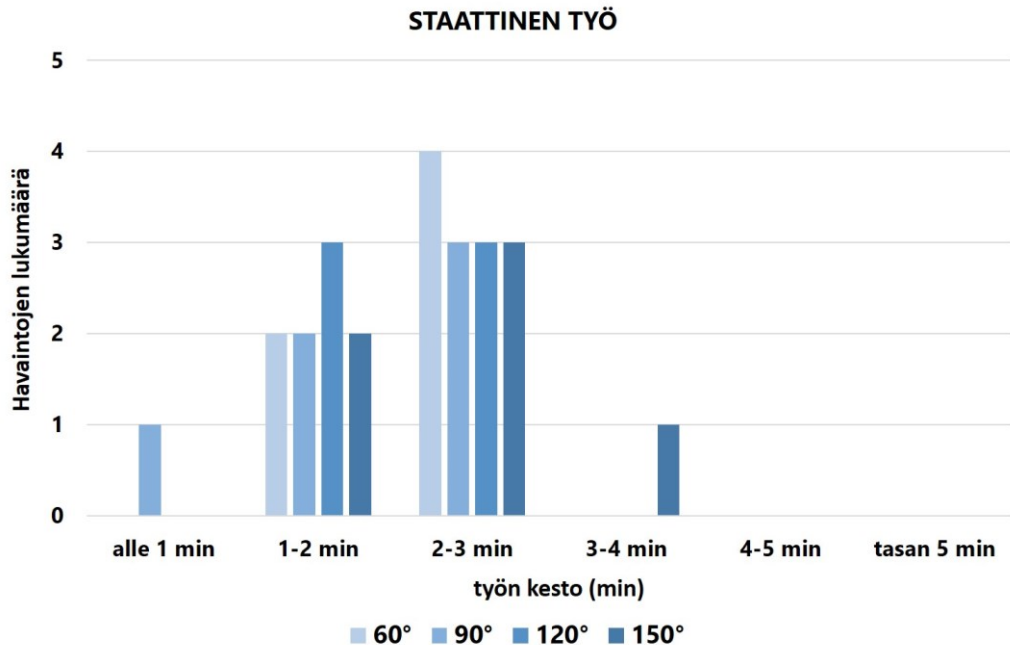
4 TULOKSET

4.1 Työn kesto ja koettu kuormitus työn aikana

Työtä ilman eksoskeletonia tehtiin laboratoriossa maksimissaan viisi minuuttia tai kunnes lihaksistoon kohdistuva työkuormittavuuden taso oli subjektiivisesti arvioituna tasolla "erittäin raskas" (RPE=18). Kuvissa 6 ja 7 on esitetty työn keston jakaumat dynaamisessa ja staattisessa työssä. Keskimäärin dynaamista toistotyötä tehtiin pisimpään 60° olkavarren kulmassa ja nopeimmin työ lopetettiin, kun olkavarren kulma oli 90° (taulukko 5, liite 1).



Kuva 6. Työn keston jakauma dynaamisessa työssä ilman eksoskeletonia tehtynä. Työn kesto oli sama eksoskeletonin kanssa.

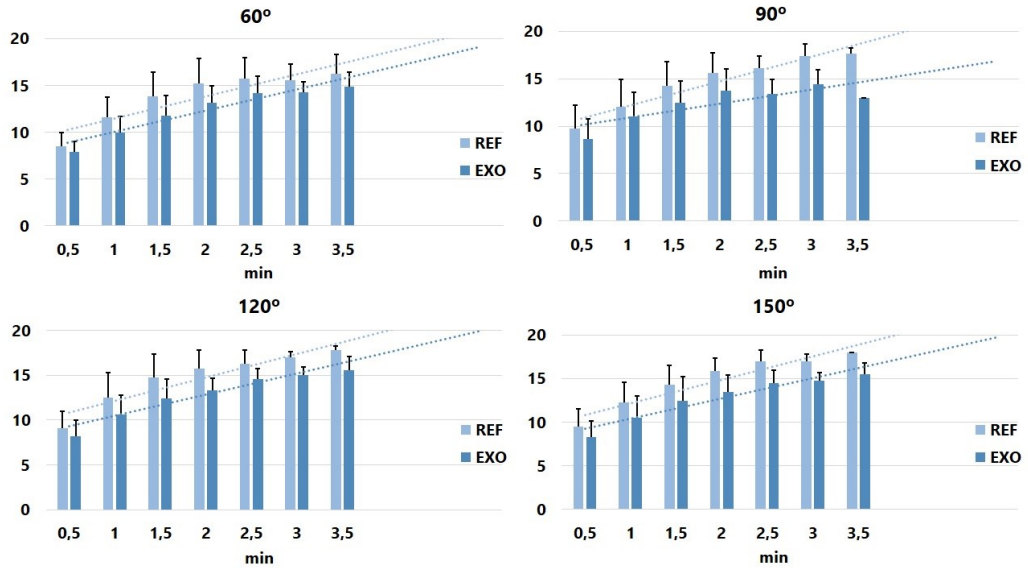


Kuva 7. Työn keston jakauma staattisessa työssä ilman eksoskeletonia tehtynä. Työn kesto oli sama eksoskeletonin kanssa.

Taulukko 5. Työn keston keskiarvo ± keskihajonta (min) dynaamisessa ja staattisessa työssä eri työskentelykulmilla. *työn kesto eroaa tilastollisesti merkitsevästi 60° kulmassa tehdyn työn kestosta **p<0,01, ***p<0,001.

| Työ | Työn kesto 60° kulmassa (min) | Työn kesto 90° kulmassa (min) | Työn kesto 120° kulmassa (min) | Työn kesto 150° kulmassa (min) |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Dynaaminen | 3,1 ± 1,2 | 2,4 ± 0,9*** | 2,5 ± 0,9** | 2,5 ± 0,7 |
| Staattinen | 1,9 ± 0,6 | 1,7 ± 0,6 | 1,8 ± 0,6 | 2,1 ± 0,6 |

Subjektiiivinen arvio työn kuormittavuudesta oli eksoskeletonin kanssa tehdyssä dynaamisessa työssä tilastollisesti merkitsevästi matalampi kaikilla olkavarren työskentelykulmilla (60° p<0,05, 90° p<0,01, 120° p<0,001 ja 150° p<0,05). Koettu kuormittuneisuus työskentelyn aikana dynaamisessa työssä on esitetty kuvassa 8. Staattisessa työssä eksoskeletonin kanssa työskentely koettiin vähemmän kuormittavaksi 120° työskentelykulmassa (p<0,001), muissa olkavarren kulmissa ero ilman eksoskeletonia työskentelyyn ei ollut merkitsevä.

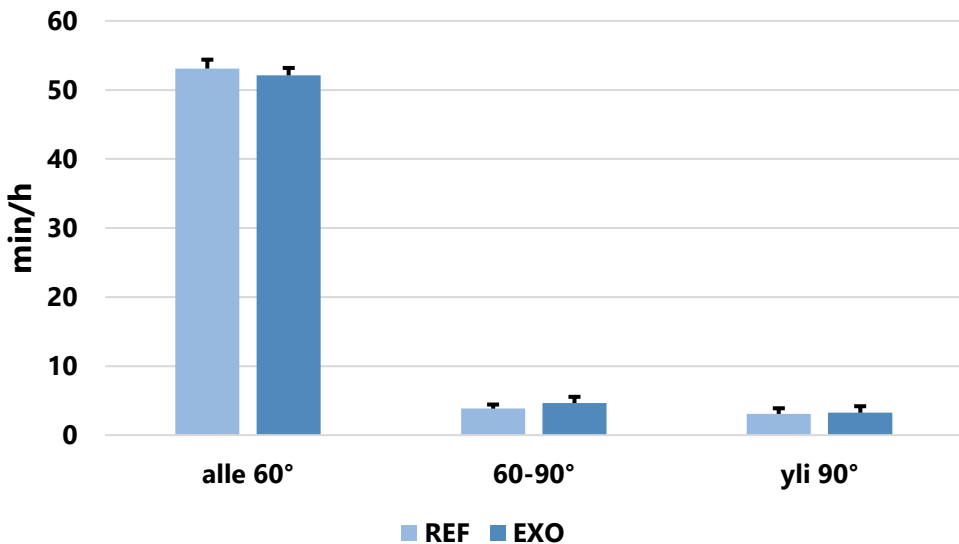


Kuva 8. Koetun kuormituksen arvio (keskiarvo ± keskihajonta) työn eri vaiheissa RPE-asteikolla (6–20) neljällä olkavarren kulmalla. Fyysisen kuormittuneisuuden taso oli tilastollisesti merkitsevästi matalampi (60° $p < 0,01$, 90° $p < 0,01$, 120° $p < 0,001$ ja 150° $p < 0,05$) eksoskeletonin kanssa (EXO) kaikilla olkavarren kulmilla verrattuna ilman eksoskeletonia työskentelyyn (REF).

Koettu kuormittuneisuus oli noin neljän tunnin autenttisissa työolosuhteissa työskentelyn jälkeen koehenkilöiden subjektiivisen arvon perusteella ”kevyttä” (RPE 11). Kuormittuneisuuden taso oli sama sekä eksoskeletonin kanssa työskentelyn jälkeen, että ilman sitä.

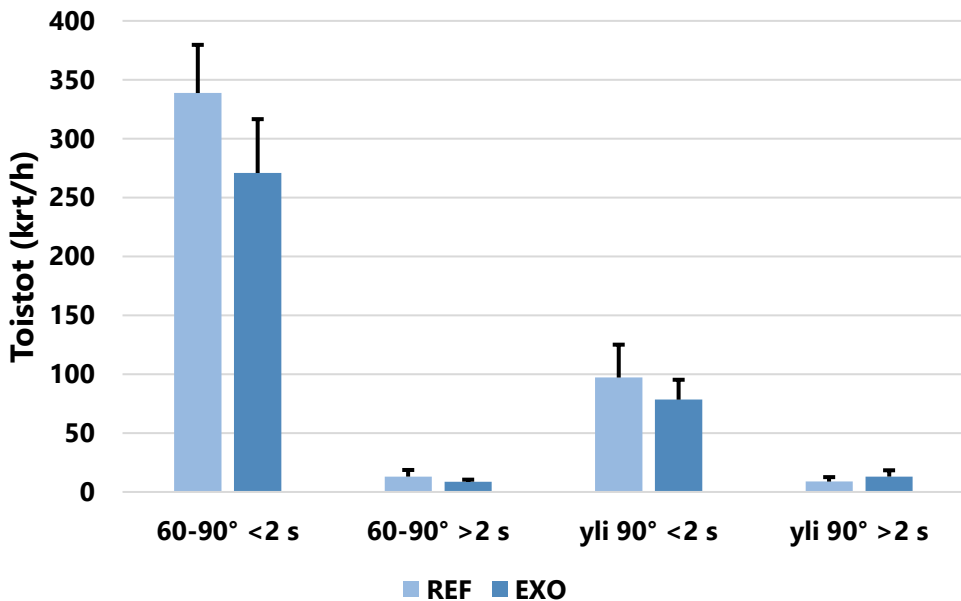
4.2 Nivelkulmat

Kenttätutkimuksessa työskentelyn aikaisia käsivarren liikekulmia mitattiin olkavarteen kiinnitetyllä sensorilla. Työjaksot eksoskeletonin kanssa ja ilman eksoskeletonia olivat olkavarren liikekulmien suhteen samanlaiset (kuva 9). Esimerkiksi hartiatason yläpuolella (yli 90° olkakulma) tapahtuvassa työnteossa oli eksoskeletonin kanssa ja ilman sitä tehdyn työn välillä vain 5,6 % (0,17 min/h) ero.

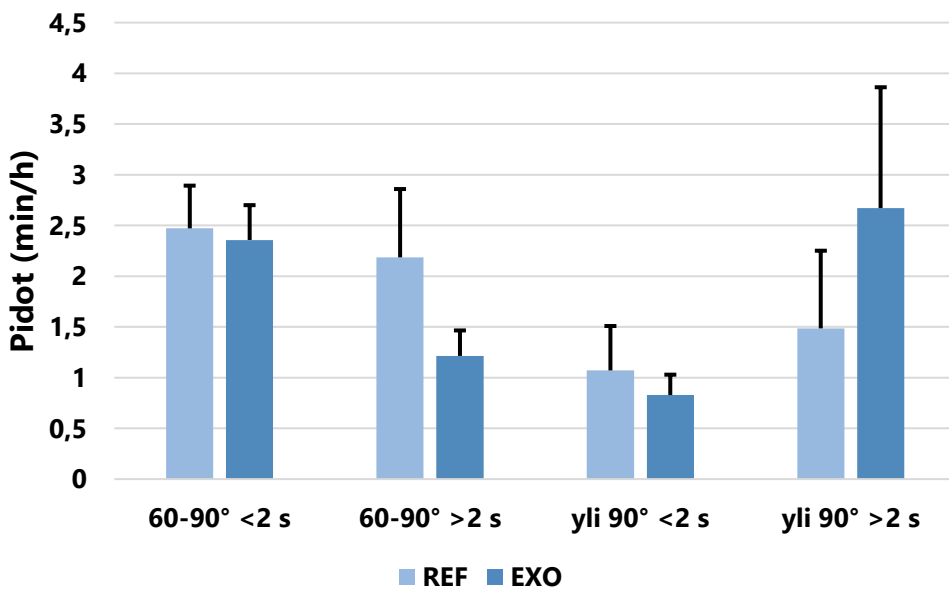


Kuva 9. Olkanivelen nivelkulmien keskiarvot (min/h) kenttätutkimuksessa noin neljän tunnin autenttisissa työolosuhteissa työskentelyn aikana eksoskeletonin kanssa (EXO) ja ilman eksoskeletonia (REF) (keskiarvo \pm keskivirhe).

Kuvissa 10 ja 11 on esitetty oikeasta olkavarresta mitatut keskimääräiset käden liikkeet (toistot kertaa tunnissa) sekä staattiset pidot (minuuttia tunnissa). Toistot sekä pidot on esitetty kahdessa eri luokassa, 60–90° sekä yli 90°, sekä alle ja yli kahden sekunnin pituisina toistoina ja pitoina. Suurin osa työskentelystä tapahtui alle 60° asteen kulmassa. Toistoissa ja pidoissa ei ollut systemaattisia eroja yli 60° työskentelykulmilla ilman eksoskeletonia ja eksoskeletonin kanssa työskentelyn välillä.



Kuva 10. Keskimääräiset käden liikkeet (kerta/tunnissa) noin neljän tunnin autenttisissa työolosuhteissa työskentelyn aikana olkavarren 60-90° ja yli 90° kulmissa eksoskeletonin kanssa (EXO) ja ilman eksoskeletonia (REF) (keskiarvo ± keskivirhe).



