

Pakettilajittelutyön keventäminen ulkoisen tukirangan avulla

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

Työterveyslaitos
Helsinki 2021



Esipuhe ja kiitokset

COVID-19-pandemian mukanaan tuomat haasteet eivät muuttaneet tutkittavaa työtä siten, että suunniteltuun tutkimusasetelmaan olisi pitänyt tehdä muutoksia. Raportti on poikkileikkaus työn kuormittavuuteen ja siihen, miten ensimmäinen markkinoille tullut eksoskeletonin 'prototyyppi' vastaa annettuihin asiakaslupauksiin. Työkuormitushanke, jossa tutkittiin pakettijäljittelyn keventämistä ulkoisen tukirangan avulla autenttisissa työtilanteissa, on palveluhankkeena ainutlaatuinen sen uutuusarvosta johtuen. Yläraajojen ja ylävartalon kuormittamista ja mahdollisia eksoskeletonin muutosvaikutuksia siihen tutkittiin Postin Vantaan lajitte-lukeskuksessa syksyllä 2021 ennen Black Friday- ja joulusesonkia.

Erityiskiitokset työhyvinvointijohtaja Anne Tallgrenille ja Posti-konsernin työhyvinvointisäätiön asiamies Esa Vilkunalle erinomaisen hyvistä yhteistyöstä hankkeen suunnitteluvaiheessa. Kiitokset työsuojelupäällikkö Päivi Kylmäkorvelle ja logistiikkakeskuksen päällikkö Saku Pöyhöselle sekä henkilökunnalle ja luottamusjohdolle hyvistä yhteistyöstä hankkeen kaikissa vaiheissa. Erityisesti kiitämme kaikkia mittauksiin osallistuneita työntekijöitä heidän arvokkaasta panoksestaan tutkimukselle.

22.12.2021

Työterveyslaitoksen työryhmä

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

Tiivistelmä

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, eksoskeleto. Sen potentiaali lihaksistoon ja liikuntaelimistöön kohdistuvan kuormituksen pienentämisessä voi olla merkittävä. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, voidaanko pakettilajittelutyön fyysistä kuormitusta keventää yläraajan eksoskeletonin avulla.

Työntekijöitä mitattiin kahden työvuoron ajan, joista toinen tehtiin ilman eksoskeletonia ja toinen eksoskeletonin kanssa. Mittausten aikana työntekijät työskentelivät normaalissa pakettilajittelutyössä neljällä eri linjalla (VDL* syöttö ja luisu sekä CP* syöttö ja luisu). Työntekijöiltä mitattiin hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitusta, lihassähköistä aktiivisuutta, olkavarren työskentelyasentoja sekä subjektiivisia arvioita kuormittuneisuudesta, epämukavuudesta ja eksoskeletonin käytettävyydestä.

Eksoskeletonia ei tutkimuksen tulosten perusteella suositella käytettäväksi pakettilajittelutyössä. Eksoskeleton lisäsi hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormittuneisuutta 7–11 %. Pakettilajittelutyö sisälsi vain hyvin vähän yläkätistä työtä (alle 5 % työajasta), mikä selittää eksoskeletonin vähäisiä hyötyjä näissä työtehtävissä. Tästä huolimatta eksoskeleton vähensi ranteen koukistajien ja olkapään lihasten kuormittuneisuutta. Tämän vuoksi eksoskeletonia voidaan harkita suositeltavaksi työn keventämiseen niille työntekijöille, joilla on ollut esimerkiksi olkapäävaivoja. Käytettävyysskyselyn perusteella eksoskeleton soveltui pakettilajittelutyöhön heikosti.

Pakettilajittelutyön aineenvaihdunnallinen kuormitus oli keskimäärin kevyttä, mutta työ sisälsi raskaita ja keskiraskaita kuormituspiikkejä, mikä lisää työn kuormittavuutta. Aineenvaihdunnallinen kuormitus ei kuitenkaan ylittänyt suositusarvoja millään mittarilla. Lihaskuormituksen osalta suositusarvot ylittyivät vain hartialihaksessa ja alaselässä. Pakettilajittelutyön fyysisen kuormituksen keventämiseksi suositellaan linjalla työskentelyä parin kanssa yksin työskentelyn sijaan sekä työntekijöiden fyysisen kunnon ja palautumisen edistämistä. Lihaskuormitusta hartiassa ja alaselässä voidaan keventää ergonomisilla nostoasunnoilla ja mahdollisesti selän eksoskeletonin avulla.

*VDL= VanDerLande (laitevalmistaja), C-halli

*CP= CrisPlant (laitevalmistaja), A- ja B-halli

Sisällysluettelo

1. Tausta.....	2
Eksoskeleton työkuormituksen hallinnan työkaluna.....	2
2. Tavoitteet.....	3
3. Tutkimusasetelma, aineisto ja menetelmät	4
Tutkimusasetelma	4
Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus	4
Työasennot	6
Puristusvoima	7
Lihassähköinen aktiivisuus (EMG)	7
Koettu kuormittuneisuus ja epämukavuus	8
Eksoskeletonin käytettävyys.....	9
4. Tulokset.....	11
Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus	11
Työasennot	17
Puristusvoima	22
Lihassähköinen aktiivisuus (EMG)	22
Koettu kuormittuneisuus ja epämukavuus	28
Eksoskeletonin käytettävyys.....	28
5. Johtopäätökset ja suositukset	30
Lähteet.....	32
Liitteet.....	35

1. Tausta

Eksoskeleton työkuormituksen hallinnan työkaluna

Kohtuullinen työkuormitus edistää työntekijöiden hyvinvointia ja työn sujumista. Pitkäaikainen kuormittuneisuus on riski työntekijän terveyden ja työkyvyn ennenaikaiseen heikkenemiseen. Kuormituksen arvioimisen tavoitteena on selvittää työn kuormitustekijät, edistää työterveyttä ja -turvallisuutta sekä parantaa työn sujuvuutta ja tuottavuutta. Työkuormituksen hallitsemisen keinoja ovat muun muassa työn organisoinnin muutokset, ergonomiset ratkaisut sekä erilaiset apuvälineet.

Pitkäkestoinen kädet koholla työskentely on haitallista yläraajojen ja hartiaseudun lihaksistolle ja lisää tuki- ja liikuntaelinvaikeuksien riskiä. Kädet koholla työskentely on yhteydessä niska-hartiaseudun vaivoihin [1–5] ja kädet koholla työskentelyn ja sairauspoissaolojen välillä on havaittu selkeä annos-vaste-suhde [6]. Olkavarret yli 90° kulmassa tehtävä työ kasvattaa olkapään pinneoireyhtymän riskiä, vaikka työtä tehtäisiin vain alle tunti päivässä [7]. Lisäksi käsien kannattelu lisää työn aineenvaihdunnallista kuormitusta ja nostaa verenpainetta [8]. Kohonnut verenpaine on yksi keskeisimmistä sydän- ja verisuonitautien riskitekijöistä.

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 tukirangat 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 [9]. Tukiranka ei rajoita tarkkuutta vaativia käden liikkeitä, joten työntekijä voi käyttää käsiään vapaasti [10].

Yläraajojen eksoskeletoneja koskevia tutkimuksia on tehty lähinnä laboratorio-olosuhteissa ja niissä eksoskeletonien on havaittu vähentävän subjektiivista kuormittumisen ja epämukavuuden tunnetta, niska-hartiaseudun lihasten aktiivisuutta ja olkaniveleen kohdistuvaa kuormitusta [11–25]. Myös aineenvaihdunnallisen kuormituksen on havaittu olevan pienempää eksoskeletonia käytettäessä, mikä näkyy alhaisempana syketasona ja hapenkulutuksena työskentelyn aikana [14, 21–23].

2. Tavoitteet

Tämän hankkeen tavoitteena oli:

1. Selvittää, kuinka paljon pakettilajittelutyötä voidaan keventää ulkoisen tukirangan (eksoskeleton) avulla.
2. Arvioida, milloin ja minkä tyyppisissä pakettilajittelun työtehtävissä eksoskeletonin käyttö on perusteltua ja suositeltavaa.

3. Menetelmät

Tutkimusasetelma

Hanke toteutettiin Postin logistiikkakeskuksessa Vantaalla 27.9.-8.10.2021. Tutkimukseen osallistui 15 tervettä vapaaehtoista työntekijää (10 miestä, 5 naista), joilta mitattiin työvuoron aikaista tuki- ja liikuntaelimistön sekä hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormittumista kahden työvuoron aikana. Toinen mitatuista työvuoroista tehtiin eksoskeletonin kanssa (Skelex 360, Skelex, Alankomaat, kuva 1) ja toinen ilman eksoskeletonia. Mittausjärjestys oli satunnaistettu eksoskeletonin käytön osalta. Mittaukset tehtiin neljällä eri linjalla: VDL syöttö ja luisu sekä CP syöttö ja luisu. Ennen työvuoron alkua tutkittaville selitettiin tutkimuksen kulku, heille annettiin kirjallinen informaatio tutkimuksesta ja heiltä pyydettiin kirjallinen suostumus tutkimukseen osallistumisesta.

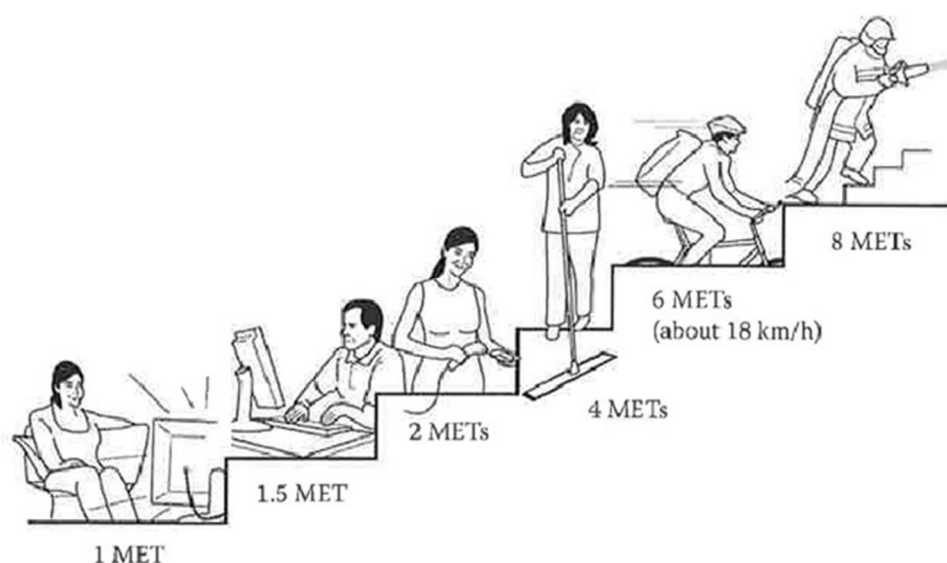


Kuva 1. Skelex 360 -tukiranka käyttövalmiina ja päälle puettuna.

Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus

Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitusta mitattiin Bodyguard 2 -mittalaitteella (Firstbeat Technologies, Suomi), joka kiinnitettiin kahdella elektrodilla (BlueSensor VL-00-S, Ambu, Tanska) tutkittavan rintakehälle. Laite mittaa sydämen sykintäaajuutta (krt/min) sekä sydämen sykkeen perusteella laskettua aineenvaihdunnallisesta kuormitusta (MET-yksikkö, hapenkulutus ja energiankulutus). Laite mittaa myös sykevälivaihtelua, eli kahden peräkkäisen sydämen lyönnin välisen ajan vaihtelua. Sykevälivaihtelumuuttujien avulla voidaan tarkentaa syketaajuuteen perustuvaa arviota työn aineenvaihdunnallisesta kuormituksesta [25].

Sydämen sykkintäaajuus on perinteinen ja hyvä hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormittumisen mittari, joka toimii luotettavimmin, kun fyysinen kuormitus ylittää kevyen kuormituksen tason. MET (metabolinen ekvivalentti) eli lepoaineenvaihdunnan kerrannainen kuvaa fyysisen aktiivisuuden (lihasten aktiivinen käyttö) aiheuttamaa lisääntynyttä energiankulutusta verrattuna lepotasoon. Yksi MET vastaa tuolissa levossa istuvan henkilön energiankulutusta, joka on yksi kilokalori painokiloa kohden tunnissa. Hapenkulutuksena 1 MET vastaa keskimäärin 3,5 ml/kg/min [26]. Hapenkulutus kertoo MET:n tapaan energiankulutuksesta ja yksikkönä käytetään kehonpainoon suhteutettua ml/kg/min-yksikköä (millilitraa kulutettua happea kehon painokiloa kohti minuutissa). Kuvasta 2 nähdään eri toimintojen ja työtehtävien kuormittavuus MET-yksiköinä.



Kuva 2. Eri toimintojen ja työtehtävien kuormittavuus MET-yksiköinä [26].

Työn kuormittavuusluokituksessa noudatettiin MET:n ja sykkeen osalta kirjallisuudesta saatuja sekä standardien määrittelemiä luokituksia. Yksilötasolla hyvin tauotetun 8 tunnin työpäivän energettisen kuormituksen tason ei tulisi ylittää 50 % työntekijän maksimaalisesta suorituskyvystä ja tauottamattomassa työssä aineenvaihdunnallinen kuormitus saisi olla korkeintaan 33 % maksimisuorituskyvystä. Yli 65 % maksimikapasiteetista lyhytaikaisestikin ylittävät työvaiheet lisäävät usein toistuvina merkittävästi ylikuormituksen vaaraa [27].

Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormittuneisuus voidaan luokitella aineenvaihdunnan kerrannaisen (MET) mukaan seuraavasti [27]:

Kevyt työ < 3,0 MET

Keskiraskas työ 3,0–5,9 MET

Raskas työ > 6,0 MET

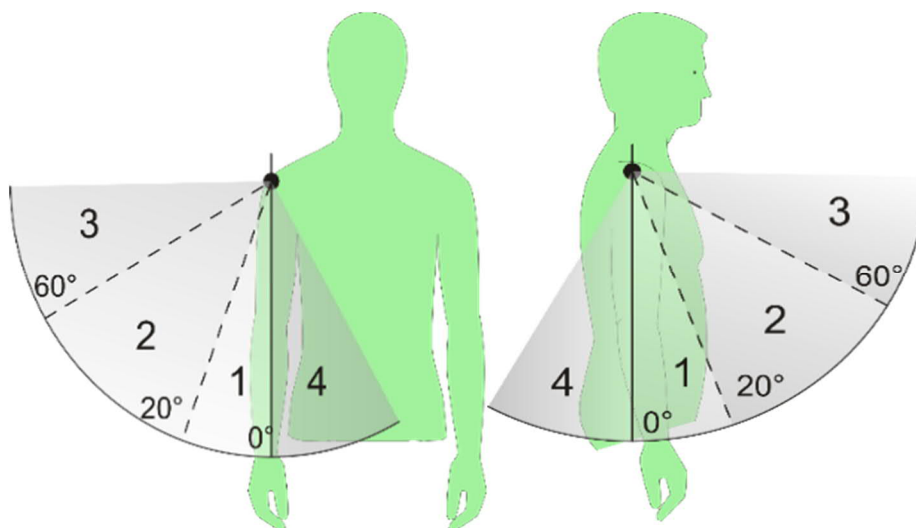
Työasennot

Työn aikaisia käden asentoja mitattiin molempiin olkavarsiin kiinnitetyillä sensoreilla (MPower, Fibrux Oy, Suomi), jotka mittaavat kolmiakselista liikettä. Mittauksista analysoitiin Tulefix-ohjelmalla (Työterveyslaitos, Suomi) olkapään keskimääräiset nivelkulmat työn aikana ja keskimääräiset käden pidot (minuuttia tunnissa) ja toistot (kertaa tunnissa) kolmessa eri kulmassa (alle 60°, 60–90° ja yli 90°) sekä lyhyinä (alle 2 sekuntia) ja pitkinä (yli 2 sekuntia) pitoina ja toistoina.

Työssä vaikuttavina fyysisinä riskitekijöinä pidetään hankalia työasentoja, lihasvoiman runsasta käyttöä, staattisia asentoja, usein toistuvia samankaltaisia työliikkeitä ja käsin tehtävää taakan käsittelyä, kuten nostamista ja kantamista. Näiden tekijöiden lisäksi mm. jotkin työhön, työvälineisiin tai työympäristöön liittyvät tekijät, kuten esimerkiksi kylmä tai työkalun tai välineen aiheuttama paine tai värinä, lisäävät edellä mainittujen tekijöiden vaikutusta [28].

Suomalaisesta aikuisväestöstä 3,8 % kärsii olkapään kiertäjäkalvosimen oireyhtymästä. Sen esiintyvyydessä ei ole eroja miesten ja naisten välillä. Tyypillisiä kiertäjäkalvosinoireyhtymän työperäisiä riskitekijöitä ovat voimankäyttö, käsien usein toistuvat kohoasennot, huonot työvälineet ja tärisevien työkalujen käyttö [29].

Monissa ergonomian havaintomenetelmissä on raportoitu olkavarren toistuvien yli 60 asteen kohoasentojen aiheuttavan haitallisia kiputiloja. Eurooppalaisessa koneturvallisuusstandardissa (SFS-EN 1005–4) työssä suositellut olkavarren kulmat on määritetty kuvan 3 mukaisesti. Standardin mukaan vyöhykkeen 3 asennot ovat hyväksyttäviä vain harvoin toistuvina (<2 krt/min) [30].



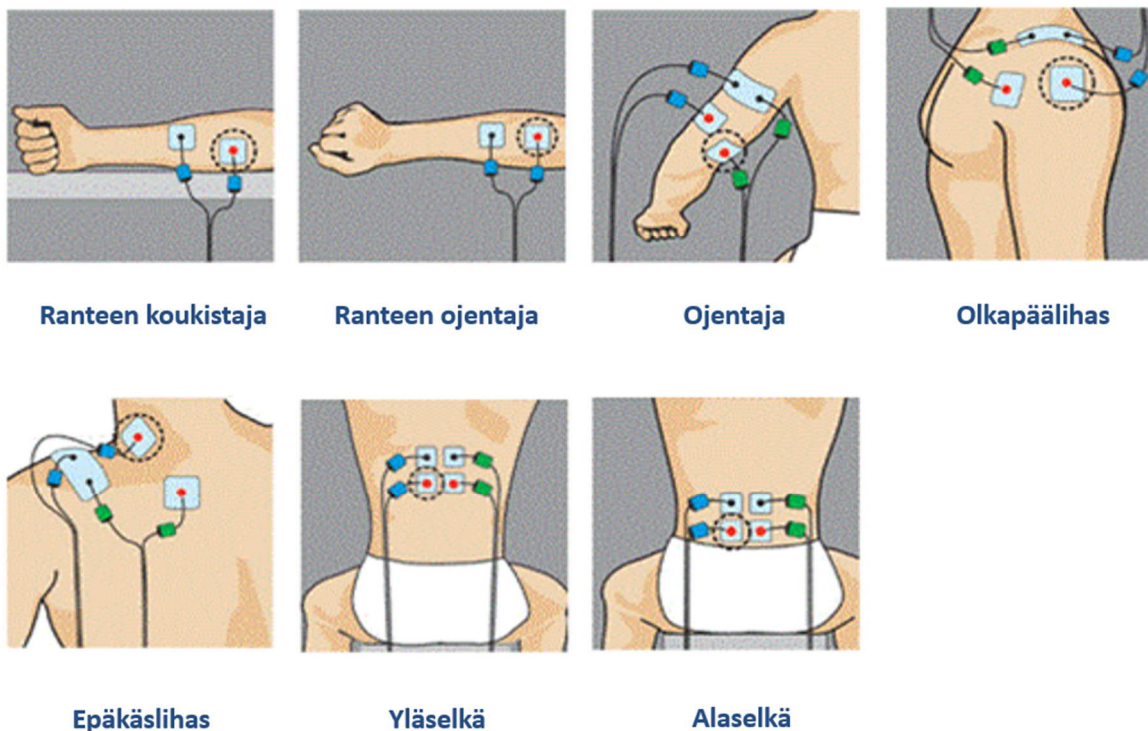
Kuva 3. Olkavarren asentoluokitus SFS-EN 1005–4 standardin mukaan. Vyöhykkeen 3 asennot on sallittu harvoin toistuvina. [30]

Puristusvoima

Käden maksimaalinen puristusvoima mitattiin ennen työpäivää ja työpäivän jälkeen puristusvoimamittarilla (Gloway EH101, Gloway Invent Oy, Kiina). Puristusvoiman mittaamisen tarkoituksena oli mitata työpäivän aiheuttamaa hermo-lihasjärjestelmän väsymystä, mikä ilmenee maksimivoiman laskuna.

Lihassähköinen aktiivisuus (EMG)

Lihassähköisen aktiivisuuden mittauksilla (EMG, elektromyografia) voidaan arvioida eri lihasryhmien työn aikaista kuormittumista. Lihaksen tuottaman sähköisen aktiivisuuden määrä on suhteessa lihasen supistusvoimakkuuteen: mitä voimakkaampi supistus, sitä enemmän sähköistä aktiivisuutta havaitaan. Kultakin tutkittavalta mitattiin lihassähköistä aktiivisuutta kahdeksasta eri lihasryhmästä. Mitatut lihasryhmät olivat: ranteen koukistaja, ranteen ojentaja, kolmipäinen olkalihas eli ojentaja, olkapäälihas (keski- ja etuosa), epäkäslihas (hartia), yläselkä (suora selkälihas lavan yläosan korkeudelta) ja alaselkä (suora selkälihas navan korkeudelta) (kuva 4).



Kuva 4. Lihasryhmät, joista sähköinen aktiivisuus mitattiin.

Mitattavan lihasryhmän päälle kiinnitettiin kaksi mittaavaa elektrodiä ja viereen nk. "maaelektrodi" (BlueSensor M-00-S, Ambu, Tanska). Elektrodeihin kiinnitettiin tallentavaan mittalaitteeseen menevät johdot ja tallentava laite (ME6000, Bittium Oy, Suomi) kiinnitettiin mitattavan vyötärölle. Kullekin lihasryhmälle tehtiin maksimaalinen lihasvoimatesti liikkumatonta vastusta vasten seuraavasti:

- jalkojen nosto ylöspäin tasolla vatsallaan maaten, jalat noin 45 asteen kulmassa viistosti alaspäin (alaselkä)
- puristusvoima seisten, käsi suorana sivulla (ranteen koukistajat ja ojentajat)
- käden nosto etukautta suoraan ylös seisten (hartia- ja olkapäälihas)
- kyynärnivelen ojennus 90° kulmassa suoraan eteenpäin (ojentaja)
- käsi vaakatasossa suoraan sivulle painaen (yläselkä)

Maksimaalisen voimatestin aikana mitattiin kunkin lihasryhmän maksimaalinen sähköinen aktiivisuus. Kun maksimaaliseen aktiivisuuteen suhteutetaan työn aikana mitattu lihasten sähköinen aktiivisuus, voidaan määrittää lihasten työssä kuormittuneisuuden taso prosentteina maksimaalisesta aktiivisuudesta.

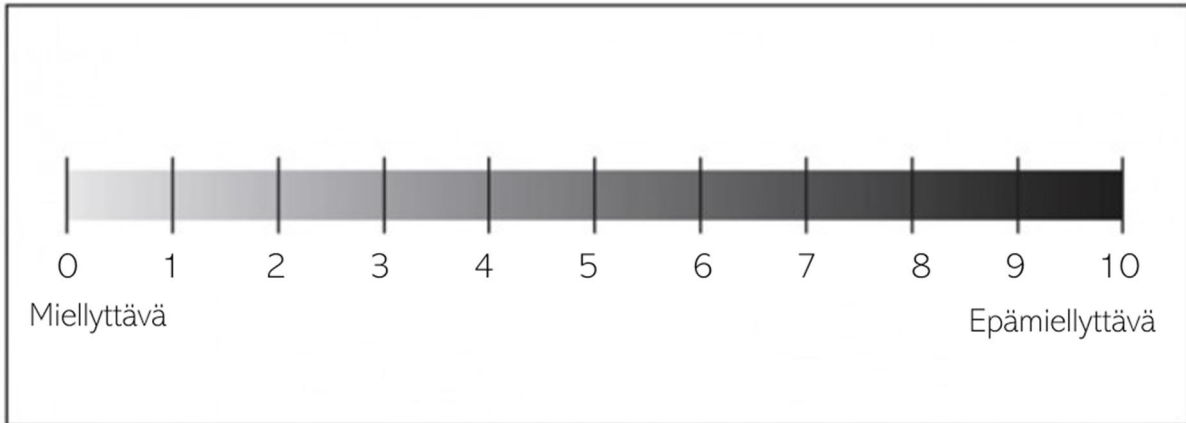
Kirjallisuudessa suositellaan, että lihaksiston työn aikainen keskimääräinen kuormittuneisuus ei saisi ylittää 14 % ja kuormitushuiput (piikkikuormitus) eivät saisi ylittää 50 % maksimaalisesta aktiivisuudesta [31].

Koettu kuormittuneisuus ja epämukavuus

Työvuoron jälkeen tutkittavat arvioivat koko kehon kuormittuneisuuden ilman eksoskeletonia ja sen kanssa käyttäen alla olevaa vakioitua RPE-asteikkoa (Rating of Perceived Exertion, kuva 5) [32]. Koettua epämukavuutta ilman eksoskeletonia ja sen kanssa arvioitiin valitsemalla omaa tuntemusta vastaava numero VAS-janalta (Visual Analogue Scale, kuva 6).

6	Ei rasitusta
7	Erittäin kevyt
8	
9	Hyvin kevyt
10	
11	Kevyt
12	
13	Melko rasittava
14	
15	Rasittava
16	
17	Hyvin rasittava
18	
19	Erittäin rasittava
20	Maksimaalinen rasitus

Kuva 5. Koetun kuormittuneisuuden arviointiin käytetty RPE-asteikko [32].



Kuva 6. Koetun epämukavuuden arviointiin käytetty VAS-jana.

Eksoskeletonin käytettävyys

Eksoskeletonin käytettävyyttä pakettilajittelutyössä arvioitiin käytettävyyskyselyllä (System Usability Scale, liite 1). 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 [33–35]. Käytettävyyskyselyn lisäksi työntekijät arvioivat lihasten väsymystasoa, epämukavuutta ja yläraajojen liikkuvuutta eksoskeletonin kanssa sekä yleistä käyttömukavuutta 7-portaisilla asteikoilla (kuva 7).

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

Kuva 7. Epämukavuuden, lihasten väsymyksen, liikkuvuuden ja käyttömukavuuden arviointias-
teikot.

