Tampereen yliopisto

Helmi Mehn

EKSOSKELETONIEN HYÖDYNTÄMINEN TEOLLISUUDESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Niko Siltala
Heinäkuu 2026

TIIVISTELMÄ

Helmi Mehn: Eksoskeletonien hyödyntäminen teollisuudessa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma, konetekniikka
Heinäkuu 2026

Ulkoiset tukirangat eli eksoskeletonit ovat ulkoisia mekaanisia rakenteita, joiden tehtävänä on lisätä käyttäjän voimaa ja siirtää erilaisia kuormituksia eri kehonosiin tai maahan. Eksoskeletonien käyttö on lisääntynyt huomattavasti vuosien varrella. Vaikka niitä hyödynnetään enemmän kuntoutuksessa ja sotilaskäytössä, niitä käytetään myös yhä enemmän teollisuudessa. Eksoskeletonien ensisijainen tehtävä teollisuudessa on parantaa työergonomiaa.

Tässä työssä tarkastellaan eksoskeletonien hyödyntämistä teollisuudessa. Työn tavoitteena on käydä läpi, mitä eksoskeletonit ovat, millaisia komponentteja niissä on ja miten eri kehonosien eksoskeletoneita hyödynnetään teollisuudessa. Lisäksi pohditaan, miten eksoskeletonit vaikuttavat kuormiin ja minkälaisia hyötyjä ja haittoja eksoskeletonien käytöstä on työergonomiaan.

Työ koostuu neljästä osasta. Ensimmäisessä osassa tarkastellaan, millaisia eri rasitustilanteita teollisuudessa esiintyy. Toisessa osassa selvitetään eksoskeletonien luokituksia, esitellään niiden komponentteja ja käydään läpi eri kehonosien eksoskeletonit. Kolmannessa osassa tarkastellaan, miten eksoskeletonit vaikuttavat kehon kokemiin rasituksiin ja minkälaisia vaikutuksia eksoskeletoneilla on työergonomiaan. Käsitteellä työergonomia viitataan tässä työssä työterveyteen, tehokkuuteen ja työturvallisuuteen. Työssä käydään läpi sekä hyödyt että haitat, jotka esiintyvät työergonomiassa hyödynnettäessä eksoskeletoneita. Viimeisessä osassa pohditaan, minkälaiset eksoskeletonit soveltuisivat parhaiten teollisuuden aloille.

Avainsanat: Eksoskeleton, ulkoinen tukiranka, työergonomia, teollisuustyö, teollisuustyön ergonomia.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei

☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: Scopus AI, ChatGPT

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: Scopus AI, ChatGPT 5.4

Käyttötarkoitus: Tekoälyä on käytetty erilaisten lähteiden etsimiseen ja lauseiden muotoilemiseen. Tekoälyllä ei ole tuotettu työhön tekstiä, ainoastaan kysytty vinkkejä sekä ehdotuksia jo aiemmin itse kirjoittamieni sanavalintojen, lauseiden tai kappaleiden muotoiluun.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Tekoälyä on käytetty osioissa 2–4.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO 1
2 EKSOSKELETONIT TEOLLISESSA TYÖSSÄ 3
2.1 Aktiiviset ja passiiviset eksoskeletonit 3
2.2 Antropomorfisuus eksoskeletoneissa 5
2.3 Eksoskeletonit kehonosien mukaan 6
2.3.1 Ylävartalon eksoskeletonit 6
2.3.2 Alavartalon eksoskeletonit 8
2.3.3 Kokovartalon eksoskeletonit 10
3 EKSOSKELETONIEN VAIKUTUS TYÖEGONOMIAAN 13
3.1 Eksoskeletonien vaikutus voimien ja kuormien jakautumiseen 13
3.2 Työterveys 14
3.3 Tehokkuus 15
3.4 Työturvallisuus 15
4 TULOKSET JA POHDINTOJA 17
5 YHTEENVETO 19
LÄHTEET 21

1 JOHDANTO

Teollisuudessa kuormitukset vaihtelevat erittäin paljon eri alaloilla. Teollisuudessa tuki- ja liikuntaelinsairauksia esiintyy eniten niskassa, hartioissa, alaselässä, kyynärpäissä, kyynärvarsissa, ranteissa ja käsissä (Rodríguez-Pulido et al. 2025, s. 2—3).

Niska, hartiat ja alaselkä rasittuvat tyypillisesti töissä, joissa työskennellään pään yläpuolella (Capodaglio et al. 2024). Ranteissa, käsissä ja selässä taas ilmenee usein rasituksia työtehtävissä, joissa nostellaan ja siirretään painavia kuormia. Alavartalossa kuten lonkissa, polvissa ja nilkoissa ei ilmene usein tuki- ja liikuntaelinsairauksia, sillä ne eivät koe usein suuria kuormituksia. Niissä ilmenevät vauriot johtuvat toistuvista alavartalon liikkeistä, kuten kävelystä ja kyykkimisestä (Kuber et al. 2023, s. 1666).

Vaikka saman työtehtävän tekijät altistuvat samoille fyysisille rasituksille, voi kuormituksen kokeminen vaihdella yksilöiden välillä. Vaikuttavia tekijöitä voivat olla sukupuoli, ikä, kehonmassa, pituus, dominoiva puoli ja fyysinen aktiivisuus (Nasr et al. 2023, s. 7). Esimerkiksi erilaisissa nostotöissä naiset väsyvät nopeammin kuin miehet (Nasr et al. 2023, s. 10).

Teollisuudessa esiintyviä rasituksia pyritään vähentämään erilaisten nostoavustimien avulla. Uusimpana avustimena ovat ulkoiset tukirangat. Ulkoiset tukirangat eli eksoskeletonit ovat puettavia mekaanisia rakenteita, joilla kyetään lisäämään ihmisen voimaa tai tukemaan eri ruumiinosia (de Looze et al. 2016, s. 671). Eksoskeletonien käyttö erilaisissa ympäristöissä on lisääntynyt huomattavasti ja siksi niistä johtuvien hyötyjen ja haittojen tutkiminen on ajankohtaista. Eksoskeletonit voidaan jakaa useisiin käyttökategorioihin, kuten kliiniset sovellukset, kuntoutus, sotilaskäyttö, tutkimuskäyttö ja teollisuuskäyttö (de la Tejera et al. 2021, s. 8; Yle Uut. 2025; Foroutannia & Mohammadian 2026). Eksoskeletonien käyttö teollisuudessa on lisääntynyt vuosien varrella, mutta skeptisyys niitä kohtaan on edelleen yleistä esimerkiksi niiden uutuuden sekä pitkäaikaisen tutkimusnäytön vähäisyyden vuoksi.

Teollisessa työssä erilaisia eksoskeletoneista aiheutuvia hyötyjä ja haittoja voidaan tutkia työergonomian kautta, sillä työergonomian parantaminen on yksi merkittävimmistä teollisuudessa ilmenevistä haasteista. Työergonomialla tässä työssä viitataan työterveyteen, tehokkuuteen ja työturvallisuuteen.

Tutkielma käsittelee eksoskeletonien käyttöä teollisuudessa ja niiden käytöstä aiheutuvia hyötyjä ja haittoja. Työn aihetta käsitellään kolmen tutkimuskysymyksen avulla:

1. Minkälaisia eksoskeletoneita teollisessa työssä käytetään?
2. Miten eksoskeletonit vaikuttavat tuki- ja liikuntaelimiin kohdistuviin voimiin?
3. Miten eksoskeletonien käyttö vaikuttaa työergonomiaan?

Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena ja työssä keskitytään teollisuudessa käytettyihin eksoskeletoneihin. Artikkeleita ja tutkimuksia on etsitty Andorista ja Scopuksesta käyttämällä hakusanoja eksoskeleton, eksoskeletonin komponentit ja eksoskeleton ja työergonomia. Rajausta artikkelien julkaisuvuoden perusteella ei ole tehty, mutta työssä on pyritty käyttämään uusimpia mahdollisia artikkeleita ja tutkimuksia.

Työn ensimmäisessä luvussa kerrotaan eksoskeletoneista yleisesti. Tämän jälkeen käydään läpi, kuinka eksoskeletonit vaikuttavat kehoon kohdistuviin voimiin teollisessa työssä ja pohditaan, minkälaisia vaikutuksia rasitusten muutoksilla on työergonomiaan. Viimeisenä esitetään saadut tulokset ja pohditaan, mitkä eksoskeletonit soveltuvat parhaiten eri rasitustilanteisiin.