Kuva 11. Keskimääräiset käden pidot (minuuttia tunnissa) noin neljän tunnin autenttisissa työolosuhteissa työskentelyn aikana olkavarren 60-90° ja yli 90° kulmissa eksoskeletonin kanssa (EXO) ja ilman eksoskeletonia (REF) (keskiarvo ± keskivirhe).

4.3 Tuki- ja liikuntaelimistöön kohdistuva kuormitus

4.3.1 Lihasvoima

Tutkittavien maksimaalinen puristusvoima ei muuttunut tilastollisesti merkitsevästi dynaamisen työn aikana. Puristusvoiman muutos oli pääasiassa kasvava, lukuun ottamatta työskentelyä olkavarren kulmassa 150°. Staattisen työn jälkeen maksimaalinen puristusvoiman muutos oli kasvava (mutta ei tilastollisesti merkitsevästi) kaikissa mitatuissa olkavarren kulmissa.

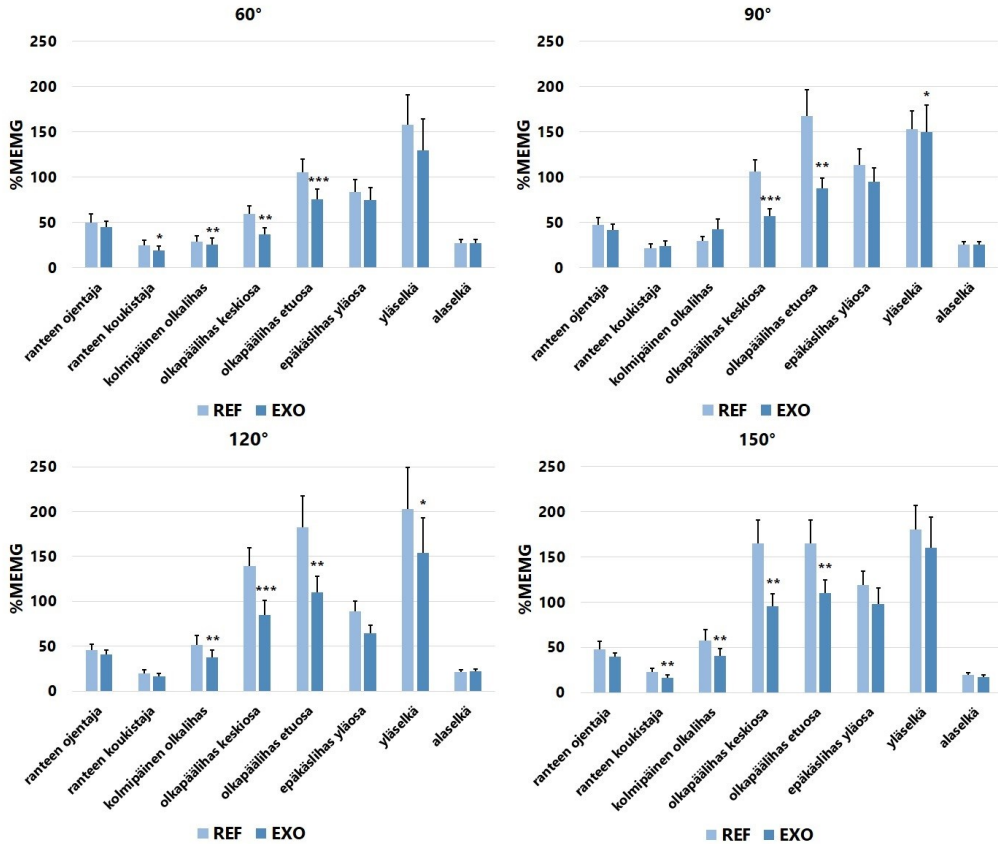
Ennen neljän tunnin todellisessa työympäristössä työskentelyä tutkimukseen osallistuneiden henkilöiden maksimipuristusvoima oli $54,7 \pm 9,6$ kg. Työn jälkeen mitattu maksimipuristusvoima ei muuttunut tilastollisesti merkitsevästi, mutta trendi oli samanlainen ja kasvava sekä ilman eksoskeletonia ($57,4 \pm 10,5$ kg) että eksoskeletonin kanssa ($56,7 \pm 10,0$ kg) työskentelyn jälkeen.

4.3.2 Lihassähköinen aktiivisuus (EMG)

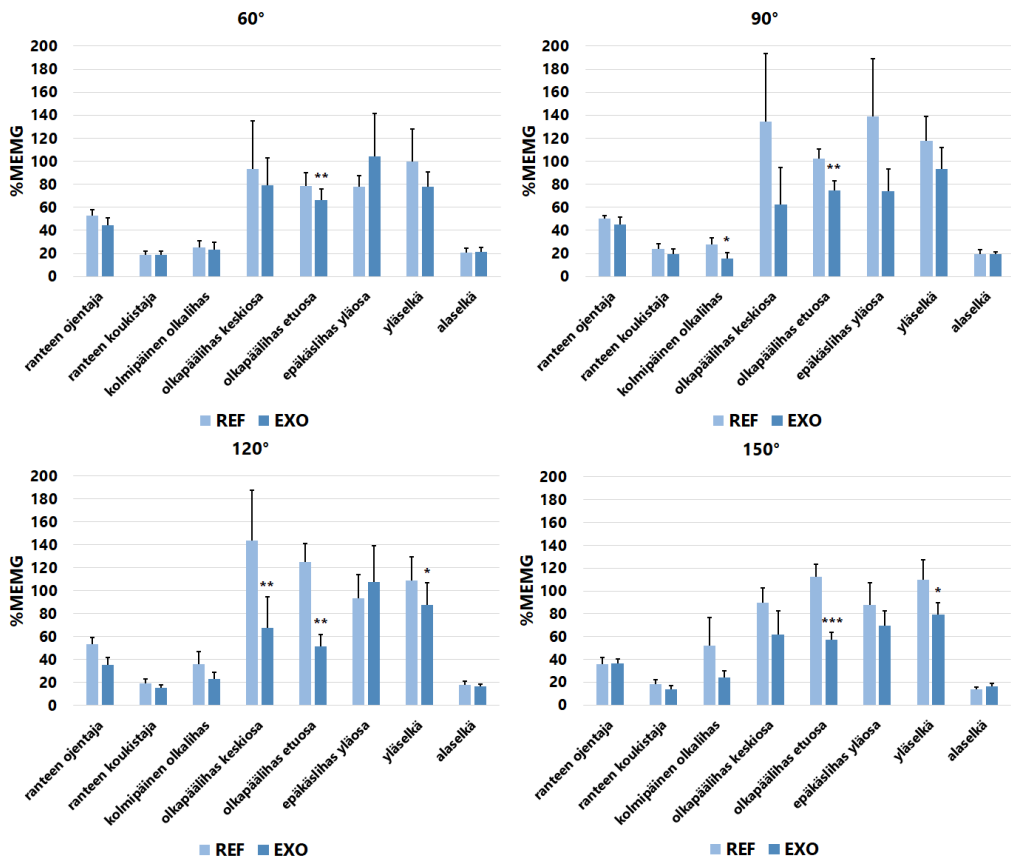
Lihaksen sähköistä aktiivisuutta mitattiin työn aikana kahdeksasta eri lihaksesta. Näistä kolmessa lihaksessa aktiivisuus oli pienempää eksoskeletonin kanssa työskenneltäessä kaikissa dynaamisen työn työskentelykulmissa (kuva 12, liite 1). Olkavarren kulmassa 60° eksoskeletonin käyttö vähensi ranteen koukistajan, kolmipäisen olkaliuksen ja olkapäälihaksen sähköistä aktiivisuutta. 90° työskentelykulmassa eksoskeleton kevensi olkapäälihaksen ja yläselän kuormitusta. 120° kulmassa eksoskeletonin vaikutus oli samanlainen, mutta olkapäälihaksen ja yläselän lisäksi myös kolmipäisen olkaliuksen aktiivisuus pieneni. Olkavarren kulmassa 150° merkitsevästi pienempi aktiivisuus eksoskeletonia käytettäessä havaittiin ranteen koukistajassa, kolmipäisessä olkaliuksessa ja olkapäälihaksessa. Eksoskeletonilla ei ollut vaikutusta ranteen ojentajalihaksen, epäkäslihaksen tai alaselän lihassähköiseen aktiivisuuteen missään työskentelykulmassa.

Mitatuista lihaksista eksoskeleton vaikutti eniten kolmipäisen hartialihaksen eli olkapäälihaksen aktiivisuuteen. Eksoskeleton vähensi olkapäälihaksen sekä etu- että keskiosan kuormitusta jokaisessa mitatussa työskentelykulmassa. Dynaamisessa työssä suurin eksoskeletonin lihasaktiivisuutta pienentävä vaikutus, lähes kaksi kertaa (47,6 %) alhaisempi kuormittuneisuus, todettiin olkapäälihaksen etuosassa 90° olkavarren kulmassa työskenneltäessä. Myös olkapäälihaksen keskiosan kuormitustaso oli huomattavasti alhaisempi (46,1 %) eksoskeletonin käytön yhteydessä 90° työskentelykulmassa.

Keskimäärin kaikissa mitatuissa lihaksissa yhteensä eksoskeleton helpotti lihastyötä merkittävimmin, kun dynaamista työtä tehtiin 150° olkavarren kulmassa. Dynaaminen työ keveni 150° työskentelykulmassa keskimäärin 23,7 %. Staattisessa työssä eksoskeleton auttoi parhaiten 90° työskentelykulmassa; työ keveni keskimäärin 27,2 % (kuva 13, liite 1).

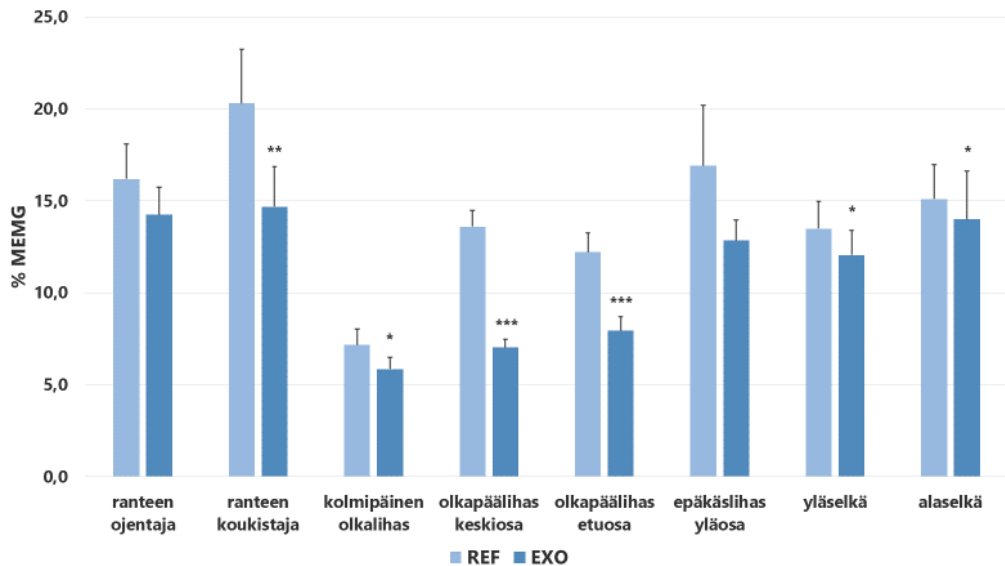


Kuva 12. Lihasten kuormitus dynamisessa työssä ilman eksoskeletonia (REF) ja sen kanssa (EXO) neljässä eri työskentelykulmassa (keskiarvo ± keskivirhe). *lihasaktiivisuus oli tilastollisesti merkitsevästi pienempää eksoskeletonin kanssa verrattuna ilman eksoskeletonia tehtyyn työhön * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.



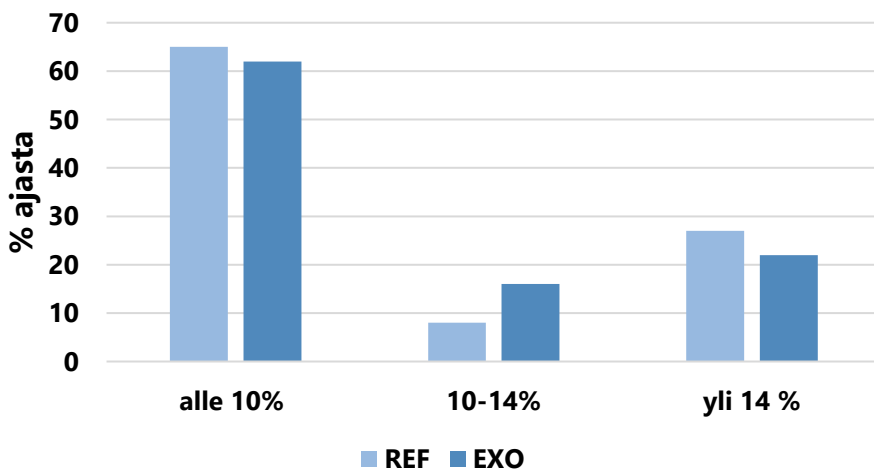
Kuva 13. Lihasten kuormitus staattisessa työssä ilman eksoskeletonia (REF) ja sen kanssa (EXO) neljässä eri työskentelykulmassa (keskiarvo ± keskivirhe). *lihasaktiivisuus oli tilastollisesti merkitsevästi pienempää eksoskeletonin kanssa verrattuna ilman eksoskeletonia tehtyyn työhön * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

Noin neljän tunnin autenttisissa työoloissa työskentelyn aikana lihasten kuormitus (lihas-sähköinen aktiivisuus) oli lähes kaikissa mitatuissa lihaksissa tilastollisesti merkitsevästi pienempi eksoskeletonin kanssa työskenneltäessä verrattuna ilman eksoskeletonia työskentelyyn (kuva 14, liite 1). Vain ranteen ojentajissa ja epäkäsihaksen yläosassa ei havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa. Ero lihaskuormituksessa eksoskeletonin kanssa ja ilman eksoskeletonia työskentelyn välillä oli selkeintä olkapäälihaksen keski- (48,6 %) ja etuosissa (34,3 %). Ranteen koukistajalihaksissa lihasaktiivisuus oli 24,9 %, kolmipäisessä olkalihaksessa 16,3 %, yläselässä 9,5 % ja alaselässä 16,2 % alhaisempaa eksoskeletonin kanssa työskenneltäessä.



