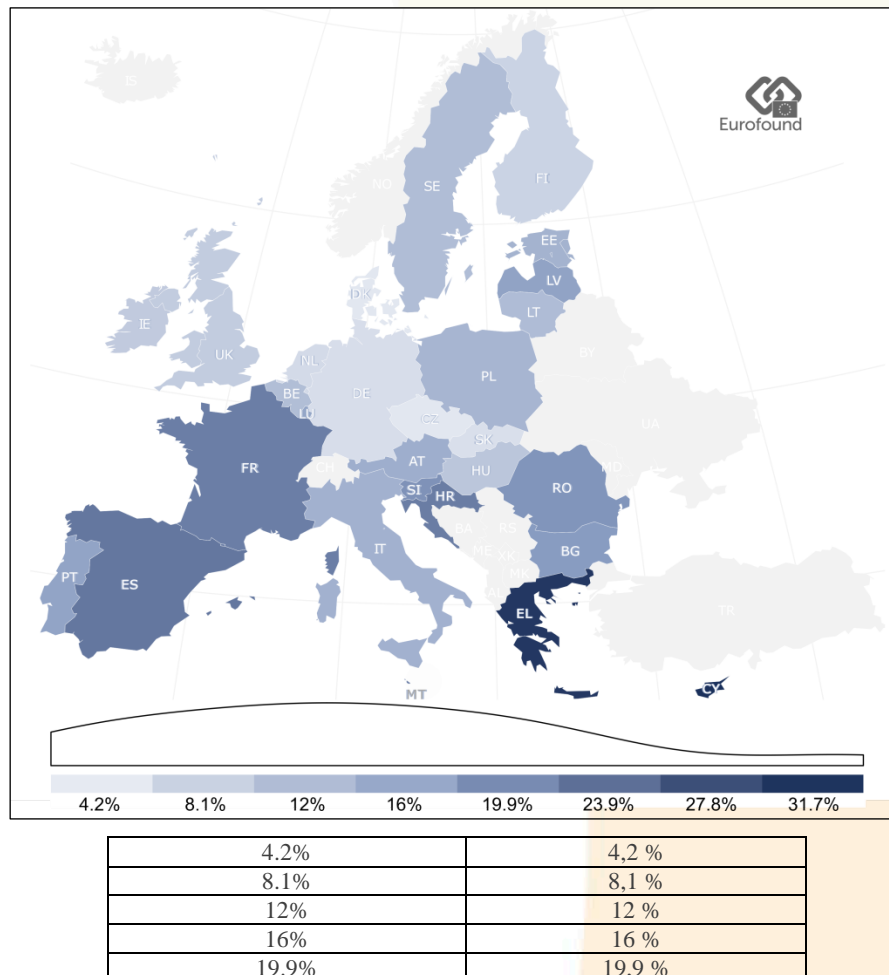


## EKSOSKELETONIEN KÄYTÖN VAIKUTUS TYÖSUOJELUUN

### Johdanto

Viime vuosina työpaikoilla on otettu käyttöön eksoskeletoneja eli ulkoisia tukirankoja. Niiden käytön odotetaan yleistyvän myös työpaikoilla, sillä eksoskeletonien prototyypit on havaittu aikaisemmin hyödyllisiksi esimerkiksi lääketieteellisessä hoidossa. Erityisesti eksoskeletonit ovat uusi lähestymistapa siihen, kuinka työperäisiin tuki- ja liikuntaelinsairauksiin (tule) voidaan puuttua. Työperäiset tule-sairaudet ovat yksi Euroopan työelämän haastavimmista ongelmista<sup>1</sup> Kuvassa 1 esitetään niiden työntekijöiden prosenttiosuudet, jotka työskentelevät kuormittavissa ja väsymystä aiheuttavissa työasennoissa. Tämä voi liittyä puutteisiin työn ja työtilojen suunnittelussa, sillä työolot ovat yhä merkittävä ongelma ympäri Eurooppaa. Eksoskeletonit on kehitetty ratkaisuksi tähän ongelmaan.

**Kuva 1 Väsyttävissä tai kivuliaissa asennoissa työskentelevien eurooppalaisten työntekijöiden prosenttiosuus (mukautettu Eurofoundin vuoden 2019 tutkimuksesta)**



<sup>1</sup> Yli 40 prosenttia Euroopan työntekijöistä kärsii alaselkäkivusta tai hartiavaivoista. Lisäksi 63 prosenttia työntekijöistä tekee toistuvia tehtäviä tai työskentelee usein (46 %) mahdollisesti vaarallisissa asennoissa (Eurofound, 2012). Tällaisissa työoloissa työskentely aiheuttaa terveysongelmia, joiden vuotuiset kustannukset ovat noin 2 prosenttia Euroopan unionin bruttokansantuotteesta (Bevan, 2015). Monet näistä ongelmista johtuvat käsin tehtävistä nostoista, kuten taakkojen nostamisesta, laskemisesta, kannattelemisesta tai kantamisesta (Zurada, 2012; Collins ja O'Sullivan, 2015). Kiertoliikkeet, kumartuminen ja työskentely kädet pään yläpuolella lisäävät myös työperäisten sairauksien riskiä. Työperäiset tule-sairaudet eivät siis ole pelkästään terveysongelma, vaan niillä on myös suuri taloudellinen vaikutus.