2 EKSOSKELETONIT TEOLLISESSA TYÖSSÄ

Teollisessa työssä käytetään useita erilaisia apuvälineitä kuormien nostamiseen. Nostoavustimet voivat olla staattisia tai ne voivat olla liikuteltavia, mutta yleisimmin teollisuudessa käytetyillä nostoavustimilla nostetaan raskas kuorma työntekijän puolesta. Toisin kuin muut nostoavustimet eksoskeletonit ovat päälle puettavia apulaitteita. Ne siis tukevat ihmisen omia niveliä ja vähentävät kehon kuormitusta. (Nasr et al. 2023)

Eksoskeletoneita on monenlaisia. Yleisimmin ne voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin eksoskeletoneihin ja antropomorfisiin ja ei-antropomorfisiin eksoskeletoneihin. Tämän lisäksi ne voidaan jakaa kehonosien mukaan ylä-, ala- ja kokovartalon eksoskeletoneihin. (de Looze et al. 2016, s. 672) Seuraavissa alaluvuissa esitellään aktiivisten ja passiivisten eksoskeletonien tärkeimmät komponentit sekä niiden keskeisimmät edut ja haasteet. Lisäksi tarkastellaan eksoskeletonien antropomorfisuutta sekä esitetään yleistietoja eri kehonosien eksoskeletoneista.

2.1 Aktiiviset ja passiiviset eksoskeletonit

Aktiiviset eksoskeletonit sisältävät ainakin yhden toimilaitteen, jonka avulla lisätään ihmisen käyttämää voimaa ja autetaan niveliä liikkumaan. Passiivisissa eksoskeletoneissa ei ole toimilaitetta, vaan niissä käytetään erilaisia jousia ja vaimentimia. Nämä varastoivat ihmisen liikkeestä kerättyä energiaa, jota voidaan käyttää tarpeen mukaan asennon tai liikkeen tukemiseen. (Mauri et al. 2019)

Aktiivisissa eksoskeletoneissa toimilaitteet saavat energiansa tukirankaan kiinnitetystä akkupankista ulkotöissä ja johtosarjan kautta virtalähteestä sisätöissä (Preethichandra et al. 2024, s. 8). Toimilaitteita ohjataan erilaisilla antureilla, joiden avulla eksoskeleton havaitsee, minkälaisia liikkeitä käyttäjä haluaa tehdä (Preethichandra et al. 2024, s. 2).

Toimilaitteet ovat aktiivisten eksoskeletonien ydinosa, ja niiden tehtävänä on muuttaa energia mekaaniseksi liikkeeksi. Toimilaitteen vuoksi aktiiviset eksoskeletonit ovat usein kookkaampia ja painavampia kuin passiiviset eksoskeletonit ja tästä syystä sopivan toimilaitteen valitseminen on erittäin tärkeää. (Thakur et al. 2018, s. 726) Toimilaitteen valitseminen riippuu esimerkiksi teho-massasuhteesta, teho-tilavuussuhteesta, jännityksestä, tehonkulutuksesta ja säätömenetelmien helppoudesta. Tavallisimmin toimilaitteet perustuvat sähkömoottoreihin, hydraulijärjestelmiin tai pneumaattisiin mekanismeihin, mutta huomattavaa kehitystä on tapahtunut pehmeiden toimilaitteiden

suuntaan, kuten tekolihasten ja elektroaktiivisten polymeerien. Ne tarjoavat joustavamman ja reagoivamman lähestymistavan liikkumisen avustamiseen. (Tiboni et al. 2022, s. 18–26; Preethichandra et al. 2024, s. 15–16)

Jotta toimilaitteet kykenevät toimimaan halutulla tavalla, eksoskeletoneissa tulee olla myös antureita. Aktiivisissa eksoskeletoneissa käytettyjä antureita ovat erilaiset kulma-anturit, kiihtyvyysanturit, voima-, paine- ja vääntömomenttianturit, inertiamittausyksikkö- eli IMU-anturit ja elektromyografia- eli EMG-anturit (Tiboni et al. 2022, s. 11; Preethichandra et al. 2024, s. 8–12)

Kulma-antureita käytetään sellaisten fysikaalisten suureiden mittaamiseen, jotka vaihtelevat kulman muuttuessa. Erilaisia kulma-antureita ovat kapasitiiviset kulma-anturit, induktiiviset kulma-anturit ja magneettiset kulma-anturit. (Preethichandra et al. 2024, s. 8–10) Kiihtyvyysanturit antavat signaalin yhteen suuntaan tapahtuvasta kiihtyvyydestä. Ne voidaan jakaa pietsosähköisiksi, pietsoresistiivisiksi ja kapasitiivisiksi kiihtyvyysantureiksi. (Preethichandra et al. 2024, s. 10–11) Dynaamisia antureita, joihin kuuluvat voima-, paine-, vääntömomentti- ja IMU-anturit, taas käytetään eksoskeletonin ja ihmisen raajojen välisten vuorovaikutusten mittaamiseen (Tiboni et al. 2022, s. 30). EMG-anturien tehtävä on mitata luustolihasten tuottamaa sähköistä toimintaa, mikä tarjoaa tietoa lihasten aktivointimalleista. Näitä tietoja käytetään eksoskeletonien liikkeiden hallinnassa ja hienosäädössä. (Preethichandra et al. 2024, s. 12)

Aktiivisista eksoskeletoneista saatu suurin hyöty on se, että niiden tarjoamaa tukea voidaan säätää niiden ohjausjärjestelmien avulla, jolloin niiden antamaa apua voidaan mukauttaa työtilanteen ja käyttäjän tarpeiden mukaan (Walter et al. 2023, s. 3). Aktiivisten eksoskeletonien suurin haaste on niiden virtalähteiden aiheuttamat haitat. Virtalähteet rajoittavat usein eksoskeletonien toiminta-aikaa. Lisäksi virtalähteet ja rakenteen paino aiheuttavat suunnittelussa haasteita, sillä suurempi teho ja tukikyky lisäävät usein eksoskeletonin painoa ja voivat näin lisätä käyttäjän uupumusta. Toisaalta kevyemmät ratkaisut voivat tarjota vähemmän tukea työtehtäviin. (Preethichandra et al. 2024, s. 30)

Jotta passiivisilla eksoskeletoneilla saadaan avustettua käyttäjää, niissä tarvitaan erilaisia passiivisia elementtejä, kuten elastisia kangasmateriaaleja tai jousivaimenninjärjestelmiä (Vazzoler et al. 2022, s. 558; Capodaglio et al. 2024, s. 3). Usein elastiset kangasmateriaalit, kuten kuminauhat ja jouset, kiinnittyvät suoraan passiivisen eksoskeletonin runkoon ja antavat näin tarvittavan avun haluttuun niveleen. Vaikka perinteiset jouset ja kuminauhat ovat yleisimpiä passiivisissa eksoskeletoneissa käytettyjä elementtejä, on olemassa myös erityisempiä passiivisia elementtejä, kuten

joissakin passiivisissa eksoskeletoneissa käytetyt kaasujouset. (Preethichandra et al. 2024, s. 6)

Passiivisten eksoskeletonien merkittävimpiä etuja ovat niiden keveys, pienempi koko ja se, että ne eivät tarvitse minkäänlaista virtalähdettä (Mauri et al. 2019, s. 2). Niiden merkittävin haitta taas on tarkan ohjauksen puute, mikä on hyvin tärkeää koneelle, jonka tulee tehdä töitä harmoniassa ihmisen kehon kanssa. (Preethichandra et al. 2024, s. 7)

2.2 Antropomorfisuus eksoskeletoneissa

Antropomorfisuus tarkoittaa sitä, että ei-inhimillisille toimijoille tai esineille liitetään ihmismäisiä ominaisuuksia, piirteitä tai mielentiloja (Epley et al. 2007, s. 865). Eksoskeletoneissa tämä tarkoittaa sitä, että antropomorfisilla eksoskeletoneilla on samat liikeradat kuin käyttäjällä, mikä mahdollistaa suuren liikkumisvapauden käyttäjälle (de Looze et al. 2016, s. 672).

Eksoskeletonien liikkuvuutta voidaan säädellä niissä käytetyillä nivelillä. Valittujen nivelten vapausasteet määrittävät, kuinka laajasti eksoskeleton kykenee liikkumaan (de Looze et al. 2016 s. 672; Vazzoler et al. 2022 s. 558). Jotta eksoskeleton liikkuu samoja liikeratoja kuin ihminen, sen nivelten vapausaseiden tulee vastata ihmisen nivelten vapausasteita (Kulić et al. 2016, s. 780). Vapausasteita yhdessä nivelessä on yhdestä kolmeen riippuen nivelestä (Vazzoler et al. 2022). Eksoskeletonin vapausasteet ilmoitetaan laskemalla kaikki eksoskeletonin vapausasteet yhteen (Vazzoler et al. 2022, s. 1; Fontana et al. 2014, s. 1). Mitä suurempi yhteenlaskettujen vapausasteiden lukumäärä on, sitä paremmin eksoskeleton kykenee myötäilemään ihmisen liikkeitä.