Kuva 14. Lihasten kuormitus autenttissa työoloissa työskentelyn aikana (noin 4 tuntia) ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) (keskiarvo ± keskivirhe). *lihasaktiivisuus oli tilastollisesti merkitsevästi pienempi eksoskeletonin kanssa verrattuna ilman eksoskeletonia tehtyyn työhön * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

Kun työvuoron aikainen lihaskuormitus jaetaan kolmeen kuormitusluokkaan (alle 10 %, 10–14 % ja yli 14 % maksimista) eksoskeletonin käyttö vähensi työskentelyaikaa suurimmassa kuormitusluokassa (yli 14 %) hauislihaksessa 18,5 % (kuva 15). Suositusten mukaan keskimääräinen työn aikainen lihaskuormitus ei saisi ylittää 14 % maksimista [44].

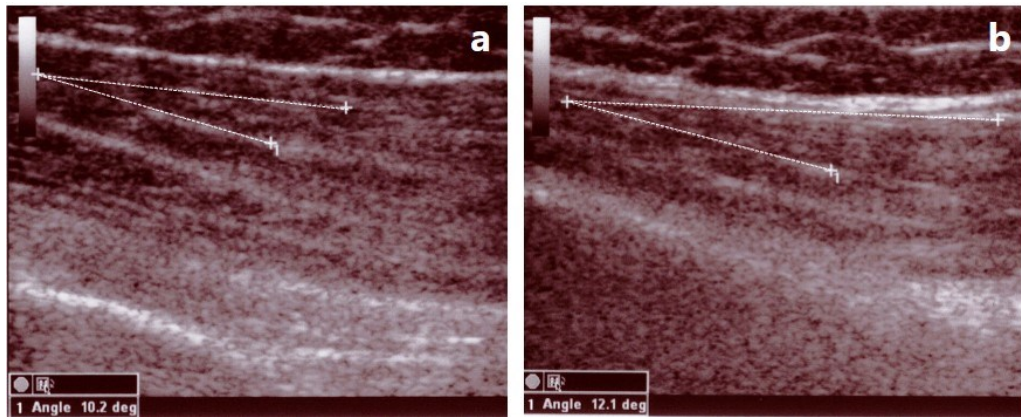


Kuva 15. Hauislihaksen kuormitus jaettuna kolmeen kuormitusluokkaan (alle 10 %, 10–14 % ja yli 14 % maksimista) kenttätutkimuksessa eksoskeletonin kanssa (EXO) ja ilman eksoskeletonia (REF) työskentelyn aikana.

4.3.3 Lihasrakenne ja lihaksen kimmo-ominaisuudet

Lihaskudos on tyypillinen kudos, jonka rakenne luo edellytyksen sen toiminnalle. 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 lihas-säikeiden 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 kompensatiosta maksimaalisen voimata-son ylläpitämiseksi. Laboratoriotutkimuksessa olkapäälihaksen pennaatiokulma kasvoi $10,1 \pm 8,7\%$ enemmän, kun työtä tehtiin eksoskeletonin kanssa 90° työskentelykulmassa verrattuna ilman eksoskeletonia tehtyyn työhön (kuva 16). Muissa työskentelykulmissa tai staattisen työn yhteydessä muutoksia ei havaittu.

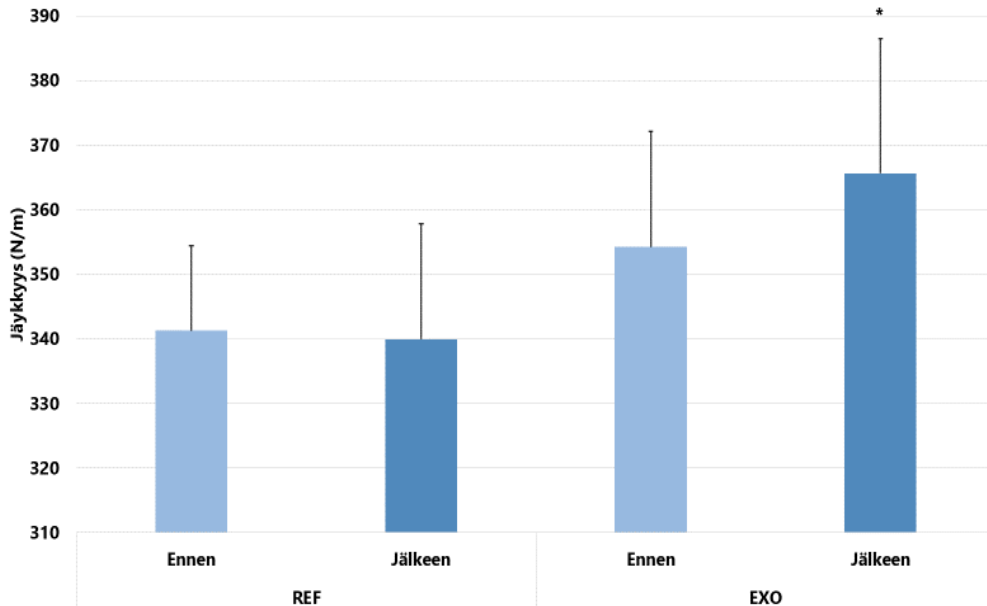


Kuva 16. Olkapäälihaksen pennaatiokulma kasvoi eniten, kun työtä tehtiin 90° kulmassa.

Ultraäänellä mitatuista lihasrakenteen muuttujista lihaksen poikkipinta-ala kasvaa tyypillisesti fyysisen työn seurauksena johtuen lihaksen akuutista turvotuksesta. Olkapäälihaksessa ei havaittu eroja poikkipinta-alan muutoksissa kummassakaan tutkimusasetelmassa (dynaaminen työ/staattinen työ).

Lihaksen hienorakennetta tutkittiin myotonometrin (nk. lihasvasara) avulla. Tulosten perusteella yläselän lihasten jäykkyys kasvaa dynaamisessa työssä 60° kulmassa eksoskeletonin kanssa työskennellessä $3,1 \pm 2,6\%$ (kuva 17, liite 1). Muissa olkavarren kulmissa tehdyn työn yhteydessä muutoksia lihaksen jäykkyydessä ei havaittu missään mitatuissa lihaksissa. Eksoskeletonin käyttö dynaamisessa työssä aiheutti yläselän lihasten elastisuuden $4,1 \pm 1,4\%$ kasvun 90° työskentelykulmassa. Ranteen koukistajassa havaittiin lihaksen kiinteyden laskua eksoskeletonin kanssa staattisesti työskenneltäessä $5,4 \pm 1,7\%$ (60° kulma). Lisäksi dynaamisessa työssä yläselän lihasten kiinteyden lasku $2,1 \pm 1,1\%$ ilman

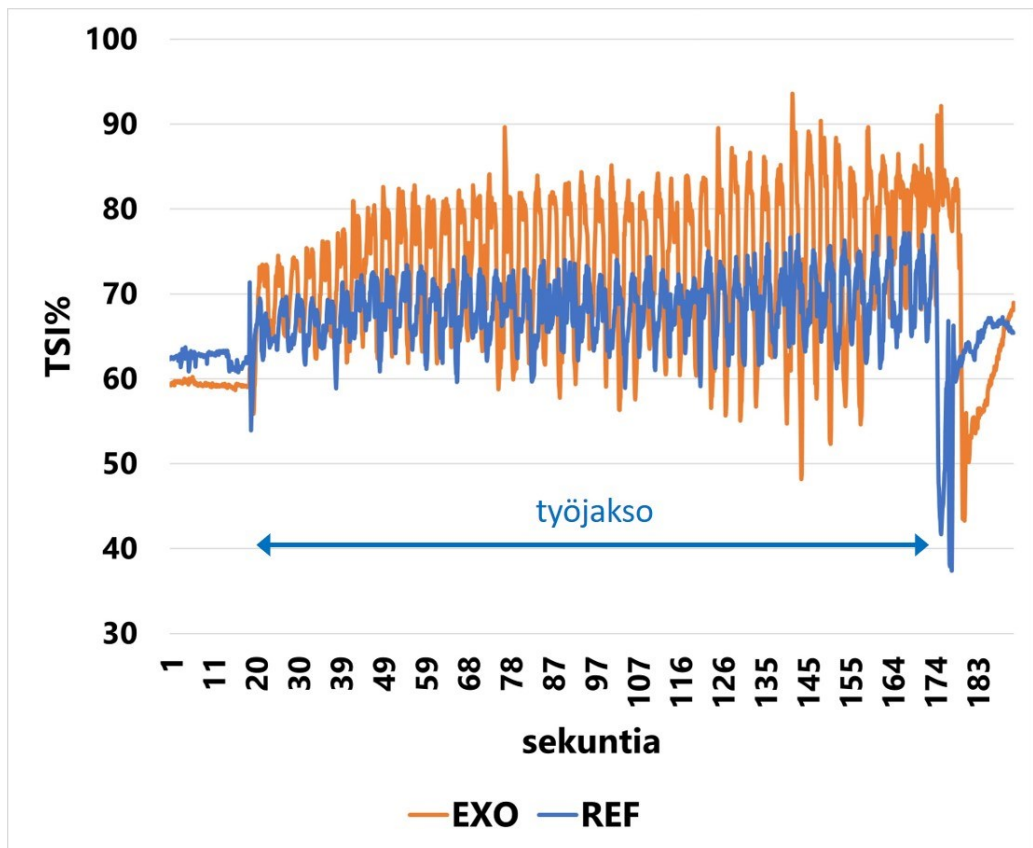
ekso skeletonia työskenneltäessä. Kenttämittauksessa olkapäälihaksen keskiosan elastisuus kasvoi, kun työtä tehtiin ilman ekso skeletonia verrattuna ekso skeletonin kanssa tehtyyn työhön ($10,5 \pm 4,1 \%$).



Kuva 17. Yläselän lihasten jäykkäisyys (keskiarvo \pm keskivirhe) kasvoi ekso skeletonia käytettäessä (EXO) 60° kulmassa tehdyssä dynaamisessa työssä (* $p < 0,05$).

4.3.4 Lihaskudoksen happisaturaatio

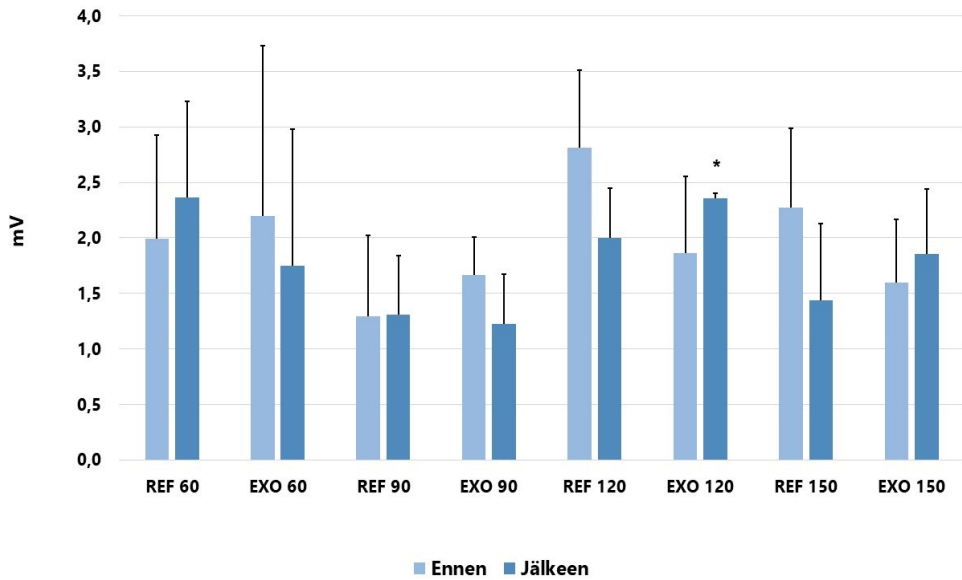
Lihaksen happisaturaatiota eli happikylläisyyttä mitattiin lähi-infrapunaspektrometrialla ranteen ojentajalihaksesta. Happisaturaatio (TSI%) on luku, joka ilmaisee, montako prosenttia hemoglobiiniin (verenpunan) hapensitomiskohdista on liittänyt itseensä happea. Näin se ilmaisee kudoksen happipitoisuuden suhteessa sen maksimaaliseen happipitoisuuteen. Tulosten perusteella ranteen ojentajalihaksen happisaturaatio putosi jokaisessa työskentelykulmassa ensimmäisen puolen minuutin aikana keskimäärin 20 % ja pysyi lähtötilannetta alhaisemmalla tasolla koko työskentelyn ajan palautuen taas normaalille tasolle työskentelyn loputtua (kuva 18). Lihaskudoksen happisaturaatiotason vaihtelu ei kuitenkaan eronnut merkittävästi, kun työtä tehtiin ekso skeletonin kanssa verrattuna ilman ekso skeletonia työskentelyyn. Happisaturaatiotason vaihtelussa ei havaittu eroja myöskään autenttisessa työympäristössä työskentelyn aikana.



Kuva 18. Ranteen ojentajan happisaturaatio (TSI%) eksoskeletonin kanssa (EXO) ja ilman (REF) dynaamisessa työssä 150° kulmassa.

4.3.5 Hermostollinen säätely

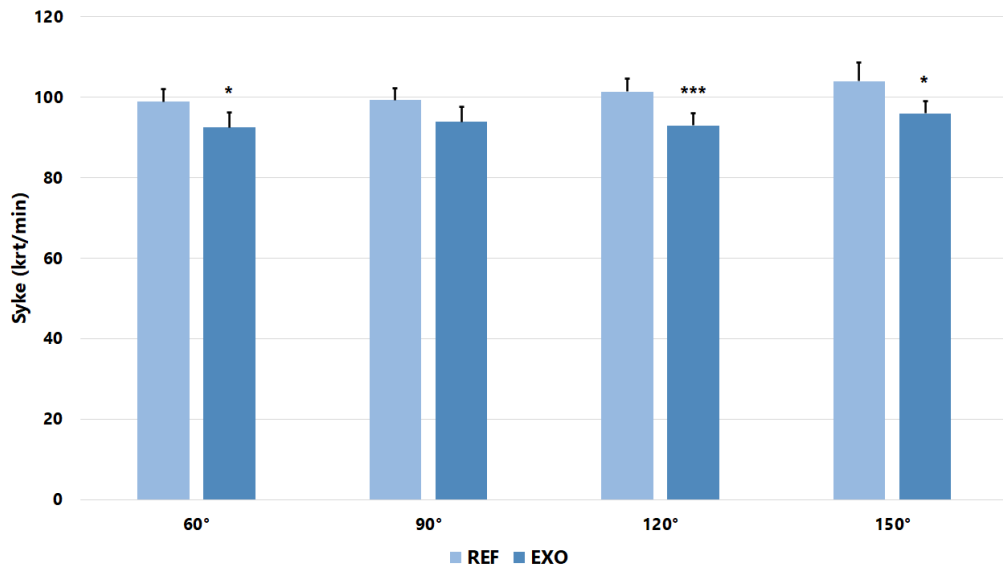
M-vasteen mittauksella arvioidaan lihaksen ja sitä suoraan hermottavan hermon yhteistoiminnan muutoksia. M-vasteesta analysoidaan vasteen suuruus (amplitudi) ja kesto ärsykkeen antamisesta vasteen alkun (latenssi). M-vasteen latenssin kasvu osoittaa hidastunutta hermoimpulssin kulkunopeutta, mikä johtuu raskaan työn aiheuttamasta lihaskudoksen happamuuden kasvamisesta. Tulosten perusteella eksoskeletonin käyttö ei vaikuttanut M-vasteen latenssiin. Vasteen amplitudi kuitenkin kasvoi, kun dynaamista työtä tehtiin 120° kulmassa eksoskeletonin kanssa verrattuna ilman eksoskeletonia tehtyyn työhön (kuva 19).