23.9%	23,9 %
27.8%	27,8 %
31.7%	31,7 %

Eksoskeletonit ovat puettavia laitteita, jotka tukevat tuki- ja liikuntaelimestöä hyödyntämällä erilaisia mekaanisia periaatteita. Työperäisten tule-sairauksien kannalta ne voivat vähentää lihaskuormitusta usein kuormittuvilla kehon alueilla, kuten selässä ja hartioissa. Eksoskeletoneista voi olla merkittävää hyötyä työperäisten tule-sairauksien ehkäisyssä. On hyvä kuitenkin huomioida, että uudenlaiset apuvälineet herättävät uusia työsuojelukysymyksiä. Ranskan kansallinen työsuojelulaitos (INRS) on julkaissut katsauksen työpaikkojen uusista riskitekijöistä liittyen eksoskeletonien käyttöön (INRS, 2019). Yhtäältä eksoskeletoneja voidaan pitää keinona vähentää työhön liittyvää lihaskuormitusta, sillä ne auttavat työntekijöitä fyysisesti ja saattavat ehkäistä työperäisiä tule-sairauksia tai tukea työntekijöitä, joilla on fyysisiä vammoja. Toisaalta ne voivat aiheuttaa uusia terveyshaittoja, sillä kuormitus saattaa jakautua uudelleen kehon muille alueille. Lisäksi eksoskeletonit vaikuttavat kehon motoriseen hallintaan ja nivelten sekä lihasten toiminnallisuuteen (INRS, 2018). Seurauksena voi myös olla, että työpaikoilla ihmiskeskiseen suunnitteluun keskittyvä ergonomia jää vähemmälle huomiolle. Monilla työpaikoilla ergonominen suunnittelu ei onnistu vaihtelevien olosuhteiden vuoksi, kuten esimerkiksi muuttopalveluissa tai elastustoimissa (Schick, 2018). Jatkuva nosteleminen, virheelliset asennot tai painavat henkilönsuojaimet voivat lisätä fyysisen yllirasittumisen riskiä tällaisissa ammateissa. Näissä tapauksissa eksoskeletonit voivat monella tavalla parantaa työoloja.



Inc/MONOPOLY919, ©Shutterstock

Tärkeintä on olla huolellinen käytettäessä uutta teknologiaa lähellä ihmisen kehoa. Tekniset ja organisatoriset järjestelyt on otettava huomioon työpaikkojen suunnittelussa ennen kuin työntekijöiden käyttöön annetaan eksoskeletonit. Eksoskeletonien käyttöä on viimeinen keino parantaa työpaikan ergonomiaa. Eksoskeletoneista on vielä vähän tieteellistä näyttöä ergonomian ja työn tutkimuksessa. Haasteena on tiedonsaanti eksoskeletonien pitkäaikaisvaikutuksista ihmisen biomekaniikkaan ja fysiologiaan. Tätä käytännössä vaikeuttaa (Liedtke ja Glitsch, 2018) moninaiset eksoskeletonien tyypit, erilaiset työtehtävät, joissa niitä käytetään, ja eri mittaiset käyttöajat. Lisäksi fysiologisiin tai biomekaanisiin tekijöihin liittyvien terveysvaikutusten tutkimus on vasta alussa, sillä ihmisten ja eksoskeletonien välinen vuorovaikutus on monimutkaista ja sen tutkiminen vaatii aikaa. Tarvitaan uusia lähestymistapoja eksoskeletonien vaikututtavuuden osoittamiseksi, ja jotta tämän tekniikan hyötyjä ja haittoja voitaisiin arvioida paremmin. Tämä artikkeli tarjoaa katsauksen keskusteluun, jota tällä hetkellä käydään eksoskeletonien käytöstä ja niiden arvioinnista työsuojelun kannalta.

## Eksoskeletonit

### Määritelmä

Eksoskeletoni voidaan määrittellä henkilökohtaiseksi apuvälineeksi, jolla on mekaaninen vaikutus kehoon (Liedtke ja Glitsch, 2018). Suppeammassa merkityksessä eksoskeletonit ovat kannettavaa robottitekniikkaa, joka muovaa kehoon kohdistuvia sisäisiä tai ulkoisia voimia. Lyhyesti sanottuna eksoskeletonit ovat puettavia laitteita, jotka antavat käyttäjälle lisää voimaa tai tukevat käyttäjää. Yleistä määritelmää ei vielä ole sovellusten ja erilaisten toimintojen suuren määrän vuoksi. Kirjallisuudessa vallitsee yksimielisyys siitä, että eksoskeletonit voidaan määrittellä kehon ulkoisiksi mekaanisiksi rakenteiksi (Herr, 2009; De Looze et al., 2016). Ne voidaan luokitella aktiivisiksi ja passiiviksi järjestelmiksi.

Aktiiviset eksoskeletonit tukevat ihmisen liikkeitä toimilaitteilla (mekaanisilla ohjauskomponenteilla). Toimilaitteisiin kuuluu sähkömoottori, mutta ne voivat toimia myös hydraulisesti tai pneumaattisesti (Gopura ja Kiguchi, 2009). Ne antavat työntekijälle lisää voimaa, jolloin suorituskyky paranee. Passiivisissa eksoskeletoneissa käytetään puolestaan jousia, vaimentimia tai muita materiaaleja ihmisen liikkeiden tukemiseen. Passiiviseen eksoskeletoniin varastoituva energia syntyy pelkästään käyttäjän liikkeistä (De Looze et al., 2016). Lisäksi voimat jakautuvat uudelleen siten, että tiettyjä kehon alueita voidaan suojata. Käyttäjän suorituskyvyn muutos ei johdu fyysisen voiman kasvusta, vaan kyvystä pysyä väsyttävässä asennossa aiempaa pidempään esimerkiksi työskenneltäessä kädet pään yläpuolella.

Hybridieksoskeletonit, jotka voivat olla aktiivisia tai passiivisia järjestelmiä, ovat vielä harvinaisia. Ne käynnistävät liikkeitä aivoaaltojen aktiivisuuden (EEG-signaalien) tai lihasten aktivoimisen perusteella. Niiden käyttö teollisuudessa on kuitenkin tällä hetkellä epätodennäköistä, joten niitä ei käsitellä tässä asiakirjassa tämän enempää.

### Eksoskeletonien tyypit

Eksoskeletonit voidaan jakaa kolmeen ryhmään: alavartalon, ylävartalon ja kokovartalon eksoskeletoneihin. Kirjallisuudessa on mainittu yksiniveliset eksoskeletonit (Gams et al., 2013), mutta niitä ei käsitellä tässä artikkelissa, sillä ne ovat erittäin yksilöllisiä ja niiden sovellukset ovat tapauskohtaisia. Ylävartalon eksoskeletoneissa käytetään yleensä kiinteitä mekaanisia rakenteita, joilla jaetaan yläraajoihin ja vartaloon (esim. olkavarsiin, kyynärvarsiin, hartioihin ja alaselkään) kohdistuvia voimia uudelleen. Tässä tapauksessa voimien jakaminen uudelleen tarkoittaa, että kuormitus kasvaa muissa kehon osissa, kuten lonkissa tai jaloissa. Alavartalon eksoskeletonit pystyvät siirtämään voimia maahan, jolloin tuki- ja liikuntaelimityöhön kohdistuva kuormitus pienenee. On kuitenkin tärkeä huomata, että eksoskeletonin mallilla ja toiminnalla on suuri vaikutus näihin periaatteisiin. Apujärjestelmiä, jotka tukevat samanaikaisesti ala- ja ylävartaloa, voidaan pitää kokovartalon eksoskeletoneina.

