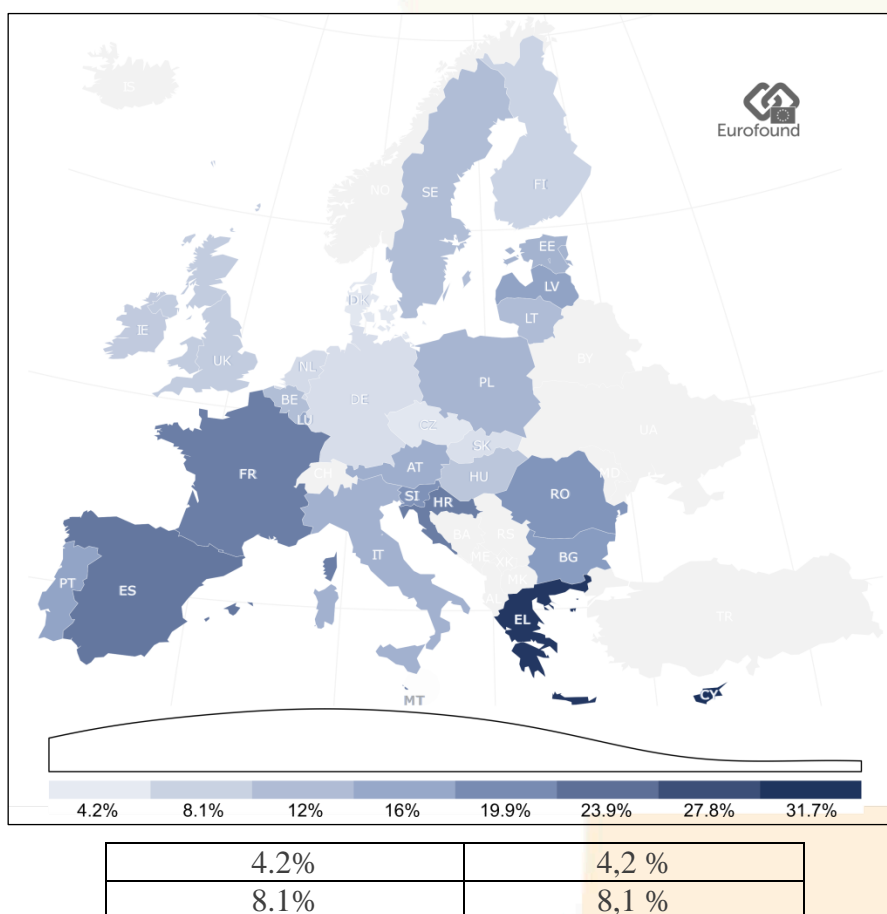


HET EFFECT VAN HET GEBRUIK VAN EXOSKELETEN OP DE VEILIGHEID EN GEZONDHEID OP HET WERK

Inleiding

De laatste jaren is op de werkplek een begin gemaakt met het gebruik van nieuwe hulpmiddelen die op het lichaam worden gedragen, de zogenaamde exoskeletten. Het gebruik daarvan zal naar verwachting in de toekomst meer gemeengoed worden, aangezien prototypes van exoskeletten hun nut hebben bewezen o.a. op gebied van medische zorg. Exoskeletten lijken met name te worden gebruikt als nieuwe aanpak van het probleem van arbeidsgerelateerde aandoeningen aan het bewegingsapparaat. Arbeidsgerelateerde aandoeningen aan het bewegingsapparaat behoren in Europa tot de grootste problemen op de werkplek¹. In figuur 1 wordt een overzicht gegeven van de percentages werknemers die in vermoeiende en pijnlijke houdingen werken. Dit houdt verband met een slecht ontwerp van de werkplek, want dergelijke arbeidsomstandigheden vormen in heel Europa nog steeds een groot probleem. Als oplossing voor dit probleem zijn exoskeletten ontwikkeld.

Figuur 1 De percentages werknemers in Europa die werken in vermoeiende of pijnlijke houdingen (overgenomen van Eurofound 2019)



¹ Meer dan 40 % van de werknemers in Europa heeft last van pijn in de onderrug of schouders. Bovendien voert 63 % van de werknemers repetitieve taken uit en werkt 46 % vaak in potentieel gevaarlijke houdingen (Eurofound, 2012). De jaarlijkse kosten die voortvloeien uit de gezondheidsgerelateerde problemen die het gevolg zijn van deze arbeidsomstandigheden bedragen ongeveer 2 % van het bruto binnenlands product van de Europese Unie (Bevan, 2015). Veel van deze problemen worden veroorzaakt door werkzaamheden waarbij sprake is van handmatige materiaalbehandeling, zoals het optillen, neerzetten, vasthouden of dragen van ladingen (Zurada, 2012; Collins en O'Sullivan, 2015). Het maken van draai- en bukbewegingen alsook werken boven het hoofd verhogen eveneens het risico op een arbeidsgerelateerde aandoening. Arbeidsgerelateerde aandoeningen van het bewegingsapparaat zijn dus niet alleen een gezondheidsgerelateerd probleem, maar ook een probleem dat grote gevolgen heeft voor de economie.