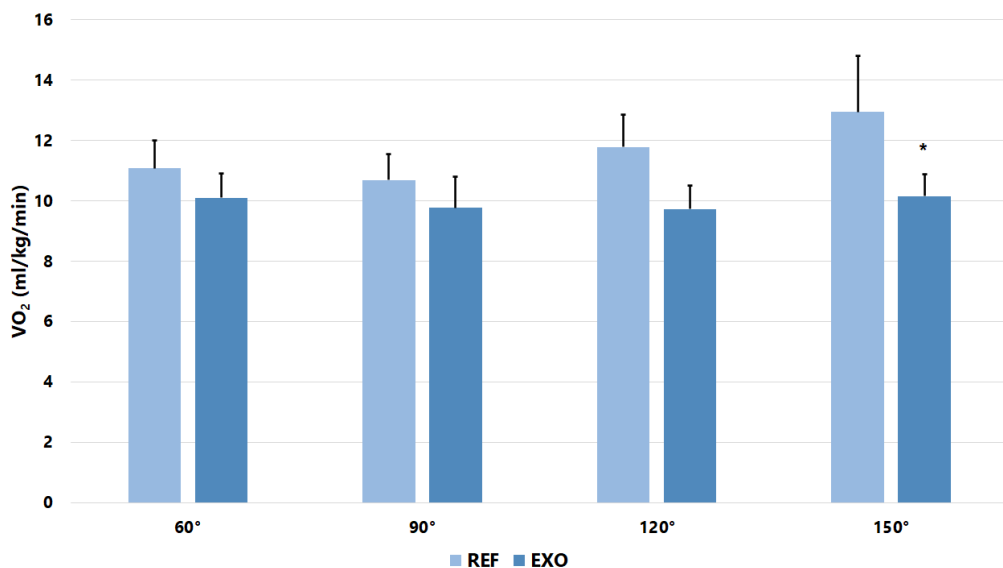
Kuva 19. M-vasteen amplitudi (keskiarvo \pm keskivirhe) kasvoi dynaamisessa työssä 120° kulmassa eksoskeletonin kanssa (EXO) verrattuna ilman eksoskeletonia (REF) tehtyyn työhön (* $p < 0,05$).

4.4 Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus

Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitusta arvioitiin sydämen sykkeen sekä sen perusteella laskennallisesti mitatun hapenkulutuksen (VO_2) perusteella. Dynaamisessa työssä sydämen syketaaso oli alhaisempi eksoskeletonin kanssa työskenneltäessä 60°, 120° ja 150° työskentelykulmilla (kuva 20, liite 1). 60 asteen työskentelykulmassa syke oli $6,9 \pm 6,5$ %, 120° kulmassa $6,7 \pm 5,3$ % ja 150° kulmassa $7,1 \pm 10,1$ % alhaisempi verrattuna ilman eksoskeletonia tehtyyn työhön. Hapenkulutus kehon painokiloa kohti (ml/kg/min) kuvaa työskentelyn aineenvaihdunnallista kuormitusta. Laboratoriomittauksissa eksoskeleton pienensi hapenkulutusta $14,5 \pm 28,1$ % 150° työskentelykulmalla, muilla työskentelykulmilla eksoskeletonilla ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta (kuva 21, liite 1).



Kuva 20. Sydämen syke dynaamisessa työssä ilman eksoskeletonia (REF) ja sen kanssa (EXO) neljässä eri työskentelykulmassa (keskiarvo \pm keskivirhe). *syke oli eksoskeletonin kanssa tilastollisesti merkitsevästi matalampi kuin ilman eksoskeletonia * $p < 0,05$, *** $p < 0,001$.

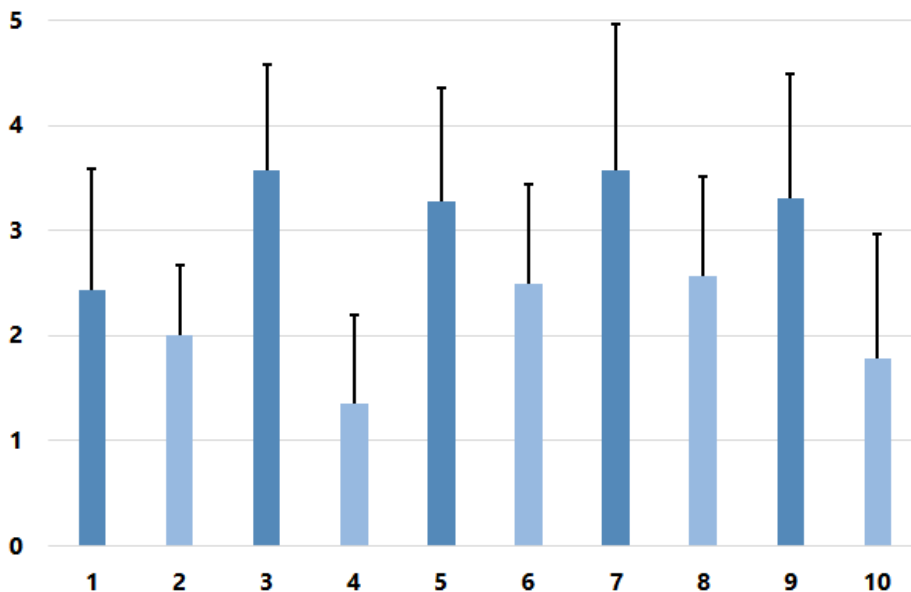


Kuva 21. Laskennallinen hapenkulutus (VO_2) kehon painokiloa kohti dynaamisessa työssä ilman eksoskeletonia (REF) ja sen kanssa (EXO) neljässä eri työskentelykulmassa (keskiarvo \pm keskivirhe). *hapenkulutus oli eksoskeletonin kanssa tilastollisesti merkitsevästi matalampi kuin ilman eksoskeletonia ($p < 0,05$).

Autenttisissa työoloissa eksoskeleton ei vaikuttanut hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormituksen tasoon. Sydämen sykkeen keskiarvo kenttätyössä ilman eksoskeletonia oli 95 ± 12 lyöntiä minuutissa ja eksoskeletonin kanssa 98 ± 8 lyöntiä minuutissa. Hapenkulutus kehon painokiloa kohti oli $8,3 \pm 1,8$ ml/kg/min ilman eksoskeletonia ja $8,6 \pm 1,6$ ml/kg/min eksoskeletonin kanssa.

4.5 Eksoskeletonin käytettävyys

Eksoskeletonin käytettävyyskysely [45–47] (System Usability Scale -SUS, liite 2) tehtiin kenttätutkimuksessa välittömästi työn päättymisen jälkeen. 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. SUS-kyselyn lisäksi tutkittavalta kysyttiin lihasten väsymystasoa, yläraajojen liikkuvuutta eksoskeletonin kanssa ja yleistä käyttökävyyttä (liite 3). SUS-kyselyn tulosten perusteella vahvimmin oltiin samaa mieltä (3,6/5) väittämistä ”Eksoskeletonia oli mielestäni helppo käyttää” ja ”Luulen, että useimmat oppivat eksoskeletonin käytön hyvin nopeasti” (kuva 22). SUS-kyselyn kokonaispisteiden keskiarvo oli $64,3 \pm 16,1$ pistettä, tarkoittaen heikkoa käytettävyyttä.



Kuva 22 Eksoskeletonin käytettävyyskyselyn (liite 2) tulokset (keskiarvo \pm keskihajonta) väittämittäin, joista parittomat ovat positiivisia väittämiä ja parilliset negatiivisia. Eksoskeletonin käytettävyyttä arvioitiin asteikolla 1–5, jossa 1 = täysin eri mieltä ja 5 = täysin samaa mieltä.

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

Yleisiä huomioita kenttätutkimukseen osallistuneilta:

"Ahtaat kolot, työturvallisuus, sujuvuus?"

"Auttaa keventämään kuormitusta."

"Ei merkittävää apua/hyötyä."

"EXO hidasti työtä, ruuvivääntimen käyttö raskaampaa eteenpäin ruuvatessa, ylöspäin ruuvatessa helpotti työntekoa."

"EXO hiukan pieni omalle selälle, joten työnteko aavistuksen haastavaa."

"Hiertää vähän."

"Housut painuu alas."

"Kömpelö käytössä."

"Liian ulkoneva, tarttuu telineisiin."

"Nivelosa kulmikas, pallonivel?"

"Oikean käden puutuminen ([eksoskeletonin alla oleva] vaatetus?)"

"Ulokeosat häiritseviä."

5 EKS@ - EKSOSKELETONIN HYÖTYJEN ARVIOINTITYÖKALU KÄDET HARTIATASON YLÄPUOLELLA TEHTÄVÄSSÄ TYÖSSÄ

Tämän tutkimuksen tulosten sekä alan kirjallisuuden ja suositusten perusteella luotiin EKS@, Eksoskeletonin hyötyjen arviointityökalu kädet hartiatason yläpuolella tehtävässä työssä, jonka avulla on tarkoitus määritellä, milloin ja minkä tyyppisessä kädet koholla tehtävässä työssä eksoskeletonin käyttö on perusteltua ja suositeltavaa. EKS@ koostuu kahdesta osasta: 1) tarpeellisuuden arviointikyselystä ja 2) käytettävyysselvityksestä. EKS@ on tarkoitettu apuvälineeksi eksoskeletonien tarpeellisuuden arviointiin kaikille työpaikan toimijoille, kuten työterveyshuollolle, työsuojelulle, yrittäjille tai vaikka yksittäisille työntekijöille. Erillisiä osaamis- tai koulutusvaatimuksia työkalun käytölle ei ole. EKS@ on nähtävissä liitteessä 4.

Arviointityökalua pilotoitiin tämän tutkimuksen ulkopuolisilla yhdeksällä logistiikka-alan työntekijällä lokakuussa 2021 ja se vaikutti toimivan hyvin suunnitellussa tarkoituksessaan. Kolmiportainen luokitteluasteikko oli käyttäjien mielestä hyvin ymmärrettävä ja sen antamien tulosten tulkinta oli helppoa. Pilotissa mukana olleet kertoivat arviointi- ja käytettävyysselvityksen tulosten kannustavan kokeilemaan eksoskeletonia ja auttoivat tekemään päätöksen, haluaisiko ulkoista tukirankaa käyttää päivittäin työssä. Pilotoinnin perusteella työkaluun tehtiin kuitenkin vielä pieniä tarkennuksia kysymyksiin, ohjeistuksiin ja tulosten tulkintaan.

5.1 Tarpeellisuuden arviointikysely

Tarpeellisuuden arviointikyselyllä kartoitetaan, onko yläraajaeksoskeletonista hyötyä tuki- ja liikuntaelimestön kuormituksen vähentämisessä kyseisessä työtehtävässä. Tarpeellisuuden arviointikyselyssä arvioidaan niskan, selän ja yläraajojen asentoa työtehtävän aikana, minkä lisäksi yläraajan osalta arvioidaan liikkeiden toistuvuutta, käsiteltävien taakkojen painoa sekä kuinka paljon työvaihetta tehdään työpäivän aikana. Kysely on tarkoitettu tehtäväksi työtehtävän 1–3 kuormittavimmasta työvaiheesta kustakin erikseen, havainnoimalla mahdollisuuksien mukaan 1–3 työntekijää. Suositus on, että jokaista työvaihetta havainnoidaan noin puolen tunnin ajan, minkä jälkeen täytetään kysely. Jos havainnointia ei tehdä, tulee kyselyn täyttäjän tuntea työtehtävä riittävän hyvin tai haastateltava muutamaa kyseistä työtehtävää tekevää henkilöä.

Tarpeellisuuden arviointikysely koostuu kuudesta kysymyksestä. Kaksi ensimmäistä kysymystä koskevat niskan ja selän asentoja ja ne arvioidaan kumpikin erikseen. Yläraajojen osalta lasketaan yhteen neljän kysymyksen pisteiden summa, jonka perusteella saadaan

arvio eksoskeletonin tarpeellisuudesta: eksoskeletonin käytöstä ei välttämättä ole hyötyä (vihreä), eksoskeletonin käytöstä on jonkin verran hyötyä (keltainen) tai eksoskeletonin käytöstä on selvää hyötyä (punainen). Mikäli kysely antaa arvon eksoskeletonin hyödyllisyydestä, suositellaan eksoskeletonin pilotointijaksoa työtehtävissä ennen eksoskeletonin hankintaa. Eksoskeletonin pilotointijakson jälkeen työntekijät vastaavat käytettävyysselvitykseen.

Tarpeellisuuden arviointikysely pohjautuu olemassa oleviin työergonomian ja -kuormituksen arviointityökaluihin. Kyselyn kysymykset on laadittu Quick Exposure Check (QEC) -arviointityökalun perusteella, joka on työn aiheuttamien tuki- ja liikuntaelimestön sairauksien riskien kartoittamiseen tarkoitettu helppo ja nopea työkalu [48]. Niskan asennon ja käsiteltävien taakkojen painon osalta raja-arvoja tarkennettiin RULA-kyselyn (rapid upper limb assessment) asteikolla [49]. Yläraajan osalta QEC:n kysymysten raja-arvot tarkistettiin ja muokattiin tämän tutkimuksen kenttämittausten tulosten perusteella.