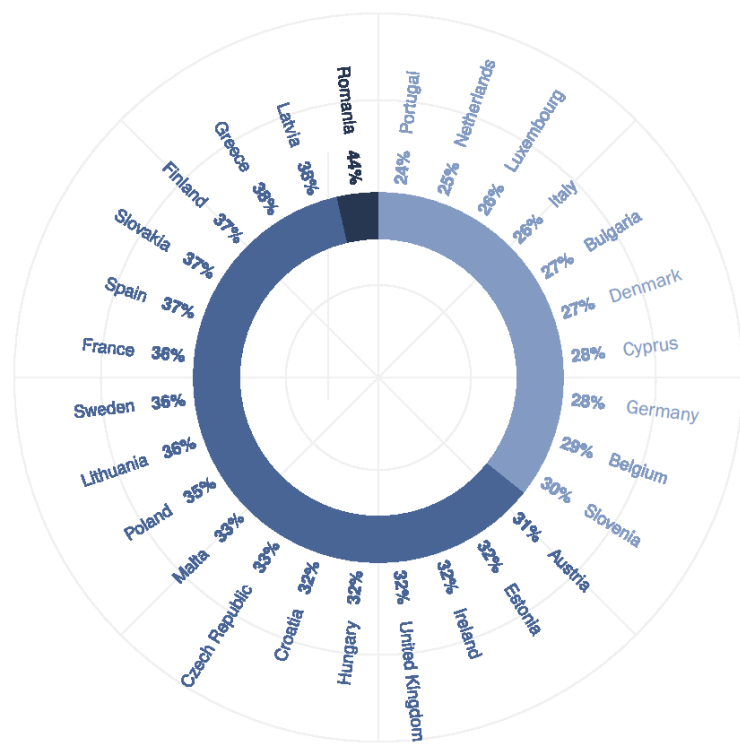
### Sovelluskohteita työpaikoilla

Ajatus ihmisen liikkeiden tukemisesta teknisillä välineillä ei ole uusi. Kannettavia tai siirrettäviä apuvälineitä, kuten eksoskeletoneja, on käytetty lääketieteellisessä hoidossa jo pitkään. Esimerkiksi ortooseja on käytetty loukkaantuneiden potilaiden kuntouttamisessa (Viteckova et al., 2013). Ortoosit voidaan kuitenkin erottaa eksoskeletoneista, sillä niillä tuetaan ihmisiä, joilla on tuki- ja liikuntaelimityön sairaus. Eksoskeletoneja on myös kehitetty sotilaalliseen käyttöön (De Looze et al., 2016). Siitä huolimatta ajatus eksoskeletonien käytöstä työntekijöiden fyysisen terveyden tukemiseen tai suojaamiseen on uusi. Vaikka ergonomistentyöolojen parantamiseen sellaisilla apuvälineillä kuin eksoskeletonit suhtaudutaan tällä hetkellä ristiriitaisesti, ne tarjoavat silti uusia mahdollisuuksia työntekijöiden suojeluun (Schick, 2018). Lisäksi ergonomisilla työoloilla on suuri merkitys tulevaisuudessa pyrittäessä varmistamaan väestörakenteen muutoksesta aiheutuvan ikääntyvän työvoiman fyysisen terveys. Tästä näkökulmasta katsottuna on erittäin tärkeää kehittää uusia ergonomisia välineitä, sillä vaihtoehtoja on tällä hetkellä vain vähän (Hensel et al., 2018; Schick, 2018).

Eksoskeletoneilla on lukuisia käyttökohteita työperäisten tule-sairauksien ehkäisyssä. Euroopassa yli 30 prosenttia työtehtävistä liittyy käsin tehtäviä nostoja (Eurofound, 2012), mikä aiheuttaa suuren terveysriskin. Työssä, johon liittyy toistuvia tehtäviä, raskaiden taakkojen käsittelyä, työskentelyä kädet pään yläpuolella tai vaarallisia asentoja, voidaan käyttää eksoskeletoneja monin tavoin. Kuvasta 2 käy

ilmi, että raskaiden taakkojen siirtäminen ja kantaminen muodostaa merkittävän osan työstä jokaisessa Euroopan maassa. Varsinkin Romaniassa lähes puolet työntekijöistä (44 %) käsittelee toisinaan raskaita taakkoja. Tässä yhteydessä huomionarvoisia aloja ovat teollisuuden työpaikat, muuttokuljetuspalvelut, pelastustoimi ja sairaalat. On silti tärkeää huomioida ergonominen suunnittelu myös paikallaan tehtävässä työssä. Jos ergonomiaa voidaan parantaa teknisillä tai organisatorisilla toimenpiteillä, eksoskeletonien käyttö ei ole suositeltavaa (Schick, 2018). Vaikuttaa kuitenkin siltä, että työntekijöiden suorituskykyä parantavat eksoskeletonit ovat houkuttelevampia kuin työpaikkojen ihmiskeskeisen suunnittelun parantaminen (Baltrusch et al., 2018).

**Kuva 2 Raskaita taakkoja käsittelevien kaikenikäisten työntekijöiden osuudet (%) Euroopassa (Eurofound, 2019)**



24%	Portugal	24 %	Portugali
25%	Netherlands	25 %	Alankomaat
26%	Luxembourg	26 %	Luxemburg
26%	Italy	26 %	Italia
27%	Bulgaria	27 %	Bulgaria
27%	Denmark	27 %	Tanska
28%	Cyprus	28 %	Kypros
28%	Germany	28 %	Saksa
29%	Belgium	29 %	Belgia
30%	Slovenia	30 %	Slovenia
31%	Austria	31 %	Itävalta
32%	Estonia	32 %	Viro
32%	Ireland	32 %	Irlanti
32%	United Kingdom	32 %	Yhdistynyt kuningaskunta
32%	Hungary	32 %	Unkari
32%	Croatia	32 %	Kroatia
33%	Czech Republic	33 %	Tšekki
33%	Malta	33 %	Malta
35%	Poland	35 %	Puola
36%	Lithuania	36 %	Liettua
36%	Sweden	36 %	Ruotsi
36%	France	36 %	Ranska
37%	Spain	37 %	Espanja
37%	Slovakia	37 %	Slovakia