Antropomorfisia eksoskeletoneita on olemassa niin aktiivisina kuin passiivisinakin, mutta aktiivisilla eksoskeletoneilla on yhä haasteena heijastaa ihmisen anatomiaa, kinematiikkaa ja kinetiikkaa, jotta saataisiin mahdollistettua luonnolliset ja mukavat liikkeet käyttäjälle. (de Looze et al. 2016, s. 679) Vapausasteiden ja niitä vastaavien toimilaitteiden lisääminen parantaa eksoskeletonien kykyä, joustavuutta ja vikasietoisuutta, mutta ne lisäävät myös monimutkaisuutta ja painoa (Kulić et al. 2016, s. 776).

Vaikka antropomorfisuus nähdään usein hyvin positiivisena ominaisuutena, siinä on kuitenkin huomattu myös vikoja. Antropomorfisissa eksoskeletoneissa on huomattu nivelten virheasentoja, jotka luokitellaan mittasuhteiden perusteella makro- ja mikrovirheiksi. Makrovirheitä esiintyy, kun eksoskeletonin ja käyttäjän vapausasteiden välillä on epäsuhdannetta. (Sergi et al. 2010, s. 101) Esimerkiksi olkanivelessä ihmisellä on kolme vapausatsetta. Jos antropomorfisen eksoskeletoniin niveleen on

epähuomiossa säädetty vain kaksi vapausastetta, syntyy käyttöä merkittävästi haittaavaa epäsuhdannetta. Mikrovirheitä esiintyy, jos eksoskeletonin nivel ei osu täydellisesti ihmisen nivelen kohdalle (Zhang et al. 2024, s. 9898; van Dijk et al. 2018, s. 337; Sergi et al. 2010, s. 101). Näistä syistä on hyvin tärkeää, että antropomorfiset eksoskeletonit mitataan käyttäjilleen sopiviksi.

Virheasentojen ilmeneminen eksoskeletoneissa voi johtaa siihen, että ei-antropomorfiset eksoskeletonit ovat jopa mukavampia kuin antropomorfiset eksoskeletonit. Ne eivät kiinnity ihmiseen niin tiukasti kuin antropomorfiset eksoskeletonit ja voivat siksi tuntua miellyttävämmältä (Zhang et al. 2024, s. 9898). Ei-antropomorfisten eksoskeletonien ominaisuus kiinnittyä löysemmin myös lisää suunnitteluvaihtoehtoja (van Dijk et al. 2018, s. 337). Lisäksi positiivista ei-antropomorfisissa eksoskeletoneissa on se, että ne ovat yksinkertaisempia, ja että niiden rakenteet voidaan suunnitella optimaaliseksi tiettyä työtehtävää varten (de Looze et al. 2016, s. 672).

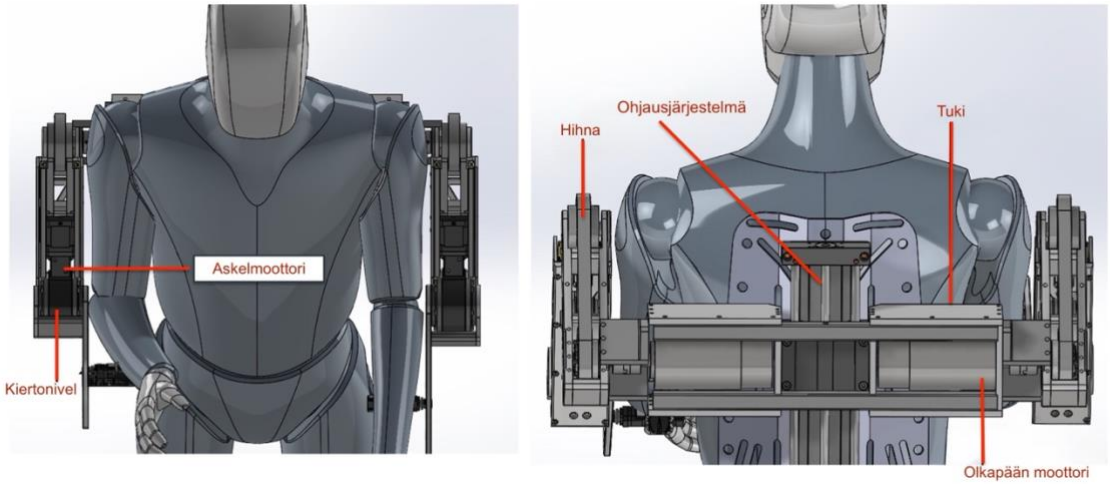
Antropomorfisuutta pyritään aina parantamaan eksoskeletoneissa, sillä on hyvin tärkeä, että eksoskeletonit tarjoavat mahdollisimman luonnolliset liikeradat käyttäjälle. Ei-antropomorfisissa eksoskeletoneissa on kuitenkin myös hyötynsä. Ne voivat esimerkiksi tukea paremmin eri niveliä ja pitää ne sellaisissa asennoissa, että käyttäjälle tulee mahdollisimman vähän nivelrikkoja (Skelex 2024).

2.3 Eksoskeletonit kehonosien mukaan

Eksoskeletonit voidaan myös lajitella sen mukaan, mitä kehonosia ne tukevat. Eksoskeletonit voivat tukea joko ylävartaloa, alavartaloa tai koko kehoa. Seuraavissa kappaleissa käsitellään eri kehonosia tukevat eksoskeletonit. Kappaleissa käydään läpi, mitä kehonosia kyseinen eksoskeletonityyppi tukee, minkälainen rakenne sillä on ja minkälaisia käyttötarkoituksia sillä on teollisuudessa.

2.3.1 Ylävartalon eksoskeletonit

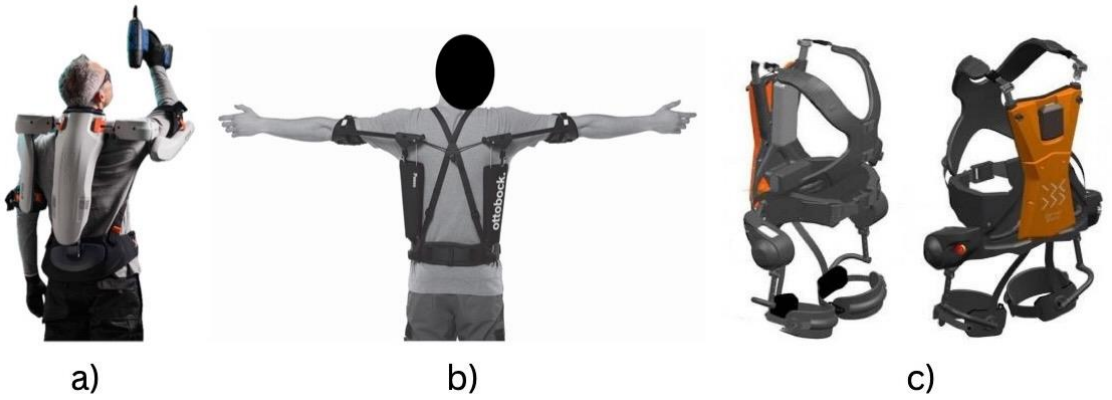
Ylävartalon eksoskeletoneita on monenlaisia. Niitä ovat yläraajoja, rintaa, päätä, selkää ja niskoja tukevat eksoskeletonit. Yläraajojen eksoskeletoneilla pystytään joko tukemaan ja avustamaan molempia yläraajoja, vain toista tai vain tiettyä osaa yläraajasta, kuten jotakin tiettyä niveltä. (de la Tejera et al. 2021, s. 7) Niveliä tukevia eksoskeletoneita ovat olkapään, kyynärpään, ranteen ja sormien eksoskeletonit (Preethichandra et al. 2024, s. 5).