5.2 Käytettävyysselvitys

Pilotoinnin jälkeen siihen osallistuneet työntekijät täyttävät käytettävyysselvityksen, jonka avulla voidaan arvioida itse laitteen toimivuutta, sen soveltuvuutta työn keventämiseen valitussa työtehtävässä sekä sen käytöstä mahdollisesti aiheutuvia oireita. Käytettävyysselvitys koostuu kymmenestä väittämästä, joiden paikkaansa pitävyyttä työntekijä arvioi asteikolla 1–5. Kyselyn täyttämisen jälkeen vastaukset pisteytetään ja kokonaispisteiden perusteella saadaan arvio, kuinka hyvin eksoskeleton soveltui kyseiseen työtehtävään.

Käytettävyysselvitys perustuu System Usability Scale (SUS) -kyselyyn [45–47]. Kymmenestä kysymyksestä viisi kysymystä koskee eksoskeletonin käytettävyyttä ja nämä kysymykset on suomennettu SUS-kyselystä. Loput viisi kysymystä koskee eksoskeletonin aiheuttamia oireita ja ne on luotu tämän tutkimuksen käytännön kokemusten sekä kirjallisuudessa esiin nousseiden havaintojen perusteella. Oireisiin liittyvillä kysymyksillä kartoitetaan esimerkiksi eksoskeletonin vaikuttavuutta työn keventämisessä, sen aiheuttamia fyysisiä oireita (esim. kipu tai puutumisen), vaikutusta palautumiseen ja mahdollisia turvallisuusriskejä. Käytettävyysselvityksen pisteytys ja arviointi tapahtuu kuten SUS-kyselyssä.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän hankekokonaisuuden tutkimushypoteesi oli, että ulkoisen tukirangan, eksoskeletonin, avulla työntekijän sekä liikunta- että hengitys- ja verenkiertoelimistöön kohdistuva kuormitus pienenee yläkätisiä töitä tehdessä. Kokonaisvaltaisella, useita fysiologisia muuttujia tarkastelevalla, lähestymistavalla arvioiden **ylävirtalon ulkoinen tukiranka keventää kädet koholla tehtävää työtä sekä lihaksiston että hengitys- ja verenkiertoelimistön osalta.**

- Subjektiiivisesti arvioiden dynaamisen työn kuormittavuus on eksoskeletonin kanssa tehtynä huomattavasti matalampaa kuin ilman eksoskeletonia tehty työ.
- Subjektiiivisesti arvioiden eksoskeleton keventää dynaamista työtä enemmän kuin staattista työtä.
- Useiden kohdelihasten kuormitus pienenee, kun työssä käytetään eksoskeletonia. Dynaamisessa työssä lihasten keskimääräinen kuormitus vähenee 18,0 %, staattisessa työssä keskimäärin 20,7 % ja autenttisessa työssä keskimäärin 22,9 %.
- Mitatuista lihaksista eksoskeleton vaikuttaa eniten kolmpäisen hartialihaksen eli olkapäälihaksen aktiivisuuteen.
 - Eksoskeleton vähentää olkapäälihaksen sekä etu- että keskiosan kuormitusta jokaisessa mitatussa työskentelykulmassa.
 - Myös autenttisissa työoloissa ero lihaskuormituksessa eksoskeletonin kanssa ja ilman eksoskeletonia työskentelyn välillä on selkeintä olkapäälihaksen keski- (48,6 % pienempi) ja etuosassa (34,3 % pienempi).
- Dynaamisessa työssä merkittävin hyöty eksoskeletonista on 120° ja 150° olkavarren kulmassa työskenneltäessä.
- Staattisessa työssä merkittävin hyöty eksoskeletonista on 90° ja 120° olkavarren kulmassa työskenneltäessä.
- Lihasrakenteen muutokset työn aikana sekä ilman eksoskeletonia että sen kanssa työskenneltäessä ovat vähäiset.
- Eksoskeletonin käyttö vaikuttaa lievästi negatiivisesti yläselän kimmo-ominaisuuksiin. Tukirangan käyttö lisää yläselän lihasten jäykkyyttä dynaamisessa työssä 60° kulmassa sekä elastisuutta 90° työskentelykulmassa. Kimmo-ominaisuuksien muutos aiheutuu todennäköisesti eksoskeletonin painosta. Aiempien tutkimusten mukaan painavien taakkojen kantaminen selässä voi aiheuttaa muutoksia lihaksiin ja luustoon [50].
- Kynärvarren lihaskudoksen happisaturaatiotaso laskee kädet koholla tehtävän työn aikana ja palautuu sen jälkeen normaalille tasolle. Muutos on samanlainen eksoskeletonin kanssa ja ilman sitä työskenneltäessä.

- Eksoskeletonin käyttö vaikuttaa myös lihasten hermostolliseen säätelyyn dynaamisessa työssä. M-vasteen amplitudin kasvu 120° työskentelykulmassa viittaa siihen, että eksoskeleton ehkäisee lihasväsymystä lyhytkestoisessa submaksimaalisessa yläkätisessä työssä.
- Lihaskuormituksen lisäksi hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus on alhaisempaa, kun lyhytaikaista dynaamista työtä tehdään eksoskeletonin kanssa. Sekä syke että hapenkulutus kehon painokiloa kohti ovat alhaisemmalla tasolla eksoskeletonia käytettäessä. Aiemmissä tutkimuksissa on saatu samansuuntaisia tuloksia ylävartalon eksoskeletonin hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitusta vähentävästä vaikutuksesta lyhytkestoisessa työssä [51].
- Pidemmän, keskimäärin neljän tunnin autenttisissa työtehtävissä työskentelyn aikana eksoskeleton ei vaikuta hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormituksen tasoon. Aiempia aidoissa työympäristössä suoritettuja tutkimuksia on tämänhetkisen tiedon perusteella vain muutamia. Yhdessä niistä havaittiin syketason olevan alempi, kun eksoskeletonia käytettiin autotuotantolinjan yläkätisissä työtehtävissä [27].

Yhteenvedona voidaan todeta, että ylävartalon ulkoisen passiivisen tukirangan avulla työkuormitusta voidaan kohdistaa tasaisemmin käsivarren, olan, hartian sekä ylä- tai alaselän lihaksiin yläkätisissä töissä. Lihasten aktiivisuus eksoskeletonia käytettäessä on pienempi kuin ilman sitä, joten lihaskuormitus on eksoskeletonin kanssa pienempää. Myös hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus on eksoskeletonia käytettäessä vähäisempää. Tulosten mukaan ainoa haittatekijä eksoskeletonin käytöstä on apuvälineen painosta johtuva yläselän jäykkyyden lievä kasvu.

7 TULOSTEN MERKITYS

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 ja suorituskykymittauksilla kuinka ulkoinen tukiranka vaikuttaa työssä kuormittuneisuuteen. Tämän tutkimuksen tulokset ovat hyödynnettävissä kaikissa rakennusalan ammateissa sekä vastaavissa raskasta fyysistä, kädet koholla tehtävää työtä sisältävissä ammateissa.

Hankkeen tulosten perusteella ylävartalon eksoskeleton on suhteellisen helppokäyttöinen ja tehokas apuväline yläraaja- ja ylävartalokuormituksen vähentämisessä, kun työtä tehdään kädet hartiatason yläpuolella. Tulosten pohjalta laaditun ohjeen avulla voidaan arvioida milloin ja minkälaisissa töissä eksoskeletonin käyttö on perusteltua.

Rakennusalan työ luokitellaan hengitys- ja verenkiertoelimistön osalta keskiraskaaksi (3–6 MET). Työn fyysisiä altisteita ovat mm. toistuvat työliikkeet ja hankalat työasennot, työskentely hartiatason yläpuolella sekä voimankäyttö. Rakennustyössä rasitus ja kuormitus kohdistuu erityisesti yläraajoihin ja selän alueelle sekä niska-hartiaseudulle. Lisäksi alaraajoissa lonkka- ja polviniveleen kohdistuu runsaasti kuormitusta. Yleisimmät rakennustyöntekijöiden ammattitaudit ovat lateraalinen epikondyylitti (tenniskynärpää) sekä käden ja ranteen jänteisiin liittyvät tulehdukset [52]. Tässä tutkimuksessa todettiin, että ylävartalon eksoskeletonin kuormitusta vähentävä vaikutus oli erittäin merkittävä olkapään kahdessa lihaksessa. Koska olkanivel on ihmiskehon liikkuvin ja kompleksisin nivel, sen kuormittumisen vähentäminen eksoskeletonin avulla on lihasten ja nivelen toimintakyvyn ja terveyden edistämisen kannalta merkittävää.

Kädet sydämen tasolla tai sen yläpuolella työskentely kuormittaa hengitys- ja verenkiertoelimistöä aiheuttamalla verenpaineen kohoamista [18]. Kohonnut verenpaine on yksi keskeisimmistä sydän- ja verisuonisairauksien vaaratekijöistä. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että eksoskeletonin avulla voidaan lihaskuormituksen lisäksi pienentää hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitusta lyhyiden, lähellä maksimaalista suoritusta tapahtuvien työtehtävien aikana. Pitempien, autenttisten työjaksojen aikana eksoskeleton ei vaikuta hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormittumiseen. Se ei siis painostaan huolimatta aiheuta lisäkuormitusta käyttäjälleen pidemmänkään työjakson aikana. Kädet koholla tehtävässä työssä eksoskeleton voi osaltaan olla vähentämässä työperäisten sydän- ja verisuonitautien riskiä.

Tutkimustieto eksoskeletonien hyödyistä on vielä vähäistä. Tutkimuksen kohteena on ollut lähinnä laitteiden tekninen kehitys, ei niinkään kuormitusfysiologia tai käyttömukavuus. Lisäksi työfysiologiset tutkimukset ovat keskittyneet pääasiassa laboratorioympäristössä tehtyihin, lyhytkestoisiin kuormitusjaksoihin. Jatkossa tarvitaan lisätutkimuksia eksoskeletonin hyödyistä autenttisessa työssä sekä seurantatutkimuksia eksoskeletonin pitkäaikaisen käytön vaikutusten arviointiin. Myös hienomotoriikkaa vaativaa staattista työtä tekevät ammattiryhmät, kuten suunterveyden ja kauneudenhoitoalan ammattilaiset altistuvat kädet koholla tehtävälle työlle. Eksoskeletonin hyödyt näillä vähemmän fyysisesti kuormittavilla aloilla ovat vielä arvioimatta. Työssä käytettävällä apuvälineellä saavutettavat hyödyt, työergonomia, käytön miellyttävyys sekä asenteet vaikuttavat sen käyttöönottohalukkuuteen. Esimerkiksi eksoskeletonin käytön helppoudesta ja mukavuudesta sekä sen työyhteisöön ja työntekijään kohdistuvista vaikutuksista tarvitaan vielä runsaasti lisää tietoa.

Tämänhetkisten tulosten valossa eksoskeletonit näyttävät olevan potentiaalisia vaihtoehtoja lihaskuormituksen vähentämiseksi fyysisessä työssä. Jotta niiden hyödyt saadaan täysimittaisesti käyttöön, tarvitaan yhteistyötä valmistajien ja työelämän kesken käytettävyyden parantamiseksi ja työturvallisuusriskien arvioimiseksi.

7.1 Suositukset työelämälle

- ✓ Ylävartalon eksoskeletonin käyttöä suositellaan, mikäli työvuoron aikana työkennelläan yhtäjaksoisesti olkavarret yli 90 asteen kulmassa yli 20 minuuttia.
- ✓ Eksoskeletonia ei suositella käytettäväksi yhtäjaksoisesti useamman tunnin/koko työvuoron ajan.
- ✓ Käyttöä suositellaan vain tarveperusteisesti, sitä ei kannata käyttää "varmuuden vuoksi".
- ✓ Työpaikalla eksoskeletonien käyttömalliksi suositellaan työtehtävä/työpistekohdasta käyttöä yksilökohtaisen käytön sijaan.
- ✓ Eksoskeleton on tarkoitettu työtä keventäväksi apuvälineeksi kuormitushuippujen tasaamiseksi. Sen avulla ei ole tarkoitus lisätä työntekijän suorituskykyä tai mahdollistaa raskaamman työn tekemistä.

7.2 Suositukset työterveyshuollolle ja työsuojeluorganisaatiolle

- ✓ Tämän raportin liitteenä (liite 4) olevaa ohjetta eksoskeletonin hyötyjen arviointiin kädet hartiatason yläpuolella tehtävässä työssä suositellaan käytettäväksi, mikäli työpaikalla on ilmennyt tarvetta yläkätisen fyysisen työn keventämiseen.
- ✓ Eksoskeletonin käyttöönoton yhteydessä on syytä kiinnittää huomiota työn turvallisuusnäkökohtiin, laite voi esimerkiksi aiheuttaa takertumisriskin.

- ✓ Eksoskeletonin käyttöön liittyvä riskiarviointi suositellaan tehtäväksi jokaisessa työpaikassa ennen apuvälineen käytön aloittamista.
- ✓ Eksoskeletonilla ei tule korvata puutteita työtä tekevän henkilön toimintakyvyssä.
- ✓ Eksoskeletonin käyttömahdollisuus on hyvä tiedostaa, kun tehdään kohdennettuja työpaikkaselvityksiä.

7.3 Huomioita eksoskeletonien valmistajille ja maahantuojille

- ✓ Eksoskeletonin käytettävyyteen, erityisesti koon säätämisen helppouteen on hyvä kiinnittää huomiota etenkin, jos käyttömalliksi yleistyy työtehtävä/työpiste-kohtainen käyttö.
- ✓ Tulevaisuudessa apuvälineiden vuokraustoiminta sekä käyttö aseptisessä työskentelyssä voi lisääntyä. Tämä on syytä huomioida eksoskeletonin huoltoon ja puhtaanapitoon liittyvissä toimenpiteissä ja ohjeissa.
- ✓ Työympäristöstä johtuvan vaaturuksen (esimerkiksi talvivaaturuksen) huomioiminen eksoskeletonin säädöissä.