4. Tulokset

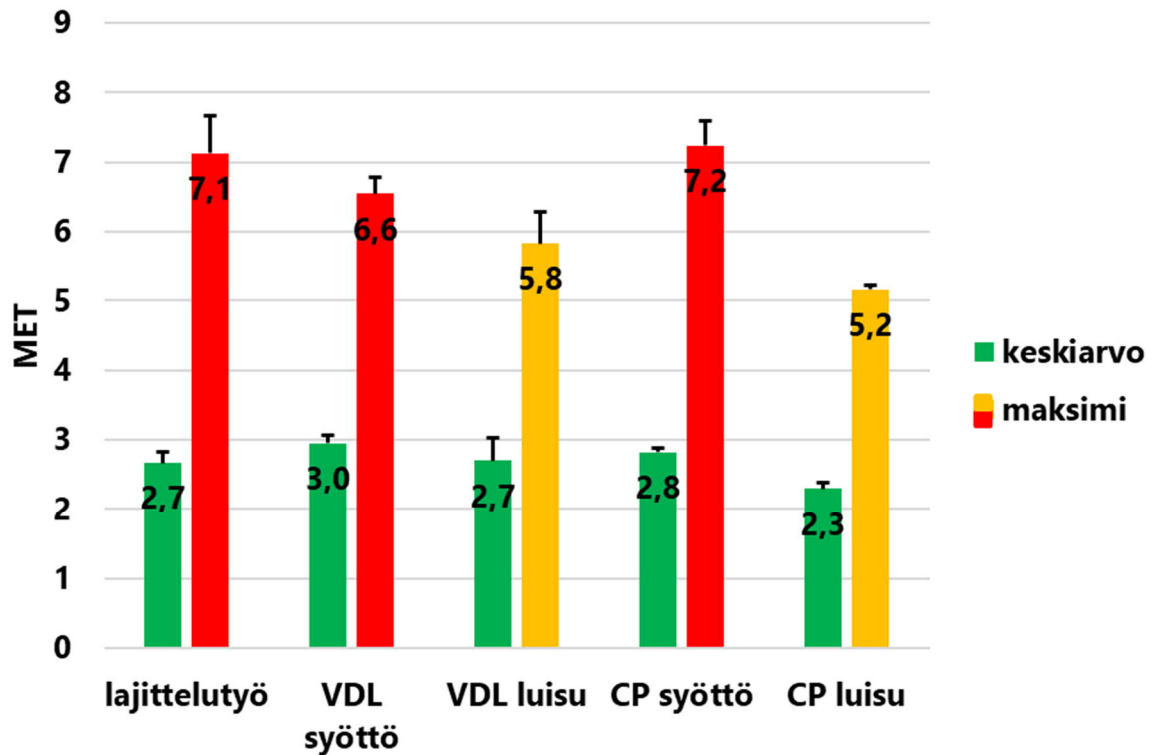
Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus

Pakettilajittelutyön hengitys- ja verenkiertoelimistöön kohdistuvaa kuormitusta arvioitiin monella eri muuttujalla. Näitä muuttujia ovat syketaaso (krt/min), hapenkulutus painokiloon suhteutettuna (ml/kg/min), energiankulutus (kcal/min) sekä MET-yksikkö (metabolic equivalent). Tulokset on esitetty koko tutkimusjoukon keskiarvoina koko työjaksosta ilman eksoskeletonia (REF = referenssi) ja eksoskeletonin kanssa (EXO = eksoskeleton) sekä linjoittain (VDL syöttö ja luisu sekä CP syöttö ja luisu) ilman eksoskeletonia ja sen kanssa.

Sykevälivaihtelu tarkoittaa vaihtelua peräkkäisten sydämenlyöntien välisissä ajoissa ja se kertoo tahdosta riippumattoman hermoston eli autonomisen hermoston tilasta. Sykevälivaihtelu suurenee rentoutuneessa kehossa, jolloin rytmi on epäsäännöllisempää. Vireystilan noustessa fyysisen kuormituksen tai henkisen stressin seurauksena sykevälivaihtelu pienenee. Sykevälivaihtelun perusteella arvioitiin työpäivän aikana tapahtuvaa palautumista, jota kertyi työpäivän aikana keskimäärin 20 minuuttia. Palautumisen tapahtuminen työpäivän aikana tarkoittaa, että työntekijät pystyvät esimerkiksi tauoilla irtautumaan työstä, mikä auttaa työssä jaksamisessa.

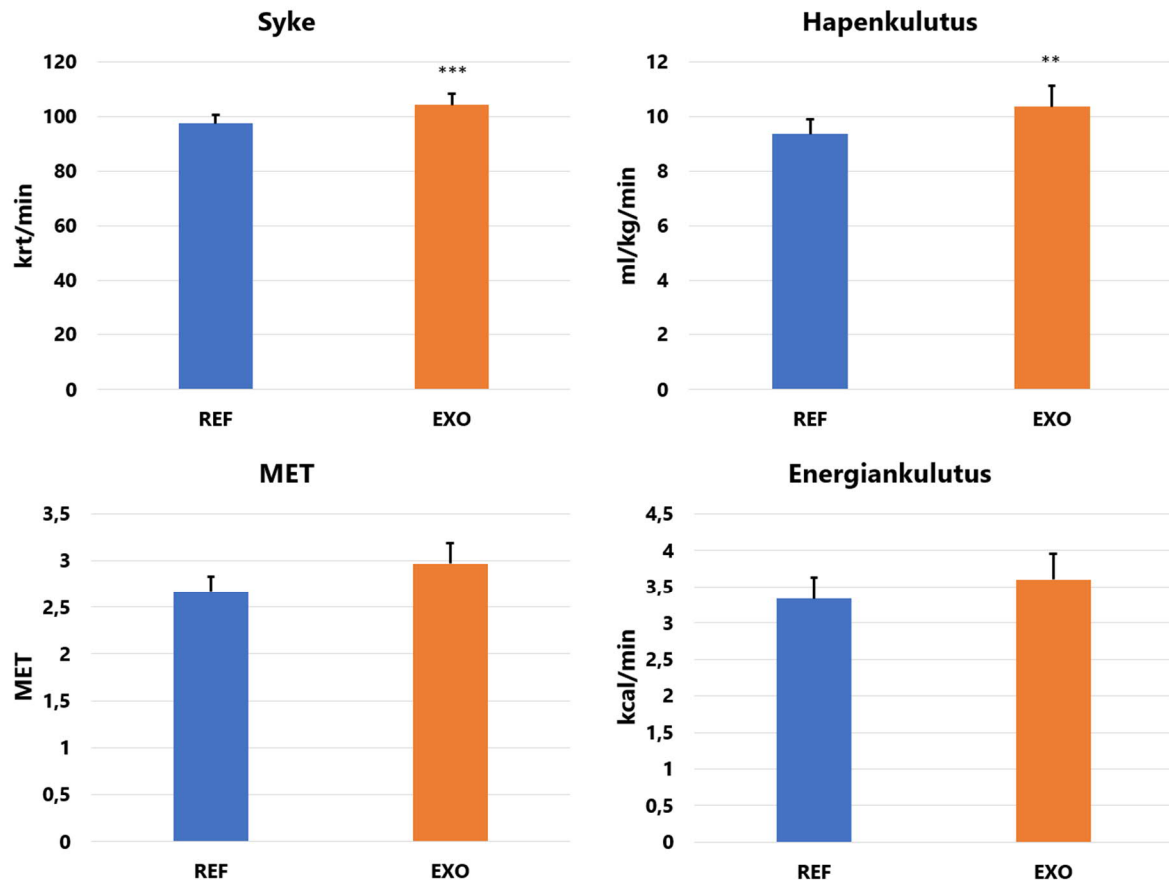
Absoluuttista sykevälivaihtelun määrää voidaan mitata RMSSD-muuttujalla (Root Mean Square of the Successive R-R Difference, ms). Keskimääräinen RMSSD työvuoron ajalta oli ilman eksoskeletonia $16,9 \pm 7,2$ ms ja eksoskeletonin kanssa $13,6 \pm 1,6$ ms. Suuret millisekuntilukemat ovat merkki parasympaattisen hermoston aktiivisuudesta ja kasvavasta sykevälivaihtelusta, mikä on yhteydessä palautumiseen. Eksoskeletonin käyttö ei edistänyt palautumista työpäivän aikana.

Kuvassa 8 on esitetty pakettilajittelutyön keskimääräinen aineenvaihdunnallinen kuormitus ja piikkikuormitus (korkein mitattu yksittäinen arvo työn ajalta) MET-yksiköinä koko tutkimusjoukosta sekä linjoittain. Pakettilajittelutyön keskimääräinen aineenvaihdunnallinen kuormitus ilman eksoskeletonia oli 2,7 MET, mikä vastaa aineenvaihdunnallisen kuormituksen osalta kevyttä työtä. Pakettilajittelutyön keskimääräinen kuormitus oli siis alhaista, mutta piikkikuormitus työssä oli varsin korkeaa. Erityisesti syötoissä piikkikuormitus vastasi raskasta työtä ja luisuissakin piikkikuormitus nousi keskiraskaan työn tasolle.



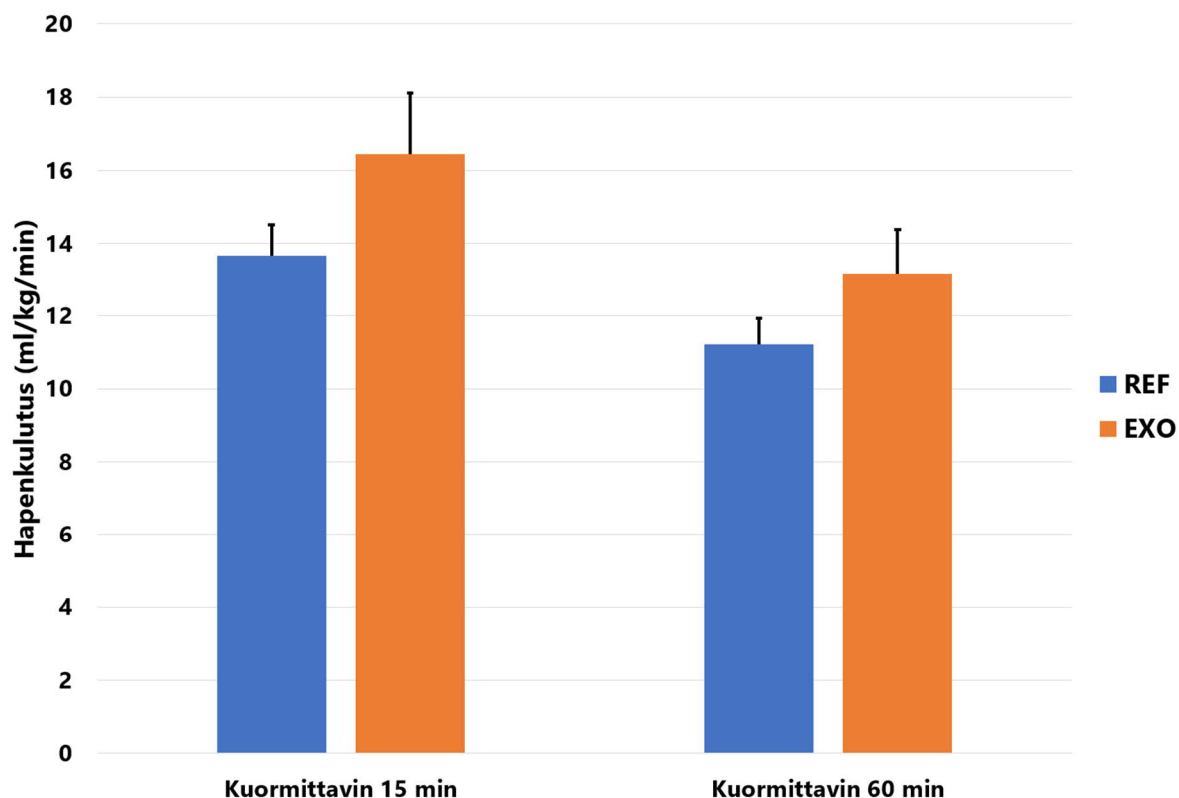
Kuva 8. Pakettilajittelutyön keskimääräinen ja korkein aineenvaihdunnallinen kuormitus MET-yksikköinä koko tutkimusjoukossa ja linjoittain.

Kuvassa 9 on esitetty koko tutkimusjoukon keskimääräiset tulokset työstä ilman eksoskeletonia ja eksoskeletonin kanssa. Eksoskeletonin käyttö lisäsi aineenvaihdunnallista kuormitusta, mikä nähdään kohonneena sykkeenä ja hapenkulutuksena. Syke oli 7 % korkeampi ja hapenkulutus 11 % korkeampi eksoskeletonin kanssa. Erot sykkeessä ja hapenkulutuksessa olivat myös tilastollisten testien mukaan merkitseviä (ts. erot olivat todellisia eroja, eivätkä johtuneet satunnaisesta vaihtelusta). Myös energiankulutus (kcal/min) ja MET olivat korkeammalla tasolla eksoskeletonin kanssa.