37%	Finland	37 %	Suomi
38%	Greece	38 %	Kreikka
38%	Latvia	38 %	Latvia
44%	Romania	44 %	Romania

Teknisistä syistä aktiivisilla eksoskeletoneilla ei juuri ole käytännön merkitystä. Useissa raporteissa on esitetty ongelmia, jotka liittyvät aktiivisten eksoskeletonien painoon, mekaaniseen rakenteeseen, akkutuki ja käyttömekaniikan suunnitteluun (Yang et al., 2008; Herr, 2009; De Looze et al., 2016). Passiivisia eksoskeletoneja sen sijaan on jo kaupallisesti saatavilla. Tällaisia passiivisia järjestelmiä on kuitenkin saatavilla vielä vähän, koska alkuvaiheessa voidaan helpottaa vain tiettyihin kehon osiin kohdistuvaa kuormitusta. Apu raskaissa nostotehtävissä on yhä rajallista.

Eksoskeletonien käyttöala vaikuttaa paljon niiden aiottuun käyttöön. Teknisten sovellusten lisäksi eksoskeletoneja voidaan käyttää henkilönsuojaimina tai lääkinällisinä tuotteina. Sovelluskohde määrää, millainen sertifiointi on tarpeen. Nämä sertifiointit liittyvät vahvasti työsuojelukysymyksiin.

## Eksoskeletonien sertifiointi

Koska eksoskeletoneilla on paljon erilaisia käyttökohteita kuntoutuksessa, teollisuudessa ja sotiilaalisessa käytössä, ja koska niiden rakenteet vaihtelevat, eksoskeletonien sertifiointille ei vielä ole yhtenäistä sääätelyä. Tämän puutteen korjaaminen vaatii pohdintaa eksoskeletonien toiminnallisesta suunnittelusta ja käyttötarkoituksista. Tässä mielessä eksoskeletonit voidaan luokitella teknisiksi laitteiksi, jotka tukevat työntekijöitä työtehtävissä. Ne voidaan myös luokitella henkilönsuojaimiksi. Tässä tapauksessa eksoskeletonit suojaavat työntekijää fyysisiltä kuormilta, jotka voivat aiheuttaa työperäisiä sairauksia, kuten rasitusvammoja. Tällä hetkellä ei ole yksimielisyyttä siitä, voivatko eksoskeletonit suojata tule-sairauksilta, mikä puolestaan vaikeuttaa niiden luokittelua.

Eksoskeletonien käytännön sovelluksiin liittyy aina sertifiointi. Kuten aiemmin mainittiin, eksoskeletonit voidaan määrittellä teknisiksi apuvälineiksi koneista annetun EU:n direktiivin (2006/42/EY) säädösten perusteella. Lisäksi aktiiviset järjestelmät voidaan määrittellä kansainvälisten robotteja ja robotiikkalaitteita koskevien säädösten (ISO 10218-1:2011) ja henkilökohtaiseen hoitoon tarkoitettujen robottien turvallisuusvaatimuksia koskevien säädösten (ISO 13482:2014) mukaisesti.

Jos eksoskeletoni sertifioidaan EU:n direktiivin 89/686/ETY mukaisena henkilönsuojaimena, sitä voidaan käyttää työperäisten vammojen tai rasitusvammojen ehkäisyyn. On syytä mainita, että direktiivin 89/686/ETY korvaa vähitellen uusi asetus (EU) 2016/425, joka koskee henkilönsuojaimia.

Lisäksi eksoskeletoneja voidaan pitää EU:n direktiivissä (93/42/ETY) tarkoitettuina lääkinällisinä laitteina. Lääkinällisten laitteiden turvallisuudelle ja suorituskyvyllä on tiukat standardit. Haasteena on lääketieteellisen tehon kliininen arviointi, sillä sitä on edelleen vaikea todistaa. Nämä kaikki vaatimukset ovat kuitenkin tarpeen, jotta eksoskeletoneja voitaisiin hyödyntää kuntoutuksessa, lääketieteellisissä sovelluksissa tai ihmisten osallistamisessa (Schick, 2018).

## Työpaikan riskinarviointi ja eksoskeletonit

Työnantajilla on yleinen velvollisuus varmistaa turvallinen ja terveellinen työympäristö ja ehkäistä mahdollisia riskejä työskentelyn aikana. Työpaikan riskinarviointit, joissa otetaan huomioon kaikki mahdolliset ammatteihin liittyvät vaarat, ovat pakollisia ja koskevat kaikkia Euroopan työnantajia. EU:n puitteidirektiivissä (89/391/ETY) käsitellään riskinarviointitoimenpiteitä. Niitä ovat esimerkiksi työhön liittyvien vaarojen ehkäiseminen, tiedon ja koulutuksen antaminen työntekijöille ja organisaatioille ja tarvittavien toimenpiteiden toteuttaminen. Työnantajan on tunnistettava eksoskeletonien käyttöön työpaikoilla liittyvät riskit.

Eksoskeletonien muotoilussa ja toimivuudessa voi mahdollisesti olla riskejä, jotka ilmenevät vasta käytössä työpaikoilla. Aktiivisissa järjestelmissä voi olla mekaanisia ja teknisiä vikoja. Tällöin toimintahäiriöt voivat aiheuttaa loukkaantumisia, sillä aktiivisten eksoskeletonien käyttömekanismit voivat kohdistaa lisävoimia työntekijän kehoon. Tällä hetkellä on vaikea luokitella puettavien laitteiden voimia ja niiden yhteyttä vammoihin. Yleisenä viitteenä voidaan pitää yhteistyörobottien biomekaanisia kynnysarvoja (ISO/TS 15066:2016) (Schick, 2018). Voidaan kuvitella, että eksoskeletonit voivat lisätä vammojen riskiä henkilön liukastuessa, kompastuessa tai kaatuessa. Niiden vaikutusta pidetään

