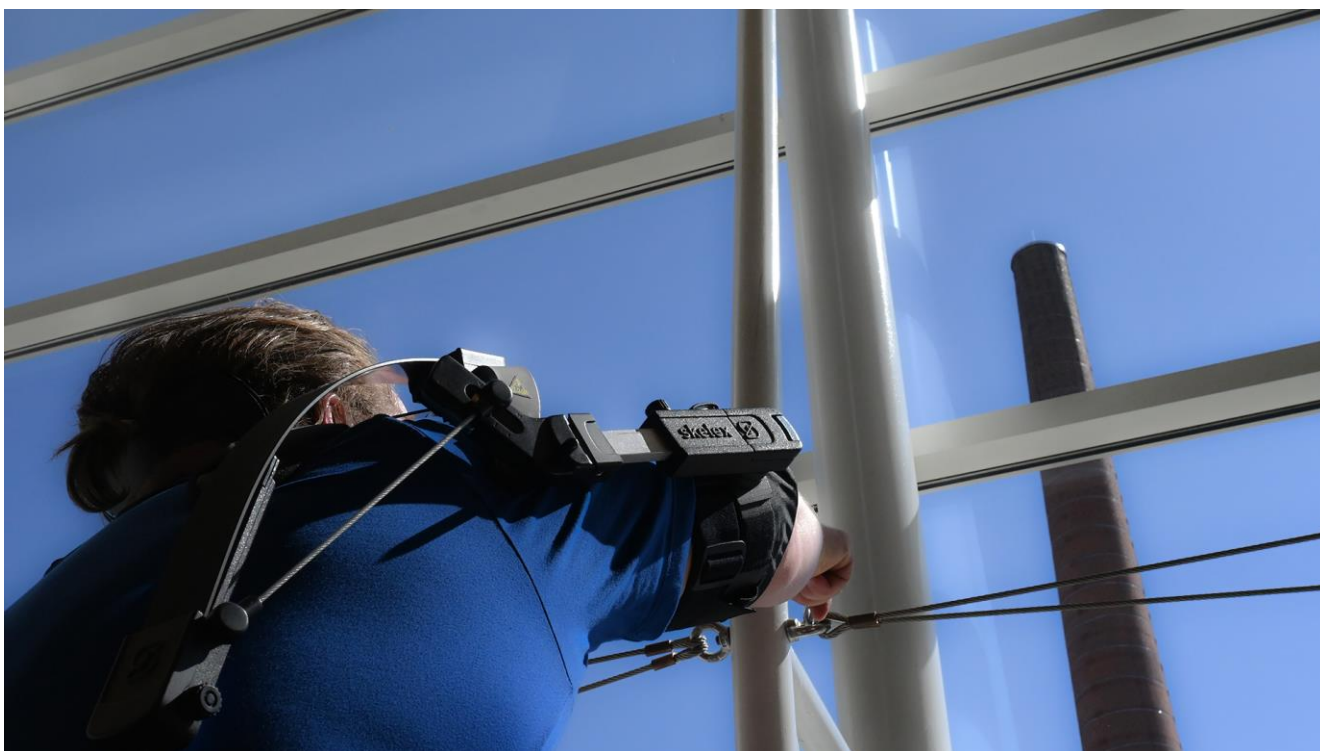


Yläraaja-eksoskeletonien vaikutusten vertailu kädet koholla työskentelyssä



Juha-Pekka Kulmala, Toni Pekkola, Kari Vehmaskoski, Anja Tantt, Katariina Korniloff



Työsuojelurahasto
Arbetskyddsfronden
The Finnish Work Environment Fund

ISBN 978-951-830-748-1

30.10.2023

Jyväskylän ammattikorkeakoulu	Postiosoite/Address	Puhelin/Tel.	Faksi/Fax	Internet	Y-tunnus
JAMK University of Applied Sciences	PL 207 FI-40101 Jyväskylä FINLAND	0207438100 +358 20 743 8100	(014) 4499694 +358 14 4499694	www.jamk.fi	1006550-2

KUSTANTAJA Jyväskylän ammattikorkeakoulu

ISBN 978-951-830-748-1

©2023

Tekijät & Jyväskylän ammattikorkeakoulu

Tämä teos on lisensoitu Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä

Sisällysluettelo

Tiivistelmä 3

1	Johdanto	4
1.1	Yleistä eksoskeletoneista	4
1.2	Yläraajaeksoskeletonit	5
2	Tutkimuksen tarkoitus ja hypoteesit	6
3	Tutkimusmenetelmät ja aineisto	6
3.1	Valmistajien tarjoamat tiedot eksoskeletoneista	6
3.2	Laboratoriomittaukset	7
3.3	Työpaikkamittaukset	9
3.4	Tilastollinen analyysi	10
4	Tulokset	11
4.1	Laboratoriomittaus	11
4.2	Työpaikkamittaus	12
5	Pohdinta	15
5.1	Laboratoriomittaus	15
5.2	Työpaikkamittaus	15
6	Yhteenveto	16
7	Projektitiimi	16
Lähteet	17	
Liitteet	18	
	Liite 1. Laboratoriomittausten EMG-tulokset	18
	Liite 2. Työpaikkamittausten yksilölliset EMG-tulokset	21

Tiivistelmä

Kädet koholla työskentely lisää merkittävästi niska-hartiaseudun kuormittumista ja siitä johtuvia TULES-ongelmia. Uudet eksoskeletoinit tarjoavat potentiaalisen keinon vähentää kädet koholla työskentelyn kuormitusta. Tähän käyttötarkoitukseen on nykyisin saatavilla jo useiden eri valmistajien laitteita, mutta tutkimustietoa on olemassa vain vähän ja ainoastaan yksittäisten laitteiden vaikutuksista. Tässä työsuojelurahaston rahoittamassa hankkeessa vertailtiin neljän (Skelex, Hilti, Comau, Hapo) Suomesta saatavan yläraajaeksoskeletoinin vaikutuksia yläkätisen työskentelyn kuormitukseen. Testejä suoritettiin sekä laboratorioympäristössä että autenttisissa tehtävissä työpaikoilla.

Liikelaboratoriotutkimukseen rekrytoitiin 13 henkilöä, jotka suorittivat kolme työtehtävää kädet koholla sekä yhden tehtävän kädet alhaalla. Eri laitteiden ja normaalitilanteen tutkimusjärjestys satunnaistettiin.

Kaikilla neljällä tutkitulla eksoskeletoonilla havaittiin olevan yläraajan kannattelua keventävä vaikutus, mikä näkyi etenkin etummaisessa ja keskimmaisessa hartialihaksissa. Skelex, Hilti ja Comau suoriutuvat melko yhdenmukaisesti, ja parhaimmillaan hartialihasten aktiivisuus kädet koholla työskentelyssä laski kolmasosalla verrattuna normaalitilanteeseen. Hapo-laiteella yläraajaa keventävä vaikutus ilmeni selvästi muita laitteita alemmalla työskentelykorkeudella, eikä hyötyä ilmennyt enää hartiatason yläpuolella.

Työpaikkamittauksissa viidellä eri työpaikalla eksoskeletoonien vaikutus lihasaktiivisuuteen vaihteli suuresti sen mukaan, millainen työtehtävä oli kyseessä. Yläraajan osalta lihasaktiivisuus usein miten pieni, mutta selkälihasten osalta havaittiin keskimäärin suurempaa aktiivisuutta eksoskeletooneilla työskennellessä. Myös työntekijöiden subjektiivisessa kokemuksessa laitteiden käytettävyydestä oli suuria eroja. Lihasaktiivisuuden muutos ei kuitenkaan ollut selkeästi yhteydessä käytettävyysskokemuksen kanssa.

Yhteenvedon voidaan todeta, että kaikki tutkitut eksoskeletoinit kykenevät vähentämään kädet koholla työskentelyn kuormitusta. Laitekohtaiset erot lihasaktiivisuustuloksissa ja käytettävyydessä olivat kuitenkin merkittäviä, mikä on hyvä huomioida pohdittaessa eksoskeletoonien soveltuvuutta työtehtävään.

1 Johdanto

Tuhannet suomalaiset työskentelevät päivittäin kädet koholla. Käsien ylös nostaminen ja kannattelu edellyttää erityisesti niska- ja hartialihasten voimakasta supistumista ja fyysisellä ylikuormituksella on keskeinen rooli työhön liittyvien TULES-vaivojen kehittymisessä. Lisääntyneestä kuormituksesta ja erityisesti staattisesta lihasjännityksestä johtuen kädet yläasennossa työskentely lisää myös työn epämu-kavuutta. Sterud ym. (2014) havaitsivat kolmen vuoden seurantatutkimuksessa, että kädet koholla työskentelyn lähes kaksinkertaistaa niska-hartiaseudun kiputilojen riskin. Työväestön ikääntyessä työn kuormituksesta johtuvat ongelmat tulevat entisestään yleistymään, mikä kuormittaa yhä enemmän yhteiskuntaa.

Työelämässä pyritäänkin erilaisin keinoin vähentämään työn kuormittavuutta ja työperäisiä sairauksia. Viimeaikaisen teknologiakehityksen ansiosta ongelmaan on tarjolla uusia ratkaisuja, sillä nykyisin markkinoilla on jo useita työhön tarkoitettuja puettavia tukirankoja eli eksoskeletoneita. Näitä laitteita markkinoidaan työn tekemisen apuvälineinä ja kuormituksen keventäjinä.

1.1 Yleistä eksoskeletoneista

Ensimmäinen tunnettu eksoskeletoni on kehitelty jo vuonna 1890. Kyseessä ovat Nicholas Yagnin (Yagn 1890) suunnittelemat laitteet avustamaan kävelyä, juoksua ja hyppäämistä. Kuitenkin vasta 1960-luvulta voidaan katsoa eksoskeletonien kehityksen lähteneen etenemään. Tuolloin General Electric ja Yhdysvaltain armeija kehittivät kokovartaloekoskeletonin nimeltä Hardiman (Makinson 1971). Nykytilanteeseen on kuitenkin vaadittu vielä paljon kehitystyötä. Viime vuosien aikana eksoskeletoni-valmistajien määrä on lisääntynyt, ja niistä on tullut entistä yleisemmin saatavilla olevia ja käytettyjä apuvälineitä ja työvälineitä.

Eksoskeletoni eli ulkoinen tukiranka mahdollistaa ihmisen suorituskyvyn tukemisen tai lisäämisen. Näitä laitteita on olemassa sekä aktiivisia että passiivisia. Aktiivisissa eksoskeletoneissa on erillinen voimanlähde, eli sähkömoottori, joka tuottaa lisävoimaa käyttäjän oman lihasvoiman lisäksi. Passiiviset eksoskeletonit puolestaan eivät käytä ulkoista voimanlähdetä, vaan varastoivat materiaalien ja rakenteiden avulla ihmisen tuottamaa liike-energiaa ja vapauttavat sen sopivassa vaiheessa työsuoritusta keventäen. Aktiivisiin ja passiivisiin eksoskeletoneihin jaon lisäksi yksi tapa luokitella eksoskeletoneja on jakaa ne sovelluskohteen mukaisesti eri kategorioihin:

- työtehtävät / työkalujen kannattelu
- kuntoutus
- urheilu
- armeijakäyttö

Yksi tapa luokitella eksoskeletoneja on sen mukaan, mitä kehon osan ne tukevat (kuva 1).



Kuva 1. Eksoskeletonien luokittelu tuettavan kehon osan mukaisesti.

1.2 Yläraajaeksoskeletonit

Nimensä mukaisesti yläraajaeksoskeletonit tukevat yläraajoja erilaisissa tehtävissä ja liikkeissä. Yleisimmät laitemallit ovat tarkoitettu kädet koholla työskentelyyn hartiatasolla tai jopa sen yläpuolella. Saatavilla on kuitenkin myös laitteita, jotka tukevat alemmalla tasolla tehtävää työskentelyä, kuten tässä tutkimuksessa mukana oleva Hapo MS -laite.