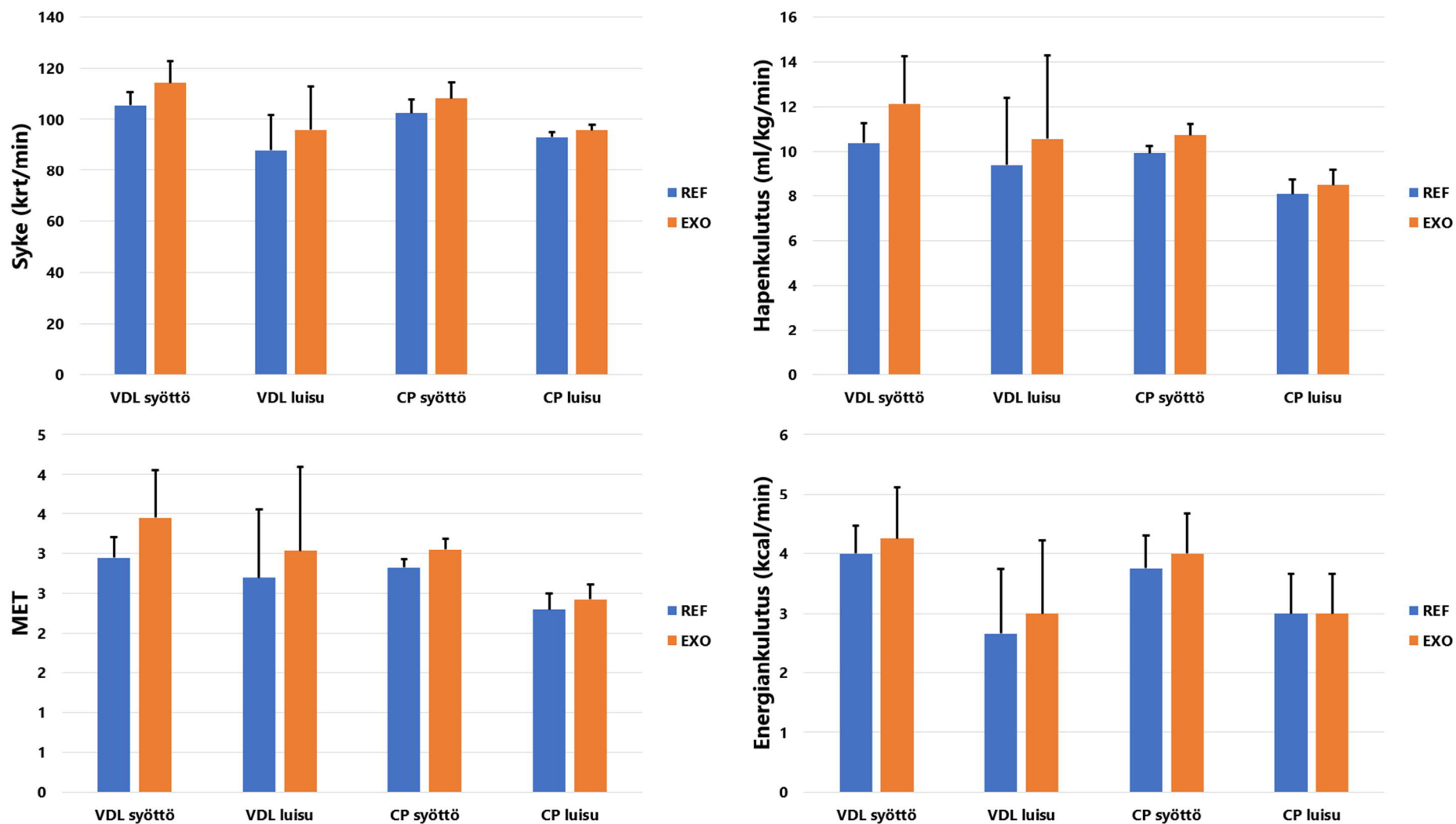
Kuva 9. Syke, hapenkulutus, MET ja energiankulutus (keskiarvo $\pm$ keskivirhe) pakettilajittelutyössä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO). * = tilastollisesti merkitsevä ero REF ja EXO välillä, *** = $p < 0,001$, ** = $p < 0,01$.

Kuvassa 10 on esitetty pakettilajittelutyön piikkikuormitus kuormittavimman 15 ja 60 minuutin keskiarvona. Kuormittavimman 15 minuutin keskiarvo oli 3,9 MET ja kuormittavimman 60 minuutin keskiarvo 3,2 MET. Piikkikuormituksen perusteella pakettilajittelutyö voidaan luokitella keskiraskaaksi työksi. Myös piikkikuormitus oli korkeampaa eksoskeletonin kanssa.



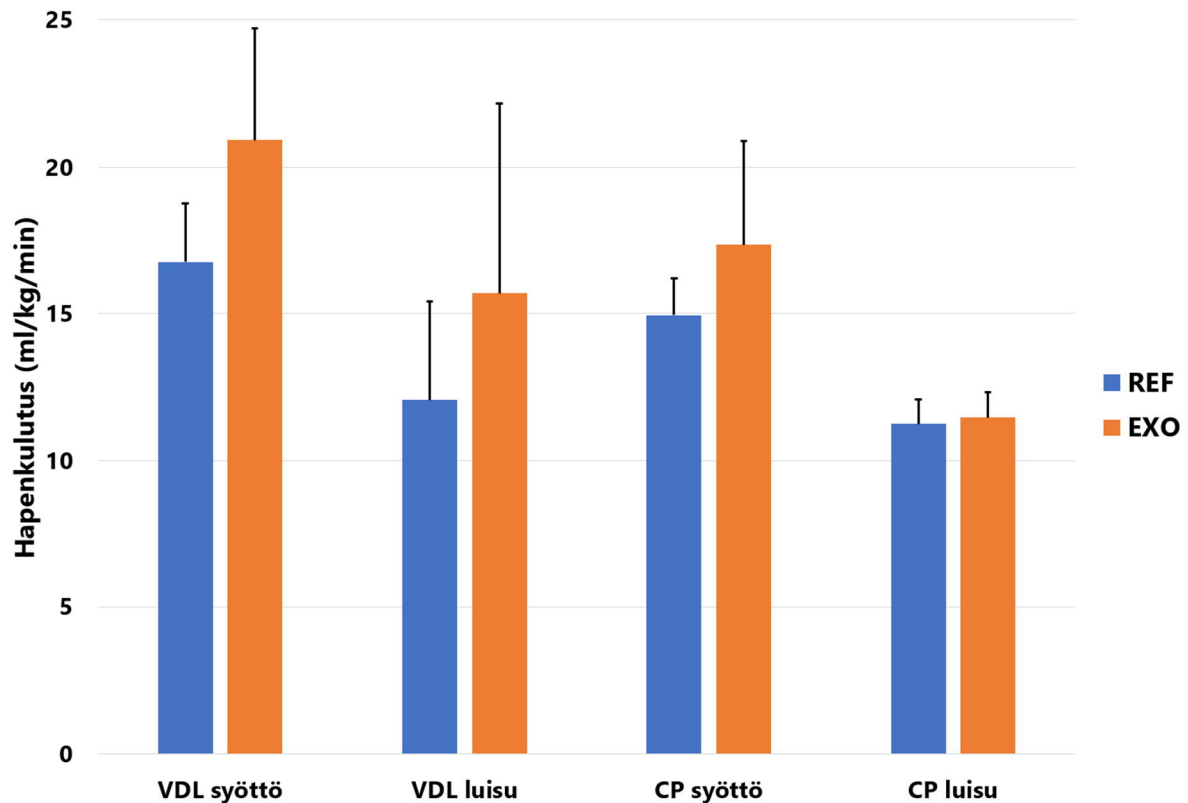
Kuva 10. Kuormittavimman 15 ja 60 minuutin keskimääräinen hapenkulutus (keskiarvo $\pm$ keskivirhe) pakettilajityössä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).

Linjoittain tarkastelussa työvuoron aikainen keskimääräinen työkuormitus oli suurinta VDL syötössä (3,0 MET), mutta linjojen välillä ei ollut suuria eroja aineenvaihdunnallisessa kuormituksessa. VDL luisussa aineenvaihdunnallinen kuormitus oli 2,7 MET, CP syötössä 2,8 MET ja CP luisussa 2,3 MET. Kuvasta 11 nähdään mitatut hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormituksen muuttujat linjoittain ilman eksoskeletonia ja eksoskeletonin kanssa. Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus oli kaikilla linjoilla ja kaikilla mittareilla suurempaa eksoskeletonin kanssa, mutta linjoja vertailtaessa erot olivat pienimpiä CP luisussa.

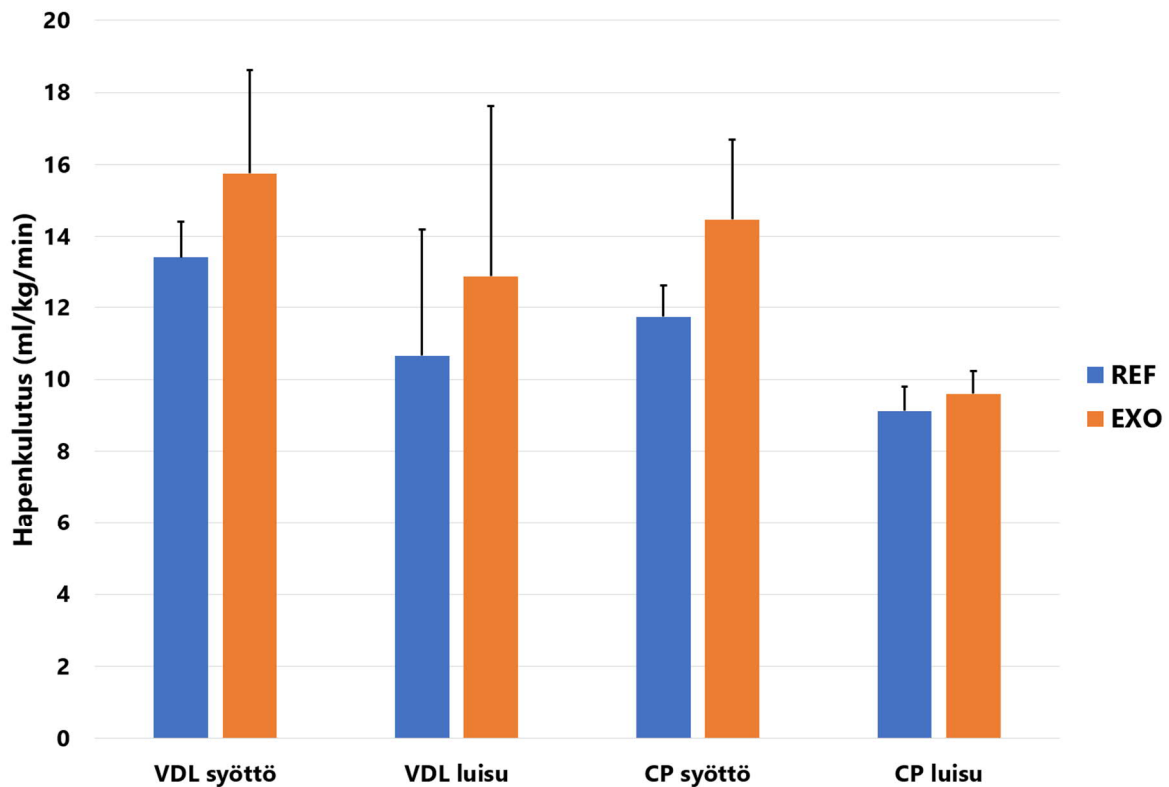


Kuva 11. Syke, hapenkulutus, MET ja energiankulutus (keskiarvo $\pm$ keskivirhe) linjoittain pakettilajittelutyössä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).

Kuvissa 12 ja 13 on esitetty piikkikuormitus linjoittain kuormittavimman 15 ja 60 minuutin keskiarvona. Myös piikkikuormituksen perusteella työkuormitus oli suurinta VDL syötössä (kuormittavin 15 min 4,8 MET ja kuormittavin 60 min 3,8 MET). Toiseksi suurinta piikkikuormitus oli CP syötössä (kuormittavin 15 min 4,3 MET ja 60 min 3,4 MET), toiseksi pienintä VDL luisussa (kuormittavin 15 min 3,4 MET ja 60 min 3,0 MET) ja pienintä CP luisussa (kuormittavin 15 min 3,2 MET ja 60 min 2,6 MET). Piikkikuormitus oli kaikilla linjoilla suurempaa eksoskeletonin kanssa, mutta CP luisussa erot olivat lähes olemattomia.



Kuva 12. Kuormittavimman 15 minuutin keskimääräinen hapenkulutus (keskiarvo $\pm$ keskivirhe) linjoittain pakettilajityössä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).