kuitenkin tällä hetkellä pienenä, kun ne puetaan ylävartaloon ja kävellään tasaisella alustalla (Kim et al., 2018). Siitä huolimatta eksoskeletonien rakenne ja paino saattavat rajoittaa työntekijöiden luontaista liikkumisvapautta. Tämä vaikeuttaa tasapainon palauttamista kompensoivilla liikkeillä kaaduttaessa. Siksi seuraukset voivat olla vakavampia kuin ilman eksoskeletonia. Lisäksi on huomioitava mahdolliset törmäykset eksoskeletonien ja työkaluston, robottien tai rakennuskoneiden välillä. Tämän yhteydessä eksoskeletonien käytännön soveltuvuutta tutkitaan tietokonesimulaatioilla virtuaalisissa tehdasympäristöissä (Constantinescu et al., 2016). Niiden pohjalta on ilmoitettu useista rajoituksista, jotka liittyvät työpaikkojen ja integroitujen eksoskeletonien uudelleensuunnitteluun. Hätätapauksissa rakennukset on voitava evakuoida nopeasti kaikkien työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden varmistamiseksi. Siksi eksoskeletonit on voitava poistaa tai riisua nopeasti. Suunnittelijoiden on myös kiinnitettävä huomiota tilanteisiin, joissa työntekijät saattavat olla yksin.

Yhteenvetona eksoskeletonien turvallisuus- ja terveysvaaroja voidaan arvioida eri skenaarioissa, mutta niitä ei ole vielä määritetty. Yhtenä syynä tähän on se, että tieteellistä näyttöä on vähän (Schick, 2018), samoin käytännön kokemusta. Varsinkaan eksoskeletonien pitkäaikaisia vaikutuksia tuki- ja liikuntaelimityöhön ei tunneta. Siksi tarvitaan lisää kattavia tutkimuksia, joissa otetaan huomioon eksoskeletonien ihmisiin liittyvät, fysiologiset, lääketieteelliset ja biomekaaniset näkökohdat.

## Eksoskeletonien arviointi

Eksoskeletonien hyödyistä ja haitoista väitellään tällä hetkellä kirjallisuudessa. Yleensä ottaen eksoskeletonit ovat tutkijaryhmille lupaava tilaisuus parantaa työpaikan ergonomiaa ja vähentää mekaaniseen materiaalien käsittelyyn usein liittyvien työperäisten tule-sairauksien määrää (Hensel et al., 2018). Tuki- ja liikuntaelimityön fyysiset vaatimukset eivät kuitenkaan ole ainoa huomioon otettava seikka. Eksoskeletonit voivat myös vaikuttaa sosiaalisiin ympäristöihin tai muihin fysiologisiin parametreihin, kuten verenpaineeseen, hapenkulutukseen ja sykkeeseen.

## Fysiologiset näkökohdat

Ulkoisen rakenteen, kuten eksoskeletonin, pukemisella työntekijän päälle voi olla haitallisia fysiologisia vaikutuksia. Kirjallisuudessa on jo osoitettu, että eksoskeletonin lisäpaino saattaa lisätä sydän- ja verisuonijärjestelmän kuormitusta (Theurel et al., 2018), joskaan vaikutuksia ei vielä tunneta hyvin. Aiempi tutkimus osoitti, mitä vaikutuksia lisäpainolla oli energiavaatimukseen liikkumisen aikana: hapenkulutus kasvoi suhteessa kannettuun painoon. Energiankulutukseen vaikuttavat kuitenkin paljon sukupuoli, kävelynopeus ja ruumiinpaino (Holewijn et al., 1992). Sen sijaan Whitfield et al. (2014) osoittivat, että ergonominen nostoapuväline ei lisää hapenkulutusta toistuvien tehtävien aikana, vaikka nostoapuvälineen lisäpaino otettiin huomioon. Nämä tulokset vastaavat eri tutkimusryhmien havaintoja, jotka eivät tunnista mitään muutoksia henkilökohtaisia nostoapuvälineitä käyttävän tutkittavan sykkeessä (Godwin et al., 2009; Lotz et al., 2009). Mitä tulee teollisiin sovelluksiin, Whitfield et al. (2014) esittivät päätelmänä, että henkilökohtaisia nostoapuvälineitä ei pidä käyttää työtehtävien laajentamiseksi. Nämä erilaiset johtopäätökset saattavat perustua aiemmin tutkittujen eksoskeletonien monimuotoisuuteen. Eksoskeletonin mekaanisen rakenteen ja toiminnan lisäksi aineenvaihduntaan saattavat vaikuttaa työtehtävien dynaamiset tai staattiset olosuhteet, mikä vaikeuttaa edelleen yleisimpien toteamusten esittämistä. Eksoskeletonit voivat kuitenkin tietyissä olosuhteissa vähentää lihasväsymystä, ja sitä kautta niillä voi olla suuri vaikutus työntekijöiden terveyteen, sillä lihasväsymyksen on osoitettu lisäävän loukkaantumisriskiä (Godwin et al., 2009; Lotz et al., 2009). Pysyvällä tukemisella voi myös olla kielteisiä pitkäaikaisvaikutuksia tuki- ja liikuntaelimityöhön. Voidaan ajatella, että lihassassa pienenee ja sitä kautta fyysinen voima heikkenee, mutta nämä vaikutukset liittyvät tiiviisti eksoskeletonin antaman lihastuen määrään.

Lisäksi niissä kohdissa, joissa eksoskeletoni kiinnitetään kehoon, voi muodostua painepisteitä. Ne voivat aiheuttaa epämukavuutta ajan myötä. Voidaan myös ajatella, että hihnojen tai vöiden verisuoniin kohdistama ulkoinen paine vähentää veren virtausta kyseisessä kehon osassa. Lisäksi eksoskeletonin käyttö toistuvissa tehtävissä, joissa kädet ovat pään yläpuolella, voi vaikuttaa sykkeeseen tai verenpaineeseen. On myös mahdollista, että kitka aiheuttaa ihoärsytystä tai että ilmenee allergisia reaktioita. Tällaiset tekijät ovat kuitenkin spekulatiivisia, ja niihin on suhtauduttava varovaisesti.