Yläraajaeksoskeletonien positiivisista vaikutuksista kuormituksen vähentämiseen on raportoitu muutamissa aiemmissa lihasaktiivisuusmittauksiin (EMG, electromyography) perustuvissa tutkimuksissa (mm. Schmalz ym. 2019, Van Engelhoven ym. 2018 ja Van Engelhoven ym. 2019), vaikkakin tulokset kirjallisuudessa eivät ole yhdenmukaisia (DeBock ym. 2021). De Bock ym. (2021) raportissa Skelex ja ShoulderX -merkkisiä eksoskeletoneja tutkittiin sekä kenttäolosuhteissa että laboratoriossa. Tutkijat havaitsivat eksoskeletonia käytettäessä, että tutkittujen lihasten aktiivisuus laski selvästi laboratoriotesteissä, mutta laitteilla oli vain vähäinen vaikutus lihasaktiivisuuteen työolosuhteissa tehdyissä kenttämittauksessa. Suomessa Työterveyslaitos selvitti Skelex-exoskeletonin vaikutuksia lihasten kuormittumiseen niin ikään laboratoriossa ja kenttämittauksessa autenttisisissa työoloissa (Mänttari ym. 2021). Laboratoriossa tehdyssä varsin kuormittavassa painonsiirtotehtävässä sekä staattisessa painon kannattelussa eksoskeletonin käyttö vähensi olkalihasten aktiivisuutta parhaimmillaan puoleen verrattuna normaalitilanteeseen ilman laitetta. Myös kenttätutkimuksessa tutkittujen lihasten kuormitus väheni eksoskeletonia käytettäessä keskimäärin 23 %.

Ristiriitaisia löydöksiä voidaan selittää osin tutkimusten erilaisilla tutkimusmenetelmillä ja koeasetelmilla. Lisäksi aiemmissa tutkimuksissa on tarkasteltu vain yksittäisten valmistajien eksoskeletoneja, mikä tekee laitekohtaisten tulosten vertailun käytännössä mahdottomaksi.

Edellä mainittujen tutkimusten jälkeen Suomessa markkinoille tulleet uudet eksoskeletonit, kuten Hapo MS ja Hilti HA EXO-O1, eroavat rakenteeltaan, painoltaan ja toimintaperiaatteeltaan Skelex-

laitteesta. Toistaiseksi ei ole tiedossa, millaisia näiden uusien eksoskeletonien vaikutukset ovat kädet koholla työskentelyyn lihaskuormitukseen.

2 Tutkimuksen tarkoitus ja hypoteesit

Hankkeen alkaessa Suomessa oli saatavilla neljä eri merkistä passiivista yläraajaeksoskeletonia. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli vertailla näiden eksoskeletonien vaikutuksia kädet koholla työskentelyn lihasaktiivisuuteen laboratoriossa suoritetuissa tehtävissä sekä aidoissa työtilanteissa viidellä eri työpaikoilla. Lisäksi työpaikkamittauksissa selvitettiin laitteiden käytettävyyttä.

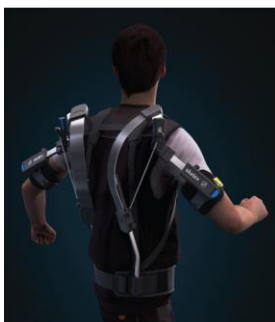
Tutkimuksen hypoteesit ovat:

1. Laboratoriomittauksessa kaikki tutkittavat eksoskeletonit vähentävät yläraajaa kannattelevien lihasten aktiivisuutta verrattuna työskentelyyn ilman laitetta.
2. Työpaikkamittauksissa työtehtävien luonne ja erityispiirteet vaikuttavat keskeisesti laitteiden käytettävyyteen sekä lihasaktiivisuuden määrään ja näiden välille muodostuu selkeä yhteys.

3 Tutkimusmenetelmät ja aineisto

3.1 Valmistajien tarjoamat tiedot eksoskeletoneista

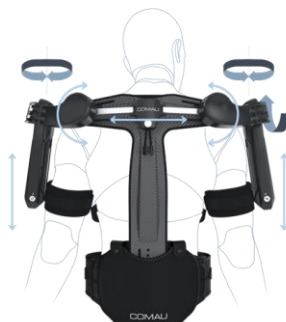
Tutkittavat yläraajaeksoskeletonit on esitetty kuvassa 2. Laitteet edustavat kaikki passiivisia eksoskeletoneja eli niiden kevennyskyky perustuu jousiin varastoituvaa energiaan.



Skelex 360
Kuva: Skelex



Hilti HA EXO-01
Kuva: Hilti



Comau Mate
Kuva: Comau

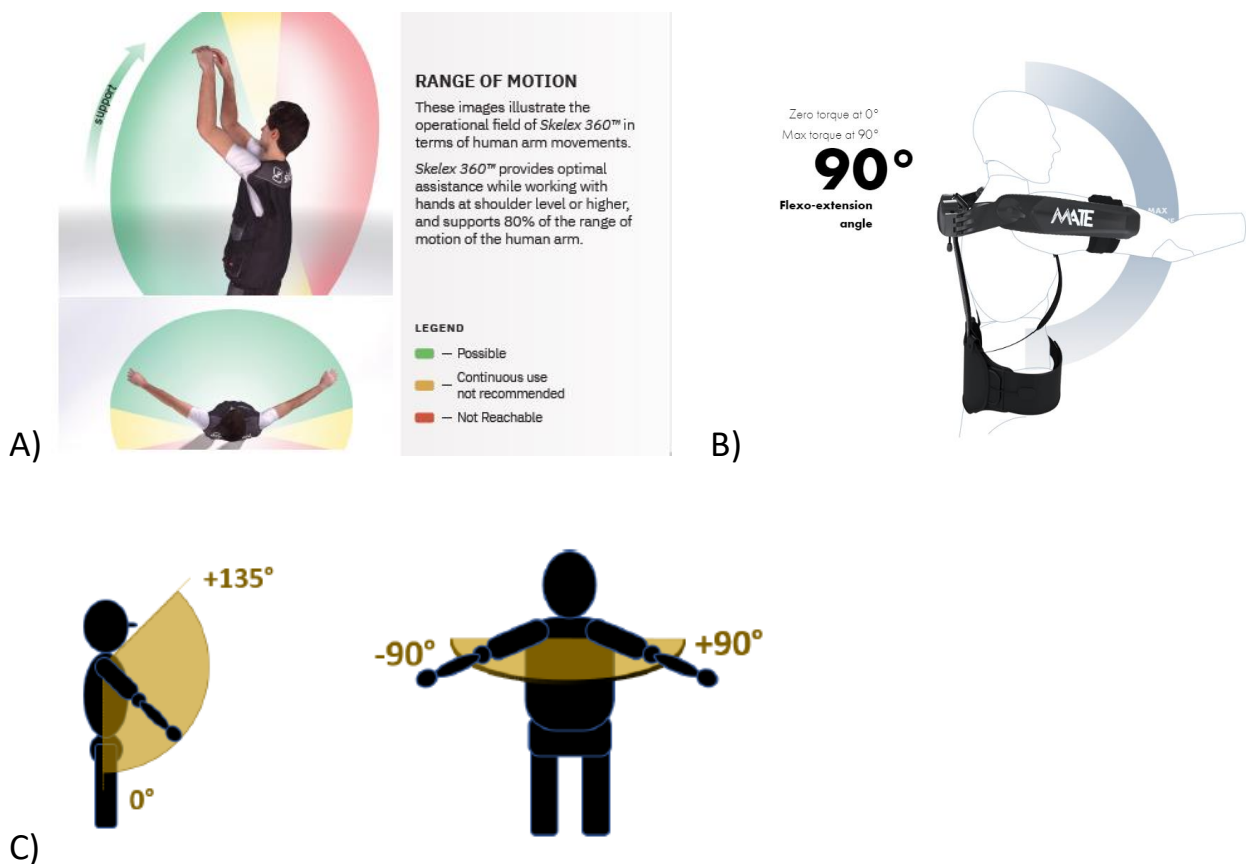


HAPO MS
Kuva: ErgoSanté

Kuva 2. Tutkimuksessa käytetyt eksoskeletonit.

Laitevalmistajat ilmoittavat jokaiselle tutkimuksessa tarkastellulle eksoskeletonille hieman eri kevennystasot/korkeudet. Skelex 360-laite painaa 2,5 kg ja sen luvataan tuottavan optimaalisen kevennyksen työskentelyn tapahtuessa hartiatasolla tai ylempänä ja laitteen salliman liikkuvuuden luvataan kattavan 80% yläraajan liikelaajuudesta (kuva 3 A). Noin 2 kg painavaa Hilti HA EXO-01-eksoskeletonia suositellaan käytettäväksi, kun työskennellään pään tai hartiatason yläpuolella. Comau Mate 3 kg painolla on ryhmän painavin ja se tarjoaa suurimman kevennyksen valmistajan mukaan hartiatasolla

työskentelyyn (kuva 3 B). Valmistajan kuvauksessa Comau Mate-exoskeletonin tarjoama kevennys seuraa olkapään koukistus-/ojennuskulmaa. Tutkimuksen kevyimmän, 1,3 kg painavan Hapo MS -laitteen suositeltu työskentelykorkeus, jolla kevennys tapahtuu, on olkavarren koukistus- ojennus suunnassa 0-135 astetta ja horisontaalitasossa puolestaan -90 - +90 astetta (kuva 3 C). Käytännössä Hapo MS -laitteen kevennys tapahtuu alemmilla korkeuksilla verrattuna tutkimuksen muihin laitteisiin.



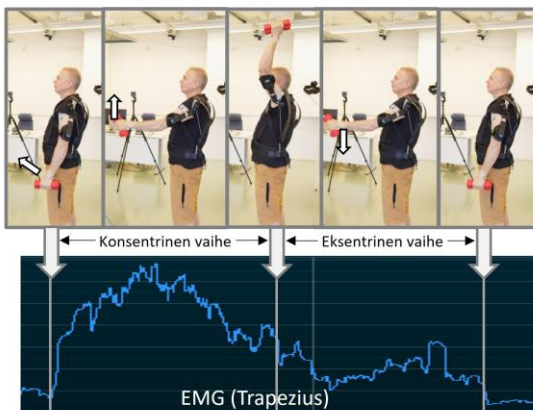
Kuva 3. Laittevalmistajien tarjoama kuvaus A) Skelex 360 (kuva Skelex-esitteestä), B) Comau Mate (Comau -verkkosivusto) ja C) Hapo MS (Ergosanté -verkkosivusto) laitteiden kevennyksestä ja liikealueista.

3.2 Laboratoriomittaukset

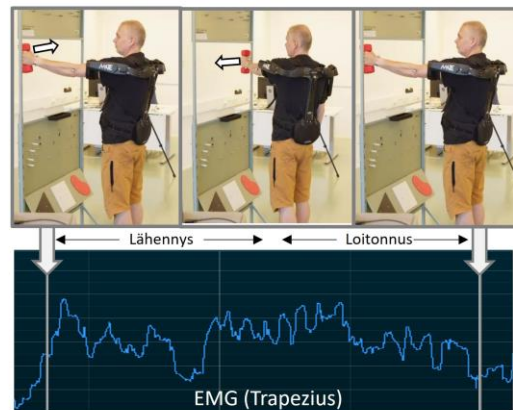
Yläraajan eksoskeletooneita vertailevaan laboratoriotutkimukseen rekrytoitiin 13 koehenkilöä (ikä 42 ± 13 vuotta, pituus 178 ± 5 cm, paino 86 ± 13 kg, miehiä 12). Tutkittavat tekivät liikelaboratoriossa kolme erilaista työtehtävää kädet koholla: käden nostot 2,5 kg painolla, horisontaalinen sivuliike 2,5 kg painolla ja työskentely akkuruuvinvääntimellä käsi ylhäällä (kuva 4 A-C). Liikkeiden suoritusnopeus vakioitiin määrittämällä metronomin avulla suoritusten tahti käden nostoissa (35 kertaa minuutissa) ja horisontaalisessa sivuliikkeessä (45 kertaa minuutissa). Lisäksi mittauksiin sisällytettiin yksi kädet alhaalla tehtävä suoritus, että voitiin selvittää vaikuttaako eksoskeletoinit kädet alhaalla työskentelyn lihasaktiivisuuteen (kuva 4 D). Eri laitteiden ja normaalitilanteen tutkimusjärjestys satunnaistettiin.