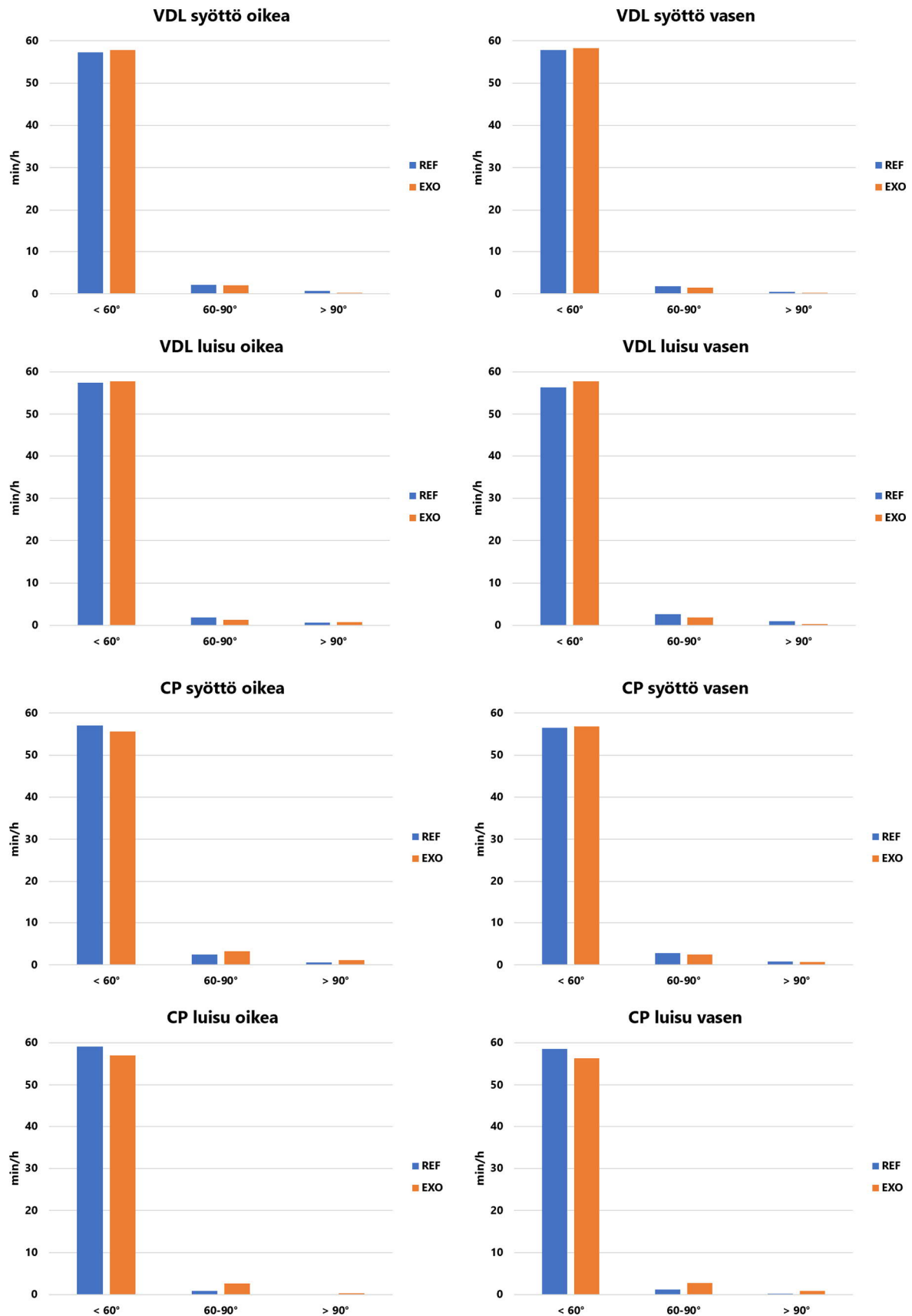


Kuva 13. Kuormittavimman 60 minuutin keskimääräinen hapenkulutus (keskiarvo $\pm$ keskivirhe) linjoittain pakettilajityössä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).

Työasennot

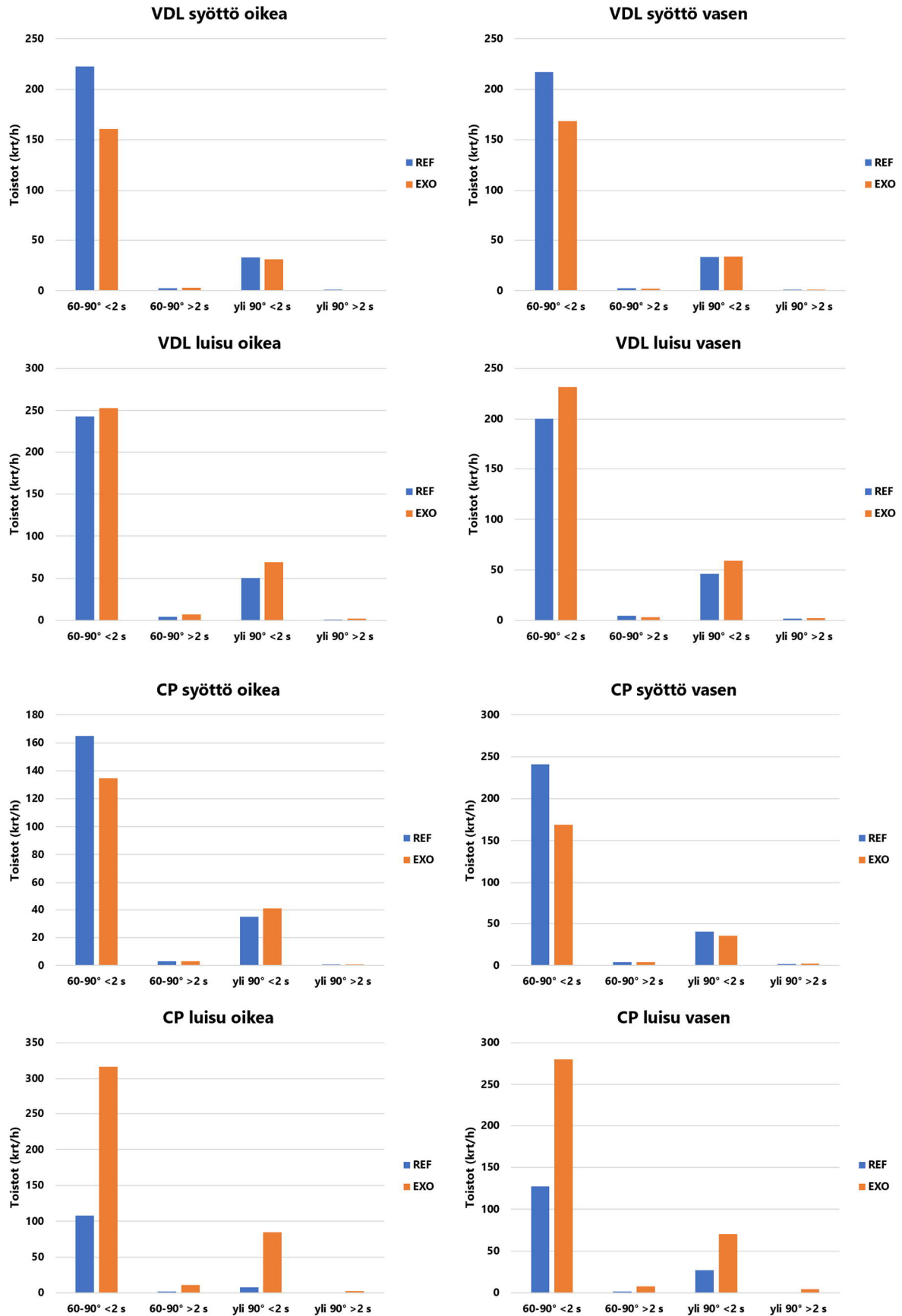
Työn aikaiset keskimääräiset nivelkulmat (minuuttia tunnissa) oikeasta ja vasemmasta kädestä neljällä eri linjalla on esitetty kuvassa 14. Työn aikaiset nivelkulmat on esitetty kolmessa luokassa: alle 60°, 60–90° ja yli 90°. Ergonomiasuositusten mukaan yli 60° asteen olkapään nivelkulmat ovat hyväksyttäviä vain harvoin toistuvina. Työterveyslaitoksen tutkimuksen tulosten perusteella yläraajan eksoskeletonin suurimmat hyödyt ovat havaittavissa yli 90° olkakulmilla [22].

Pakettilajittelutyö sisälsi hyvin vähän yläkätistä työtä, sillä yli 60° olkakulmia havaittiin kaikilla linjoilla keskimäärin alle 5 minuuttia tunnissa. Yli 90° olkakulmilla tapahtuvaa työskentelyä oli korkeimmillaan noin yksi minuutti tunnissa. Eksoskeleton ei juurikaan vaikuttanut työn aikaisiin nivelkulmiin millään linjalla. Suurimmat erot eksoskeletonin kanssa ja ilman eksoskeletonia työskentelyn välillä olivat havaittavissa CP luisussa, jossa yli 60° olkakulmissa vietettiin keskimäärin 2 minuuttia tunnissa kauemmin eksoskeletonin kanssa.

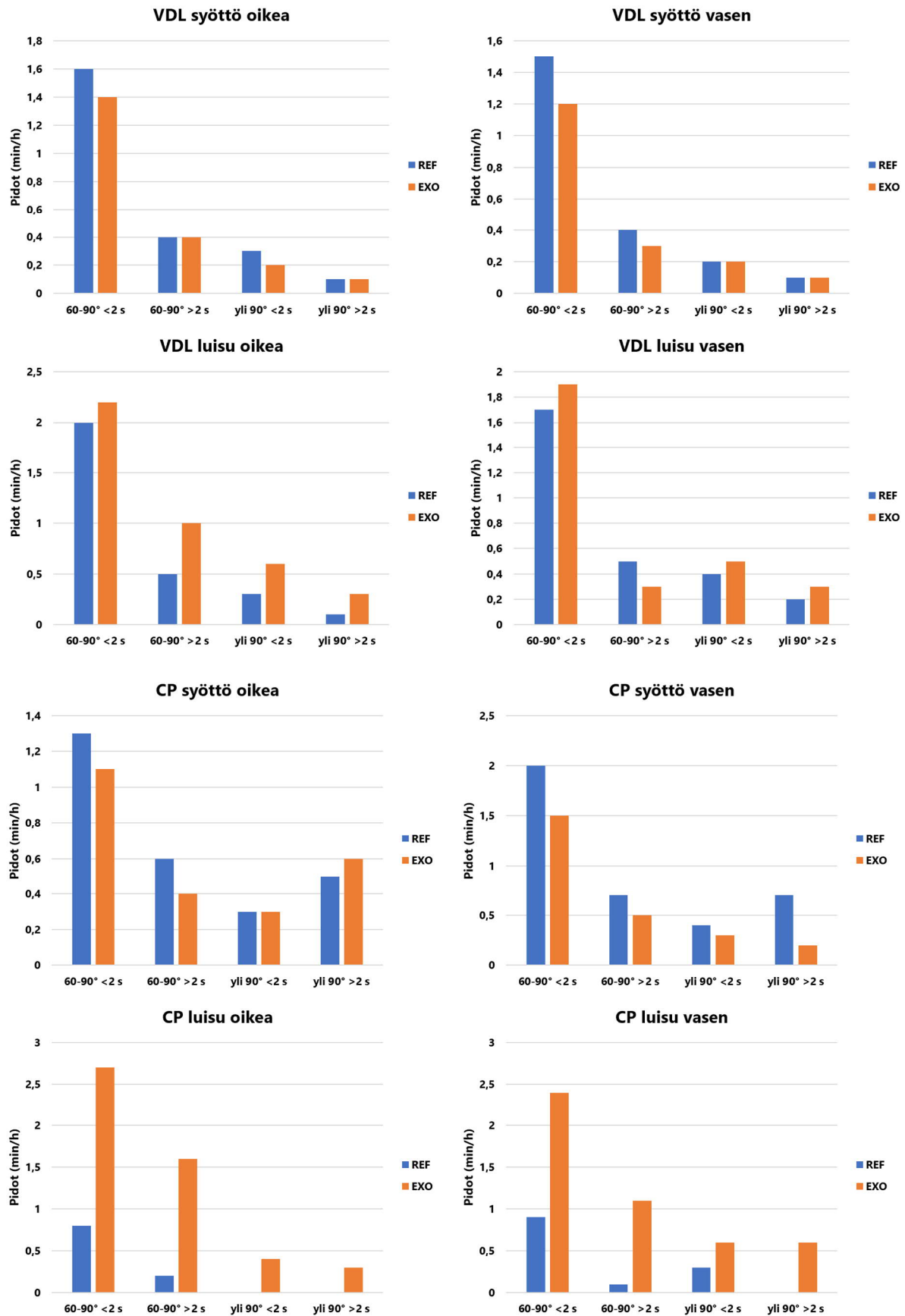


Kuva 14. Olkapään keskimääräiset nivelkulmat linjoittain ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO) työskenneltäessä.

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty molemmista olkavarsista mitatut keskimääräiset käden liikkeet (toistot kertaa tunnissa) sekä staattiset pidot (minuuttia tunnissa). Toistot ja pidot on esitetty kahdessa eri luokassa, 60–90° ja yli 90°, sekä alle ja yli kahden sekunnin pituisina toistoina ja pitoina. Suurin osa työskentelystä tapahtui alle 60° asteen kulmassa. Syötoissä yli 60° toistoja ja pitoja havaittiin vähemmän eksoskeletonin kanssa, kun taas luisuissa eksoskeletonin kanssa toistoja ja pitoja yli 60 asteen kulmassa tapahtui enemmän eksoskeletonin kanssa. Myös toistoissa ja pidoissa erot olivat suurimpia CP luisussa.



Kuva 15. Keskimääräiset käden liikkeet (kertaa tunnissa) linjoittain olkavarren 60–90° ja yli 90° kulmissa eksoskeletonin kanssa (EXO) ja ilman eksoskeletonia (REF).



Kuva 16. Keskimääräiset käden pidot (minuuttia tunnissa) linjoittain olkavarren 60–90° ja yli 90° kulmissa eksoskeletonin kanssa (EXO) ja ilman eksoskeletonia (REF).

Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty keskimääräiset oikean ja vasemman käden (olkavarren) liikkeiden määrä (kertaa tunnissa) pakettilajittelutyössä ilman eksoskeletonia ja eksoskeletonin kanssa. Toistojen määrä ei eronnut oikean ja vasemman käden välillä. Eniten toistoja kertyi VDL syötössä ja vähiten CP luisussa. Eksoskeletonin käyttö vähensi käden toistoliikkeitä syöttölinjoilla, kun taas luisuissa eksoskeletonin hieman lisäsi toistojen määrää.

Taulukko 1. Keskimääräiset oikean käden liikkeiden määrä pakettilajittelutyössä neljällä linjalla ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).