## Käyttäjien hyväksyntä ja psykososiaaliset tekijät

Työntekijään kohdistuvien eksoskeletonien fyysisten vaikutusten lisäksi työntekijän halukkuudella käyttää laitteita voi olla suuri vaikutus työpaikalla. Eksoskeletonien käytön hyväksyntä on erittäin tärkeää, jos niitä on tarkoitus käyttää pitkäaikaisesti. On tehty muutamia tutkimuksia, joissa huomioidaan eksoskeletonien subjektiivinen arviointi ja käsitellään teknologian hyväksyntää (Gilotta et al., 2018; Hensel et al., 2018). Vaikka monet käyttäjät suhtautuvat lujiin eksoskeletoneihin myönteisesti, Hensel et al. (2018) osoittivat, että niiden hyväksyntä saattaa heikentyä ajan myötä ja liittyy vahvasti epämukavuuteen ja käytettävyyteen. Epämukavuus on haasteellisinta, ja voi vaikeuttaa eksoskeletonien käytön laajentumiseen teollisuuden työpaikoilla (Bosch et al., 2016). On jälleen syytä mainita, että arvioinnit ovat tehtävä- ja laitekohtaisia eikä niitä voi siksi yleistää. Havainnot kuitenkin viittaavat siihen, että suunnittelijoiden on syytä ottaa huomioon eksoskeletonien toiminta, paino ja ergonomia. Lisäksi työntekijät saattavat kokea alemmuutta käyttäessään eksoskeletonia päivittäisissä työtehtävissä, koska työsuorituksen fyysinen osuus liittyy laitteeseen. Gilotta et al. (2018) mainitsivat, että sosiaaliset vaikutukset voivat heikentää laitteiden käytön hyväksyntää. Eksoskeletonien käyttö voi myös aiheuttaa leimautumista työpaikoilla, koska voi vaikuttaa siltä, että työntekijät ovat riippuvaisia niiden antamasta tuesta.

## Biomekaaniset näkökohdat

Lukuisat tähän mennessä tehdyt tutkimukset osoittavat, että eksoskeletonit voivat vähentää tiettyyn kehon alueeseen, kuten olkaniveliin tai selkärangan alaosaan, kohdistuvaa fyysistä kuormitusta (Abdoli-E et al., 2006; Graham et al., 2009; Bosch et al., 2016; De Looze et al., 2016; Theurel et al., 2018; Weston et al., 2018). Saattaa kuitenkin olla olennaista, että fyysisen kuormituksen jakaminen uudelleen voi lisätä kuormitusta kehon toisilla alueilla, ellei voimia siirry maahan (Theurel et al., 2018; Weston et al., 2018). Tässä yhteydessä Weston et al. (2018) totesivat, että ylävartalon eksoskeletoni lisää lannerankaan kohdistuvaa kuormitusta. Theurel et al. (2018) osoittivat, että ylävartalon eksoskeletoni voi vähentää olkanivelten lihaksiin kohdistuvaa rasitusta. Tutkimuksissa on huomattu fyysisiä vaikutuksia, kuten lihasvoiman käytön lisääntymistä kehon toisilla alueilla ja liikesarjojen muutoksia. Lisäksi eksoskeletonin lisäpaino rasittaa sydän- ja verisuonijärjestelmää ja siirtää ruumiinpainon keskipistettä, mikä vaikuttaa laitteen kantajan lihaskuntoon. On tärkeää mainita, että eksoskeletonien vaikutuksia ihmiskehoon ei voida yleistää. Biomekaaniset tutkimuskysymykset liittyvät usein hyvin täsmällisiin liikkeisiin ja lihastyöhön, eikä niissä oteta huomioon eksoskeletonien kaikkia mahdollisia käyttötapoja ja tyyppejä. Ne voivat siitä huolimatta antaa tietoa tiettyjen eksoskeletonien mekaanisten vaikutusten aiheuttamasta toimintakyvyn puutteesta tai niiden vaikutuksista kehon rasituksen ja kuormitukseen.

## Työsuojelulliset haasteet

Uuden teknologian käyttö työpaikoilla edellyttää aina työterveyden ja -turvallisuuden kriittisen arvioinnin sidosryhmien kannalta. Puitedirektiivin (89/391/ETY) mukaan ihmiskehkeinen suunnittelu on perusedellytys. Tiivistäen sanottuna tämä tarkoittaa, että tavanomaisilla työpaikoilla ei tarvita lisätoimenpiteitä. Nykyisin ergonomiset työolot eivät ole itsestään selvyyttä edes Euroopassa uusien teknologioiden aiheuttaessa uudenlaisia tule-vaivoja. Jotta turvallinen työympäristö voitaisiin varmistaa, on käytettävä puitedirektiivin (89/391/ETY) mukaisia teknisiä, organisatorisia ja yksilöllisiä toimenpiteitä. Työterveys- ja -turvallisuuskulmasta näitä toimenpiteitä on velvollisuus soveltaa hierarkkisesti. Kun kaikki tekniset toimenpiteet, kuten nostoapuvälineiden käyttö tai työpaikan uudelleensuunnittelu, on kokeiltu, on otettava huomioon organisatoriset näkökohdat, kuten työprosessien uudelleenjärjestely. Viimeisenä keinona harkitaan yksittäistä työntekijää suojaavia toimenpiteitä.

Kuten aiemmin mainittiin, eksoskeletoneja voidaan pitää teknisinä tai lääkinällisinä laitteina tai suojavarusteina. Sovelluksella, suunnittelulla ja käyttötarkoituksella on suuri vaikutus eksoskeletonien luokitteluun. Niinpä eksoskeletoneja voidaan tällä hetkellä arvioida ainoastaan tapauskohtaisesti. Voidaan ajatella, että eksoskeletonit ovat teknisiä laitteita, joilla helpotetaan työprosesseja. Eksoskeletoneja pidetään henkilönsuojaimina, jos niillä parannetaan työpaikan suunnittelua kun on tarpeen suojella työntekijöitä rasitusvammoilta.

Tulevaisuudessa eksoskeletonien arviointi on sisällytettävä perinteiseen ergonomiseen lähestymistapaan (ihmiskeskeiseen suunnitteluun), sillä laitteet vaikuttavat työtilanteisiin ja organisatorisiin näkökohtiin.