Skelex, Hilti ja Comau -eksokeletonien kevennystaso oli asetettu vastaamaan n. 3 kg kevennystä. Hapossa valittavana olevasta kahdesta jousisarjasta (spring rod), joilla valittu kevennys toteutetaan, valittiin matalamman tason kevennys. Valmistajan mukaan tämä jousisarja tuottaa n. 4 kg kevennyksen laitteen liikealueelle (kuva 3 C).

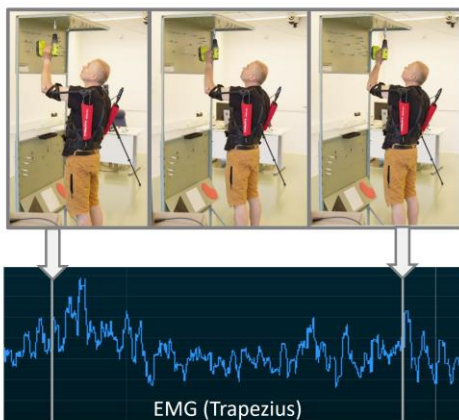
A) Käden nostot painolla (2,5 kg)



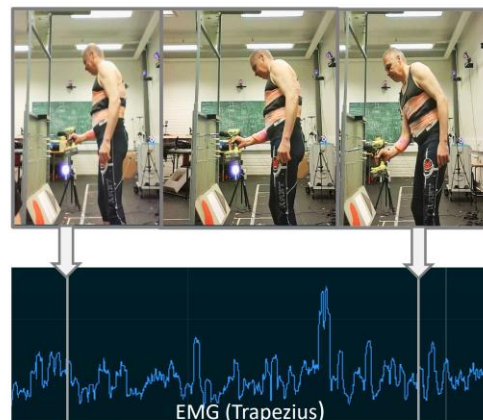
B) Horisontaalinen sivuliike painolla (2,5 kg)



C) Työskentely akkuruuvinvääntimellä ylhäällä



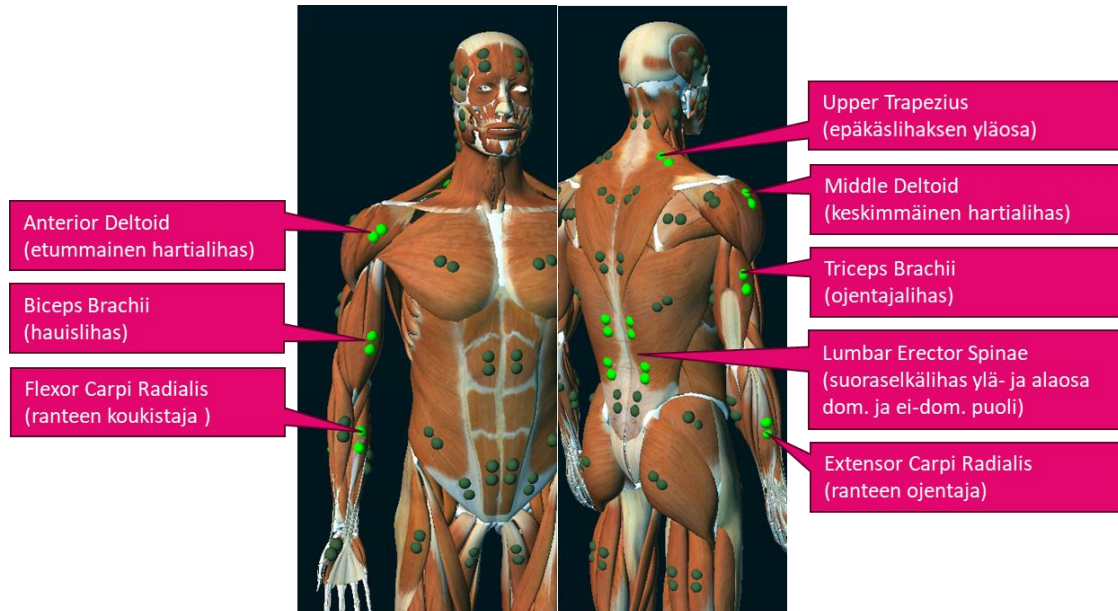
D) Työskentely akkuruuvinvääntimellä alhaalla



Kuva 4. Liikelaboratoriossa suoritettiin neljä tehtävää: A) kädennosto 2,5 kg painolla, B) horisontaalinen sivuliike hartiatasossa 2,5 kg painolla, C) työskentely akkuruuvinvääntimellä ylhäällä ja C) työskentely akkuruuvinvääntimellä alhaalla.

Laboratoriotutkimuksessa suoritusten aikainen lihasaktiivisuus mitattiin yhteensä 11 ylävartalon lihaksesta (kuva 5). Pintaelektrodit (BlueSensor M-00-S, Ambu, napaväli 22 mm) asetettiin bipolaarisesti lihasrungon päälle Hermens ym. (2000) ohjeistuksen mukaisesti. EMG-signaali kerättiin 2000 Hz taajuudella ja 20–500 Hz kaistanleveydellä Noraxon Ultium laitteella (Noraxon, Arizona, USA). EMG-signaalin laatu tarkastettiin jokaisesta suorituksesta visuaalisesti ennen analyysiä. Analysointi suoritettiin Noraxon MR3 -ohjelmalla määrittämällä lihasaktiivisuuden RMS-arvo (100 ms liukuva keskiarvo) työsuorituksen ajalta. Käden nostoissa lihasaktiivisuus määritettiin erikseen noston konsentriselle ja eksentriselle vaiheelle (kuva 4 A). Muissa tehtävissä analyysiin otettiin koko suorituksen kesto (kuva 4 B-D).

Lisäksi vartalon ja yläraajan asento suoritusten aikana selvitettiin liikenealyysimenetelmällä (Vicon, Oxford, UK) Vicon Plug-in-Gait kokovartalomallin avulla.



Kuva 5. Liikelaboratoriotutkimuksessa EMG:llä mitatut lihakset.

3.3 Työpaikkamittaukset

Työpaikkamittaus tehtiin yhteensä kahdeksalle koehenkilölle (ID:t 2, 3, 4, 6, 7, 11, 12, 13) heidän tavanomaisissa työtehtävissään. Työpaikkamittaukseen valittiin tutkittavaksi kaksi tai kolme parhaiten soveltuvaa eksoskeletonia työtehtävän tyyppin, laboratoriotutkimuksen EMG-tulosten sekä subjektiivisten kokemusten perusteella.

Työpaikkamittauksissa lihasaktiivisuus viidestä lihaksesta (epäkäslihas, etummainen ja keskimmäinen hartialihäs, hauislihas & suoran selkähäksen alaosa) kehon kummaltakin puolelta (yhteensä 10 lihasta). Lihasaktiivisuusdata kerättiin 2000 Hz taajuudella ja 20–500 Hz kaistanleveydellä Noraxon Ultium laitteella (Noraxon, Arizona, USA). Analysointi suoritettiin Noraxon MR3 -ohjelmalla määrittämällä lihasaktiivisuuden RMS-arvo (100 ms liukuva keskiarvo) tutkittavan tavanomaisista työsuorituksista. Analyysiin valittiin tutkimuksen kannalta relevantti kohta, joka sisälsi työtä kädet koholla. EMG-signaalin laatu tarkastettiin jokaisesta suorituksesta visuaalisesti ennen analyysiä. Eksoskeletoneilla työskentelyn aikainen lihasaktiivisuuden määrä suhteutettiin normaalisuorituksen aktiivisuustasoon ja raportoitiin ns. normalisoituna EMG-arvona.

Jokaisella eksoskeletonilla työskentelyn jälkeen tutkittavat täyttivät Työterveyslaitoksen kehittämän käytettävyykselyn subjektiivisten kokemusten kartoittamiseksi (taulukko 1). Mitä korkeampi pistemäärä kyselystä tuli, sitä paremmin eksoskeleton sopii kyseiseen työtehtävään.

Taulukko 1. Kyselylomake eksoskeletonien käytettävyydestä (Työterveyslaitos)

	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 puutuminen tai kipu.	1	2	3	4	5
9. Eksoskeleton paransi jaksamistani työpäivän aikana tai sen jälkeen.	1	2	3	4	5
10. Eksoskeleton aiheutti turvallisuusriskin, 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:	
Pistemäärä	Arvio
> 80,3	Eksoskeleton soveltuu työtehtävään erinomaisesti
68,1–80,3	Eksoskeleton soveltuu työtehtävään hyvin
68	Eksoskeleton soveltuu työtehtävään kohtalaisesti
51–67,9	Eksoskeletonin soveltuu työtehtävään heikosti
< 51	Eksoskeleton ei sovellu työtehtävään lainkaan

3.4 Tilastollinen analyysi

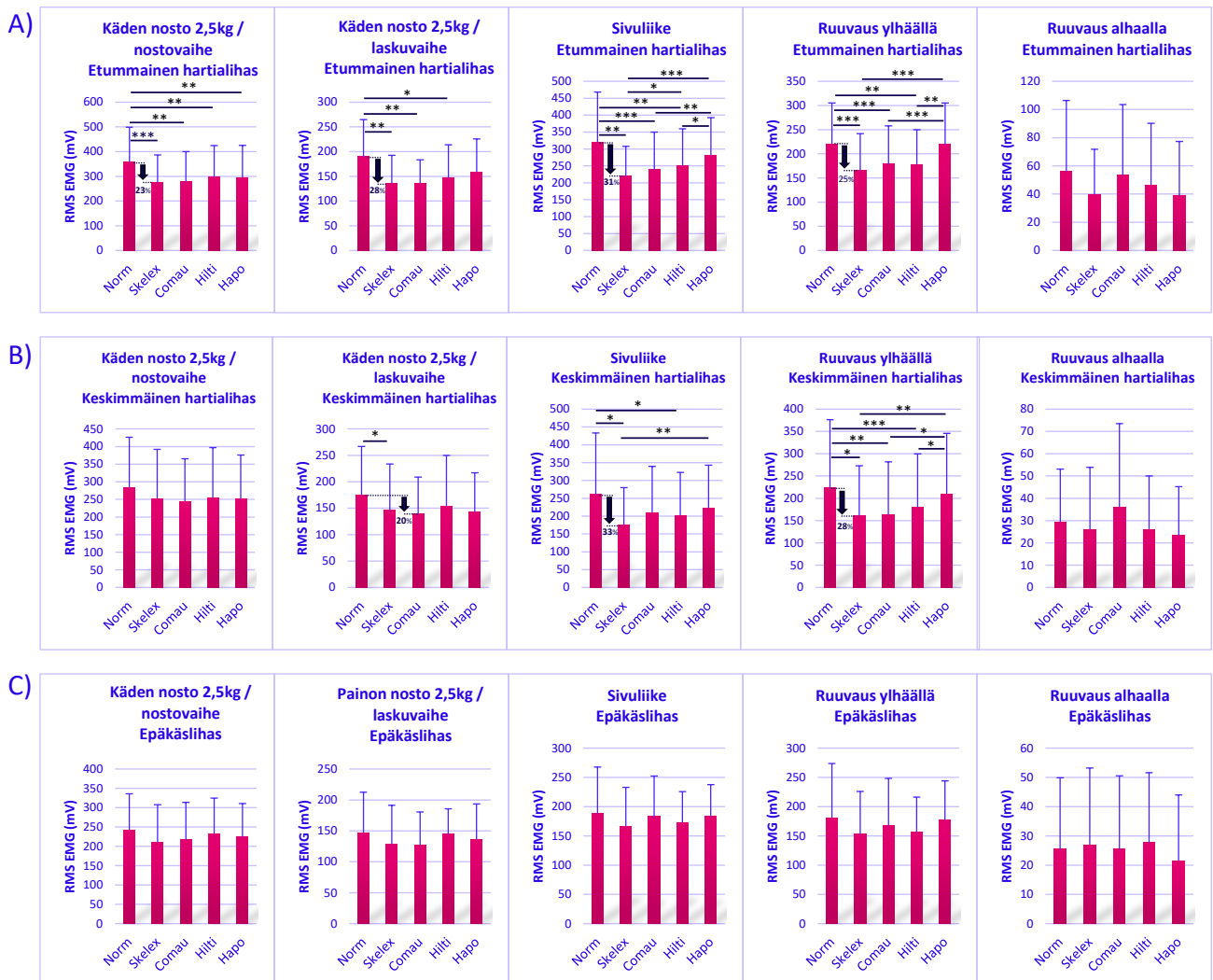
Tilastolliset analyysit suoritettiin IBM SPSS statistics 29 -ohjelmalla (IBM, Armonk, Yhdysvallat). Laboratoriomittauksista analyysiin otettiin viiden testitilanteen lihasaktiivisuuden arvot ja tietyt nivelkulmat. Työpaikkamittauksien osalta tilastollinen analyysi suoritettiin ainoastaan subjektiivisten pisteiden ja lihasaktiivisuuden yhteydelle Pearsonin korrelaatiolla. Datan normaalijakautuneisuus ja varianssien yhdenmukaisuus varmistettiin Shapiro-Wilkin and Levenen testeillä. Testitilanteen eroja tarkasteltiin toistettujen mittausten varianssianalyysillä ja parivertailu suoritettiin bonferoni post hoc -testiä käyttäen. Tilastollisen merkitsevyyden tasoina on käytetty: * = $p \leq 0.05$, ** = $p \leq 0.01$ ja *** = $p \leq 0.001$.