Kuva 1. *Yläraajoja tukevan aktiivisen eksoskeletonin pääkomponentit. (muokattu lähteestä Mauri et al. 2019)*

Yleisesti ylävartalon eksoskeleton muodostuu selkään kiinnitettävästä rungosta. Runko koostuu päälinkeistä, jotka kiinnittyvät toisiinsa nivelillä muodostaen yhtenäisen kinemaattisen ketjun (Vazzoler et al. 2022, s. 9). Kuten kappaleessa 2.2 mainitaan, nivelten vapausasteet määrittävät sen, kuinka hyvin runko seuraa ihmisen liikkeitä. Kuvassa 1 on esimerkki yläraajoja tukevasta aktiivisesta eksoskeletonista ja sen pääkomponenteista. Rungon materiaalina käytetään usein kevyitä ja kestäviä materiaaleja, kuten alumiinia tai hiilikuitua (Vazzoler et al. 2022, s. 563; Foroutannia & Mohammadian 2026, s. 3). Tämän lisäksi eksoskeletoneissa käytetään erilaisia kiinnitysmekanismeja, kuten hihnoja, joilla eksoskeleton saadaan kiinnitettyä käyttäjään (Vazzoler et al. 2022, s. 559; de Looze et al. 2016, s. 673).

Teollisuudessa ylävartalon eksoskeletonien ensisijainen tehtävä on parantaa tehokkuutta ja vähentää erilaisia tuki- ja liikuntaelinten sairauksia. Jokainen eri eksoskeletonin tyyppi on suunniteltu tiettyjä tehtäviä varten. Yläraajoja tukevat passiiviset eksoskeletonit ovat esimerkiksi tarkoitettu ensisijaisesti kompensoimaan yläkehoon vaikuttavia painovoimakuormia. Sitä hyödynnetään esimerkiksi silloin kuin työntekijän tulee tehdä kauan töitä pään yläpuolella. (Capodaglio et al. 2024) Yläraajoja tukevia aktiivisia eksoskeletoneita taas hyödynnetään aloilla, joissa työntekijät nostelevat painavia kuormia (Skelex 2024).



Kuva 2. *Teollisuudessa käytettäviä ylävartalon eksoskeletoneita. (muokattu lähteistä exoIQ, n.d.; Capodaglio et al. 2024; Walter et al. 2023)*

Teollisuudessa nähdään yleisimmin selkää, olkapäitä ja yläraajoja tukevia eksoskeletoneita, joista on esimerkkejä kuvassa 2. Kuvassa a on teollisuudessa käytetty aktiivinen yläraajoja tukeva eksoskeleton. Kuvassa b taas on passiivinen yläraajoja tukeva eksoskeleton ja kuvassa c on selkää tukeva eksoskeleton. Se, mitä kehonosaa halutaan tukea, riippuu hyvin paljon tehtävästä ja käyttäjän tarpeista.

2.3.2 Alavartalon eksoskeletonit

Myös alavartalon eksoskeletoneita on useanlaisia. Alavartalon eksoskeletoneita ovat esimerkiksi puettavat tuoli-eksoskeletonit ja kyykkäystä avustavat eksoskeletonit. Kuten yläraajan eksoskeletonit, myös alaraajoja tukevat eksoskeletonit voivat tukea joko molempia alaraajoja, vain toista tai vain tiettyä niveltä (de la Tejera et al. 2021).

Kuva 3. *Esimerkki alaraajoja tukevan aktiivisen eksoskeletonin pääkomponenteista (muokattu lähteestä Luo et al. 2019)*

Kuten ylävartalon eksoskeletonit myös alavartalon eksoskeletonit koostuvat rungosta ja sen eri osia kiinnittävistä nivelistä, kuten kuvassa 3 esitetään. Toisin kuin ylävartalon eksoskeletoneissa, alavartalon eksoskeletoneissa runko voi olla selkään kiinnitettävien valjaiden lisäksi kiinnitettynä myös vain lantion ympärille (Shim et al. 2023, s. 3; Luo et al. 2019, s. 600). Kiinnityskohta riippuu siitä, onko alavartalon eksoskeleton aktiivinen vai passiivinen, sillä aktiivisissa alavartalon eksoskeletoneissa akku kiinnitetään usein selkään kuten ylävartalon eksoskeletoneissa. Muuten ylä- ja alavartalon eksoskeletonit ovat rakenteeltaan ja toiminnaltaan hyvin samankaltaisia (Luo et al. 2019, s. 600).

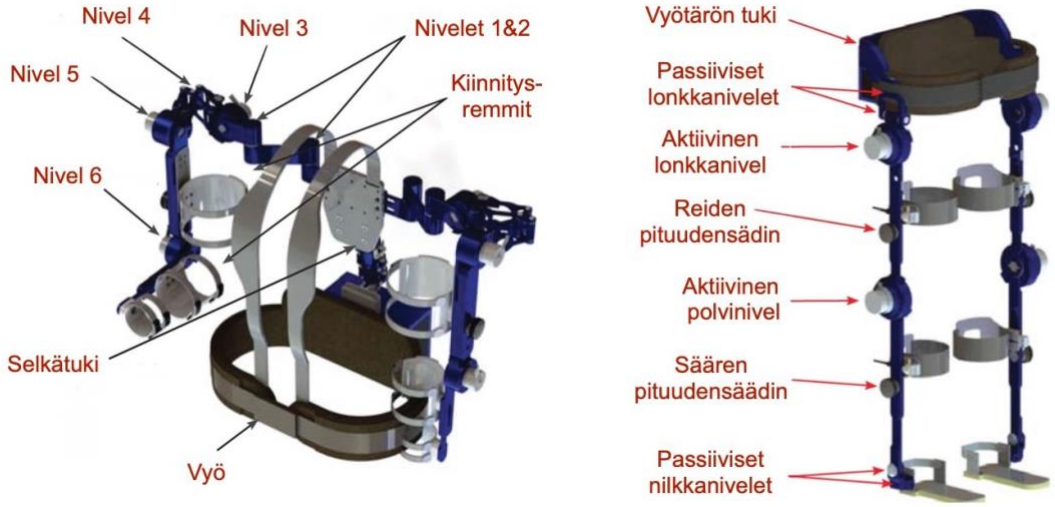
Vaikka alaraajojen eksoskeletonit ovat myös hyödyllisiä tuotannossa etenkin aloilla, joilla täytyy istua ja kyykkiä paljon, ne eivät ole yhtä yleisiä teollisuudessa kuin ylävartalon eksoskeletonit. (Kuber et al. 2023, s. 1665) Alaraajoja tukevia eksoskeletoneita käytetään kuitenkin paljon esimerkiksi kuntoutuksessa (Foroutannia & Mohammadian 2026).

Kuva 4. *Esimerkit teollisista alavartalon eksoskeletoneista (muokattu lähteistä Shim et al. 2023, s. 3; Coxworth 2016)*

Yllä olevassa kuvassa 4 on esimerkit yleisimmistä teollisuudessa käytetyistä alavartalon eksoskeletoneista. Vasemmalla kuvassa a oleva eksoskeleton on istumista varten kehitetty eksoskeleton ja oikealla kuvassa b on kyykkäämistä avustava eksoskeleton.

2.3.3 Kokovartalon eksoskeletonit

Kokovartalon eksoskeletonit tukevat nimensä mukaisesti koko vartaloa, eivätkä vain joko ylä- tai alavartaloa. Näiden eksoskeletonien tehtävänä on tukea useita niveliä ja lihasryhmiä samanaikaisesti, mikä mahdollistaa tehokkaamman voimantuoton ja voimien jakautumisen tasaisemmin koko vartalolle. (Christensen et al. 2021, s. 2) Tämä on erityisen hyödyllistä työtehtävissä, joissa kuormitus kohdistuu useaan kehonosaan samanaikaisesti.



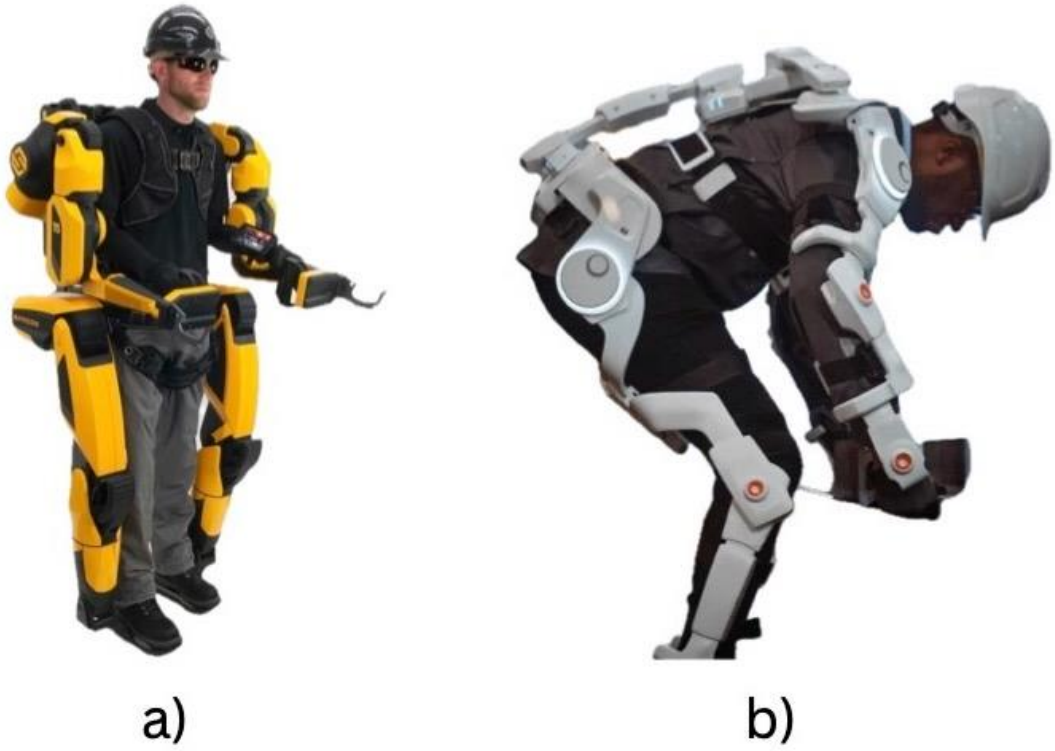
Kuva 5. *Esimerkki kokovartalon aktiivisesta eksoskeletonista. (muokattu lähteestä Christensen et al. 2021)*