## Työntekijät

Työntekijöiden käyttövaatimukset vaihtelevat kyseisen eksoskeletonin luokituksen mukaan. Jos eksoskeletonit on luokiteltu tekniseksi laitteeksi, ne on sidottu työpaikkoihin eikä niitä voida käyttää jokaisessa mahdollisessa työtilanteessa, jollei niitä ole suunniteltu kyseistä sovellusta varten. Tekniset laitteet eivät kuitenkaan ole henkilökohtaisia suojaustoimenpiteitä, ja niiden käyttö on vapaaehtoista. Jos eksoskeletoni on sertifioitu henkilönsuojaimena, sen käyttö on lain mukaan pakollista. Tässä tapauksessa eksoskeletonin on oltava työntekijän käytössä niin kauan, kuin hän altistuu suurentuneelle työkuormitukselle.

## Työnantajat

Työnantajien on otettava huomioon erilaisia seikkoja eksoskeletonien käyttöönotossa ja käytössä. Henkilönsuojainten hygieniavaatimukset ovat kattavammat kuin teknisten apuvälineiden. Jos eksoskeletoni on henkilönsuojain, sen käyttö on pakollista. Jotta vaatimukset voitaisiin täyttää, eksoskeletoni on työpaikalla annettava jokaisen työntekijän käyttöön henkilönsuojaimena. Tämä voi aiheuttaa haasteita suojainten varastoinnille. Lisäksi on otettava huomioon laitteiden käytön pitkäaikaiset vaikutukset, tule-sairaudet, seuraukset sydän- ja verisuonijärjestelmään sekä suorituskykyyn liittyvät seikat. Saatavilla on myös oltava tarvittavat puhdistusaineet tai -laitteet, jotta hygieniavaatimukset täytyisivät. Teknisiksi apuvälineiksi luokiteltujen eksoskeletonien käyttö on vapaaehtoista, eikä sellaista tarvitse olla työpaikalla jokaisen työntekijän saatavilla. Tällöin eksoskeletoneja on kuitenkin pidettävä apuvälineinä (tukivälineinä) eikä tapana parantaa työntekijöiden suorituskykyä tai tehokkuutta.

## Päätöksentekijät

Tulevaisuudessa päätöksentekijöiden on otettava huomioon eksoskeletonien teknisiä näkökohtia ja käyttöä koskevat säädökset, jotta uuden teknologian sertifiointi helpottuisi. Tällöin valmistajat voivat luokitella tuotteet selkeästi ja työntekijät voivat käyttää eksoskeletoneja niiden suunniteltuun käyttötarkoitukseen. On kuitenkin syytä mainita, että tuotteen käyttötarkoitus ja sitä vastaava sertifiointi ovat aina valmistajan vastuulla.



## Tiivistelmä

Eksoskeletonit herättävät tällä hetkellä paljon kiinnostusta. Lupaavista mahdollisuuksista huolimatta eksoskeletonien laaja käyttö eri aloilla on syytä kyseenalaistaa. Nähtäväksi jää, voidaanko eksoskeletoneja käyttää tulevaisuudessa laajasti työntekijöiden suojaamiseen rasitusvammoilta tai työn tuottavuuden parantamiseen. Tekninen kehitys määrää, tuleeko eksoskeletoneista arkinen työkalu ruumiillisissa työtehtävissä vai jäävätkö ne kapean erikoisalan tuotteiksi. Nykyinen kaupallinen kiinnostus eksoskeletoneihin voi haitata tulevaa kehitystä, sillä suorituskykyyn tai taloudellisuuteen keskittyminen voi syrjäyttää työturvallisuuden kehittämisen. Eksoskeletoneja voidaan silti käyttää työpaikoilla teknisinä tai lääkinällisinä laitteina tai henkilönsuojaimina. Yhtenäistä määritelmää ei kuitenkaan ole olemassa eksoskeletonien erilaisten toimintojen, suunnittelun ja käyttötarkoitusten vuoksi, mikä vaikeuttaa niiden käyttöönottoa käytännössä sertifiointin kannalta. Eksoskeletonien vaikutuksia työntekijöiden terveyteen tunnetaan vielä heikosti, vaikka on tehty useita eksoskeletonitutkimuksia, joissa on otettu huomioon erilaiset käytettävyyss- ja toimivuusnäkökohdat. Varsinkaan eksoskeletonien pitkäaikaisia vaikutuksia fysiologisiin, psykososiaalisiin ja biomekaanisiin muuttujiin ei tunneta. Tulevissa tutkimuksissa pitäisi käsitellä eksoskeletonien käytännön pitkäaikaisvaikutuksia työpaikalla, jotta saataisiin luotettavia tuloksia. On syytä mainita, että eksoskeletonien käyttöä ergonomian parantamiseen paikalla tehtävässä työssä ei voida suositella. On olemassa monia liikkuvia työympäristöjä, joissa työolojen ergonomiaa ei voida enää kehittää ja missä eksoskeletonit voivat tulevaisuudessa olla lupaava keino vähentää työperäisiä tule-sairauksia.

*Laatijat: Peters, M. ja Wischniewski, S. (2019). Federal Institute for Occupational Safety and Health, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund, Saksa.*

*Hankkeen hallinta: Annick Starren, Emmanuelle Brun, Euroopan työterveys- ja työturvallisuusvirasto (EU-OSHA), 2109*

*Kiitämme tri Lars Adolphia, professori tri Ute Latzaa ja ryhmää EU-OSHAn kansallisia koordinaatiokeskuksia kriittisistä arvioista ja hyödyllisistä ehdotuksista. Haluamme myös kiittää EUROFOUNDia siitä, että saimme käyttää heidän kuvia tässä artikkelissa.*

*Artikkelin tilasi Euroopan työterveys- ja työturvallisuusvirasto (EU-OSHA). Sen sisällöstä sekä siinä mahdollisesti esitetystä näkemyksistä ja päätelmistä vastaavat yksin laatijat, eivätkä ne välttämättä vastaa EU-OSHAn kantaa.*