4 Tulokset

4.1 Laboratoriomittaus

Kaikki tutkitut eksoskeletonit vähensivät lihasaktiivisuutta käden nostoissa (sekä nosto että laskuvaiheessa) erityisesti etummaisessa hartialihaksessa verrattuna normaalitilanteeseen (kuva 6 A). Myös muissa tutkituissa liikkeissä etummaisen hartialihaksen aktiivisuudessa havaitaan selkeää vähenemistä eksoskeletoneja käytettäessä luukuunottamatta Hapo-laitetta. Tämän laitteen keventävä vaikutus vai- menee mitä ylempänä työskennellään, mikä näkyy yläraajan sivuliikkeessä ja ruuvauksessa ylhäällä.

Keskimmäisen hartialihaksen osalta lihasaktiivisuuden määrä vähenee eksoskeletonia käytettäessä noin kolmasosalla sivuliikkeessä ja ruuvauksessa ylhäällä (kuva 6 B). Myös epäkäslihaksen aktiivisuudessa havaittiin eksoskeletoneilla 10-15% vähenemistä, mutta erot evät saavuttanut tilastollisesta merkittävyyttä (kuva 6 C). Lihasaktiivisuudessa ei havaittu eroja muiden tutkittujen lihasten osalta (liite 1). Myöskään ruuvauksessa alhaalla ei havaittu merkittäviä eroja tilanteiden välillä.



Kuva 6. Laboratoriotutkimuksen lihasaktiivisuustulokset A) etummaisen ja B) keskimmäisen hartialihaksen sekä C) epäkäslihaksen osalta.

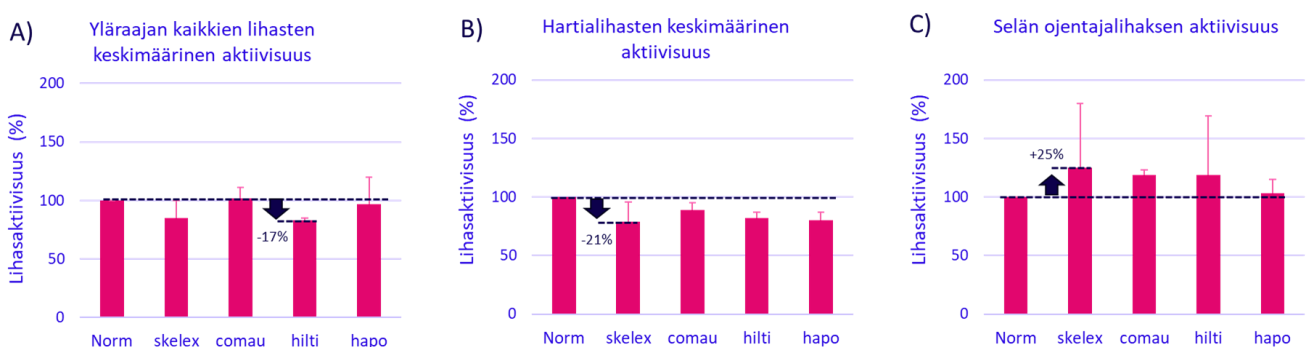
Liikeanalyysillä määritetyt kehon asennot ja olkavarren koukistuskulmat on esitetty liitteessä 1 (taulukko 4). Tutkittavien tilanteiden välillä ei havaittu merkittäviä eroja eli tämän perusteella eksoskeletonien käytöllä ei ollut vaikutusta työskentelyn aikaiseen kehon asentoon ja olkavarren liikkeeseen tutkituissa tilanteissa.

4.2 Työpaikkamittaus

Työtehtävien luonne eri työpaikoilla erosi merkittävästi mm. käsien työskentelykorkeuden, vartalon asennon ja kierron sekä kuormitustason suhteen. Työpaikkamittauksiin valittiin jokaiselle henkilölle kaksi tai kolme sopivinta eksoskeletonia sen perusteella, mitkä laitteet arvioitiin aiemmin tehdyn laboratoriomittauksen perustella työhön parhaiten soveltuvaksi. Lisäksi valinnassa huomioitiin osallistujien subjektiivinen kokemus.

Koska työtilanteet kohteissa olivat luonteeltaan hyvin erilaisia ja ne on suorittanut joko yksi tai maksimissaan kaksi henkilöä ja vain osalla laitteista, on EMG-tulosten laitekohtaiseen vertailuun suhtauduttavat varauksella. Tämän vuoksi laitekohtaisille tuloksille ei suoritettu tilastollista vertailua työpakkamittauksien osalta. Kuvassa 7 esitetyt laitekohtaiset tulokset antavat suuntaa lihasaktiivisuuden keskimääräisestä muutoksesta, kun mukana on tehtäviä, johon laitteet soveltuivat hyvin ja toisaalta tehtäviä, joihin soveltuvuus on heikompi. Näiden tulosten lisäksi on hyvä tarkastella lihasaktiivisuustuloksia tapauskohtaisesti jokaisen osallistujan osalta erikseen (liite 2).

Kuvasta 7 A) ja taulukosta 2 havaitaan, että normaalitilanteeseen nähden dominoivan puolen yläraajan lihasten aktiivisuus väheni eksoskeletoneilla keskimäärin 17-3,1 % lukuun ottamatta Comauta, jolla yläraajan lihasten aktiivisuus oli keskimäärin 2.4 % suurempaa (kuva 7 A). Etummaisesta ja keskimmäisestä hartialihaksen yhteenlaskettu aktiivisuus laski kaikilla eksoskeletoneilla (11-21%) suhteessa normaalitilanteeseen (kuva 7 B, taulukko 2). Sen sijaan selän ojentajalihaksissa mitattiin keskimäärin viidesosan korkeampia lihasaktiivisuuksia eksoskeletoneilla työskentelyssä verrattuna normaalitilanteeseen (kuva 7 C). Suurentunut selkälihasten aktiivisuus liittyi työtilanteisiin, joissa selkää taivutettiin taaksepäin (esim. koehenkilö 6, Liite 2). Hapo-laitteella selän aktiivisuus ei lisääntynyt. Tämä laite oli kevyin, eikä siinä ole selän taaksetaivutusta estäviä jäykkiä rakenteita.



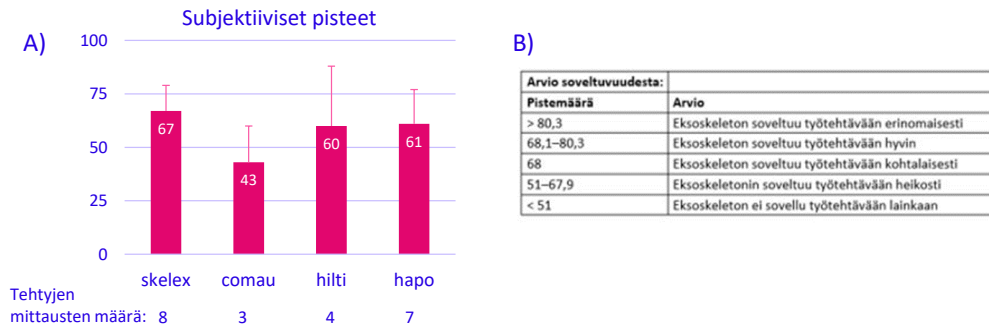
Kuva 7. A) Dominovan puolen ylävartalon kaikkien lihasten, B) hartialihasten (etummaisesta ja keskimmäisestä hartialihaksen keskiarvotulos) sekä C) selän ojentajalihaksen aktiivisuus eksoskeletoneilla suhteessa normaalitilanteeseen.

Taulukko 2. Työpaikkamittauksen EMG-tulokset eri eksoskeletoneilla ja näitä vastaavat subjektiiviset pisteet. Yläraaja- ja hartialihasten (Upper Trapezius, Ant. Deltoid, Mid. Deltoid, Biceps) tulokset on esitetty keskiarvotuloksena ja selän ojentajalihasten arvot esitetään erikseen. Jos työpaikkamittauksissa mitattiin kaksi eri työtehtävää, on tulos analysoitu keskiarvotuloksena.

Skelex	N=8	Upper limb muscles (%)		Lumbar erector spinae (%)		Subjektiiviset pisteet
	ID	Dominant side	Non-dominant side	Dominant side	Non-dominant side	
	2	87.7	114.7	94.1	99.8	42.5
	3	105.2	101.9	172.2	162.7	60
	4	60.9	75.1	57.4	107.3	75
	6	87.4	81.7	115.8	112.0	67.5
	7	92.7	67.9	148.6	132.0	62.5
	11	64.1	93.0	96.8	101.2	67.5
	12	102.7	80.4	75.2	85.7	80
	13	79.5	97.3	239.0	185.8	82.5
	Average	85.0	89.0	124.9	123.3	67.2
	SD	15.2	14.5	55.5	32.3	12.0
Hilti	N=4	Upper limb muscles (%)		Lumbar erector spinae (%)		Subjektiiviset pisteet
	ID	Dominant side	Non-dominant side	Dominant side	Non-dominant side	
	4	82.9	92.5	72.7	91.4	70
	6	82.8	86.8	104.9	97.3	77.5
	11	80.8	99.5	93.8	98.6	50
	13	85.5	102.6	204.9	204.9	92.5
	Average	83.0	95.3	119.1	123.1	60.4
	SD	1.7	6.2	50.9	47.3	27.8
Comau	N=3	Upper limb muscles (%)		Lumbar erector spinae (%)		Subjektiiviset pisteet
	ID	Dominant side	Non-dominant side	Dominant side	Non-dominant side	
	3	108.6	125.0	124.7	114.8	53.75
	7	109.8	88.0	116.0	124.2	57.5
	13	88.9	96.7	118.8	114.4	17.5
	Average	102.4	103.2	119.8	117.8	43.4
	SD	9.6	15.8	3.6	4.6	17.4
Hapo	N=7	Upper limb muscles (%)		Lumbar erector spinae (%)		Subjektiiviset pisteet
	ID	Dominant side	Non-dominant side	Dominant side	Non-dominant side	
	2	92.6	98.1	90.7	99.9	38.75
	3	88.0	128.4	104.8	106.7	48.75
	4	77.9	88.3	84.8	98.8	72.5
	6	82.2	82.5	108.5	102.3	85
	7	146.3	82.7	99.2	114.5	45
	11	79.4	92.0	112.3	131.1	66.25
	12	111.9	75.8	124.8	123.1	72.5
	Average	96.9	92.5	103.6	110.9	61.3
	SD	22.8	16.1	12.5	11.5	15.9