Linja	REF	EXO
VDL syöttö	2625 krt/h	1773 krt/h
VDL luisu	2058 krt/h	2149 krt/h
CP syöttö	1846 krt/h	1317 krt/h
CP luisu	1463 krt/h	2337 krt/h

Taulukko 2. Keskimääräiset vasemman käden liikkeiden määrä pakettilajittelutyössä neljällä linjalla ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).

Linja	REF	EXO
VDL syöttö	2791 krt/h	2143 krt/h
VDL luisu	1828 krt/h	2375 krt/h
CP syöttö	2083 krt/h	1516 krt/h
CP luisu	1525 krt/h	2172 krt/h

Puristusvoima

Maksimaalinen puristusvoima mitattiin ennen työpäivää ja työpäivän jälkeen. Työssä ilman eksoskeletonia puristusvoima oli ennen työpäivää $42,7 \pm 14,0$ kg ja työpäivän jälkeen $41,5 \pm 11,2$ kg. Eksoskeletonin kanssa puristusvoima oli ennen työpäivää $39,2 \pm 11,9$ kg ja työpäivän jälkeen $40,6 \pm 11,5$ kg. Muutos puristusvoimassa työpäivän aikana oli $-0,3$ kg ilman eksoskeletonia ja $+1,4$ kg eksoskeletonin kanssa. Ero puristusvoiman muutoksessa ei ole merkitsevää.

Lihassähköinen aktiivisuus (EMG)

Lihaksiston kuormittuneisuustulokset on esitetty taulukoissa 3 ja 4 ”liikennevaloperiaatteella”. Kun kuormittuneisuus ylittää suositusarvon 14 % maksimaalisesta lihasaktiivisuudesta se on merkitty punaisella, kun kuormittuneisuus on 10–14 % välissä se on merkitty keltaisella ja kuormittuneisuuden ollessa alle 10 % se on merkitty vihreällä. Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty kuormittuneisuustulokset koko tutkimusjoukosta ja linjoittain neljästä pakettilajittelupisteestä kahdeksasta mitatusista lihaksesta. Jotta lihasten kuormittuneisuutta voitaisiin vertailla, lihaksille tehtiin kuormituspisteytys siten, että yli 14 % kuormitus = 3 pistettä, 10–14 % kuormitus = 2 pistettä ja alle 10 % kuormitus = 1 piste. Suurempi pistemäärä vastaa suurempaa kuormittuneisuutta.

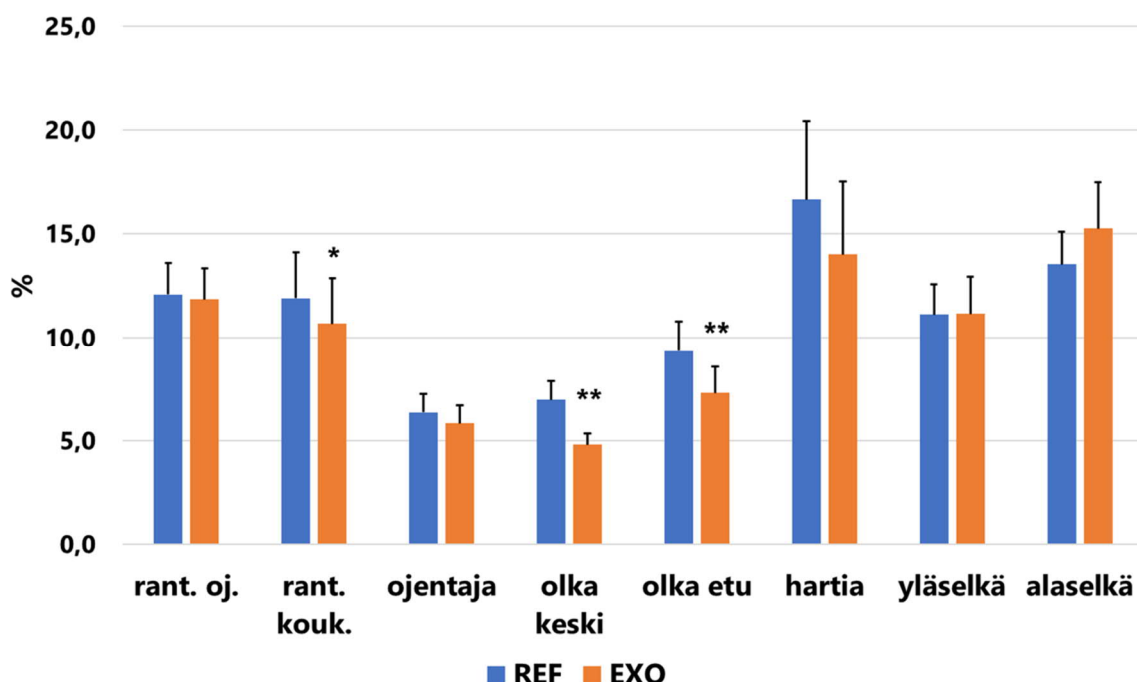
Taulukko 3. Pakettilajittelutyön aikainen keskimääräinen kuormittuneisuus kahdeksassa lihasryhmässä.

Koko työ	ranteen ojentaja	ranteen koukistaja	ojentaja	olka keski	olka etu	hartia	yläselkä	alaselkä	Kuormituspisteet
<i>Ilman exoa</i>	 12,1	 11,9	 6,4	 7,0	 9,4	 16,7	 11,1	 13,5	14
<i>Exon kanssa</i>	 11,8	 10,7	 5,8	 4,8	 7,3	 14,0	 11,1	 15,3	15

Taulukko 4. Pakettilajittelutyön aikainen keskimääräinen kuormittuneisuus kahdeksassa lihasryhmässä linjoittain.

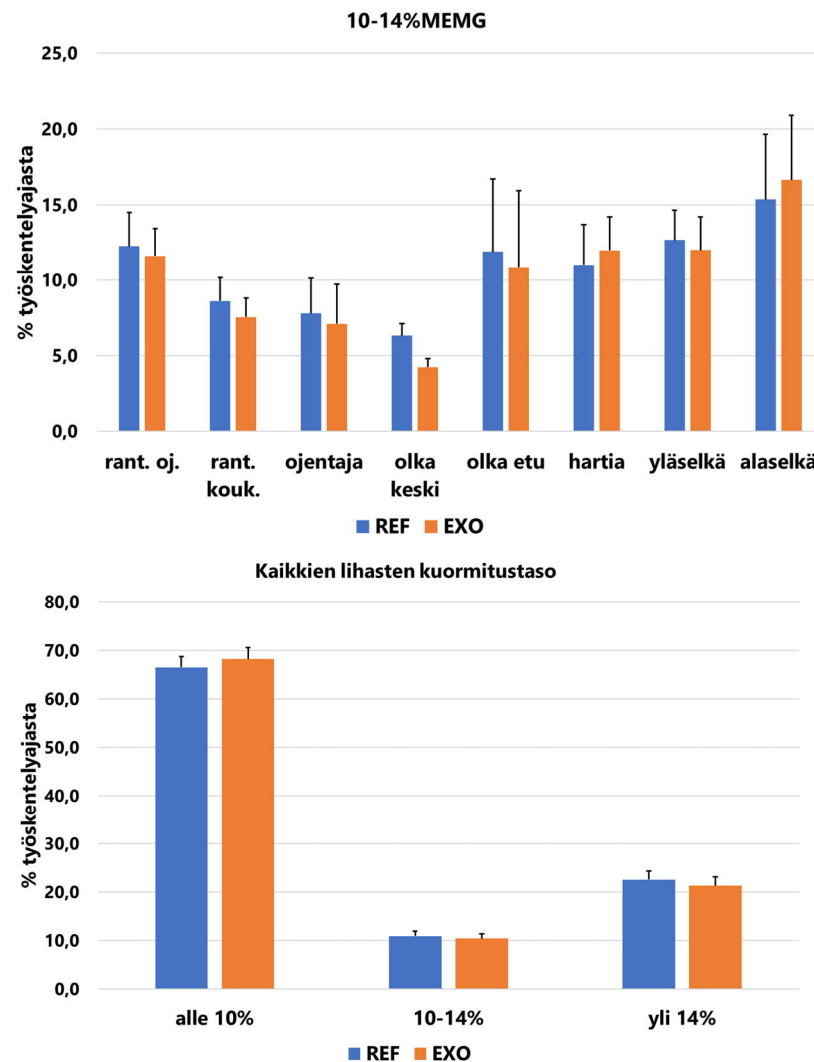
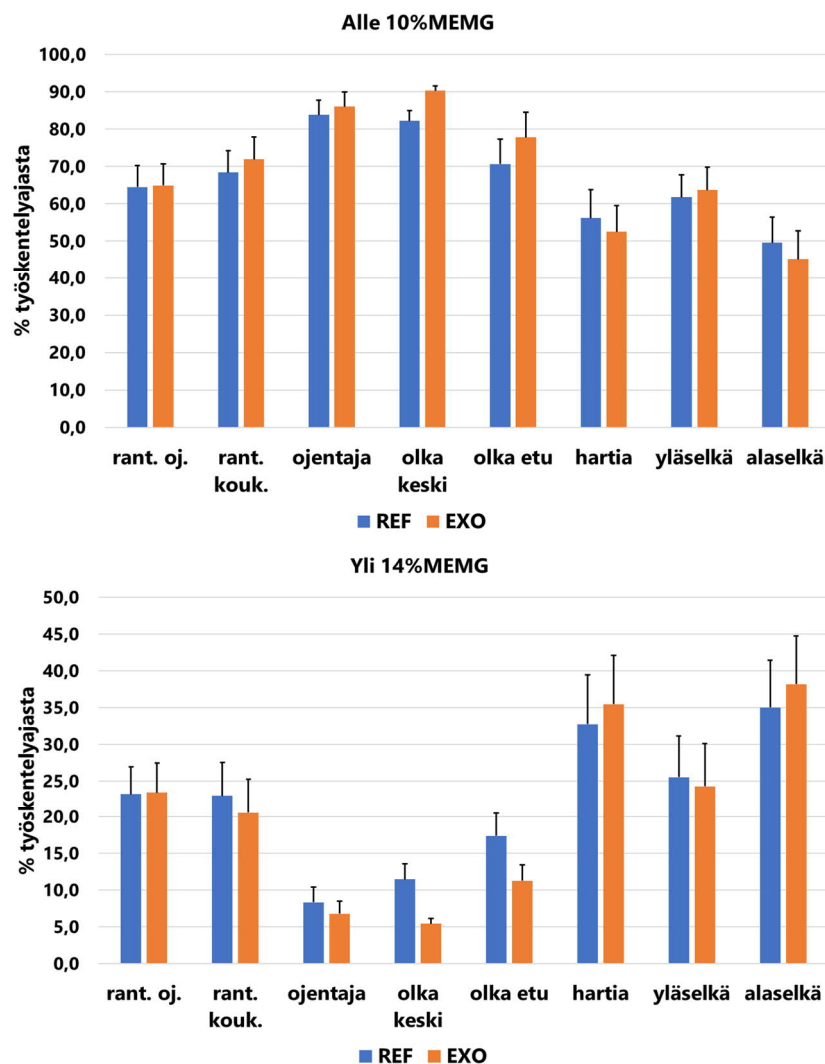
Linjat	ranteen ojentaja	ranteen koukistaja	ojentaja	olka keski	olka etu	hartia	yläselkä	alaselkä	
VDL syöttö									Kuormituspisteet
<i>Ilman exoa</i>	 11,1	 8,3	 6,7	 7,8	 11,6	 9,5	 12,1	 12,5	12
<i>Exon kanssa</i>	 10,8	 8,5	 6,5	 6,0	 10,6	 10,0	 10,1	 11,3	13
VDL luisu									Kuormituspisteet
<i>Ilman exoa</i>	 18,3	 26,9	 7,0	 5,0	 8,6	 15,2	 14,6	 13,0	17
<i>Exon kanssa</i>	 19,1	 23,8	 7,5	 4,8	 8,8	 15,4	 18,3	 17,0	18
CP syöttö									Kuormituspisteet
<i>Ilman exoa</i>	 8,4	 7,5	 3,7	 8,2	 7,9	 22,5	 9,6	 8,6	10
<i>Exon kanssa</i>	 9,1	 7,7	 3,4	 5,1	 6,0	 22,2	 8,9	 8,8	10
CP luisu									Kuormituspisteet
<i>Ilman exoa</i>	 13,0	 9,5	 8,4	 7,1	 10,1	 19,7	 9,9	 20,3	14
<i>Exon kanssa</i>	 11,1	 6,7	 6,8	 3,7	 4,3	 18,6	 10,0	 20,2	13

Tutkittaessa lihassähköistä aktiivisuutta koko työn ajalta eksoskeleton pienensi lihasaktiivisuutta tilastollisesti merkitsevästi ranteen koukistajassa ja olkapäälihaksen keski- ja etuosassa (kuva 17). Lihaskuormitus oli pienempää eksoskeletonin kanssa kaikissa muissa lihaksissa paitsi alaselässä, jossa lihaskuormitus kasvoi eksoskeletonin kanssa. Eksoskeletonin paino voi lisätä alaselän kuormitusta verrattuna ilman eksoskeletonia työskentelyyn. On suositeltu, että lihaksiston työn aikainen keskimääräinen kuormittuneisuus ei saisi ylittää 14 % [31]. Koko työtä tarkastellessa vain hartia ja alaselkä ylittivät kyseisen raja-arvon.