Kokovartalon eksoskeletonit koostuvat ylä- ja alavartalon eksoskeletoneista, joten niiden komponentit ovat samat kuin muidenkin kehonosien eksoskeletoneissa. Näitä ovat runko, nivelet, kiinnitysmekanismit, sekä toimilaitteet ja anturit aktiivisissa ratkaisuissa. Kuvassa 5 on esimerkki kokovartalon aktiivisesta eksoskeletonista ja sen komponenteista. Toisin kuin ylä- ja alavartalon eksoskeletoneissa, kokovartalon eksoskeletoneissa eri komponenttien yhteensovittaminen on haastavampaa, sillä kokovartalon eksoskeletonin tulee tukea useaa niveltä samanaikaisesti (Fontana et al. 2014, s. 35–37). Tämä vaikuttaa myös siihen, että aktiivisten kokovartalon eksoskeletonien ohjausjärjestelmät ovat huomattavasti monimutkaisempia, kuin ylä- tai alavartalon eksoskeletonien ohjausjärjestelmät (Fontana et al. 2014, s. 38). Kokovartalon eksoskeletonien suunnittelu on siis hyvin monimutkaista ja komponenttien määrän vuoksi ne ovat myös melko painavia (Christensen et al. 2021, s. 1).

Kokovartalon eksoskeletoneissa esiintyy suunnitteluun liittyvien ongelmien lisäksi muitakin haasteita. Esimerkiksi ohjaaminen on monimutkaisempaa, kuin ylä- tai alavartalon eksoskeletonien ohjaaminen, ja niiden käyttö vaatii erittäin pitkää opettelua. Tämän lisäksi tasapainon ylläpitäminen nostettaessa raskaita kuormia on alussa hyvin haasteellista ja vaatii jatkuvaa harjoittelua (Fontana et al. 2014, s. 43–44).

Kuten aktiivisia ylävartalon eksoskeletoneita, myös kokovartalon eksoskeletoneita käytetään teollisuudessa muun muassa painavien kuormien nostamisen avustamisessa, mutta niitä hyödynnetään paljon myös painavien kuormien siirtämisessä (Fontana et al. 2014, s. 35). Kokovartalon eksoskeletoneilla kuitenkin kyetään nostamaan huomattavasti painavimpia kuormia, kuin ylävartalon eksoskeletoneilla, sillä kuorman

paino kohdistuu pääasiassa mekaanisen rakenteen kautta maahan muiden kehonosien sijaan (Christensen et al. 2021, s. 2).



Kuva 6. *Esimerkit teollisista kokovartalon eksoskeletoneista. (muokattu lähteistä Supply Demand Chain Exec. 2021; Verve motion n.d.)*

Kuvassa 6 on esimerkit teollisuudessa käytetyistä kokovartaloa tukevista eksoskeletoneista. Vaikka molemmat kuvan 6 eksoskeletonit ovat aktiivisia, kuvassa a oleva eksoskeleton on tarkoitettu nimenomaan työntekijän voiman lisäämisen, kun taas kuvassa b olevalla eksoskeletonilla pyritään lähinnä tukemaan ihmisen kehoa. Vaikka kokovartalon eksoskeletonit ovat vielä harvinaisempia teollisuudessa kuin alavartalon eksoskeletonit, ne tarjoavat usein merkittävän avun tehtäviin, joissa tarvitaan laajoja liikeratoja ja paljon voimaa (Brunelli et al. 2025, s. 12).

3 EKSOSKELETONIEN VAIKUTUS TYÖERGONOMIAAN

Teollisuuden aloilla hyvä työergonomia on erittäin oleellista ja sitä pyritään jatkuvasti kehittämään. Teollisilla eksoskeletoneilla voidaan vaikuttaa merkittävästi työergonomian eri osa-alueisiin, kuten työterveyteen, tehokkuuteen ja työturvallisuuteen. Näiden vaikutusten ymmärtämiseksi on kuitenkin tarkasteltava, kuinka eksoskeletonit vaikuttavat käyttäjän kokemiin voimiin. Tässä luvussa käsitellään ensin eksoskeletonien vaikutusta voimien ja kuormien jakautumiseen, jonka jälkeen tarkastellaan niiden vaikutuksia työterveyteen, tehokkuuteen ja työturvallisuuteen. Vaikka eksoskeletonit vaikuttavat kaikkiin edellä mainittuihin osa-alueisiin, niiden merkittävin vaikutus kohdistuu työterveyteen.

3.1 Eksoskeletonien vaikutus voimien ja kuormien jakautumiseen

Eksoskeletoneilla pyritään avustamaan kehoa nosto- ja siirtotilanteissa ja työskenneltäessä erilaisissa epämukavissa asennoissa. Eksoskeletonit vähentävät huomattavasti ihmisen kokemia voimia. Tämä johtuu siitä, että eksoskeletonit vähentävät ihmisten lihastoimintaa. Lihastoimintaa vähennetään erilaisilla passiivisilla ja aktiivisilla toimilaitteilla, joita käsitellään luvussa 2.1. Toimilaitteiden lisäksi lihastoimintaa pyritään vähentämään siirtämällä kuormia muihin kehonosiin tai suoraan maahan. Esimerkiksi passiivisten alavartalon ja kokovartalon eksoskeletonien kuorman vähentäminen perustuu siihen, että ne siirtävät kannettavasta kuormasta tietyn määrän maahan (van Dijk et al. 2018, s. 341; Christensen et al. 2021, s. 2)

Nosto- ja siirtotilanteissa käytetään usein aktiivisia eksoskeletoneita. De Loozen et al. (2016, s. 678) kirjallisuuskatsauksessa mainitaan, että dynaamisissa nosto- ja siirtotöissä aktiivista eksoskeletonia käyttäessä lihasaktiivisuus on noin 20–65 % alhaisempi. Rinaldin et al. (2026, s. 1399) tutkimuksessa taas huomattiin, että dynaamisissa nostotöissä lihasaktiivisuus vähenee 8–33 %. Lisäksi siirtotöissä lihasaktiivisuus on noin 22–32 % pienempi tutkittua aktiivista ylävartalon eksoskeletonia käyttäessä. Kuberin et al. (2023, s.1671) kirjallisuuskatsauksessa kerrotaan, että aktiivista alavartalon eksoskeletonia käyttäessä lihasaktiivisuus alaselässä on jopa 35 % pienempi kuormia nostaessa. Capodaglion et al. (2024, s. 7) tutkimuksessa taas todetaan, että vaivannäkö käyttäessä passiivista ylävartalon eksoskeletonia laskee 46 %. Tutkimuksessa vaivannäöllä tarkoitetaan psyykkistä ja fyysistä kuormitusta ja siihen

on otettu huomioon myös aikapaine. Myös Walterin et al. (2023, s. 7) tutkimuksessa käytetyn aktiivisen selkää tukevan eksoskeletonin kerrotaan vähentävän lihasaktiivisuutta huomattavasti nostotilanteissa.