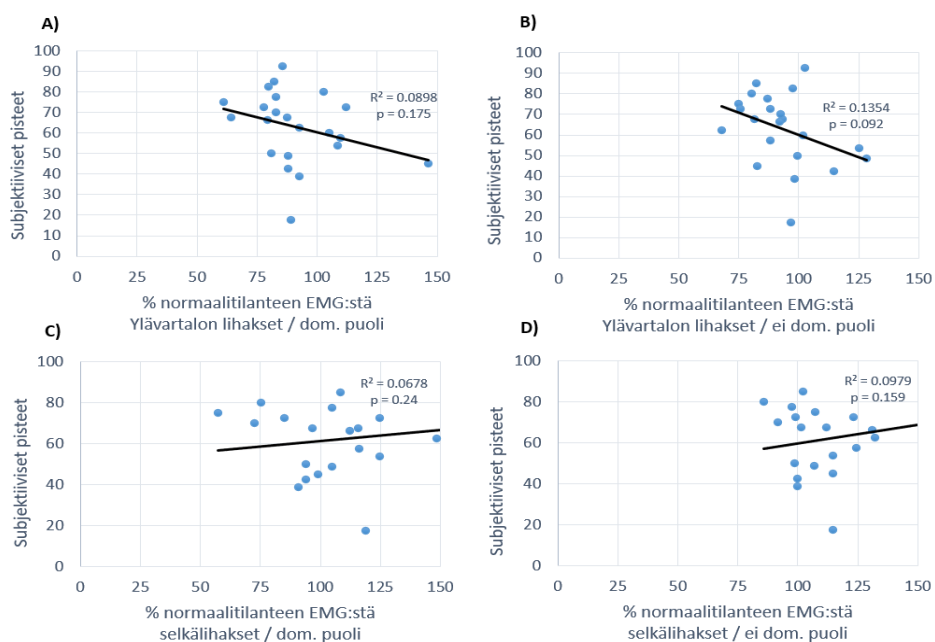
Työpaikkamittausten subjektiiviset pisteet on esitetty kuvaajassa 8 ja taulukossa 2. Huomionarvoista näissäkin tuloksissa on, että laitekohtaisten keskiarvotulosten suora vertailu ei ole mielekästä, koska eksoskeletoneilla tehtyjen työtehtävien luonne erosi merkittävästi ja mittauksen määrä vaihteli kolmesta kahdeksaan per laite. Kaikkiaan työpaikoilla suoritettua 22 eksoskeletonmittauksesta kolmessa tapauksessa subjektiiviset pisteet ylivät >80,3 pisteen luokkaan, jolloin eksoskeletonin arvioidaan soveltuvan kyseiseen työtehtävään erinomaisesti. Yhdeksässä eksoskeletonmittauksessa pisteet olivat

>68,1, jolloin soveltuvuus työtehtävään arvioidaan hyväksi. Heikko soveltuvuus työtehtäviin havaittiin hieman yli puolessa eksoskeletonmittauksista.



Kuva 8. A) Subjektiiivisten pisteiden keskiarvo eksoskeletoneilla tehdyistä työpaikkamittauksista ja B) soveltuvuusluokitus Työterveyslaitoksen käytettävyysslomakkeen mukaan.

Työpaikkamittauksen osalta selvitimme myös, voidaanko subjektiivisesti koetusta eksoskeletonien soveltuvuudesta päätellä eksoskeletonien kykyä vähentää lihaskuormituksen tasoa. Tätä tarkasteltiin määrittämällä subjektiivisten pisteiden ja lihasaktiivisuuden yhteys Pearsonin korrelaatiolla. Kuvasta 9 A ja B voidaan havaita korrelaatiotrendi: kun eksoskeletonin käyttö vähensi ylävartalon lihasten aktiivisuutta suhteessa normaalitilanteeseen, olivat subjektiiviset pisteet keskimäärin korkeammat. Sen sijaan selkälihasten kohdalla havaitaan heikohko päinvastainen yhteys (kuva x C ja D) korkeamman lihasaktiivisuuden ja paremman soveltuvuuden välillä. Korrelaatiotulosten osalta ei kuitenkaan saavuteta tilastollista merkitsevyyttä ($p < 0.05$). Tämän perusteella todeta, että lihasaktiivisuuden muutos ei ole selkeä tekijä selittämään kokemusta eksoskeletonien soveltuvuudesta työtehtävään.



Kuva 9. Subjektiiivisten pisteiden ja EMG-tulosten välinen yhteys työpaikkamittauksissa ylävartalon lihaksissa A dominoivalta ja B) ei-dominoivalta puolelta sekä vartalon C) dominoivalta ja D) ei-dominoivalta puolelta.

5 Pohdinta

5.1 Laboratoriomittaus

Tulokset tukivat hypoteesia, että kaikilla neljällä tutkitulla eksoskeletoneilla on yläraajan kannattelua keventävä vaikutus. Etummaisen ja keskimmäisen hartialihaksen aktiivisuus kädet koholla työskentelyssä väheni eksoskeletonien käytöllä parhaimmillaan noin kolmasosalla normaalitilanteeseen verrattuna. Epäkäslihaksen aktiivisuuden aleneminen eksoskeletoneilla ei saavuttanut tilastollisesti merkitsevää tasoa missään tutkituista suorituksista. Muissa yläraajan tai selän lihaksissa ei myöskään havaittu eroja eri tilanteiden välillä.

Skelex, Hilti ja Comau suoriutuivat tehtävistä melko yhdenmukaisesti, ja pienet erot EMG-tuloksissa latteiden välillä saattoivat osin johtua siitä, että vaikka kevennystasot pyrittiin vakiomaan, saattoi niissä todellisuudessa olla jonkin verran eroja. Odotusten mukaisesti Hapo MS-laite erottui EMG-tulosten perusteella siinä, että sen yläraajaa keventävä vaikutus ilmeni selvästi muita laitteita alemmalla työskentelykorkeudella.

Aikaisemmassa Työterveyslaitoksen tutkimuksessa (Mänttari ym. 2021) Skelex-eksoskeletonilla saavutettiin vielä selkeämpää laskua kädet koholla työskentelyn lihasaktiivisuudessa verrattuna tähän tutkimukseen. Tämä saattoi johtua siitä, että Työterveyslaitoksen tutkimuksessa tutkitut työtehtävät olivat fyysisesti huomattavasti raskaampia kuin tässä tutkimuksessa käytetyt tehtävät. Lisäksi laitteiden kevennystasossa saattoi olla eroa tutkimusten välillä. Näiden löydösten pohjalta on kuitenkin selvää, että yläraajaeksoskeletoneilla voidaan keventää työn kuormitusta merkittävästi ainakin laboratoriotestien kaltaisissa suhteellisen yksinkertaisissa työtilanteissa.

5.2 Työpaikkamittaus

Työpaikkamittauksien osalta hypoteesinä oli, että työtehtävien yksilöllisellä luonteella on keskeinen vaikutus sekä osallistujan kokemukseen eksoskeletonien käytettävyydestä että laitteiden kykyyn vähentää työtehtävän kuormitusta. Havainnot tukevat kumpaakin esitettyä ajatusta. Esimerkiksi pitkäkestoisessa kaiuttimen asennuksessa kädet koholla koehenkilö 13 antoi kahdelle eksoskeletonille erinomaiset käytettävyysepisteet ja erityisesti dominoivan yläraajan (aktiivisemmin toimiva käsi tehtävässä) lihasaktiivisuudessa havaittiin selkeää vähenemistä. Toisaalta mielenkiintoista oli, että samalla koehenkilöllä selkälihasten aktiivisuus tuplaantui kyseisillä eksoskeletoneilla, mutta tämä ei kuitenkaan vaikuttanut alentavasti subjektiivisten pisteiden määrään. Selkälihasten korkeampi aktiivisuus etenkin koehenkilöillä 13 ja 7 johtui todennäköisesti laitteiden rakenteen tuottamasta lisävastuksesta selän taaksetaivutuksessa kyseisissä työtehtävissä. Selkälihasten aktiivisuustaso normaalitilanteissa näissä tapauksissa oli melko matala, mikä saattaa selittää sen, että koehenkilö 13 ei kokenut huomattavaa aktiivisuuden nousua eksoskeletoneilla negatiiviseksi. Sen sijaan koehenkilö 7 mainitse taaksetaivutuksen lisääntyneen vastuksen eksoskeletoneilla häiritsevänä. On oletettavaa, että kyseinen haitta korostuisi pitkäkestoisemman käyttöjakson aikana.

Työpaikkamittauksen toisena hypoteesinä oli, että subjektiivisten pisteiden ja lihasaktiivisuuden muutosten välille muodostuu selkeä yhteys. Jos näin olisi, voisi eksoskeletonien käytettävyysepisteiden pohjalta päätellä alentavatko laitteet lihasten kuormittumista. Tulokset eivät kuitenkaan selkeästi tue hypoteesia. Tämän pohjalta voidaan todeta, että tässä tutkimuksessa lihasaktiivisuuden muutos ei ole

selkeä tekijä selittämään kokemusta eksoskeletonien soveltuvuudesta työtehtävään. On kuitenkin mahdollista, että pidempikestoinen laitteiden käyttöjakso olisi tuottanut erilaisen yhteyden muuttujien välille.

Haasteina eksoskeletonien käytölle työssä koettiin takertumisvaara sekä päälle pukemisen ja säätöjen asettamisen vaikeus. Laitteiden käytettävyyden kannalta olennaista on myös, millaisia jaksoja kädet koholla työtä tehdään, sillä laitteita ei ole mielekästä pitää päälle puettuna pidempiä väliaikoja. Lisäksi hienomotorisessa työssä koettiin, että eksoskeletonit joskus vähensivät tarkkuutta, esimerkiksi ruuvi-meisselin käytössä. On mahdollista, että laitteen kevennystason pienentäminen ja mahdollisesti pidempi totuttelujakso laitteen käyttöön olisi saattanut vähentää negatiivisiä vaikutuksia kyseisessä tilanteessa.

6 Yhteenveto

Tämän tutkimuksen perusteella yläraajaeksoskeletoneilla on potentiaalia vähentää kädet koholla työskentelyn kuormitusta ja siitä johtuvia ongelmia. Kaikilla neljällä eksoskeletonilla havaittiin yläraajaa kannattelevien lihasten aktiivisuutta vähentävä vaikutus verrattuna työskentelyyn ilman laitetta. Kuten aiemmassa kirjallisuudessa (esim. DeBock ym. 2021), lihasaktiivisuuden väheneminen laboratoriomittauksissa oli selkeämpää ja yhdenmukaisempaa verrattuna työpaikkamittauksiin, joissa työn moninaisuus lisäsi hajontaa tuloksiin.

Laitekohtaiset erot lihasaktiivisuustuloksissa ja käytettävyydessä tunnistettiin merkittäviksi. Onkin tärkeää, että eri työtehtäviin pystytään löytämään markkinoilta parhaiten sopivat laitteet. Tutkittujen laitteiden välillä oli selkeitä rakenteellisia ja toiminnallisia eroja, jotka tulee huomioida pohdittaessa niiden soveltuvuutta työtehtävään. Työpaikoilla ja työsuojelun piirissä ei ole vielä riittävästi tietoa saatavilla erilaisiin työtehtäviin soveltuvista eksoskeletoneista.