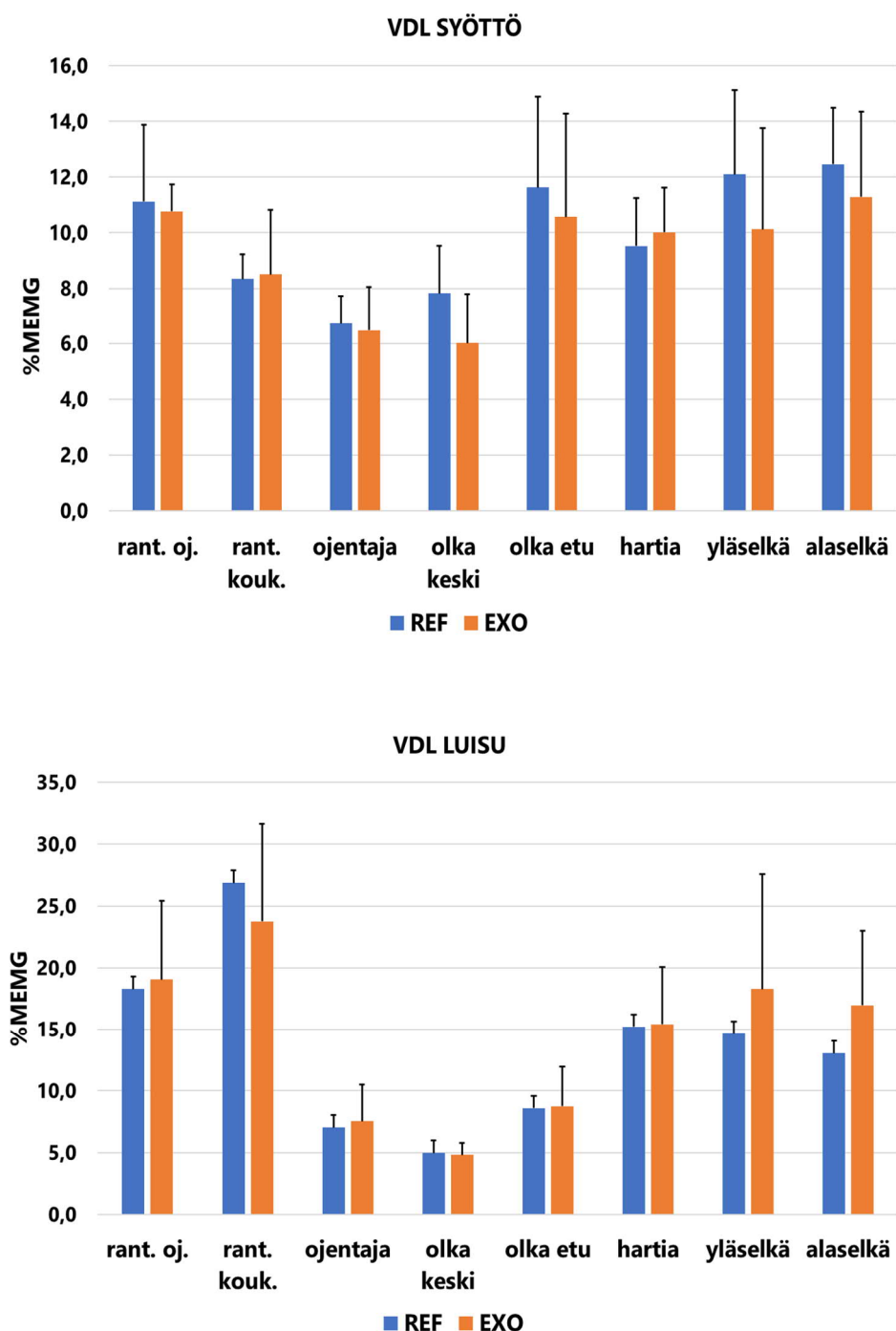
Kuva 17. Pakettilajittelutyön aikainen lihaksiston kuormittuneisuus (% maksimitasosta, keskiarvo $\pm$ keskivirhe) kahdeksassa lihasryhmässä työssä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO). * = tilastollisesti merkitsevä ero REF ja EXO välillä, ** = $p < 0,01$, * = $p < 0,05$.

Keskiarvojen lisäksi lihasaktiivisuus työskentelyajalta esitetään kolmessa luokassa: alle 10 %, 10–14 % ja yli 14 % maksimitasosta (kuva 18). Parhaiten eksoskeletonin vaikutus näkyy olkapään lihaksissa, joissa eksoskeleton siirtää kuormitusta alemmalle tasolle, alle 10 prosenttiin maksimaalisesta lihasaktiivisuudesta. Kuitenkin kokonaisuutena eksoskeleton ei juurikaan keventänyt fyysistä kuormitusta pakettilajittelutyössä.

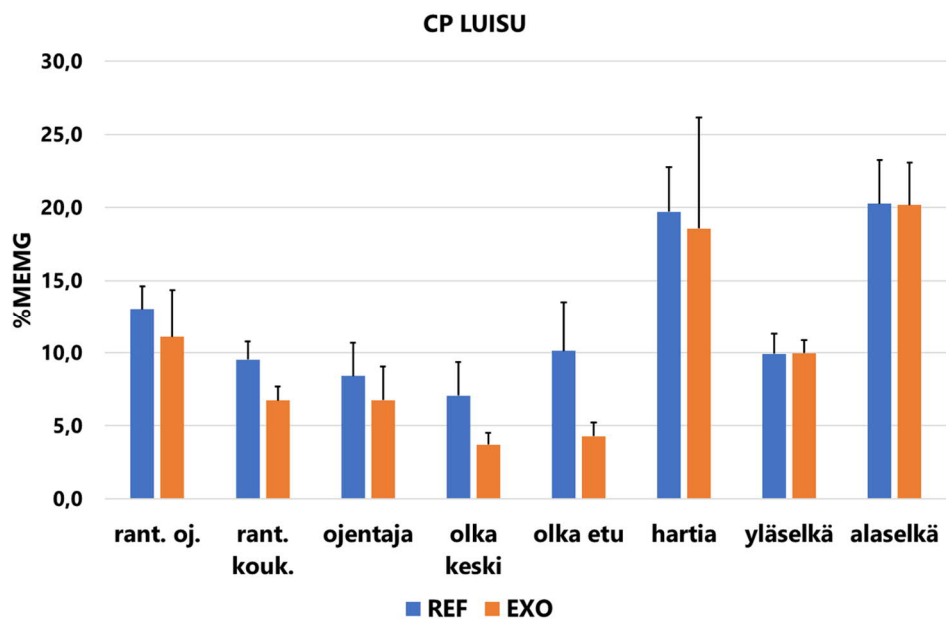
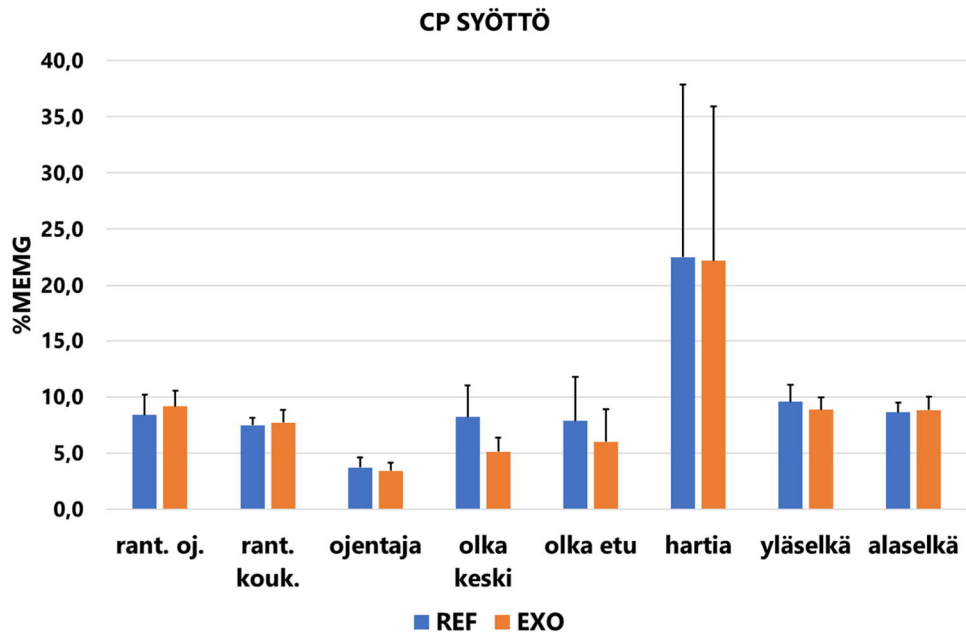


Kuva 18. Pakettilajittelutyön kuormittuneisuuden jakautuminen (keskiarvo $\pm$ keskivirhe) kahdeksassa lihasryhmässä ja kaikissa lihaksissa keskimäärin työssä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).

Tarkastellessa kuormitustasoja eri työtehtävissä havaittiin, että VDL-linjalla työskentely ei hyötynyt eksoskeletoista, varsinkaan luisun puolella (kuva 19). Mikäli työtehtävät eivät ole yläkätisiä, eksoskeletoilla voi aiheuttaa lisäkuormitusta. CP-linjalla (kuva 20) eksoskeletoilla vähensi olkapään lihaksiston kuormitusta, etenkin luisussa työskennellessä.



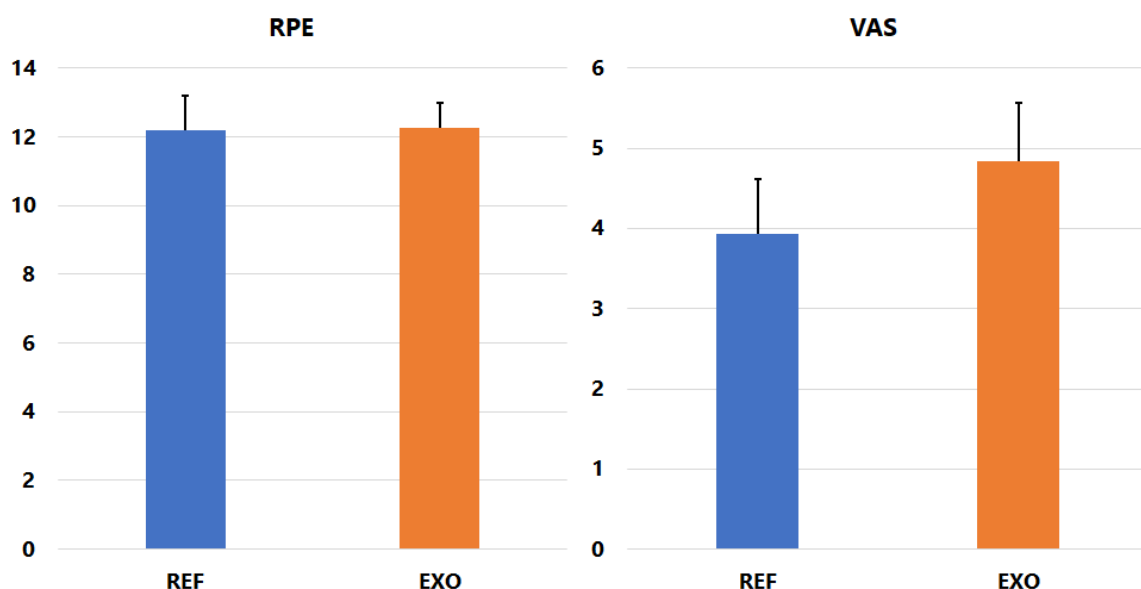
Kuva 19. Lihaksiston kuormittuneisuus (%MEMG = % maksimitasosta, keskiarvo $\pm$ keskivirhe) VDL syötössä ja luisussa kahdeksassa lihasryhmässä työssä ilman eksoskeletoita (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).



Kuva 20. Lihaksiston kuormittuneisuus (%MEMG = % maksimitasosta, keskiarvo ± keskivirhe) CP syötössä ja luisussa kahdeksassa lihasryhmässä työssä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).

Koettu kuormittuneisuus ja epämukavuus

Kuvassa 21 on esitetty koettu kuormittuneisuus ja epämukavuus ilman eksoskeletonia ja eksoskeletonin kanssa työskentelyn jälkeen. Koettu kuormittuneisuus oli samalla tasolla eksoskeletonin kanssa ja ilman sitä (RPE 12). Työn koettu epämukavuus oli hieman korkeammalla tasolla eksoskeletonin kanssa.