8 PROJEKTIN VIESTINTÄ

Hankkeesta on viestitty seuraavissa kanavissa:

- Hankkeen esittelysivu Työterveyslaitoksen internetsivuilla: <https://www.ttl.fi/tutkimushanke/kadet-koholla-tyoskentelyn-keventaminen-eksoskeletonin-avulla-2020-2021/>
- Eksoskeleton tulee työmaille. Oulu-lehti 29.1.2020.
- Tuuleeko rakentajista kyborgeja? Työterveyslaitos testaa eksoskeletoneja töissä, joissa kädet ovat usein yläasennossa. Rakentaja-lehti 12.6.2020. <https://rakennusliitto.fi/2020/06/12/tuleeko-rakentajista-kyborgeja/>
- Eksoskeleton voisi kannatella hammaslääkäriäkin. Suomen hammaslääkärilehti 8/20.
- Tutkimus tutuksi -tapaaminen, Työsuojelurahasto, 28.10.2020. Ari-Pekka Rautola: Älyvaatteet työpaikalla. <https://www.tsr.fi/tietoa-meista/uutiset/tutkimus-tutuksi-alyvaatteet-tyopaikalla/>
- Kysyimme asiantuntijalta. Työterveys: Ulkoiset tukirangat helpottavat työtä yhä useammilla aloilla. Tekniikan Maailma 9.12.2020.
- AamuAreena 12.2.2021. Eksoskeletonit – scifiä vai arkipäivää? Juha Oksa: Eksoskeleton – uutta tekniikkaa työn keventämiseen. <https://tieke.fi/aamuareenalla-12-2-2021-eksoskeletonit-scifia-vai-arkipaivaa/>
- Meditas-webinaari 19.2.2021. Eksoskeletonit fyysisen työn keventäjinä. Satu Mänttari: Exoskeleton – uutta tekniikkaa kädet koholla tehtävän työn keventämiseen?
- Alajärveläisyrittäjä aikoo vähentää työntekijöiden selkävaivoja erikoisella välineellä – Asiantuntija kertoo mistä on kyse. Ilkka-Pohjalainen 16.6.2021.
- Tutkimus: Eksoskeleton voi keventää kuormitusta rakennustyössä. Rakennuslehti 1.7.2021.
- Tuki- ja liikuntaelinsairaudet aiheuttavat maataloudessa eniten työkyvyttömyyttä – työn keventämiseen uusia keinoja. Työterveyslaitoksen uutiskirje 21.6.2021. <https://news.cision.com/fi/tyoterveyslaitos/r/tuki--ja-liikuntaelinsairaudet-aiheuttavat-maataloudessa-eniten-tyokyvyttömyyttä---tyon-keventämiseen,c3370895>
- Ranka lihasten tueksi. Digitaalinen supergraafi esittelee eksoskeletonit ja sähkömoottoroidun voimahanskan, joista olisi apua kymmenille tuhansille suomalaisille jokapäiväisessä työssä. Tekniikka ja Talous 17.8.2021.
- Meditas Exowebinar 8.9.2021. Juha Oksa: Exoskeletons in work – preliminary results of research in Finland.
- Nostelu ja käsien kohottaminen rasittavat monessa työssä – Päälle puettava tukiranka vähentää kuormitusta merkittävästi. Helsingin Sanomat. Tiede. 17.8.2021

- Työterveyspäivät 2021, Työterveyslaitos. 13.10.2021 – Teemana tuki- ja liikuntaelinterveys. Satu Mänttari: Eksoskeletonin hyödyntäminen työkuormituksen hallinnassa.
- Rakennusteollisuus RT ry seminaari Viisaat kypärät yhteen. 26.10.2021. Satu Mänttari ja Ari-Pekka Rauttola: Eksoskeleton, rakennustyön keventäminen ulkoisen tukirangan avulla.
- Ekso keventämään kuormitushuippuja. Rakennuslehti 29.10.2021. https://is-suu.com/rakennusteollisuusrty/docs/jokka_0221_digi

Työterveyslaitos aloittaa aktiivisen tiedotuskampanjan sosiaalisessa mediassa, kun tutkimusraportti ja arviointityökalu on julkistettu 26.10.2021.

LÄHTEET

- [1] Bodin J, Ha C, Petit-Le Manc'h A, Serazin C, Descatha A, Leclerc A, Goldberg M, Roquelaure Y (2012) Risk factors for incidence of rotator cuff syndrome in a large working population. *Scand J Work Environ Health* 38(5): 436–446.
- [2] Perkiö-Mäkelä M, Hirvonen M (2013) Työ ja terveys -haastattelututkimus. Taulukkoraportti. <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/11/tyo-ja-terveys-haastattelututkimus-2012-taulukkoraportti.pdf>
- [3] Tynes T, Sterud T, Johannessen HA, Gravseth HM, Løvseth EK, Alfonso J, Aasnæss S (2015) Faktabok om arbeidsmiljø og helse 2015 - status og utviklingstrekk (Facts about work environment and health 2015). NOA: STAMI-raportti 16(3).
- [4] Ariëns GAM, van Mechelen W, Bongers PM, Bouter LM, van der Wal G (2000) Physical risk factors for neck pain. *Scand J Work Environ Health* 26(1): 7-19.
- [5] Ketola R (2003) Physical workload as a risk factor for symptoms in the neck and upper limbs. Exposure assessment and ergonomic intervention. Kuopio University Publications D. Medical Sciences 311. (väitöskirja)
- [6] Hansson GÅ, Arvidsson I, Nordander C (2016) Riktvärden för att bedöma risken för belastningsskador, baserade på tekniska mätningar av exponeringen (Guidelines to assess the risk for musculoskeletal disorders, based on technical measurements of the exposure). Lund: Occupational and Environmental medicine. Rapport no 4: 2016.
- [7] van Rijn RM, Huisstede BM, Koes BW, Burdorf A (2010) Associations between work-related factors and specific disorders of the shoulder – a systematic review of the literature. *Scand J Work Environ Health* 36(3): 189-201.
- [8] Palm P, Gupta N, Forsman M, Kotte J, Nordquist T, Holtermann A (2018) Exposure to Upper Arm Elevation During Work Compared to Leisure Among 12 Different Occupations Measured with Triaxial Accelerometers. *Annals of Work Exposures and Health* 62(6): 689–698.
- [9] Nordander, C, Hansson GÅ, Ohlsson K, Arvidsson I, Balogh I, Strömberg U, Rittner R, Skerfving S (2016) Exposure-response relationships for work-related neck and shoulder musculoskeletal disorders - Analyses of pooled uniform data sets. *Appl Ergon* 55: 70-84.
- [10] Svendsen SW, Dalbøge A, Andersen JH, Thomsen JF, Frost P (2013) Risk of surgery for subacromial impingement syndrome in relation to neck-shoulder complaints and occupational biomechanical exposures: a longitudinal study. *Scand J Work Environ Health* 39(6): 568–577.

- [11] Paukku T (2019) Keho, joka jaksaa ja jaksaa – Duunari sai voimahaarniskan, ja se auttaa nostoissa jopa kymmenien kilojen verran. Ulkoinen tukiranka eli eksoskeleton tekee tuloaan raskaisiin ja toisteisiin töihin. Helsingin Sanomat <https://www.hs.fi/tiede/art-2000006196287.html>. Luettu 12.8.2019.
- [12] Palmerud G, Forsman M, Sporrang H, Herberts P, Kadefors R (2000) Intramuscular pressure of the infra- and supraspinatus muscles in relation to hand load and arm posture. *Eur J Appl Physiol* 83(2-3): 223-230.
- [13] Visser B, van Dieën JH (2006) Pathophysiology of upper extremity muscle disorders. *J Electromyogr Kinesiol* 16(1): 1-16.
- [14] Seitz AL, McClure PW, Finucane S, Boardman ND 3rd, Michener LA (2011) Mechanisms of rotator cuff tendinopathy: intrinsic, extrinsic, or both? *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 26(1): 1-12.
- [15] Armstrong TJ, Buckle P, Fine LJ, Hagberg M, Jonsson B, Kilbom Å, Kuorinka IAA, Silverstein B, Sjøgaard G, Viikari-Juntura ERA (1993) A conceptual model for work-related neck and upper-limb musculoskeletal disorders. *Scand J Work Environ Health* 19(2): 73-84.
- [16] Barbe MF, Barr AE (2006) Inflammation and the pathophysiology of work-related musculoskeletal disorders. *Brain Behav Immun* 20(5): 423-429.
- [17] Toomingas A, Mathiassen SE, Tornqvist EW (2012) Work, working life, occupational physiology. Teoksessa A Toomingas, SE Mathiassen, EW Tornqvist (toim.) *Occupational physiology*. Boca Raton (FL): CRC Press. s. 1-18.
- [18] Schumann B, Seidler A, Kluttig A, Werdan K, Haerting J, Greiser KH (2011) Association of occupation with prevalent hypertension in an elderly East German population: an exploratory cross-sectional analysis. *Int Arch Occup Environ Health* 84(4): 361-369.
- [19] de Looze M, Boscha T, Krausea F, Stadlerc K, O'Sullivan L (2016) Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics* 59(5): 671-681.
- [20] MacDougall W (2014) *Industrie 4.0: Smart Manufacturing for the Future* (Brochure 20750). Germany Trade and Invest.
- [21] Bosch T, van Eck J, Knitel K, de Looze M (2016) The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Appl Ergon* 54: 212-217.

- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Alabdulkarim S, Nussbaum MA (2019a) Influences of different exoskeleton designs and tool mass on physical demands and performance in a simulated overhead drilling task. *Appl Ergon* 74: 55–66.
- [25] Alabdulkarim S, Kim S, Nussbaum MA (2019b) Effects of exoskeleton design and precision requirements on physical demands and quality in a simulated overhead drilling task. *Appl Ergon* 80: 136–145.
- [26] Blanco A, Catalán JM, Díez JA, García JV, Lobato E, García-Aracil N (2019) Electromyography Assessment of the Assistance Provided by an Upper-Limb Exoskeleton in Maintenance Tasks. *Sensors* 19(15): 3391.
- [27] De Bock S, Ghillebert J, Govaerts R, Elprama SA, Marusic U, Serrien B, Jacobs A, Geeroms J, Meeusen R, De Pauw K (2021) Passive Shoulder Exoskeletons: More Effective in the Lab Than in the Field? *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 29: 173–183.
- [28] de Vries AW, Krause F, de Looze MP (2021) The effectivity of a passive arm support exoskeleton in reducing muscle activation and perceived exertion during plastering activities. *Ergonomics* 64(6): 712–721.
- [29] Hall PT, Crouch DL (2020) Effect of continuous, mechanically passive, anti-gravity assistance on kinematics and muscle activity dynamic shoulder elevation. *J Biomech* 103: 109685.
- [30] Huysamen K, Bosch T, de Looze M, Stadler KS, Graf E, O'Sullivan LW (2018) Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Appl Ergon* 70: 148–155.
- [31] Hyun DJ, Bae KH, Sim KJ, Nam S, Lee DH (2019) A light-weight passive upper arm assistive exoskeleton based on multi-linkage spring-energy dissipation mechanism for overhead tasks. *Robotics and Autonomous Systems* 122: 103309.
- [32] Iranzo S, Piedrabuena A, Iordanov D, Martinez-Iranzo U, Belda-Lois JM (2020) Ergonomics assessment of passive upper-limb exoskeletons in an automotive assembly plant. *Appl Ergon* 87: 103120.
- [33] Kim S, Nussbaum MA, Mokhlespour Esfahani MI, Alemi MM, Alabdulkarim S, Rashedi E (2018) Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest

for tasks requiring arm elevation: Part I - "Expected" effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Appl Ergon* 70: 315-322.

[34] Maurice P, Camernik J, Gorjan D, Schirrmmeister B, Bornmann J, Tagliapietra L, Latella C, Pucci D, Fritzsche L, Ivaldi S, Babic J (2020) Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 28(1): 152-164.

[35] Schmalz T, Schändlinger J, Schuler M, Bornmann J, Schirrmmeister B, Kannenberg A, Ernst M (2019) Biomechanical and Metabolic Effectiveness of an Industrial Exoskeleton for Overhead Work. *Int J Environ Res Public Health* 16(23): 4792.

[36] Theurel J, Desbrosses K, Roux T, Savescu A (2018) Physiological consequences of using an upper-limb exoskeleton during manual handling tasks. *Appl Ergon* 67: 211-217.

[37] Yin P, Yang L, Qu S, Wang C (2020) Effects of a passive upper extremity exoskeleton for overhead tasks. *J Electromyogr Kinesiol* 55: 102478.

[38] Weston EB, Alizadeh M, Knapik GG, Wang X, Marras WS (2018) Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading on the lumbar spine. *Appl Ergon* 68: 101-108.

[39] Kim S, Nussbaum MA, Mokhlespour Esfahani MI, Alemi MM, Jia B, Rashedi E (2018) Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part II - "Unexpected" effects on shoulder motion, balance, and spine loading. *Appl Ergon* 70: 323-330.

[40] Skelex, User manual. [online] <https://www.skelex.com/wp-content/uploads/2019/08/Skelex-360-User-manual-V1.1-29-03-2019.pdf>

[41] Borg G (1998) Borg's Perceived Exertion and Pain Scales, *Human Kinetics*, s. 2-52.

[42] Artinis Medical Systems, Theory of NIRS. [online] <https://www.artinis.com/theory-of-nirs>

[43] Firstbeat Technologies Ltd. (2014) Stress and Recovery Analysis Method Based on 24-hour Heart Rate Variability, whitepaper.

[44] Jonsson B (1982) Measurement and evaluation of local muscular in the shoulder during constrained work. *J Human Ergol* 11:73-88.

[45] Bangor A, Kortum P, Miller J (2009) Determining what individual SUS scores mean: adding an adjective rating scale. *J Usability Stud* 4(3): 114-123.

[46] Brooke J (1996) SUS: a "quick and dirty" usability scale. In PW Jordan, B Thomas, BA Weerdmeester, IL McClelland (toim.) *Usability Evaluation in Industry*. Lontoo: Taylor and Francis. s. 189-194.

[47] Tullis T, Albert B (2013) Measuring the user experience: collecting, analyzing, and presenting usability metrics. 2. painos. Waltham: Elsevier.

[48] Li G, Buckle P (1999) Evaluating change in exposure to risk for musculoskeletal disorders – a practical tool. Health and Safety Executive (HSE) contract research report 251.

[49] McAtamney L, Corlett N (1993) RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Appl Ergon* 24(2): 91–99.

[50] Hadid A, Epstein Y, Shabshin N, Gefen A (2012) Modeling mechanical strains and stresses in soft tissues of the shoulder during load carriage based on load-bearing open MRI. *J Appl Physiol* 112(4): 597–606.

[51] Bär M, Steinhilber B, Rieger MA, Luger T (2021) The influence of using exoskeletons during occupational tasks on acute physical stress and strain compared to no exoskeleton – A systematic review and meta-analysis. *Appl Ergon* 94: 103385.