Tulevaisuudessa tarvitaan lisää työpaikoilla tehtävää tutkimusta, jotta voidaan paremmin tunnistaa eksoskeletonien käyttökohteet ja kehitystarpeet. Tutkimusryhmän toiveissa on, että uusien laitteiden ilmestyessä markkinoille päästään entistä parempaa käyttömukavuuteen, jolloin laitteiden käyttöön otolle työelämässä jää merkittävästi vähemmän esteitä.

7 Projektitiimi

Projektin toteutuksesta vastasi Jyväskylän ammattikorkeakoulun monialainen tutkimusryhmä:

Juha-Pekka Kulmala, Vanhempi tutkija, LitT, dos. Erytisoaaminen liikkumisen biomekaniikka ja liikettä avustavat eksoskeletonit.

Toni Pekkola, Vanhempi asiantuntija, LitM, Insinööri (AMK) Terveysteknologia. Erytisoaaminen TKI-toiminta, terveys- ja hyvinvointitekniikka sekä liikettä avustavat eksoskeletonit.

Kari Vehmaskoski, Lehtori, THM, Professor Honor, Erytisoaaminen terveys- ja hyvinvointitekniikka ja eksoskeletonit.

Anja Tantt, Lehtori, TtM, Erytisoaaminen työ- ja toimintakyvyn tukeminen ja ergonomia.

Katariina Korniloff, Johtava tutkija, TtT, Liikunnallisen ja digitaalisen kuntoutuksen dosentti.

Lähteet

- DeBock, S.; Ghillebert, J.; Govaerts R.; Elprama, S. A.; 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 transactions on neural systems and rehabilitation engineering. PP. 10.1109/TNSRE.2020.3041906.
- Hermens H.J., Freriks, B. C Disselhorst-Klug, G Rau. Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. J Electromyogr Kinesiol. . 2000 Oct;10(5):361-74. doi: 10.1016/s1050-6411(00)00027-4.
- Makinson, B.J. 1971. Research and Development Prototype for Machine Augmentation of Human Strength and Endurance. Hardiman I Project; Technical Report 196; National Technical Information Service (NTIS): Schenectady, NY, USA. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0724797>
- Schmalz T, Schändlinger J, Schuler M, Bornmann J, Schirrmeister B, Kannenberg A & Ernst M 2019. Biomechanical and Metabolic Effectiveness of an Industrial Exoskeleton for OverheadWork. Int. J. Environ. Res. Public Health 2019, 16, 4792.
- Sterud T, Johannessen HA & Tynes T. 2014. Work-related psychosocial and mechanical risk factors for neck/shoulder pain: a 3-year follow-up study of the general working population in Norway. Int Arch Occup Environ Health (2014) 87:471–481
- Mänttari S, Halonen J, Karkulehto J, Rauttola A-P, Säynäkangas P & Oksa J. Kädet koholla työskenteilyn keventäminen ulkoisen tukirangan avulla. Työterveyslaitoksen raportti. 2021.
- Van Engelhoven, L.; Poon, N.; Kazerooni, H.; Barr, A.; Rempel, D. & Harris-Adamson C. 2018. Evaluation of an adjustable support shoulder exoskeleton on static and dynamic overhead tasks. Human Factors and Ergonomics Society International Annual Meeting October 1-5, 2018 Philadelphia, Pennsylvania.
- Van Engelhoven, L. & Kazerooni, H. 2019. Design and Intended Use of a Passive Actuation Strategy for a Shoulder Supporting Exoskeleton. 2019 Wearable Robotics Association Conference (WearRAcon) Scottsdale, AZ, USA, March 26-28, 2019.
- Yagn, N. 1890. Apparatus for Facilitating Walking, Running, and Jumping. U.S. Patent 420,179, 28 January 1890. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Apparatus+for+Facilitating+Walking,+Running,+and+Jumping&author=Yagn,+N.&publication_year=1890

Liitteet

Liite 1. Laboratoriomittausten EMG-tulokset



Kuva 10. Selkälihasten aktiivisuudet laboratoriomittauksessa.



Kuva 11. Olkavarren ja kynärvarren lihasten aktiivisuudet laboratoriomittauksessa.

Taulukko 3. EMG-arvot (μV) eri tilanteissa laboratoriomittauksessa.

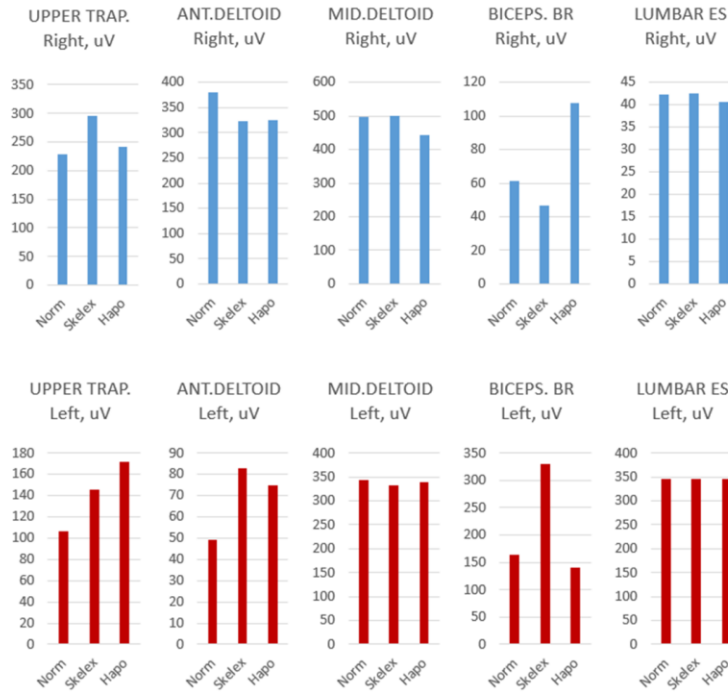
	UPPER TRAP.		ANT.DELT.		MID DELT.		THORACIC ES Dom		LUMBAR ES Dom		THORACIC ES NonDom		LUMBAR ES NonDom		BICEPS		TRICEPS		FLEX.CARP.RAD.		EXT.CARP.RAD.		
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
Norm																							
Nosto 2,5kg	Nostovaihe	242.7	93.1	357.0	142.1	282.8	143.6	18.0	7.0	15.4	8.9	30.2	16.5	30.4	28.3	123.4	78.5	60.4	42.1	52.0	38.7	150.5	61.5
	Laskuvaihe	146.8	65.6	189.7	75.2	175.7	91.1	15.0	5.5	14.0	7.7	23.9	11.3	25.3	21.4	91.8	58.2	38.6	22.7	51.4	40.2	128.0	55.3
Sivuliike hartiatasossa		188.6	79.0	320.3	148.2	260.5	172.5	21.7	8.8	25.4	15.0	28.0	17.0	26.9	22.5	143.4	68.4	48.2	40.0	67.9	47.1	141.6	74.7
Ruuvaus Ylä		181.1	92.6	220.9	84.1	223.1	153.0	11.6	5.6	11.4	7.2	14.4	10.5	11.2	8.1	92.1	63.0	42.6	24.5	50.8	34.5	137.3	80.4
Ruuvaus Ala		25.4	24.5	56.2	50.3	29.3	23.8	13.2	7.4	13.4	8.4	16.0	11.3	26.9	18.0	54.6	28.2	12.9	10.2	63.1	77.2	162.2	107.4
Skelex																							
Nosto 2,5kg	Nostovaihe	210.2	97.5	275.4	110.9	252.2	139.7	16.3	6.8	16.4	10.4	25.7	17.7	29.9	26.6	104.0	61.3	55.4	49.0	42.8	33.2	143.0	62.2
	Laskuvaihe	128.6	62.7	135.8	56.6	145.7	87.9	13.6	5.7	14.3	8.5	20.4	11.5	23.6	19.4	69.2	48.6	37.1	36.1	42.5	28.9	132.6	60.4
Sivuliike ylhäällä		166.4	66.5	220.1	87.7	174.7	105.2	22.8	6.5	28.1	13.6	27.5	14.5	26.4	17.0	105.0	65.0	36.7	25.0	54.1	41.4	157.7	84.8
Ruuvaus Ylä		152.9	73.0	166.2	75.5	161.3	111.4	12.1	4.4	13.1	6.2	15.5	11.1	12.1	8.3	66.2	49.5	37.6	21.5	46.7	33.3	139.6	74.6
Ruuvaus Ala		27.0	26.3	39.7	32.0	26.1	27.8	14.3	7.4	15.3	9.1	16.7	11.7	22.9	14.1	53.5	26.8	10.7	10.1	56.0	62.9	162.5	105.4
Comau																							
Nosto 2,5kg	Nostovaihe	217.7	96.0	279.9	120.3	244.3	121.3	18.0	8.9	16.2	9.5	27.9	17.0	26.2	22.6	103.9	64.3	57.4	39.7	39.2	30.9	142.4	82.1
	Laskuvaihe	126.8	53.8	136.0	47.3	140.3	68.6	16.0	7.4	14.5	6.6	22.8	11.9	21.9	11.5	73.0	43.7	35.4	24.4	39.5	23.1	134.1	80.5
Sivuliike hartiatasossa		183.0	69.4	238.6	111.3	210.4	129.0	22.5	8.8	26.7	13.9	30.2	15.4	29.6	23.5	117.6	54.9	46.1	34.4	58.4	36.9	155.6	64.0
Ruuvaus Ylä		167.5	80.9	178.6	79.2	163.2	118.6	13.8	5.7	13.5	7.3	16.4	10.0	12.8	9.5	83.3	59.8	40.0	20.6	51.7	33.2	147.9	55.6
Ruuvaus Ala		25.4	25.1	53.4	50.2	36.0	37.4	14.6	8.3	14.5	9.1	17.1	12.0	26.9	17.3	51.3	28.0	13.7	12.1	59.1	72.1	183.7	94.7
Hilti																							
Nosto 2,5kg	Nostovaihe	232.9	91.9	296.6	128.1	254.6	142.4	16.3	6.2	15.2	10.5	25.0	18.3	28.0	25.1	117.5	86.0	66.0	86.0	43.5	31.4	160.3	89.0
	Laskuvaihe	144.7	41.1	147.1	66.9	154.1	96.0	14.6	5.5	14.3	8.1	19.0	10.0	22.2	15.7	66.4	34.0	38.8	34.0	43.4	29.9	137.2	62.5
Sivuliike hartiatasossa		173.0	52.8	250.0	109.7	202.1	120.7	21.2	7.1	26.8	15.0	24.5	13.3	26.6	18.6	102.4	58.1	48.8	58.1	58.0	41.1	167.8	88.0
Ruuvaus Ylä		156.2	60.1	177.7	72.1	180.5	119.1	12.4	5.5	11.3	6.4	14.3	11.4	12.1	8.4	74.7	55.4	44.4	55.4	50.7	44.4	143.4	63.8
Ruuvaus Ala		27.7	23.9	46.2	43.9	26.1	23.9	12.1	5.5	12.3	5.5	16.5	10.0	25.6	17.0	57.3	39.4	14.7	37.4	54.9	63.7	167.5	72.9
Hapo																							
Nosto 2,5kg	Nostovaihe	224.2	86.6	295.9	129.6	250.8	125.4	15.8	6.5	16.8	11.0	28.3	18.9	31.4	27.2	110.8	72.7	53.7	45.4	47.5	35.5	138.1	57.5
	Laskuvaihe	136.4	57.3	159.0	66.8	142.8	74.3	13.2	5.6	14.3	7.9	21.3	12.3	24.6	17.7	79.7	49.5	31.2	22.6	45.2	34.0	115.5	46.3
Sivuliike hartiatasossa		183.3	54.5	282.0	110.8	222.7	120.3	21.2	6.1	27.5	14.2	27.9	15.3	29.1	20.8	127.9	59.0	46.3	39.6	56.9	36.6	138.9	44.6
Ruuvaus Ylä		177.2	67.0	219.3	86.0	209.5	136.3	11.9	4.2	13.4	7.6	15.7	11.2	12.8	8.8	83.8	53.2	40.2	25.5	46.3	36.3	132.6	52.3
Ruuvaus Ala		21.6	22.4	38.7	38.6	23.2	22.0	13.7	6.3	15.1	7.5	14.4	9.5	24.3	14.0	54.6	34.1	14.8	16.4	59.6	64.0	171.4	85.8

Taulukko 4. Kinemaattiset tulokset eri tilanteissa laboratoriomittauksessa.