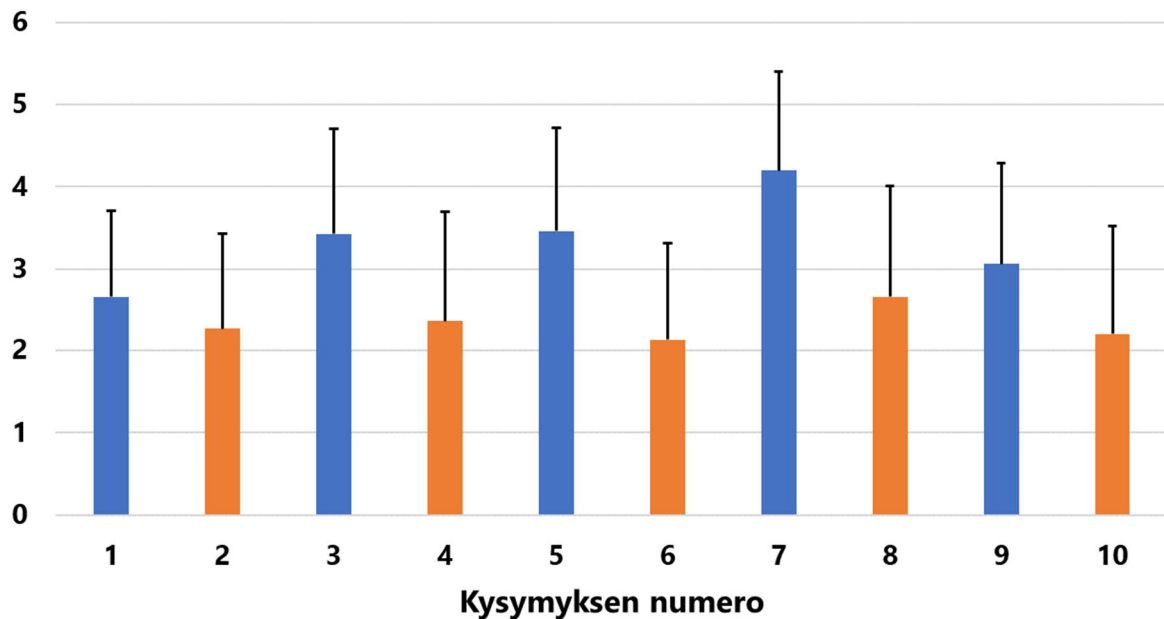
Kuva 21. Koettu kuormittuneisuus (RPE) asteikolla 6–20 ja koettu epämukavuus (VAS) asteikolla 0–10 (keskiarvo $\pm$ keskihajonta) pakettilajittelutyössä ilman eksoskeletonia (REF) ja eksoskeletonin kanssa (EXO).

Eksoskeletonin käytettävyys

Käytettävyyskyselyn tulosten perusteella vahvimmin oltiin samaa mieltä väittämistä ”Luulen, että useimmat oppisivat eksoskeletonin käytön hyvin nopeasti” (4,2/5) ja ”Eksoskeletonia oli mielestäni helppo käyttää” (3,4/5) (kuva 22). Käytettävyyskyselyn kokonaispisteiden keskiarvo oli $62,8 \pm 20,9$ pistettä, mikä vastaa heikkoa käytettävyyttä (taulukko 5).

Taulukko 5. Käytettävyyskyselyn pisteytyksen tulkinta.

Pistemäärä	Arvio
> 80,4	Eksoskeleton soveltuu työtehtävään erinomaisesti
68,1–80,3	Eksoskeleton soveltuu työtehtävään hyvin
68	Eksoskeleton soveltuu työtehtävään kohtalaisesti
51–67,9	Eksoskeletonin soveltuu työtehtävään heikosti
< 50,9	Eksoskeleton ei sovellu työtehtävään lainkaan



Kuva 22. Eksoskeletonin käytettävyysskyselyn (liite 1) tulokset (keskiarvo $\pm$ keskihajonta) kysymyksittäin, 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 2,5 asteikolla 0 "ei ollenkaan väsyneet" – 6 "erittäin väsyneet". Yläraajojen liikkuvuus arvioitiin olevan eksoskeletonin kanssa keskimäärin 3,1 asteikolla 0 = "normaali" – 6 = "hyvin vaikeaa". Yleinen epämukavuustaso oli eksoskeletonin käytön kanssa keskimäärin 2,9 asteikolla 0 = "ei lainkaan epämukava" – 6 = "erittäin epämukava" ja käyttömukavuus arvioitiin keskimäärin tasolle -0,4 asteikolla -3 = "hyvin epämiellyttävä" – 3 = "hyvin miellyttävä".

Yleisiä huomioita eksoskeletonin käytettävyydestä:

"Eksoskeleton oli liian iso, säädöt riittämättömät"

"Eksoskeletonin kanssa piti olla hieman varovainen, kun tiesi että kyseessä kallis verme"

"Työtehtävät ei olleet yläkätisiä"

"Vaikea kiertoliikkeissä"

"Eksoskeleton oli jäykkä ja otti kiinni joka paikkaan"

"Kulku vaikeutuu esimerkiksi rullakkoon"

"[Eksoskeleton] auttoi joissain tilanteissa, esimerkiksi nostamisessa tai kannattelussa"

5. Johtopäätökset ja suositukset

Hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitus:

- Yläraajan eksoskeleton ei vähentänyt hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitusta pakettilajittelutyössä. Päinvastoin eksoskeleton kohotti sykettä 7 % ja aineenvaihdunnallista kuormitusta 11 %, mikä johtuu todennäköisesti eksoskeletonin painosta (noin 2,7 kg) ja siitä, että yläkätisen työn osuus oli vähäinen. Kädet alhaalla työskenneltäessä käsiä joutuu "painamaan" alaspäin eksoskeletonia vasten, mikä lisää kuormittavuutta.
- Keskimäärin työpäivän aikainen hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormittuneisuus ei ollut liiallista mitatuissa työtehtävissä. Pakettilajittelutyö oli keskimäärin kevyttä (kaikkien linjojen keskiarvo 2,7 MET). Tähän keskiarvoon sisältyi myös tauot ja ilman taukoja työn keskimääräinen kuormitus todennäköisesti kohoaisi keskiraskaaksi (>3 MET).
- Linjoittain tarkastelussa työvuoron aikainen keskimääräinen työkuormitus oli korkeinta VDL luisussa (3,0 MET) ja pienintä CP luisussa (2,3 MET). Työkuormitus oli suurempaa syötössä verrattuna luisuun ja VDL-linjoilla verrattuna CP-linjoihin.
- Alhaisesta keskimääräisestä kuormituksesta huolimatta pakettilajittelutyössä oli jonkin verran kuormituspiikkejä, joiden intensiteetti vaihteli linjasta riippuen keskiraskaasta raskaaseen. Suurinta piikkikuormitus oli syöttölinjoilla (VDL syöttö 6,6 MET ja CP syöttö 7,2 MET).
- Eksoskeleton ei vaikuttanut työpäivän aikaiseen palautumiseen.

Työasennot:

- Eksoskeleton ei vaikuttanut olkavarren työskentelykulmiin merkittävästi.
- Pakettilajittelutyö sisälsi varsin vähän yläkätistä työtä ja keskimäärin 96 % työajasta työskenneltiin olkavarret alle 60° kulmassa.

Tuki- ja liikuntaelimistön kuormitus:

- Eksoskeleton vähensi olkapään lihasten sekä ranteen koukistajien kuormitusta, kun taas alaselän lihasaktiivisuus hieman lisääntyi, mikä voi johtua eksoskeletonin aiheuttamasta lisäpainosta.
- Vaikka eksoskeletonin hyöty havaittiin paikallisesti olkapään lihaksiston osalta, eksoskeleton kuitenkin lisäsi koko kehon aineenvaihdunnallista kuormitusta. Eksoskeleton siis mahdollisesti lisää lihasten kuormittumista toisaalla, esimerkiksi jaloissa.
- Olkapään lihasten kuormittuneisuus pakettilajittelutyössä ilman eksoskeletoniakin oli varsin matalaa, jolloin eksoskeletonin käytöstä saatava lisähyöty kuormituksen keventämisessä ei välttämättä ole merkityksellistä.
- Pakettilajittelutyön lihaskuormitus oli pääsääntöisesti suositusten mukaista. Ainoastaan hartian ja alaselän kuormitus ylittivät suositusten mukaisen keskimääräisen kuormituksen ylärajan (14 % maksimaalisesta aktiivisuudesta).
- Lihaskuormituksen osalta raskain työtehtävä on VDL luisu, jossa jopa neljä lihasta (ranteen ojentaja ja koukistaja, hartia ja yläselkä) ylittivät 14 % raja-arvon. Luisu oli syöttöä raskaampaa ja VDL-linjalla työskentely raskaampaa verrattuna CP-linjaan.

Subjektiiiviset arviot:

- Eksoskeleton ei vaikuttanut koettuun työn kuormittavuuteen, sen sijaan se hieman lisäsi koettua työn epämukavuutta.
- Työn koettu kuormitus arvioitiin kevyen ja melko rasittavan välille (RPE 12).
- Käytettävyyskyselyn tulosten perusteella eksoskeletonin soveltuvuus kyseisiin työtehtäviin oli heikko johtuen todennäköisesti siitä, että työ ei ollut yläkätistä työtä, johon yläraajan eksoskeleton on pääasiassa suunniteltu.

Suositukses:

- Eksoskeletonia ei suositella pakettilajittelutyössä käytettäväksi, koska se lisää hengitys- ja verenkiertoelimistön kuormitusta ja lisäksi työ ei sisältänyt merkittävästi kädet koholla työskentelyä. Eksoskeletonia voidaan kuitenkin suositella työn keventämisen välineeksi yksilöllisesti niille, joilla olkapään alueen lihaksiston kuormituksen keventäminen on oleellista, esimerkiksi olkapään tuki- ja liikuntaelinvaijien vuoksi.
- Lihaskuormitus oli suurinta hartiassa ja alaselässä. Hartian ja alaselän osalta lihaskuormitusta voidaan vähentää ergonomisilla nostoasunnoilla. Alaselän kuormitukseen voi auttaa selän eksoskeleton.
- Yksin linjalla työskenneltäessä työkuormitus voi kohota liian korkeaksi. Eräällä työntekijällä yksin linjalla työskentelyn aineenvaihdunnallinen kuormitus oli 4,4 MET ja työparin kanssa 2,9 MET. Piikkikuormitus yksin työskennellessä oli jopa 11,7 MET (78 % maksimista). Aineenvaihdunnallisen kuormituksen näkökulmasta yksin linjalla työskentelyä ei suositella.
- Hyväkuntoinen jaksaa työssä paremmin. Riittävä vapaa-ajan liikunta parantaa työntekijän jaksamista, unen laatua ja palautumista. Vähäinenkin liikunnan lisääminen arkeen parantaa toimintakykyä etenkin sellaisilla henkilöillä, jotka eivät muuten harrasta vapaa-ajan liikuntaa ollenkaan. Fyysisesti kuormittava työ ei itsessään ole kuntoa kohottavaa, vaan tarvitsee tuekseen vapaa-ajan liikuntaa. Fyysinen aktiivisuus tehostaa palautumista parantamalla suorituskykyä ja voi olla jo itsessään palautumista nopeuttava tekijä.
- Palautumisen merkitys korostuu työn rasittavuuden kasvaessa. Työpäivän jälkeistä palautumista voidaan edistää erilaisilla menetelmillä, kuten käyttämällä viileä tai viileälämpimä vesialtistusta työn jälkeen. Myös venyttelyllä on havaittu positiivisia vaikutuksia.

Lähteet

- [1] 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.
- [2] 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)
- [3] 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. Rapportti no 4: 2016.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Gupta N, Rasmussen CL, Forsman M, Søgaard K, Holtermann A (2021). How does accelerometry-measured arm elevation at work influence prospective risk of long-term sickness absence? *Scand J Work Environ Health* 4000. <https://doi.org/10.5271/sjweh.4000>
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] de Looze M, Boscha T, Krausea F, Stadler K, O’Sullivan L (2016) Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics* 59(5): 671–681.
- [10] MacDougall W (2014) Industrie 4.0: Smart Manufacturing for the Future (Brochure 20750). Germany Trade and Invest.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Maurice P, Camernik J, Gorjan D, Schirrmeister 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.
- [22] Mänttari S, Halonen J, Karkulehto J, Rauttola AP, Säynäjäkangas P, Oksa J (2021) Kädet koholla työskentelyn keventäminen ulkoisen tukirangan avulla. Työsuojelurahaston loppuraportti.
- [23] Schmalz T, Schändlinger J, Schuler M, Bornmann J, Schirrmeister 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.
- [24] 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.
- [25] Yin P, Yang L, Qu S, Wang C (2020) Effects of a passive upper extremity exoskeleton for overhead tasks. *J Electromyogr Kinesiol* 55: 102478.

- [25] Firstbeat Technologies Ltd. (2014) Stress and Recovery Analysis Method Based on 24-hour Heart Rate Variability, whitepaper.
- [26] Tornqvist EW (2012) Work Demanding High Energy Metabolism. Teoksessa A Toomingas, SE Mathiassen, EW Tornqvist (toim.) Occupational physiology. Boca Raton (FL): CRC Press. s. 19-58.
- [27] Ilmarinen J (1992) Job design for the aged with regard to decline in their maximal aerobic capacity: Part II —The scientific basis for the guide. Int J Ind Ergon 10(1-2): 65-77.
- [28] Launis M (2011) Työliikkeet ja työvälineet. Teoksessa M Launis, J Lehtelä (toim.) Ergonomia. Helsinki: Työterveyslaitos. s. 195–214.
- [29] Arokoski J, Lepola V, Rantala T, Viikari-Juntura E (2015) Olkapään sairaudet. Teoksessa J Arokoski, M Mikkelsen, T Pohjolainen, E Viikari-Juntura (toim.) Fysiatría. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim. s. 119–130.
- [30] SFS-EN 1005-4 (2009) Koneturvallisuus - Ihmisen fyysinen suorituskky - Osa 4: Koneesta aiheutuvien työasentojen arviointi.
- [31] Jonsson B (1982) Measurement and evaluation of local muscular in the shoulder during constrained work. J Human Ergol 11:73-88.
- [32] Borg G (1998) Borg's Perceived Exertion and Pain Scales, Human Kinetics, s. 2-52.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Tullis T, Albert B (2013) Measuring the user experience: collecting, analyzing, and presenting usability metrics. 2. painos. Waltham: Elsevier.

Liitteet

Liite 1. Käytettävyysskysely.

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 epäjohtamukaisuutta.	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