[52] Työkyky ja -kyvyttömyys. [online] <https://www.tyoelamatiето.fi/#/fi/>

LIITTEET

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

| | Vaikutus | p-arvo |
|--|------------------------------|----------|
| <u>Lihassähköinen aktiivisuus:</u> | | |
| %MEMG (prosenttia maksimaalisesta lihasaktiivisuudesta) | | |
| ranteen ojentaja | ei | NS |
| ranteen koukistaja | | |
| 60° (dyn) | 22,8 % matalampi exon kanssa | 0,032* |
| 150° (dyn) | 27,5 % matalampi exon kanssa | 0,005** |
| kenttä | 24,9 % matalampi exon kanssa | 0,004** |
| kolmipäinen olkalihäs | | |
| 60° (dyn) | 10,1 % matalampi exon kanssa | 0,004** |
| 90° (staat) | 22,1 % matalampi exon kanssa | 0,025* |
| 120° (dyn) | 27,1 % matalampi exon kanssa | 0,002** |
| 150° (dyn) | 29,5 % matalampi exon kanssa | 0,008** |
| kenttä | 16,3 % matalampi exon kanssa | 0,034* |
| olka keski | | |
| 60° (dyn) | 37,9 % matalampi exon kanssa | 0,002** |
| 90° (dyn) | 46,1 % matalampi exon kanssa | 0,001*** |
| 120° (dyn) | 39,0 % matalampi exon kanssa | 0,001*** |
| 120° (staat) | 53,1 % matalampi exon kanssa | 0,009** |
| 150° (dyn) | 42,2 % matalampi exon kanssa | 0,002** |
| kenttä | 48,6 % matalampi exon kanssa | 0,000*** |
| olka etu | | |
| 60° (dyn) | 28,2 % matalampi exon kanssa | 0,000*** |

| | | | |
|----------|--------------|------------------------------|----------|
| | 60° (staat) | 16,1 % matalampi exon kanssa | 0,003** |
| | 90° (dyn) | 47,6 % matalampi exon kanssa | 0,004** |
| | 90° (staat) | 53,3 % matalampi exon kanssa | 0,004** |
| | 120° (dyn) | 39,8 % matalampi exon kanssa | 0,005** |
| | 120° (staat) | 59,0 % matalampi exon kanssa | 0,006** |
| | 150° (dyn) | 33,2 % matalampi exon kanssa | 0,006** |
| | 150° (staat) | 49,3 % matalampi exon kanssa | 0,001*** |
| | kenttä | 34,3 % matalampi exon kanssa | 0,000*** |
| hartia | | ei | NS |
| yläselkä | | | |
| | 90° (dyn) | 2,5 % matalampi exon kanssa | 0,014* |
| | 120° (dyn) | 24,1 % matalampi exon kanssa | 0,013* |
| | 120° (staat) | 19,4 % matalampi exon kanssa | 0,013* |
| | 150° (staat) | 28,0 % matalampi exon kanssa | 0,034* |
| | kenttä | 9,5 % matalampi exon kanssa | 0,019* |
| alaselkä | kenttä | 16,2 % matalampi exon kanssa | 0,012* |

MF (keskitaajuus, median frequency)

| | | | |
|-----------------------|--------------|------------------------------|----------|
| ranteen ojentaja | | | |
| | 60° (staat) | 7,5 % matalampi exon kanssa | 0,014* |
| ranteen koukistaja | | ei | NS |
| kolmipäinen olkalihas | | | |
| | 150° (dyn) | 6,3 % korkeampi exon kanssa | 0,008** |
| olka keski | | | |
| | 120° (dyn) | 6,8 % korkeampi exon kanssa | 0,004** |
| | 150° (dyn) | 16,3 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 90° (staat) | 12,9 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 120° (staat) | 11,9 % korkeampi exon kanssa | 0,013* |
| olka etu | | | |

| | | | |
|----------|--------------|------------------------------|----------|
| | 60° (dyn) | 5,4 % korkeampi exon kanssa | 0,045* |
| | 90° (dyn) | 10,3 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 120° (dyn) | 9,0 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 150° (dyn) | 12,4 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 120° (staat) | 9,7 % korkeampi exon kanssa | 0,033* |
| hartia | | | |
| | 150° (dyn) | 13,0 % matalampi exon kanssa | 0,001*** |
| | 60° (staat) | 6,4 % matalampi exon kanssa | 0,050* |
| yläselkä | | | |
| | 150° (staat) | 3,9 % matalampi exon kanssa | 0,049* |
| alaselkä | | | |
| | 90° (dyn) | 8,5 % korkeampi exon kanssa | 0,047* |

MPF (tehon keskitaajuus, mean power frequency)

| | | | |
|-----------------------|--------------|------------------------------|----------|
| ranteen ojentaja | | | |
| | 60° (staat) | 5,2 % matalampi exon kanssa | 0,017* |
| ranteen koukistaja | | ei | NS |
| kolmipäinen olkalihas | | | |
| | 60° (dyn) | 1,8 % korkeampi exon kanssa | 0,047* |
| | 150° (dyn) | 3,8 % korkeampi exon kanssa | 0,016* |
| olka keski | | | |
| | 120° (dyn) | 5,8 % korkeampi exon kanssa | 0,003** |
| | 150° (dyn) | 13,3 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 90° (staat) | 10,1 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 120° (staat) | 9,0 % korkeampi exon kanssa | 0,018* |
| olka etu | | | |
| | 90° (dyn) | 7,6 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 120° (dyn) | 6,6 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 150° (dyn) | 9,5 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 60° (staat) | 4,6 % korkeampi exon kanssa | 0,038* |

| | | | |
|----------|--------------|------------------------------|----------|
| hartia | 120° (staat) | 8,0 % korkeampi exon kanssa | 0,017* |
| | 150° (dyn) | 11,3 % matalampi exon kanssa | 0,000*** |
| yläselkä | 60° (staat) | 5,4 % matalampi exon kanssa | 0,042* |
| | 150° (staat) | 3,7 % matalampi exon kanssa | 0,003** |
| alaselkä | 90° (dyn) | 7,4 % korkeampi exon kanssa | 0,006** |

ZCR (nollan ylitystaajuus, zero crossing rate)

| | | | |
|-----------------------|--------------|------------------------------|----------|
| ranteen ojentaja | 60° (staat) | 6,7 % matalampi exon kanssa | 0,007** |
| ranteen koukistaja | ei | | NS |
| kolmipäinen olkalihäs | 150° (dyn) | 3,5 % korkeampi exon kanssa | 0,002** |
| olka keski | 150° (dyn) | 10,2 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 90° (staat) | 8,0 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 120° (staat) | 6,5 % korkeampi exon kanssa | 0,016* |
| olka etu | 90° (dyn) | 7,5 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 120° (dyn) | 5,5 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 150° (dyn) | 7,9 % korkeampi exon kanssa | 0,000*** |
| | 120° (staat) | 7,5 % korkeampi exon kanssa | 0,031* |
| hartia | 150° (dyn) | 7,7 % matalampi exon kanssa | 0,003** |
| | 60° (staat) | 5,3 % matalampi exon kanssa | 0,023* |
| yläselkä | | | |

150° (staat) 4,4 % matalampi exon kanssa 0,020*
 alaselkä

90° (dyn) 8,6 % korkeampi exon kanssa 0,007**

SPA (tehospektrin amplitudien summa, sum of power spectrum amplitude)

ranteen ojentaja ei NS

ranteen koukistaja ei NS

kolmipäinen olkalihäs

60° (dyn) 47,8 % pienempi exon kanssa 0,004**

120° (dyn) 48,5 % pienempi exon kanssa 0,002**

150° (dyn) 42,7 % pienempi exon kanssa 0,004**

90° (staat) 30,3 % pienempi exon kanssa 0,003**

olka keski

60° (dyn) 64,6 % pienempi exon kanssa 0,006**

90° (dyn) 62,3 % pienempi exon kanssa 0,012*

120° (dyn) 60,0 % pienempi exon kanssa 0,001***

150° (dyn) 59,0 % pienempi exon kanssa 0,001***

90° (staat) 68,4 % pienempi exon kanssa 0,007**

120° (staat) 81,5 % pienempi exon kanssa 0,012*

olka etu

60° (dyn) 52,1 % pienempi exon kanssa 0,017*

90° (dyn) 70,5 % pienempi exon kanssa 0,000***

120° (dyn) 63,5 % pienempi exon kanssa 0,001***

150° (dyn) 54,4 % pienempi exon kanssa 0,002**

60° (staat) 29,2 % pienempi exon kanssa 0,028*

90° (staat) 50,5 % pienempi exon kanssa 0,001***

120° (staat) 85,4 % pienempi exon kanssa 0,024*

150° (staat) 74,6 % pienempi exon kanssa 0,010**

hartia

| | | | |
|----------|-------------|-----------------------------|---------|
| | 60° (dyn) | 29,3 % pienempi exon kanssa | 0,026* |
| | 90° (staat) | 40,7 % pienempi exon kanssa | 0,015** |
| yläselkä | | | |
| | 60° (dyn) | 32,8 % pienempi exon kanssa | 0,024* |
| | 90° (dyn) | 36,1 % pienempi exon kanssa | 0,011* |
| alaselkä | | ei | NS |

Lihassoima:

Maksimipuristusvoima ei NS

Liharakenne ja lihaksen kimmo-ominaisuudet:

Poikkipinta-ala ei NS

Pennaatiokulma 90° (dyn) ↑ exon kanssa 0,003**

Jäykkyys

| | | |
|-----------------------|-----------------------------|--------|
| ranteen ojentaja | ei | NS |
| ranteen koukistaja | ei | NS |
| kolmipäinen olkalihas | ei | NS |
| olka keski | ei | NS |
| olka etu | ei | NS |
| hartia | ↓ exon kanssa (staat, 120°) | 0,013* |
| yläselkä | ↑ exon kanssa (dyn, 60°) | 0,048* |
| alaselkä | ei | NS |

Elastisuus

| | | |
|-----------------------|-----------------------|--------|
| ranteen ojentaja | ei | NS |
| ranteen koukistaja | ei | NS |
| kolmipäinen olkalihas | ei | NS |
| olka keski | ↑ ilman exoa (kenttä) | 0,014* |
| olka etu | ei | NS |
| hartia | ei | NS |

| | | |
|----------|---------------------------|--------|
| yläselkä | ↑ exon kanssa (dyn, 90°) | 0,028* |
| alaselkä | ↓ ilman exoa (staat, 60°) | 0,047* |

Kiinteys

| | | |
|-----------------------|----------------------------|--------|
| ranteen ojentaja | ei | NS |
| ranteen koukistaja | ↓ exon kanssa (staat, 60°) | 0,019* |
| kolmipäinen olkalihas | ei | NS |
| olka keski | ei | NS |
| olka etu | ei | NS |
| hartia | ei | NS |
| yläselkä | ↓ ilman exoa (dyn, 60°) | 0,037* |
| alaselkä | ei | NS |

Lihaskudoksen happisaturaatio:

| | | |
|--------------------|----|----|
| O ₂ min | ei | NS |
| k | ei | NS |
| R ² | ei | NS |

Hermostollinen säätely:

M-vaste

| | | |
|-----------|---------------------------|--------|
| amplitudi | ↑ exon kanssa (dyn, 120°) | 0,034* |
| latenssi | ei | NS |

Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus:

Syke

| | | |
|----------|-----------------------|----------|
| 60° dyn | matalampi exon kanssa | 0,030* |
| 120° dyn | matalampi exon kanssa | 0,001*** |
| 150° dyn | matalampi exon kanssa | 0,017* |

Hapenkulutus

| | | |
|----------|-----------------------|--------|
| 150° dyn | matalampi exon kanssa | 0,033* |
|----------|-----------------------|--------|

Subjektiiivinen tuntemus:

RPE (koettu kuormitus, rating of perceived exertion)

| | | |
|-----------------|------------------------|----------|
| 60° dyn | k pienempi exon kanssa | 0,021* |
| 90° dyn | k pienempi exon kanssa | 0,010** |
| 120° dyn, staat | k pienempi exon kanssa | 0,001*** |
| 150° dyn | k pienempi exon kanssa | 0,026* |
| kenttä | ei | NS |

Työskentelyaika:

| | | | |
|-------|-------|-----------------------|----------|
| kulma | dyn | ero työskentelyajassa | 0,002** |
| | | 60° vs 90° | 0,001*** |
| | | 60° vs 120° | 0,01** |
| | staat | ei | NS |

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

Arvioi seuraavat väittämät ympyröimällä mielipidettäsi parhaiten kuvaava vaihtoehto.

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

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

Lihasten väsymys

| | |
|---|-------------------|
| 0 | Ei ollenkaan |
| 1 | |
| 2 | Vähän |
| 3 | |
| 4 | Kohtalaisesti |
| 5 | |
| 6 | Erittäin väsyneet |

Epämukavuus

| | |
|---|--------------------|
| 0 | Ei ollenkaan |
| 1 | |
| 2 | Vähän |
| 3 | |
| 4 | Kohtalaisesti |
| 5 | |
| 6 | Erittäin epämukava |

Liikkuvuus

| | |
|---|----------------|
| 0 | Normaali |
| 1 | |
| 2 | Hieman vaikeaa |
| 3 | |
| 4 | Vaikeaa |
| 5 | |
| 6 | Hyvin vaikeaa |

Käyttömukavuus

| | |
|----|--------------------------------------|
| 3 | Hyvin helppo liikkua tai miellyttävä |
| 2 | |
| 1 | |
| 0 | Neutraali |
| -1 | |
| -2 | |
| -3 | Hyvin vaikea liikkua tai epämukava |

LIITE 4. Eksoskeletonien tarpeellisuuden arviointityökalu EKS@.

Hyödynkö ulkoisen tukirangan käytöstä työssäni?

EKS@ - Eksoskeletonin hyötyjen arviointityökalu kädet hartiatason yläpuolella tehtävässä työssä.

Mikä on eksoskeleton?

Eksoskeletonilla tarkoitetaan ulkoista tukirankaa tai kevennintä. Ne ovat päälle puettavia laitteita, joilla kevennetään tuki- ja liikuntaelimestöön kohdistuvaa raskautusta. Eksoskeletonien tarkoitus on pienentää työn aiheuttamaa kuormitusta, etenkin raskaampia kuormituspiikkejä sekä helpottaa hankalissa asennoissa työskentelyä. Ne eivät lisää käyttäjänsä voimaa, eikä niiden avulla ole tarkoitus tehdä raskaampia työtehtäviä tai enemmän työtä kuin normaalisti. Ne eivät poista ergonomiaan, työtapoihin, työvälineisiin, työympäristöön tai työn suunnitteluun liittyviä haasteita. Arviointityökalu on rajattu passiivisiin eksoskeletoneihin, jotka eivät sisällä moottoria tai muita aktiivisia osia.

Arviointityökalun yleiskuvaus

Arviointityökalu koostuu kahdesta osasta:

- 1) eksoskeletonin tarpeellisuuden arviointiin tarkoitettu kysely
- 2) käytettävyyksely eksoskeletonin koekäytön jälkeen.