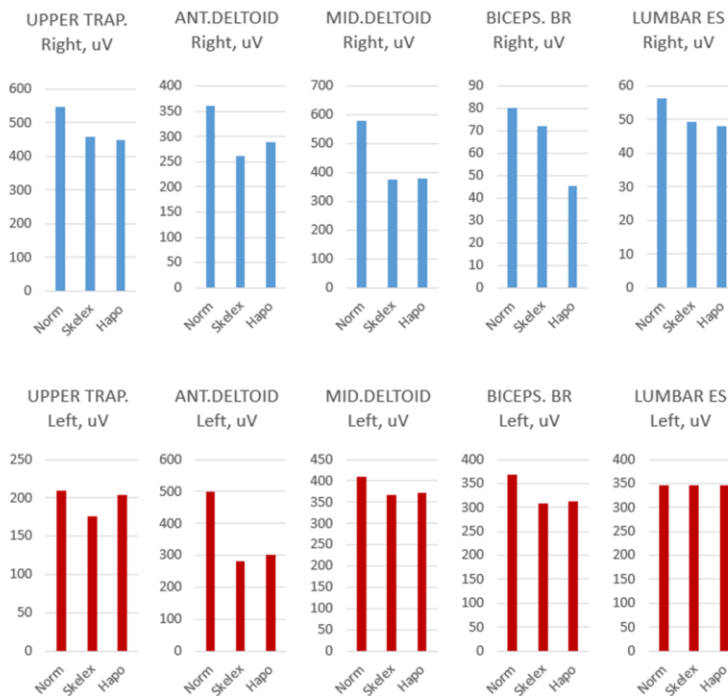
	Norm		Skelex		Hilti		Comau		Hapo	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Käden nostot										
Olkavarren maksimikoukistus	142	13	144	15	143	14	140	19	139	13
Vartalon maksimiojennuskulma	-5	7	-7	9	-3	8	-4	7	-6	10
Sivuliike										
Olkavarren keskimääräinen koukistus	85	7	83	9	85	8	84	10	86	7
Vartalon keskimääräinen ojennuskulma	4	8	5	7	6	8	4	7	5	8
Työskentely akkuruuvinvääntimellä ylhäällä										
Olkavarren keskimääräinen koukistus	110	8	112	9	109	9	111	10	113	11
Vartalon keskimääräinen ojennuskulma	-11	9	-10	11	-12	9	-11	11	-12	10
Työskentely akkuruuvinvääntimellä alhaalla										
Olkavarren keskimääräinen koukistus	5	7	6	7	5	7	7	5	5	8
Vartalon keskimääräinen ojennuskulma	1	6	2	7	2	7	3	8	2	6

Liite 2. Työpaikkamittausten yksilölliset EMG-tulokset

Nosto (palkki)



Nosto (pellit)

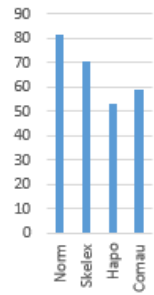


Kuva 12. Koehenkilö 2. Tutkittujen lihasten absoluuttiset EMG-tulokset normaalitilanteessa ja eksoskeleto-neilla kahdessa työtehtävässä.

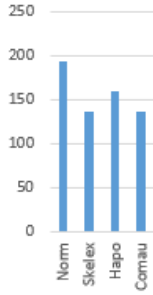
Nosto (palkki)



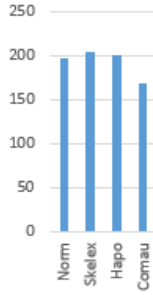
UPPER TRAP. Right, uV



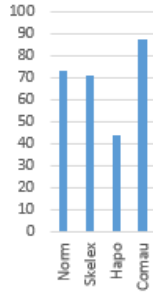
ANT.DELTOID Right, uV



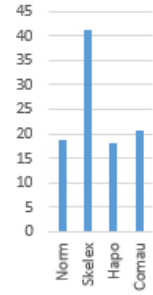
MID.DELTOID Right, uV



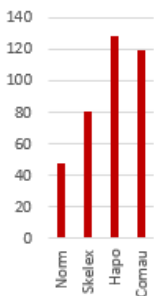
BICEPS. BR Right, uV



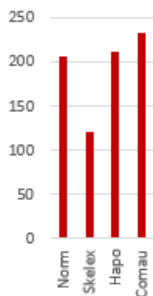
LUMBAR ES Right, uV



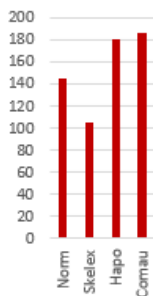
UPPER TRAP. Left, uV



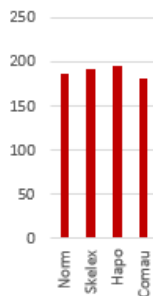
ANT.DELTOID Left, uV



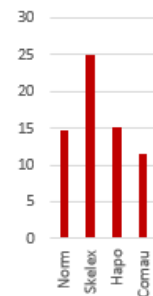
MID.DELTOID Left, uV



BICEPS. BR Left, uV



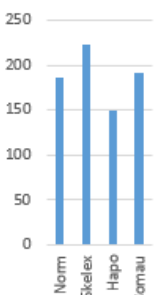
LUMBAR ES Left, uV



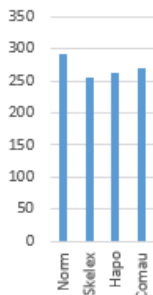
Nosto (pellit)



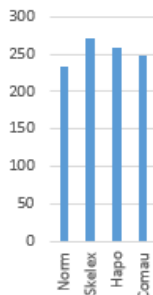
UPPER TRAP. Right, uV



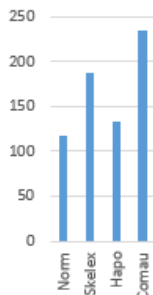
ANT.DELTOID Right, uV



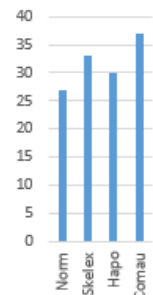
MID.DELTOID Right, uV



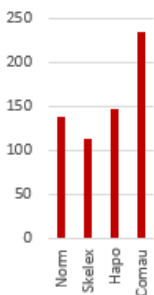
BICEPS. BR Right, uV



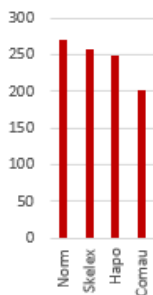
LUMBAR ES Right, uV



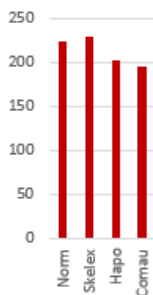
UPPER TRAP. Left, uV



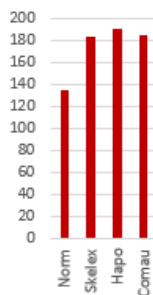
ANT.DELTOID Left, uV



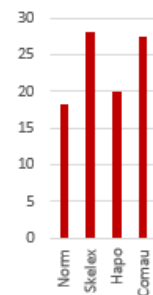
MID.DELTOID Left, uV



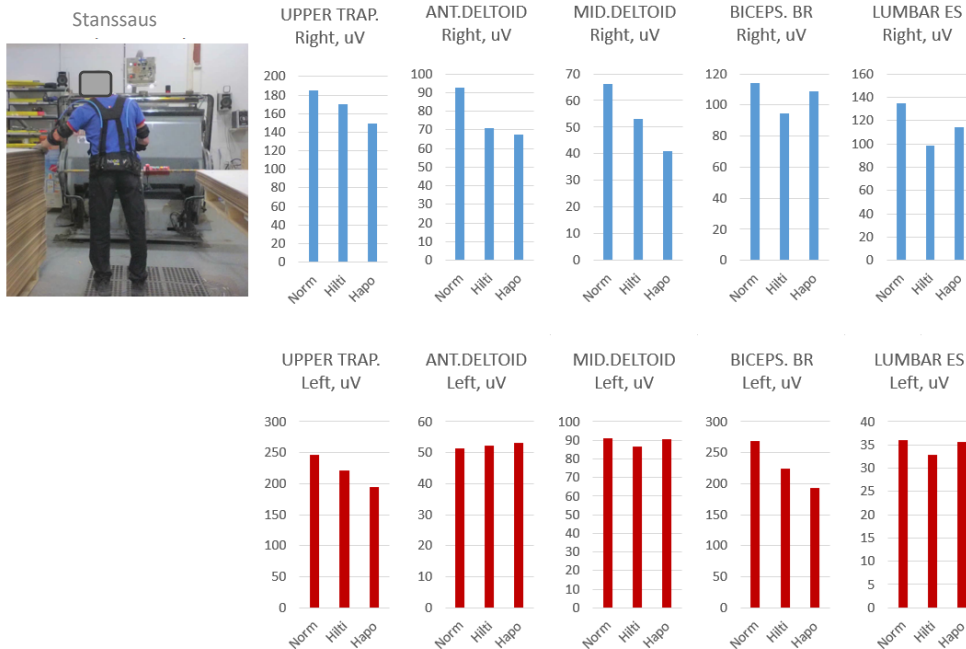
BICEPS. BR Left, uV



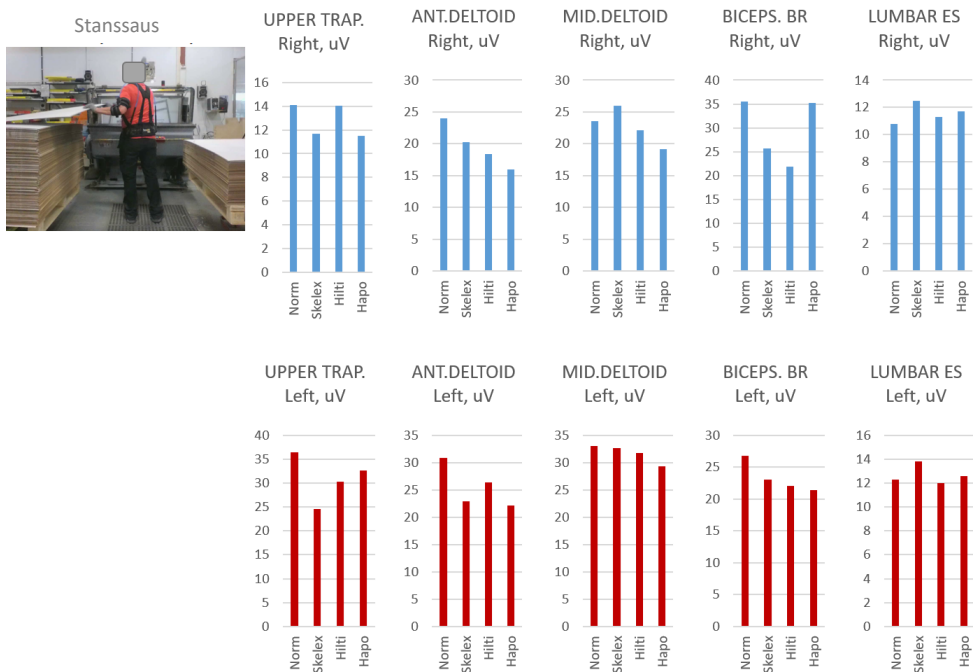
LUMBAR ES Left, uV



Kuva 13. Koehenkilö 3. Tutkittujen lihasten absoluuttiset EMG-tulokset normaalitilanteessa ja eksoskeletoneilla kahdessa työtehtävässä.