12%	12 %
16%	16 %
19.9%	19,9 %
23.9%	23,9 %
27.8%	27,8 %
31.7%	31,7 %

Exoskeletten zijn op het lichaam gedragen apparaten die het bewegingsapparaat ondersteunen met behulp van verschillende mechanische principes. Wat betreft arbeidsgerelateerde aandoeningen van het bewegingsapparaat kunnen zij de belasting van de spieren verminderen in vaak belaste lichaamsdelen, zoals de onderrug of de schouders. Hoewel de mogelijke voordelen van exoskeletten ter preventie van arbeidsgerelateerde aandoeningen aan het bewegingsapparaat aanzienlijk kunnen zijn, moet ook rekening worden gehouden met het feit dat dergelijke hulpmiddelen nieuwe vragen oproepen in verband met de veiligheid en gezondheid op het werk. In dit verband heeft het Franse Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS) een overzicht gepubliceerd van de nieuwe risicofactoren die tijdens het gebruik van exoskeletten op de werkplek zijn geconstateerd (INRS, 2019). Enerzijds kunnen exoskeletten worden gezien als een kans om de belasting van de spieren op het werk te verminderen door werknemers fysiek te ondersteunen en daarmee mogelijk arbeidsgerelateerde aandoeningen aan het bewegingsapparaat te voorkomen, of als een hulpmiddel voor werknemers met een lichamelijke beperking. Anderzijds kunnen zich mogelijk nieuwe gezondheidsrisico's voordoen als gevolg van de herverdeling van de belasting van de spieren naar andere lichaamsdelen. Exoskeletten zijn ook van invloed op de motorische controle, gewrichtsstabiliteit en veranderingen in het bewegingsapparaat (INRS, 2018). Bovendien zou het gebruik van exoskeletten kunnen resulteren in onvoldoende aandacht voor het ergonomische ontwerp van de werkplek (ontwerp waarbij de mens centraal wordt gesteld). Er zijn echter ook veel werkzaamheden die niet op een specifieke locatie worden verricht, zoals meubelbezorging of hulpverlening door hulpdiensten. Bij deze werkzaamheden kunnen geen ergonomische maatregelen worden genomen omdat de werkomgeving steeds verandert en er steeds aan andere eisen moet worden voldaan (Schick, 2018). Bovendien kan/kunnen in dergelijke beroepen overbelasting van de spieren, veelvuldig tillen, een verkeerde houding of zware persoonlijke beschermingsmiddelen het risico op fysieke overbelasting vergroten. In dit verband kunnen exoskeletten een aantal mogelijkheden voor verbetering van de arbeidsomstandigheden bieden.



Inc/MONOPOLY919, ©Shutterstock

Het belangrijkste punt van zorg is dat er voorzichtigheid moet worden betracht bij het gebruik van technologie zo dicht op het menselijk lichaam. Bij het ontwerpen van werkplekken moeten er technische en organisatorische maatregelen in acht worden genomen voordat er werknemers met exoskeletten worden uitgerust. Over het algemeen moet het gebruik van exoskeletten ter verbetering van het ergonomische ontwerp van de werkplek altijd als laatste redmiddel worden ingezet. Er bestaat nog

weinig wetenschappelijk bewijs over exoskeletten in de ergonomie en arbeidswetenschappen. Een van de uitdagingen is het verkrijgen van inzicht in de langetermijneffecten van exoskeletten op de menselijke biomechanica en fysiologie. Dit is in de praktijk lastig realiseerbaar (Liedtke en Glitsch, 2018) omdat er rekening moet worden gehouden met het soort exoskelet, de aard van de werkzaamheden en de toepassingsperioden. Bovendien staat het onderzoek naar de gezondheidseffecten die verband houden met de fysiologische of biomechanische aspecten nog in de kinderschoenen, omdat het onderzoek naar de interactie tussen mens en exoskelet ingewikkeld en tijdrovend is. Er moeten echter nieuwe manieren van aanpak worden ontwikkeld om de doelmatigheid van exoskeletten aan te tonen, zodat de voor- en nadelen van deze technologie beter in kaart kunnen worden gebracht. In dit artikel wordt een overzicht gegeven van de huidige discussie over het gebruik van exoskeletten op de werkplek, en wordt het effect van het gebruik van exoskeletten op de veiligheid en gezondheid op het werk geëvalueerd.