Arviointityökalu on tarkoitettu työpaikoille päätöksenteon tueksi tilanteisiin, joissa harkitaan voisiko eksoskeleton olla hyödyllinen apuväline työssä. Tarpeellisuuden arviointikyselyllä pyritään arvioimaan milloin ja minkä tyyppisissä kädet koholla tehtävissä työtehtävissä eksoskeletonin käyttö olisi perusteltua ja suositeltavaa. Arviointityökalu pyrkii antamaan tukea myös eksoskeletonin koekäytön arviointiin ja päätöksentekoon kokeilun jälkeen suoritettavalla käytettävyykselyllä. Arviointityökalua ei ole tarkoitettu työn kuormittavuuden arvioinnin välineeksi, vaan ainoastaan eksoskeletonin tarpeellisuuden arviointiin.

Arviointityökalu on tarkoitettu tasapuolisesti kaikille työpaikan toimijoille, kuten työterveyshuollolle, työsuojelelle, yrittäjille tai vaikka yksittäisille työntekijöille. Arviointityökalun käytölle ei ole varsinaisia osaamisvaatimuksia, mutta paremmat valmiudet mittarin käyttöön ovat terveydenhuoltoalan ammattilaisilla (esim. fysioterapeutti) tai muilla ergonomiaan ja työn arvioimiseen perehtyneillä ammattiryhmillä.

Mahdolliset haittavaikutukset eksoskeletonin käytöstä

Eksoskeletonit on suunniteltu tukemaan työskenteleviä kehon osia siirtämällä kuormitusta muualle kehoon. Eksoskeletonien käyttö saattaa siten pitkällä aikavälillä lisätä näiden

kehon osien (esimerkiksi alaselkä) kuormitusta. Eksoskeletonien käyttö saattaa lisätä tapaturma-alttiutta: ne saattavat vaikuttaa tasapainon säätelyyn ja liikeratojen laajuuteen, hankaloittaa ympäristön havainnointia tai takertua vaatteisiin tai ympäristöön aiheuttaen turvallisuusriskin. Yläraajaeksoskeleton ei myöskään välttämättä sovellu ahtaissa tiloissa tai hankalissa asennoissa, kuten selkä kumarassa, työskentelyyn. Eksoskeleton saattaa aiheuttaa pientä painetta rintakehään ja muihin kehon osiin, joihin se on kosketuksissa, joten sen käyttöä kannattaa harkita esimerkiksi hengitystä hankaloittavien sairauksien tai pintaverenkierron häiriöiden yhteydessä. Mahdolliset haittavaikutukset ovat riippuvaisia eksoskeletonin suunnittelusta ja rakenteesta, joten riskejä aina pohdittava tapauskohtaisesti.

Arviointityökalu pohjautuu Työterveyslaitoksen tutkimuksen (<https://www.ttl.fi/tutkimus-hanke/kadet-koholla-tyoskentelyn-keventaminen-eksoskeletonin-avulla-2020-2021/>) antamaan tietoon sekä alan kirjallisuuteen ja suosituksiin.

1. Tarpeellisuuden arviointikysely

Tarpeellisuuden arviointikysely suoritetaan erikseen juuri siitä työtehtävästä, johon eksoskeletonia on tarkoitus käyttää. Jos arviointityökalu antaa vastausten perusteella suosituksen eksoskeletonin hyödyistä, kannattaa ennen eksoskeletonin hankintaa tehdä eksoskeletonin koekäyttökäyttö. Koekäytön kokemuksia voidaan sen jälkeen arvioida käytettävyysskyselyllä.

Arviointi perustuu työtehtävän fyysisesti kuormittavimpien työvaiheiden tunnistamiseen ja niiden perusteella tehtäviin päätelmiin eksoskeletonin hyödyllisyydestä. Valitse arviointiin työtehtävän kuormittavimmat työvaiheet (1–3). Pyydä tarvittaessa työvaiheiden valinnassa apua muilta kyseistä työtehtävää tekevilta henkilöiltä. Kustakin valitusta työvaiheesta tehdään erillinen arvio. Suosituksena on, että arvioinnin suorittajan käy havainnoimassa jokaista valittua työvaihetta noin puolen tunnin ajan. Jos havainnointia ei tehdä, on arvioinnin tekijän tunnettava työ riittävän hyvin tai hänen on haastateltava muutamaa työn hyvin tuntevaa työntekijää. Arvioinnin voi tehdä yhden työntekijän perusteella, mutta luotettavamman arvion saa, kun työtehtävää arvioi 2–3 työntekijän perusteella. Näin voidaan arvioida itse työtehtävää ja saadaa minimoitua yksilöllisten työtapojen vaikutus arvioon. Jos yhdenkin arvion perusteella vaikuttaa siltä, että eksoskeletonista voisi olla hyötyä, kannattaa sen kokeilua harkita.

Tarpeellisuuden arviointikysely koostuu kuudesta kysymyksestä. Kaksi ensimmäistä kysymystä koskevat niskan ja selän asentoja ja ne arvioidaan kumpikin erikseen. Yläraajojen osalta lasketaan yhteen neljän kysymyksen pisteiden summa, jonka perusteella saadaan arvio eksoskeletonin tarpeellisuudesta.

2. Käytettävyysselvitys

Koekäytön jälkeen siihen osallistuneet työntekijät täyttävät käytettävyysselvityksen, jonka avulla voidaan arvioida itse laitteen toimivuutta, sen soveltuvuutta työn keventämiseen valitussa työtehtävässä sekä sen käytöstä mahdollisesti aiheutuvia oireita.

Käytettävyysselvitys koostuu kymmenestä väittämästä, joiden paikkaansa pitävyyttä työntekijä arvioi asteikolla 1–5. Selvityksen täyttämisen jälkeen vastaukset pisteytetään ja kokonaispisteiden perusteella arviointitaulukosta saadaan arvio, kuinka hyvin eksoskeleton soveltui kyseiseen työtehtävään. Useamman selvityksen keskiarvon perusteella saa kattavimman kuvan eksoskeletonin käytettävyydestä.

1. TARPEELLISUUDEN ARVIOINTIKYSELY

Ohje kyselyn täyttämiseen

Täytä alla oleva lomake seurattuasi työvaihetta, haastateltuasi työtä tekeviä henkilöitä tai oman arvioisi perusteella. **Niska ja selkä** arvioidaan ainoastaan yhden kysymyksen perusteella, kumpikin erikseen. Tulos tulkitaan ainoastaan valitun vaihtoehdon perusteella.

Yläraajojen osalta neljän kysymyksen pisteet lasketaan yhteen ja tulkinta eksoskeletonin tarpeellisuudesta katsotaan yhteisemmän osoittamalta kohdalta.

| ARVIOINTIKOHDE | Ei riskiä kunnossa | Riski kohonnut osittain kunnossa | Riski selkeästi kohonnut ei kunnossa |
|--|---|--|--|
| Niska ja selkä | | | |
| Onko niska taipuneena tai kiertyneenä työtä tehdessä? | a) Ei (< 20 astetta taipunut) | b) Kyllä ajoittain | c) Kyllä, jatkuvasti (yli puolet työtehtävänä kestosta) / niska on taakse taipunut |
| Millainen on selän asento työtä tehdessä? | a) Lähes keskiasento (< 20 astetta taipunut tai kiertynyt) | b) Jonkin verran taipunut tai kiertynyt (20–60 astetta) | c) Voimakkaasti kiertynyt tai taipunut (> 60 astetta) |
| Yläraajat | | | |
| Millainen on käsien asento työtä tehdessä? | Vyötärön korkeudella tai alempana | Noin rinnan korkeudella | Hartiatasolla tai ylempänä |
| Pisteet | 0 | 6 | 12 |
| Kuinka usein käsien liike toistuu työvaiheen aikana? | Harvoin (joitakin liikkeitä ajoittain; noin 3 krt/min tai harvemmin)? | Toistuvasti (liikkeitä säännöllisesti, jonkun verran taukoja; noin 8 krt/min)? | Erittäin usein (liikkeet ovat lähes jatkuvia; noin 12 krt/min tai useammin)? |
| Pisteet | 1 | 2 | 3 |
| Millainen on raskain käsin käsiteltävä taakka työvaiheen aikana? | Alle 2 kg | 2–10 kg | Yli 10 kg |
| Pisteet | 1 | 2 | 3 |
| Kuinka paljon työvaihetta tehdään työpäivän aikana? | Alle tunti/työpäivä | 1–3 tuntia/työpäivä | Yli 3 tuntia/työpäivä |
| Pisteet | 1 | 2 | 3 |

Arviointikyselyn pisteytys ja tulkinta

Niska ja selkä arvioidaan ainoastaan yhden kysymyksen perusteella, kumpikin erikseen. Tulos tulkitaan ainoastaan valitun vaihtoehdon perusteella.

Niska

Vaihtoehto

- | | |
|---|---|
| a | Niskan asennon osalta asiat ovat kunnossa. |
| b | Niska on ajoittain taipuneena tai kiertyneenä. Tarkastele voisitko työntekotavoilla tai työn järjestelyllisillä seikoilla vähentää niskan taipuneita tai kiertyneitä asentoja. |
| c | Työskentely niska pitkään hankalaan asentoon taipuneena lisää kroonisten vaivojen ja vammojen riskiä. Tarkastele voisitko työntekotavoilla tai työn järjestelyllisillä seikoilla vähentää niskan taipuneita tai kiertyneitä asentoja. |

Selkä

Vaihtoehto

- | | |
|---|--|
| a | Selän asennon osalta asiat ovat kunnossa. |
| b | Selän asento työtä tehdessä on taipunut, yläraajaeksooskeletonin käytöstä ei välttämättä ole hyötyä. Selän eksooskeletonin käytöstä sen sijaan saattaisi olla hyötyä, mutta tarkastele ensin voisitko työntekotavoilla tai työn järjestelyllisillä seikoilla vähentää selän taipuneita tai kiertyneitä asentoja. |
| c | Selän asento työtä tehdessä on voimakkaasti taipunut, yläraajaeksooskeletonin käytöstä ei todennäköisesti ole hyötyä. Työskentely selkä pitkään hankalaan asentoon taipuneena lisää kroonisten vaivojen ja vammojen riskiä, etenkin raskaampia taakkoja käsitellessä. Selän eksooskeletonin käytöstä saattaisi olla hyötyä, mutta tarkastele ensin voisitko työntekotavoilla tai työn järjestelyllisillä seikoilla vähentää selän taipuneita tai kiertyneitä asentoja. |

Yläraajojen osalta neljän kysymyksen pisteet lasketaan yhteen ja tulkinta eksooskeletonin tarpeellisuudesta katsotaan yhteissumman osoittamalta kohdalta.

Yläraajat

Summa

Tulkinta

- | | |
|---------|---|
| 0–9 p | Eksooskeletonin käytöstä ei välttämättä ole hyötyä. |
| 10–15 p | Eksooskeletonin käytöstä on jonkin verran hyötyä. |
| 16–21 p | Eksooskeletonin käytöstä on selvää hyötyä. |

2. KÄYTETTÄVYYSKYSELY

Arvioi seuraavat väittämät kokeilun perusteella ympyröimällä mielipidettäsi kuvaava vaihtoehto.

| | Täysin eri mieltä | Eri mieltä | Neutraali | Samaa mieltä | Täysin samaa mieltä |
|---|-------------------|------------|-----------|--------------|---------------------|
| 1. Käyttäisin mielelläni tätä eksoskeletonia usein. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2. Luulen, että tarvitsisin opastusta, jotta osaisin käyttää eksoskeletonia. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 3. Eksoskeletonia oli mielestäni helppo käyttää. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 4. Mielestäni eksoskeletonin eri osat eivät toimi teknisesti hyvin yhteen. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 5. Luulen, että useimmat oppisivat eksoskeletonin käytön hyvin nopeasti. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 6. Eksoskeleton rajoitti toimintaani tai liikelaajuuksiani. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 7. Eksoskeleton kevensi työtäni. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 8. Eksoskeletonin käyttö aiheutti fyysisiä oireita, kuten puutumisen tai kipua. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 9. Eksoskeleton paransi jaksamistani työpäivän aikana tai sen jälkeen. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 10. Eksoskeleton aiheutti turvallisuusrisikin, kuten ympäristön havainnoinnin heikentyminen tai takertuminen vaatteisiin tai ympäristöön. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Kyselyn pisteytys ja tulkinta:

X = parittomien kysymysten vastausten summa - 5

Y = 25 - parillisten kysymysten vastausten summa

Kokonaispisteet: $(X + Y) * 2,5$

Esimerkki:

Parittomien vastausten summa on 22 ja parillisten vastausten summa 8.

$((22-5) + (25-8)) * 2,5 = 85$ pistettä

| Arvio soveltuvuudesta: | Arvio |
|------------------------|---|
| Pistemäärä | |
| > 80,3 | Ekoskeleton soveltuu työtehtävään erinomaisesti |
| 68,1–80,3 | Ekoskeleton soveltuu työtehtävään hyvin |
| 68 | Ekoskeleton soveltuu työtehtävään kohtalaisesti |
| 51–67,9 | Ekoskeletonin soveltuu työtehtävään heikosti |
| < 51 | Ekoskeleton ei sovellu työtehtävään lainkaan |

Lähes 230 000 suomalaista työskentelee useita tunteja päivässä kädet koholla. Pitkäkestoinen kädet koholla työskentely on haitallista yläraajojen ja hartiaseudun lihaksistolle lisäten liikuntaelinvaijien riskiä. Perinteisesti fyysistä työkuormitusta on pyritty vähentämään erilaisilla apuvälineillä ja ergonomisilla ratkaisuilla. Yksi uusimmista on ulkoinen tukiranka, eksoskeleton. Sen potentiaali fyysisen työkuormituksen pienentämisessä voi olla merkittävä. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, kuinka paljon kädet koholla tehtävää työtä voidaan keventää eksoskeletonin avulla. Tutkimus arvioi kokonaisvaltaisesti uuden, työtä keventävän apuvälineteknologian hyötyjä sekä standardi- että autenttisessa työympäristössä. Tulosten pohjalta laadittu työkalu auttaa arvioimaan minkälaisissa töissä eksoskeletonin käyttö on perusteltua.

Tämä raportti on tarkoitettu niille työhyvinvointia kehittäville tahoille, jotka toimivat raskasta fyysistä, kädet koholla tehtävää työtä sisältävien alojen parissa.



Työsuojelurahasto
Arbetskyddsfonden
The Finnish Work Environment Fund

Työterveyslaitos
Arbetshälsoinstitutet
Finnish Institute of Occupational Health

PL 40, 00032 Työterveyslaitos

www.ttl.fi

ISBN 978-952-261-985-3 (PDF)