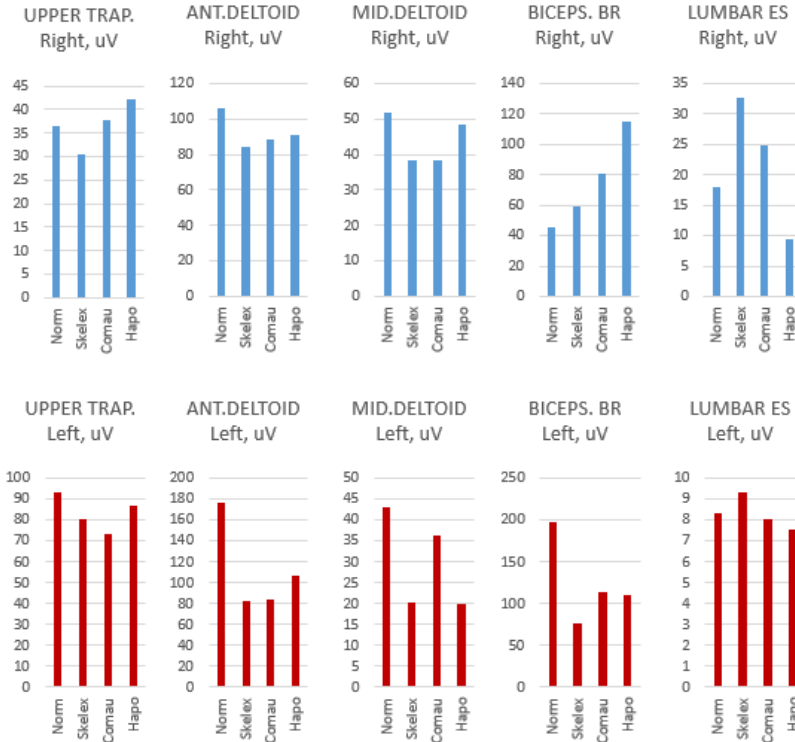


Kuva 14. Koehenkilö 4. Tutkittujen lihasten absoluuttiset EMG-tulokset normaalitilanteessa ja eksoskeletoneilla yhdessä työtehtävässä.

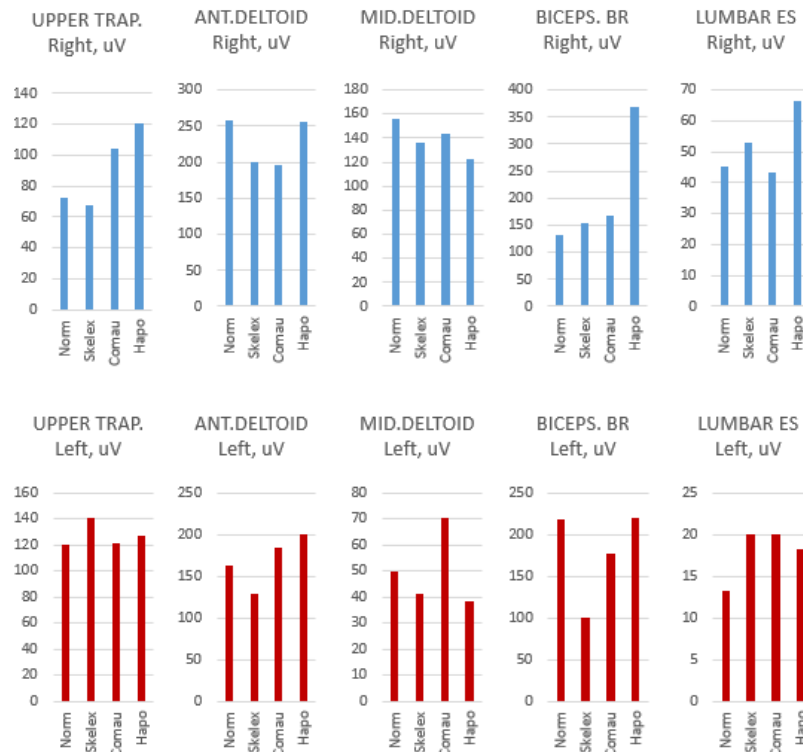


Kuva 15. Koehenkilö 6. Tutkittujen lihasten absoluuttiset EMG-tulokset normaalitilanteessa ja eksoskeletoneilla yhdessä työtehtävässä.

Valaisimen vaihto / ruuvimeissillä ruuvaus

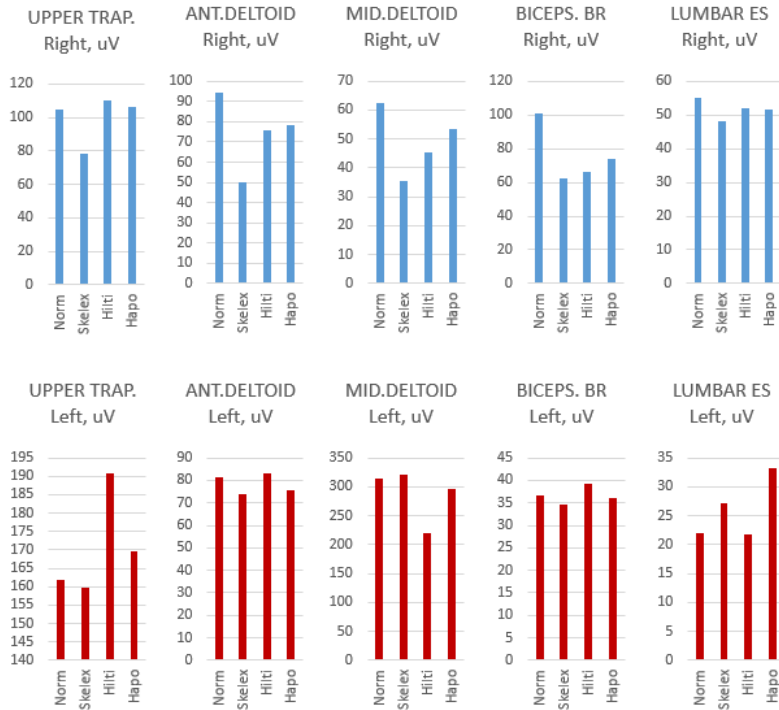


Valaisimen vaihto / akkukoneella ruuvaus

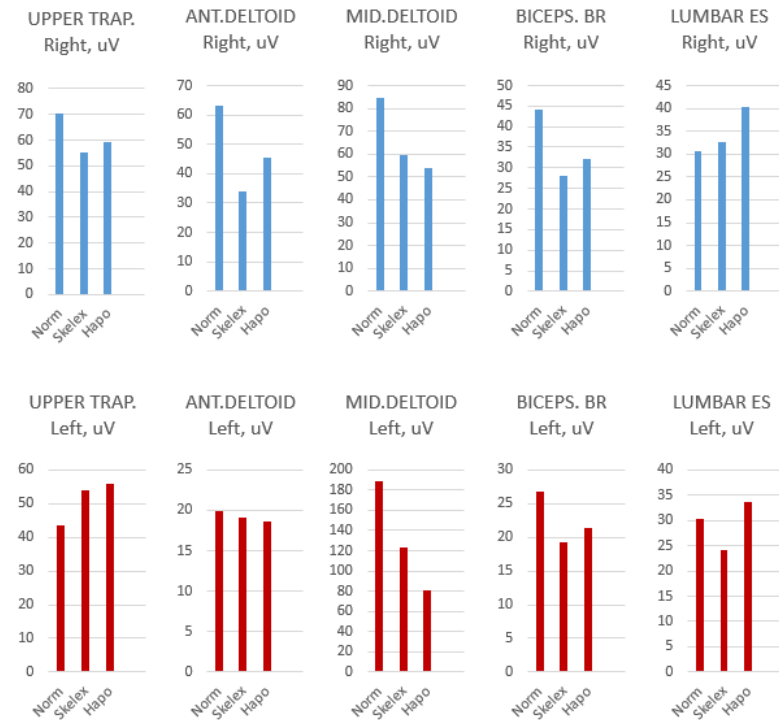


Kuva 16. Koehenkilö 7. Tutkittujen lihasten absoluuttiset EMG-tulokset normaalitilanteessa ja eksoskeletoneilla valaisimen vaihdon kahdessa eri työvaiheessa.

Nosto 1

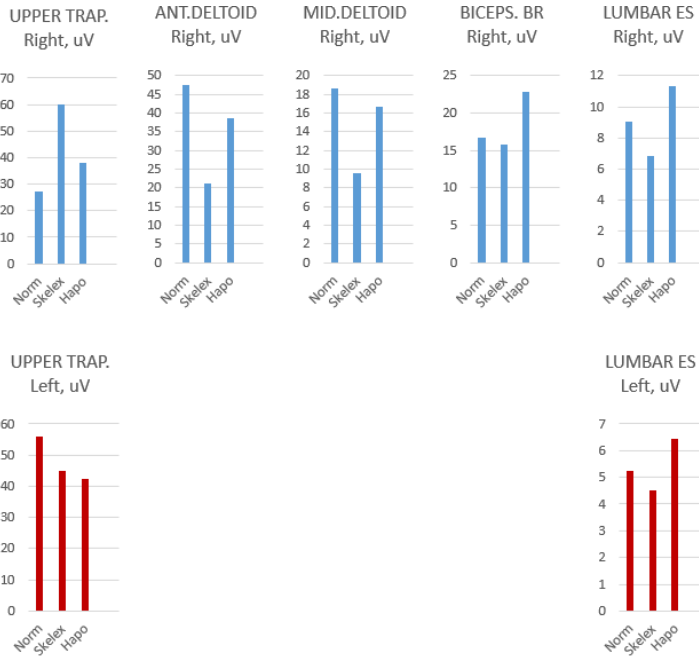


Nosto 2



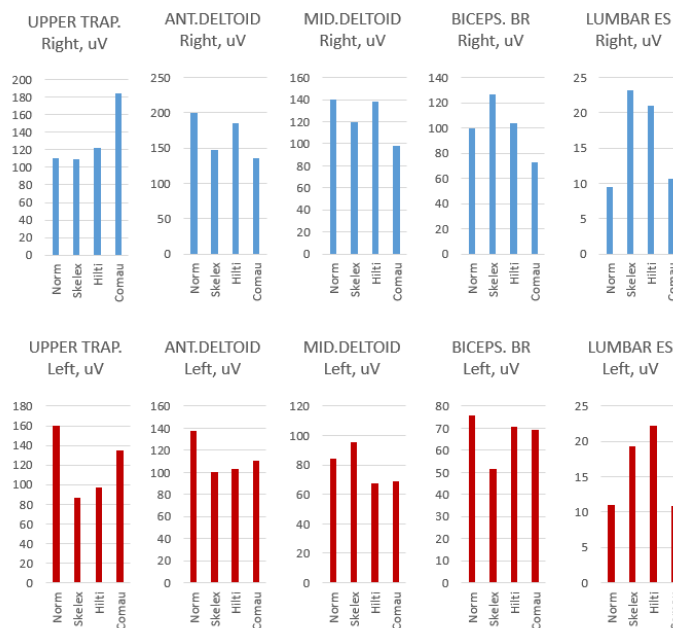
Kuva 17. Koehenkilö 11. Tutkittujen lihasten absoluuttiset EMG-tulokset normaalitilanteessa ja eksoskeletoneilla kahdessa erilaisessa nostotehtävässä.

Maalaus ruiskulla



Kuva 18. Koehenkilö 12. Tutkittujen lihasten absoluuttiset EMG-tulokset normaalitilanteessa ja eksoskeletoneilla maalaustehtävässä. Vasemmalta puolelta ei mitattu kolmea lihasta (Ant. Delt., Mid. Delt. & Biceps) työtilanteen toispuolisuuden vuoksi.

Kaiuttimen asennus



Kuva 19. Koehenkilö 13. Tutkittujen lihasten absoluuttiset EMG-tulokset normaalitilanteessa ja eksoskeletoneilla yhdessä työtehtävässä.