Exoskeletten

Definitie

Een exoskelet kan worden gedefinieerd als een persoonlijk hulpmiddel dat op mechanische wijze van invloed is op het lichaam (Liedtke en Glitsch, 2018). In engere zin zijn exoskeletten draagbare robottechnologieën die invloed uitoefenen op de interne of externe krachten die op het lichaam worden uitgeoefend. Kort samengevat zijn exoskeletten draagbare apparaten die de kracht van de gebruiker versterken of ondersteunen. Gezien het grote aantal toepassingen en de verschillende functies is er nog steeds geen gemeenschappelijke definitie. In de vakliteratuur bestaat er algemene overeenstemming over het feit dat exoskeletten kunnen worden gedefinieerd als externe mechanische structuren die op het lichaam worden gedragen (Herr, 2009; De Looze et al., 2016). Exoskeletten kunnen worden geclassificeerd als actieve of passieve systemen.

Actieve exoskeletten maken gebruik van actuatoren (mechanische aandrijfcomponenten) die de menselijke bewegingen ondersteunen. Deze mechanische componenten bestaan uit elektromotoren maar kunnen ook hydraulisch of pneumatisch worden aangedreven (Gopura en Kiguchi, 2009). Deze ondersteuning geeft extra kracht en verhoogt daarmee de prestaties van een werknemer. Daarentegen wordt er bij passieve exoskeletten gebruikgemaakt van de herstelkracht van veren, schokdempers of andere materialen ter ondersteuning van de menselijke bewegingen. De energie die is opgeslagen in een passief exoskelet wordt uitsluitend gegenereerd door de bewegingen van de gebruiker (De Looze et al., 2016). Bovendien worden de krachten herverdeeld om specifieke lichaamsdelen te beschermen. De verandering in de prestaties van de gebruikers is niet het gevolg van extra fysieke kracht, maar van het vermogen om vermoeiende houdingen langer vol te houden, bijvoorbeeld in het geval van boven het hoofd werken.

Hybride exoskeletten, die actief of passief van aard kunnen zijn, blijven tot dusver een uitzondering. Bij deze exoskeletten wordt gebruikgemaakt van hersengolfactiviteit (EEG-signalen) of activering van de spieren om bewegingen op gang te brengen. Het gebruik ervan in het bedrijfsleven is momenteel echter onwaarschijnlijk, zodat zij in deze discussienota verder niet aan de orde komen.

Soorten exoskeletten

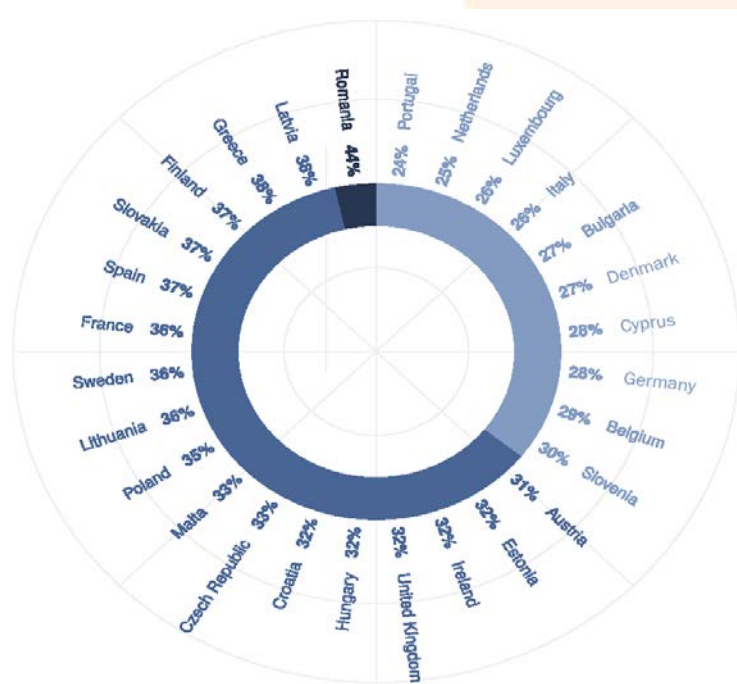
Exoskeletten kunnen in drie groepen worden onderverdeeld: exoskeletten voor het onderlichaam, exoskeletten voor het bovenlichaam en exoskeletten voor het hele lichaam. In de literatuur worden ook exoskeletten die één gewricht ondersteunen genoemd (Gams et al., 2013), maar deze zullen in deze discussienota verder niet worden besproken vanwege hun zeer individuele aspecten en gevalsgerichte toepassingen. Bij exoskeletten voor het bovenlichaam wordt gewoonlijk gebruikgemaakt van stevige mechanische structuren voor de herverdeling van de krachten die op de bovenste ledematen en de romp worden uitgeoefend (bovenarmen, onderarmen, schouders of onderrug). Deze herverdeling van krachten betekent in dit geval dat andere lichaamsdelen, zoals de heupen of benen, extra belast worden. Exoskeletten voor het onderlichaam kunnen krachten naar de grond verplaatsen en op deze manier de belasting van het bewegingsapparaat verminderen. Het is echter belangrijk op te merken dat deze effecten sterk afhankelijk zijn van het ontwerp en de functionaliteit van het exoskelet. Ondersteunende systemen die het bovenlichaam en onderlichaam tegelijkertijd ondersteunen, worden exoskeletten voor het hele lichaam genoemd.