## Viitteet

- 89/391/ETY. Neuvoston direktiivi 89/391/ETY, annettu 12 päivänä kesäkuuta 1989, toimenpiteistä työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden parantamisen edistämiseksi työssä. Euroopan unionin neuvosto.
- 89/686/ETY. Neuvoston direktiivi 89/686/ETY, annettu 21 päivänä joulukuuta 1989, henkilönsuojaimia koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä. Euroopan unionin neuvosto.
- 93/42/ETY. Neuvoston direktiivi 93/42/ETY, annettu 14 päivänä kesäkuuta 1993, lääkinnällisistä laitteista. Euroopan unionin neuvosto.
- 2006/42/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, annettu 17 päivänä toukokuuta 2006, koneista ja direktiivin 95/16/EY muuttamisesta (uudelleenlaadittu). Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto.
- 2016/425. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetetus (EU) 2016/425, annettu 9 päivänä maaliskuuta 2016, henkilönsuojaimista ja neuvoston direktiivin 89/686/ETY kumoamisesta. Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto.
- Abdoli-E, M., Agnew, M. J. ja Stevenson, J. M. (2006). An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. *Clinical Biomechanics*, 21 (5), 456–465.
- Baltrusch, S. J., van Dieën, J. H., van Bennekom, C. A. M. ja Houdijk, H. (2018). The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Applied Ergonomics*, 72, 94–106.
- Bevan, S. (2015). Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe. *Best Practice & Research in Clinical Rheumatology*, 29 (3), 356–373.
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K. ja de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*, 54, 212–217.
- Collins, J. D. ja O’Sullivan, L. W. (2015). Musculoskeletal disorder prevalence and psychosocial risk exposures by age and gender in a cohort of office based employees in two academic institutions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 46, 85–97.
- Constantinescu, C., Muresan, P.-C. ja Simon, G.-M. (2016). JackEx: the new digital manufacturing resource for optimization of exoskeleton-based factory environments. *Procedia CIRP*, 50, 508–511.
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S. ja O’Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59 (5), 671–681.
- INRS. (2018). Exosquelettes au travail: impact sur la santé et la sécurité des opérateurs – état des connaissances. Pariisi: Institut National de Recherche et de Sécurité. Haettu INRS:n sivustolta: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206311>
- INRS. (2019). Acquisition et integration d’un exosquelette en entreprise: Guide pour les préventeurs. Pariisi: Institut National de Recherche et de Sécurité. Haettu INRS:n sivustolta: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206315>
- Eurofound. (2012). *Viides Euroopan työolotutkimus*. Luxemburg: Euroopan unionin julkaisutoimisto.
- Eurofound. (2019). *Euroopan työolotutkimus 2015*. Bryssel: Eurofound. Haettu kohteesta <https://www.eurofound.europa.eu/data/european-working-conditions-survey>.
- Gams, A., Petrič, T., Debevec, T. ja Babič, J. (2013). Effects of robotic knee exoskeleton on human energy expenditure. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60 (6), 1636–1644.
- Gilotta, S., Spada, S., Ghibaud, L., Isoardi, M. ja Mosso, C. (2018). *Acceptability beyond Usability: A Manufacturing Case Study*. Esitetty kansainvälisen ergonomiayhdistyksen kongressissa.
- Godwin, A. A., Stevenson, J. M., Agnew, M. J., Twiddy, A. L., Abdoli-Eramaki, M. ja Lotz, C. A. (2009). Testing the efficacy of an ergonomic lifting aid at diminishing muscular fatigue in women over a prolonged period of lifting. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39 (1), 121–126.

- Gopura, R. A. R. C. ja Kiguchi, K. (2009). *Mechanical Designs of Active Upper-limb Exoskeleton Robots: State-of-the-art and Design Difficulties*. Esitetty ICORR-konferenssissa 2009: 11. IEEE-konferenssi kuntoutusrobotiikasta.
- Graham, R. B., Agnew, M. J. ja Stevenson, J. M. (2009). Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task: assessment of EMG response and user acceptability. *Applied Ergonomics*, 40 (5), 936–942.
- Hensel, R., Keil, M., Mücke, B. ja Weiler, S. (2018). Chancen und Risiken für den Betrieblichen Einsatz von Exoskeletten in der betrieblichen Praxis. *ASU Zeitschrift für medizinische Prävention*, 53, 654–661.
- Herr, H. (2009). Exoskeletons and orthoses: classification, design challenges and future directions. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 6 (21).
- Holewijn, M., Hens, R. ja Wammes, L. (1992). Physiological strain due to load carrying in heavy footwear. *European Journal of Applied Physiology Occupational Physiology*, 65 (2), 129–134.
- ISO 10218-1:2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit. Geneve: Kansainvälinen standardointijärjestö.
- ISO 13482:2014. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset muille kuin teollisille roboteille. Muu kuin lääketieteellinen robotti henkilökohtaiseen hoitoon. Geneve: Kansainvälinen standardointijärjestö.
- ISO/TS 15066:2016. Robotit ja robotiikkalaitteet. Yhteistyörobotit. Geneve: Kansainvälinen standardointijärjestö.
- Kim, S., Nussbaum, M. A., Mokhlespour Esfahani, M. I., Alemi, M. M., Jia, B. ja Rashedi, E. (2018). Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: part II — ‘unexpected’ effects on shoulder motion, balance, and spine loading. *Applied Ergonomics*, 70, 323–330.
- Liedtke, M. and Glitsch, U. (2018). Exoskelette — Verordnung für persönliche Schutzausrüstung. *sicher ist sicher*, 3, 110–113.
- Lotz, C. A., Agnew, M. J., Godwin, A. A. ja Stevenson, J. M. (2009). The effect of an on-body personal lift assist device (PLAD) on fatigue during a repetitive lifting task. *Journal of Electromyography Kinesiology*, 19 (2), 331–340.
- Schick, R. (2018). Einsatz von Exoskeletten in der Arbeitswelt. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, 68 (5), 266–269.
- Theurel, J., Desbrosses, K., Roux, T. & Savescu, A. (2018). Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied Ergonomics*, 67, 211–217.
- Viteckova, S., Kutilek, P. ja Jirina, M. (2013). Wearable lower limb robotics: a review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 33 (2), 96–105.
- Weston, E. B., Alizadeh, M., Knapik, G. G., Wang, X. ja Marras, W. S. (2018). Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading of the lumbar spine. *Applied Ergonomics*, 68, 101–108.
- Whitfield, B. H., Costigan, P. A., Stevenson, J. M. ja Smallman, C. L. (2014). Effect of an on-body ergonomic aid on oxygen consumption during a repetitive lifting task. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44 (1), 39–44.
- Yang, C., Zhang, J., Chen, Y., Dong, Y. ja Zhang, Y. (2008). A review of exoskeleton-type systems and their key technologies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 222 (8), 1599–1612.
- Zurada, J. (2012). Classifying the risk of work related low back disorders due to manual material handling tasks. *Expert Systems with Applications*, 39 (12), 11125–11134.