Epämukavissa asennoissa työntekijää pyritään avustamaan erilaisilla passiivisilla eksoskeletoneilla. Pään yläpuolella tehdyssä työssä hyödynnetään ylävartalon eksoskeletoneita. De Loozen et al. (2016, s. 678) kirjallisuuskatsauksessa havaittiin, että pidettäessä painoa pään yläpuolella käyttäen aktiivista ylävartalon eksoskeletonia, lihasaktiivisuus on noin 30–70 % alhaisempi mallista riippuen. Capodaglion et al. (2024, s. 10) artikkelissa taas kerrotaan, että passiivista eksoskeletonia käyttäessä henkinen ja fyysinen kuormitus vähenee raskaasta vaivasta kohtalaiseen vaivaan tutkimuksessa käytetyllä asteikolla. Matalalla tehdyissä töissä, joissa työntekijän tulisi kyykkiä paljon, hyödynnetään paljon istuin-eksoskeletoneita. Kuberin et al. (2023, s. 1671) artikkelissa kerrotaan, että istuin-eksoskeletonia käyttäessä lihaskuormitus vähenee jopa 90 %.

Taulukko 1. *Eksoskeletonin vaikutus lihasaktiivisuuteen eri työtilanteissa. (de Looze et al. 2016; Kuber et al. 2023; Capodaglio et al. 2024; Rinaldi et al. 2026)*

	Ylävartalo	Alavartalo
Nostotyöt	8–60 %	noin 35 %
Siirtotyöt	20–60 %	–
Epämukavat asennot (esim. kyykkiminen tai pään yläpuolella tehty työ)	30–70 %	90 %

Taulukkoon 1 on tiivistetty saadut tiedot siitä, missä määrin eksoskeletonit vähentävät lihasaktiivisuutta eri työtilanteissa. Taulukossa pystyriveillä on kerrottu, minkä kehonosan eksoskeleton on kyseessä ja vaakariveillä on ilmaistu työtehtävät.

Eksoskeletoneilla voi siis olla jopa merkittävät vaikutukset käyttäjän kokemiin rasituksiin ja siihen, kuinka erilaiset voimat ja rasitukset jakautuvat kehoon.

3.2 Työterveys

Eksoskeletonien apu näkyy merkittävimmin työterveydessä. Painavien kuormien nostamisen avustaminen aktiivisilla eksoskeletoneilla on vähentänyt huomattavasti tuki- ja liikuntaelinsairauksia. Tämä on havaittu esimerkiksi selkää tukevissa eksoskeletoneissa, joilla parannetaan ryhtiä. On huomattu, että selkää tukeva eksoskeleton aiheuttaa huomattavan laskun koettuun rasitustasoon (Walter et al. 2023,

s. 11). Myös passiivisilla eksoskeletoneilla kyetään vähentämään liikunta- ja tukielinten sairauksia. Passiiviset eksoskeletonit vähentävät esimerkiksi olkapään lihasten tekemää työtä aloilla, joissa työt tehdään pään yläpuolella (Capodaglio et al. 2024). On huomattu, että aktiiviset eksoskeletonit voivat vähentää tuki- ja liikuntaelinsairauksia 6–48 % ja passiiviset taas noin 6–35 %. (Walter et al. 2023, s. 2) Capodaglion et al. (2024, s. 13) artikkelissa mainitaan, että passiivista eksoskeletonia käyttäneet tekstiilityöntekijät kokivat, että eksoskeletonien merkittävin hyöty oli nimenomaan se, että ne vähensivät huomattavasti tuki- ja liikuntaelinsairauksia.

Vaikka eksoskeletoneilla on monia hyviä vaikutuksia työterveyteen teollisessa työssä, niiden käyttö on vielä hyvin rajoitettua. Tämä johtuu siitä, että pitkän aikavälin tutkimuksia on hyvin vähän ja eksoskeletonien todellisia vaikutuksia liikunta- ja tukielinsairauksiin pitkällä aikavälillä on tutkittu vasta rajatusti (Capodaglio et al. 2024, s. 1). Mikäli eksoskeletonit rajoittavat työntekijöiden liikkeitä, tai niistä aiheutuu nivelten virheasentoja, joista mainittiin luvussa 2.3, voi niiden haitta olla hyötyä suurempi niiden aiheuttamien tuki- ja liikuntaelinsairauksien vuoksi (Sergi et al. 2010, s. 101; Fox et al. 2019, s. 1273).

3.3 Tehokkuus

Työntekijään kohdistuvan kuorman väheneminen parantaa myös tehokkuutta. Kun työntekijät ovat vähemmän väsyneitä ja fyysisesti rasittuneita, he ovat tehokkaampia ja tekevät työtehtävät tuloksellisemmin ja huolellisemmin. (Capodaglio et al. 2024, s. 13; Skelex 2024)

Vaikka eksoskeletonit vähentävät kuormitusta, niiden vaikutukset tehokkuuteen eivät ole vain positiivisia. Aiemmin mainittu käyttäjän liikkeiden rajoittuminen eksoskeletonin vuoksi vaikuttaa negatiivisesti myös tehokkuuteen. Jos työntekijän on vaikea liikkua, se vaikuttaa myös negatiivisesti hänen suorituskykyynsä. Lisäksi satunnainen eksoskeletoneista aiheutunut kuorma tekee tehdystä työstä epätasaisempaa (Fox et al. 2019, s. 1723).

3.4 Työturvallisuus

Kuten tehokkuuteen myös työturvallisuuteen vaikuttaa hyvin paljon se, ettei työntekijä väsy niin nopeasti (Nasr et al. 2023, s. 2). Jos henkilö on henkisesti ja fyysisesti parempivointinen, hän tekee vähemmän esimerkiksi huolimattomuusvirheitä, jotka vaikuttavat merkittävästi työtapaturmien vähentymiseen.

Eksoskeletoneilla voi kuitenkin olla myös negatiivisia vaikutuksia työturvallisuuteen. Esimerkiksi eksoskeletonien liikkuvuuden rajoittuminen voi aiheuttaa vaaratilanteita. Satunnainen kuormituksen lisääntyminen eksoskeletonin mukana voi myös aiheuttaa tapaturmia, jos käyttäjä keskittyy tukirankaan ja työtehtävään samanaikaisesti. (Fox et al. 2019, s. 1273) Näitä vaaratilanteita ja tapaturmatilanteita voivat olla esimerkiksi kaatumisvaara tai huono reagointikyky erilaisiin yhtäkkisiin tapahtumiin, kuten esimerkiksi putoaviin esineisiin.

4 TULOKSET JA POHDINTOJA

Työn tavoitteena oli pohtia, millaisia eksoskeletoneita käytetään teollisessa työssä, miten ne vaikuttavat tuki ja liikuntaelimiin kohdistuviin voimiin ja miten eksoskeletonien käyttö vaikuttaa työergonomiaan. Seuraavassa luvussa esitellään saadut tulokset sekä tarkastellaan niitä aiemman tutkimuskirjallisuuden pohjalta.

Eksoskeletoneita käytetään teollisuudessa hyvin monipuolisesti. Ylävartalon eksoskeletonit ovat huomattavasti yleisempiä kuin alavartalon eksoskeletonit, ja niistä on käytössä niin aktiivisia kuin passiivisia versioita. Kokovartalon eksoskeletonit ovat vielä hyvin harvinaisessa käytössä teollisuudessa. Vaikka kokovartalon ja alavartalon eksoskeletonit ovatkin melko harvinaisia, niiden käyttö saattaa lisääntyä tulevaisuudessa eksoskeletonien kehittyessä. Antropomorfisia ja ei-antropomorfisia eksoskeletoneita käytetään teollisuudessa melko tasaisesti.

Erilaisissa tutkimuksissa on huomattu, että eksoskeletoneilla voi olla merkittävä vaikutus kehon tuki- ja liikuntaelimiin kohdistuviin voimiin. Eksoskeletonit vähentävät huomattavasti lihasaktiivisuutta raskaissa työtehtävissä, kuten erilaisissa nosto- ja siirtotöissä. Lisäksi ne auttavat työntekijöitä heidän ollessa vaikeissa työasennoissa, joita voi esiintyä esimerkiksi tehtävissä, jotka tehdään pään yläpuolella tai jos töitä joudutaan tekemään hyvin matalalla.

Eksoskeletoneilla on teollisuudessa monenlaisia vaikutuksia ja esimerkiksi työergonomiaan niillä on sekä hyötyjä että haittoja. Eksoskeletonien on huomattu vähentävän tuki- ja liikuntaelinsairauksia, joten niillä kyetään parantamaan työterveyttä. Eksoskeletonit voivat kuitenkin myös vaikuttaa työterveyteen negatiivisesti. Koska esimerkiksi eksoskeletoneista aiheutuvat nivelvirheet ovat melko helposti korjattavissa, voidaan olettaa, että niiden kehittyessä nämä ongelmat myös vähenevät huomattavasti. Eksoskeletonien kyky vähentää väsymystä parantaa myös tehokkuutta ja työturvallisuutta.