Toepassingsgebieden op de werkplek

Het idee om menselijke bewegingen te ondersteunen met technische apparaten is niet nieuw. Draagbare hulpmiddelen, zoals exoskeletten, worden al lange tijd gebruikt in de gezondheidszorg. Een voorbeeld is het gebruik van orthesen (corrigerende prothese voor een lichaamsafwijking) voor revalidatiedoeleinden om gewonde patiënten te helpen weer fysiek gezond te worden (Viteckova et al., 2013). Niettemin bestaat er verschil tussen orthesen en exoskeletten, aangezien orthesen dienen om mensen met aandoeningen aan het bewegingsapparaat te ondersteunen. Er zijn ook exoskeletten ontwikkeld voor militaire toepassingen (De Looze et al., 2016). Het gebruik van exoskeletten om de lichamelijke gezondheid van werknemers in stand te houden of te beschermen is echter nieuw. Hoewel verbetering van de ergonomische arbeidsomstandigheden met hulpapparaten zoals exoskeletten op dit moment nog onderwerp van discussie is, bieden dergelijke hulpmiddelen wel degelijk nieuwe mogelijkheden voor de veiligheid en gezondheid van werknemers (Schick, 2018). Bovendien zullen de vereisten voor ergonomische werkplekken in de toekomst een belangrijke rol spelen bij het waarborgen van de lichamelijke gezondheid van een beroepsbevolking die als gevolg van demografische veranderingen aan het verouderen is. Vanuit dit oogpunt bezien, is het van essentieel belang om nieuwe ergonomische hulpmiddelen te ontwikkelen aangezien de opties momenteel beperkt zijn (Hensel et al., 2018; Schick, 2018).

Exoskeletten kunnen op talrijke gebieden worden ingezet voor het verminderen van aandoeningen aan het bewegingsapparaat. In heel Europa maakt handmatige materiaalbehandeling, die een groot risico voor de gezondheid vormt, ruim 30 % van de werkzaamheden uit (Eurofound, 2012). Werkzaamheden waarbij sprake is van repetitieve taken, het hanteren van zware lasten, boven het hoofd werken of gevaarlijke lichaamshoudingen bieden diverse mogelijkheden voor het gebruik van exoskeletten. In figuur 2 is te zien dat in alle Europese landen het verplaatsen en dragen van zware lasten een aanzienlijk deel van het werk uitmaakt. Dit is vooral het geval in Roemenië, waar bijna de helft van de werknemers (44 %) soms met zware lasten werkt. Dit betreft vooral industriële werkplekken, meubelbezorging, hulpdiensten en ziekenhuizen. Het is echter belangrijk te onderkennen dat het belang van ergonomisch ontwerp vooral speelt op vaste werkplekken. Zolang technische of organisatorische maatregelen mogelijkheden bieden om het ergonomisch ontwerp van de werkplek te verbeteren, mag geen voorkeur worden gegeven aan het gebruik van exoskeletten (Schick, 2018). Het lijkt er echter op dat een focus op exoskeletten die de prestaties van werknemers verhogen belangrijker wordt gevonden dan aandacht voor het ergonomisch ontwerp van de werkplek (Baltrusch et al., 2018).