Vaikka kaikista tutkimuksista käy selvästi ilmi, että eksoskeletonit vähentävät lihasaktiivisuutta, sen vähenemisen määrä vaihtelee merkittävästi eri tutkimusten välillä. Tämä voi johtua esimerkiksi koehenkilöiden erilaisista ominaisuuksista, kuten sukupuolesta, pituudesta tai iästä. Lisäksi tuloksiin vaikuttaa se, minkälaisilla antureilla tuloksia on mitattu ja kuinka tarkkoja nämä tulokset todella ovat. Useissa kokeissa toistojen määrä on vähäinen, joten tulokset eivät ole tarkimmat. Lisäksi tutkimuksissa on käytetty eri valmistajien eksoskeletoneita, jotka voivat myös vaihdella merkittävästi

ominaisuuksiltaan. Lisäksi kaikki tutkimukset on suoritettu niitä varten järjestetyissä koeympäristöissä, minkä takia niitä ei voida suoraan yleistää teollisiin ympäristöihin.

Artikkeleiden ja tutkimusten perusteella huomataan, että eksoskeletonit soveltuvat parhaiten työtehtäviin, joissa käytetään samoja lihasryhmiä pitkiä aikoja. Sen sijaan työtehtävissä, joissa tarvitaan nopeita liikkeitä tai hyvin vapaita liikeratoja, ne voivat rajoittaa työntekijää merkittävästi ja vaikuttaa näin esimerkiksi työn laatuun. Tämän lisäksi eksoskeletonien hyödyntäminen esimerkiksi työtehtävissä, joissa työntekijä on ahtaissa tiloissa, on vähäistä. Tämä vahvistaa sen, että eksoskeletonin valinta tulee perustua työtehtävän vaatimuksiin, eikä yhtä ratkaisua voida soveltaa kaikkiin tilanteisiin.

Työssä käytettyjen tutkimusten julkaisuvuosien välillä on huomattavia eroja vanhimman artikkelin ollessa vuodelta 2014 ja uusimman vuodelta 2026. Vaikka eksoskeletonin rakenne on pysynyt hyvin samanlaisena vuosien varrella, sen toiminta ja mekaaniset ominaisuudet ovat voineet kehittyä merkittävästi julkaisuajankohtien välillä. Tämän lisäksi kaupalla nettisivuilla, joissa yritykset kuvailevat tuotteitaan, eksoskeletoneista puhutaan hyvin positiiviseen sävyyn, minkä vuoksi niiden tietoja tulee tarkastella kriittisesti ja tiedot tulee täydentää ja varmentaa vertaisarvioidulla tutkimuksella.

Koska kokovartalon eksoskeletoneista on erittäin vähän tutkimusta, niiden vaikutuksia ei ole käsitelty. Kokovartalon eksoskeletonien hyödyntäminen teollisuudessa saattaisikin olla mielenkiintoinen uusi tutkimuskohde. Lisäksi pitkäaikaisia vaikutuksia todellisissa työympäristöissä olisi tarpeen tutkia. Koska eksoskeletonien pitkäaikaisista vaikutuksista ei vielä ole tutkittua tietoa, on haastava ennustaa niiden pitkän aikavälin vaikutuksia työergonomiaan. Esimerkiksi ylävartalon eksoskeletonien selkätuki voi kauan käytettynä alkaa rasittaa selkää, ja ylävartalon painon kasvaminen eksoskeletonin myötä saattaa vaikuttaa alavartaloon erilaisina rasituksina. Tästä syystä eksoskeletonien vaikutusten tutkiminen ja niiden kehittäminen on erittäin tärkeää.

5 YHTEENVETO

Eksoskeletonien määrä teollisuudessa on lisääntynyt, koska teollisuuden aloilla pyritään jatkuvasti vähentämään siellä esiintyviä tuki- ja liikuntaelinsairauksia. Erityisesti niska, hartiat, alaselkä, kyynärpäät, kädet ja ranteet kuormittuvat työtehtävissä, joissa tehdään toistuvia liikkeitä, nostellaan ja siirrellään raskaita kuormia ja tehdään töitä erilaisissa epämukavissa asennoissa. Vaikka myös alavartalossa voi esiintyä kuormitusta, suurimmat kuormitukset kohdistuvat usein ylävartaloon. Kuormituksen kokeminen vaihtelee yksilöittäin muun muassa iän, sukupuolen, kehonrakenteen ja fyysisen kunnon mukaan.

Sekä aktiiviset että passiiviset eksoskeletonit ovat mekaanisia rakenteita, jotka tukevat käyttäjän liikkeitä ja vähentävät fyysistä kuormitusta. Aktiivisissa eksoskeletoneissa on toimilaitteita, antureita ja virtalähde, joiden avulla ne kykenevät antamaan säädettyä apua käyttäjän liikkeisiin. Passiiviset eksoskeletonit hyödyntävät erilasia jousia, vaimentimia ja elastisia materiaaleja ilman erillistä virtalähdettä. Aktiivisten eksoskeletonien etuna on tarkempi liikkeiden ohjattavuus ja suurempi avustusteho, mutta ne ovat usein raskaampia ja monimutkaisempia. Passiiviset eksoskeletonit ovat kevyempiä ja yksinkertaisempia, mutta niissä on tarkan ohjauksen puutteita.

Eksoskeletonit voidaan myös lajitella antropomorfisuuden mukaan. Antropomorfiset eksoskeletonit pyrkivät jäljittelemään käyttäjän liikkeitä tarkasti mahdollistaen laajan liikkumisvapauden. Ne vaativat kuitenkin tarkkaa mitoittamista virheasentojen välttämiseksi. Ei-antropomorfiset eksoskeletonit ovat suunnitellultaan yksinkertaisempia, eivätkä ne seuraa ihmisen luonnollisia liikeratoja. Lisäksi niiden väljempi istuvuus voi tuntua käyttäjästä mukavammalta.

Eksoskeletonit jaetaan kehonosien mukaan ylävartalon, alavartalon ja kokovartalon eksoskeletoneihin. Ylävartalon eksoskeletoneja käytetään yleisimmin teollisuudessa ja niitä hyödynnetään esimerkiksi pään yläpuolella tehdyissä töissä sekä nostotöissä. Alavartalon eksoskeletonit, kuten istumista ja kyykkyyn menemistä avustavat eksoskeletonit, ovat teollisuudessa harvinaisempia, mutta niitäkin hyödynnetään nostamisessa ja matalalla tehdyissä töissä työasennon parantamiseen. Kokovartalon eksoskeletonit tukevat samanaikaisesti lihasryhmiä ja niveliä niin ylä- kuin alavartalosta, minkä vuoksi ne soveltuvat raskaisiin nosto- ja siirtotöihin.

Eksoskeletonien hyödyt työergonomiassa näkyvät erityisesti työterveydessä, tehokkuudessa ja työturvallisuudessa. Tutkimusten mukaan eksoskeletonit voivat

vähentää lihasaktiivisutta ja ihmisen kokemaa kuormitusta merkittävästi, mikä voi vähentää tuki- ja liikuntaelinsairauksien esiintymistä. Samalla ne voivat lisätä tehokkuutta, koska työntekijä väsyy hitaammin. Myös työturvallisuus parantuu fyysisen ja psyykkisen kuormituksen vähentyessä. Toisaalta eksoskeletonit voivat vähentää liikkuvuutta, aiheuttaa nivelten virheasentoja ja jopa lisätä kuormitusta tietyissä tilanteissa, mikä voi haitata kaikkia työergonomian eri osa-alueisiin.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että eksoskeletonit voivat mahdollistaa merkittäviä etuja työergonomian parantamiseen, mutta niiden hyödyllisyys riippuu työtehtävästä ja käytetystä eksoskeletonin tyypistä. Raskaissa nosto- ja siirtotehtävissä aktiiviset kokovartalon eksoskeletonit vaikuttavat olevan hyödyllisimpiä tehokkuuden ja työterveyden näkökulmasta. Pään yläpuolella tehdyssä työssä passiiviset ylävartalon eksoskeletonit ovat sopivimpia ja matalalla tehdyissä töissä, esimerkiksi kyykkiessä, avustavat passiiviset alavartalon eksoskeletonit eniten. Vaikka tulokset näyttävät lupaavilta tarvitaan eksoskeletoneista yhä pitkäaikaisempia tutkimuksia, jotta niiden todelliset vaikutukset työergonomiaan voidaan myös arvioida.

LÄHTEET

Brunelli, G., Dubois, O., Tiboni, M. & Jarrassé, N. (2025). Review of upper-limb occupational exoskeletons: From technology to assessment, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 110, 103815 doi: 10.1016/j.ergon.2025.103815

Capodaglio, E.M., Amitrano, F., Coccia, A., Gabba, V., Pagano, G., D'Addio, G. & Panigazzi, M. (2024). Subjective Effects of Using a Passive Upper Limb Exoskeleton for Industrial Textile Workers, *Safety 10 (3), pp. 59*. doi: 10.3390/safety10030059

Christensen, S., Rafique, S. & Bai, S. (2021). Design of a powered full-body exoskeleton for physical assistance of elderly people, *International Journal of Advanced Robotic Systems*. doi: 10.1177/17298814211053534

Coxworth, B. (2016). *New exoskeleton takes injury-prevention to the max*, *New Atlas*. Saatavissa (Viitattu 18.3.2026): https://newatlas.com/suitx-max-exoskeleton/46476/

De la Tejera, J.A., Bustamante-Bello, R., Ramirez-Mendoza, R.A. & Izquierdo-Reyes, J. (2021). Systematic Review of Exoskeletons towards a General Categorization Model Proposal, *Applied Sciences*, 11 (1), pp. 76. doi: 10.3390/app11010076.

De Looze, M.P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K.S. & O'Sullivan, L.W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical workload, *Ergonomics*, 59 (5), pp. 671–681. doi: 10.1080/00140139.2015.1081988

exoiq (ei pvm). Making work easier. With exoskeletons from exoIQ. Saatavissa (viitattu 15.4.2026): https://www.exoiq.com/en

Epley, N., Waytz, A. & Cacioppo, J.T. (2007). On seeing human: A three-factor theory of anthropomorphism, *Psychological Review*, 114 (4), pp. 864–886. doi: 10.1037/0033-295X.114.4.864

Fontana, M., Vertechy, R., Marcheschi, S., Salsedo, F. & Bergamasco, M. (2014). The Body Extender: A Full-Body Exoskeleton for the Transport and Handling of Heavy Loads, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 21 (4), pp. 34–44. doi: 10.1109/MRA.2014.2360287

Foroutannia, A. & Mohammadian, M. (2026). A comprehensive survey of lower limb assistive exoskeleton robots: Models, dynamics, mechanics, and control, *Robotics and Autonomous Systems*, 195, pp. 105232. doi: 10.1016/j.robot.2025.105232.

Fox, S., Aranko, O., Heilala, J. & Vahala, P. (2019). Exoskeletons: Comprehensive, comparative and critical analyses of their potential to improve manufacturing performance, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31 (6), pp. 1261–1280. doi: 10.1108/JMTM-01-2019-0023

Kuber, P.M., Alemi, M.M. & Rashedi, E. (2023). A Systematic Review on Lower-Limb Industrial Exoskeletons: Evaluation Methods, Evidence, and Future Directions,

Annals of Biomedical Engineering, 51 (8), pp. 1665–1682. doi: 10.1007/s10439-023-03242-w

Kulić, D., Venture, G., Yamane, K., Demircan, E., Mizuuchi, I. & Mombaur, K. (2016). Anthropomorphic Movement Analysis and Synthesis: A Survey of Methods and Applications, *IEEE Transactions on Robotics*, 32 (4), pp. 776–795. doi: 10.1109/TRO.2016.2587744

Luo, L., Yuan, Y. & Li, Z., (2019). Design and Development of A Wearable Lower Limb Exoskeleton Robot. 2019 IEEE 4th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM). pp. 599–604. doi: 10.1109/ICARM.2019.8833912

Mauri, A., Lettori, J., Fusi, G., Fausti, D., Mor, M., Braghin, F., Legnani, G. & Roveda, L. (2019). Mechanical and Control Design of an Industrial Exoskeleton for Advanced Human Empowering in Heavy Parts Manipulation Tasks, *Robotics*, 8 (3), pp. 65. doi: 10.3390/robotics8030065.

Nasr, A., Dickerson, C.R. & McPhee, J. (2023). Experimental Study of Fully Passive, Fully Active, and Active–Passive Upper-Limb Exoskeleton Efficiency: An Assessment of Lifting Tasks, *Sensors*, 24 (1), pp. 63. doi: 10.3390/s24010063.

Preethichandra, D.M.G., Piyathilaka, L., Sul, J.-H., Izhar, U., Samarasinghe, R., Arachchige, S.D. & de Silva, L.C. (2024). Passive and Active Exoskeleton Solutions: Sensors, Actuators, Applications, and Recent Trends, *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24 (21), pp. 7095. doi: 10.3390/s24217095.

Rinaldi, G., Suglia, V., Tiseni, L., Camardella, C., Xiloyannis, M., Masia, L., Buongiorno, D., Bevilacqua, V., Frisoli, A. & Chiaradia, D. (2026). Towards a Healthier Workplace: How Flexos, an Active and Bilateral Shoulder Exoskeleton, Provides Support in Weight-Lifting and Carrying Tasks, *IEEE Transactions on Robotics*, 42, pp. 1389–1404. doi: 10.1109/TRO.2026.3666155.

Rodríguez-Pulido, A.G., Arrieta-Córdova, A.F. & Arce-Huamani, M.A. (2025). Prevalence and correlation of workload and musculoskeletal disorders in industrial workers: a cross-sectional study, *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 6. doi: 10.3389/fresc.2025.1677621

Sergi, F., Accoto, D., Tagliamonte, N.L., Carpino, G., Pathiyil, L. & Guglielmelli, E. (2010). A systematic graph-based method for the kinematic synthesis of non-anthropomorphic wearable robots, *2010 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*. *2010 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 100–105. doi: 10.1109/RAMECH.2010.5513204.

Shim, H.-H., Choi, K.-H., Keum, H., Son, S., Kim, J.H., Seo, M.-T., Kim, S.-Y., Park, D. & Kong, Y.-K. (2023). Evaluation of the Effects of Passive Lower-Limb Exoskeletons on Muscle Activities According to Working Heights, *Applied Sciences*, 13 (21), pp. 11754. doi: 10.3390/app132111754

Skelex (2024). *How Exoskeletons are Revolutionizing Industrial Work*, *Skelex*. Saatavissa (viitattu 29.2.2026): https://www.skelex.com/post/how-exoskeletons-are-revolutionizing-industrial-work

Supply & Demand Chain Executive (2021). *Sarcos Robotics, Rotor Acquisition Merger to Deploy Robot Fleet as RaaS Solution*. Saatavissa (viitattu 18.3.2026): https://www.sdcexec.com/software-technology/robotics/news/21378478/sarcos-robotics-sarcos-robotics-rotor-acquisition-merger-to-deploy-robot-fleet-as-raas-solution

Thakur, C., Ogawa, K. & Kurita, Y. (2018). Active Passive Nature of Assistive Wearable Gait Augment Suit for Enhanced Mobility, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 30 (5), pp. 717–728. doi: 10.20965/jrm.2018.p0717

Tiboni, M., Borboni, A., Vérité, F., Bregoli, C. & Amici, C. (2022). Sensors and Actuation Technologies in Exoskeletons: A Review, *Sensors*, 22 (3), pp. 884. doi: 10.3390/s22030884.

van Dijk, W., Van de Wijdeven, T., Holscher, M.M., Barents, R., Könemann, R., Krause, F. & Koerhuis, C.L. (2018). Exobuddy - A Non-Anthropomorphic Quasi-Passive Exoskeleton for Load Carrying Assistance, *2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob)*, *2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob)*, pp. 336–341. doi: 10.1109/BIOROB.2018.8487794

Vazzoler, G., Bilancia, P., Berselli, G., Fontana, M. & Frisoli, A. (2022). Analysis and Preliminary Design of a Passive Upper Limb Exoskeleton, *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 4 (3), pp. 558–569. doi: 10.1109/TMRB.2022.3186903.

Verve Motion (n.d.). The Competitive Landscape for Exosuits and Exoskeletons. Saatavissa (viitattu 7.4.2026): https://blog.vervemotion.com/the-competitive-landscape-for-exosuits-and-exoskeletons

Walter, T., Stutzig, N. & Siebert, T. (2023). Active exoskeleton reduces erector spinae muscle activity during lifting, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, pp. 1143926. doi: 10.3389/fbioe.2023.1143926

Yle uutiset (2025). Sari Seppä sai työnantajalta apuvälineen raskaaseen työhön: ”Asiakkaat sanovat robotiksi”. Saatavissa (viitattu 21.1.2026): https://yle.fi/a/74-20190560

Zhang, W., Zhan, Y., Ju, W., Hou, Z., Kang, R., Dai, J.S. & Song, Z. (2024). A Novel Quasi-Passive Non-Anthropomorphic Lower Limb Exoskeleton for Load-Bearing, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9 (11), pp. 9891–9898. doi: 10.1109/LRA.2024.3461553.