Figuur 2 Percentage werknemers van alle leeftijden in Europa die een kwart van hun werktijd besteden aan het dragen of verplaatsen van zware lasten (Eurofound, 2019)



24%	Portugal	24 %	Portugal
25%	Netherlands	25 %	Nederland
26%	Luxembourg	26 %	Luxemburg
26%	Italy	26 %	Italië
27%	Bulgaria	27 %	Bulgarije
27%	Denmark	27 %	Denemarken
28%	Cyprus	28 %	Cyprus
28%	Germany	28 %	Duitsland
29%	Belgium	29 %	België
30%	Slovenia	30 %	Slovenië
31%	Austria	31 %	Oostenrijk
32%	Estonia	32 %	Estland
32%	Ireland	32 %	Ierland
32%	United Kingdom	32 %	Verenigd Koninkrijk
32%	Hungary	32 %	Hongarije
32%	Croatia	32 %	Kroatië
33%	Czech Republic	33 %	Tsjechië
33%	Malta	33 %	Malta
35%	Poland	35 %	Polen
36%	Lithuania	36 %	Litouwen
36%	Sweden	36 %	Zweden
36%	France	36 %	Frankrijk
37%	Spain	37 %	Spanje
37%	Slovakia	37 %	Slowakije
37%	Finland	37 %	Finland
38%	Greece	38 %	Griekenland
38%	Latvia	38 %	Letland
44%	Romania	44 %	Roemenië

Als gevolg van technische problemen zijn actieve exoskeletten weinig praktisch in gebruik. In verschillende rapporten wordt gewezen op problemen in verband met het gewicht, de mechanische structuur, de batterijhouder en het ontwerp van het aandrijfmechanisme van actieve exoskeletten (Yang et al., 2008; Herr, 2009; De Looze et al., 2016). Daarentegen zijn sommige passieve exoskeletten al in de handel verkrijgbaar. Deze passieve systemen geven echter beperkte ondersteuning, omdat in eerste instantie slechts enkele lichaamsdelen verlichting ondervinden. De geboden ondersteuning bij het tillen van zware lasten is nog steeds beperkt.

Het beoogde gebruik van exoskeletten is sterk afhankelijk van hun toepassingsgebied. Exoskeletten kunnen niet alleen fungeren als technisch hulpmiddel, maar kunnen ook worden gebruikt als persoonlijk beschermingsmiddel of als medisch product. Afhankelijk van de beoogde toepassingen moeten er verschillende certificaten worden verkregen. Deze certificaten houden nauw verband met kwesties op het gebied van veiligheid en gezondheid op het werk.

Certificering van exoskeletten

Gezien hun brede scala van toepassingen voor revalidatie en gebruik in het bedrijfsleven en het leger, alsook hun bijbehorende verschillende constructietypen, is er nog steeds geen uniforme regelgeving of certificering voor exoskeletten. Om deze leemte op te vullen moet in de eerste plaats rekening worden gehouden met het functionele ontwerp en beoogde gebruik van de exoskeletten. Een exoskelet kan in dit verband worden geclassificeerd als een technisch apparaat dat een werknemer ondersteunt bij het vervullen van zijn of haar taken. Daarnaast kan een exoskelet worden geclassificeerd als een persoonlijk beschermingsmiddel. In dat geval beschermt het exoskelet de werknemer tegen fysieke

belasting die kan leiden tot arbeidsgerelateerd letsel, zoals overbelastingsblessures. Er bestaat momenteel geen consensus over de vraag of exoskeletten bescherming kunnen bieden tegen aandoeningen aan het bewegingsapparaat, en dit bemoeilijkt de classificatie.

De praktische toepassing van exoskeletten hangt nauw samen met de specifieke certificering. Zoals eerder vermeld, kan een exoskelet worden gedefinieerd als een technisch hulpmiddel in de zin van de voorschriften van Richtlijn 2006/42/EG van het Europees Parlement en de Raad betreffende machines. Actieve exoskeletten kunnen verder worden gedefinieerd aan de hand van de internationale regelgeving voor robots en robot apparatuur (ISO 10218-1: 2011) en de veiligheidseisen voor persoonlijke servicerobots (ISO 13482: 2014).

Een exoskelet dat is gecertificeerd als persoonlijk beschermingsmiddel op basis van Richtlijn 89/686/EEG van het Europees Parlement en de Raad kan voor preventieve doeleinden worden gebruikt om arbeidsgerelateerd letsel of overbelastingsblessures te vermijden. Hierbij moet worden opgemerkt dat Richtlijn 89/686/EEG geleidelijk wordt vervangen door de nieuwe Verordening (EU) 2016/425 betreffende persoonlijke beschermingsmiddelen.

En tot slot kan een exoskelet volgens de betreffende Europese Richtlijn 93/42/EEG als een medisch hulpmiddel worden beschouwd. Medische producten moeten voldoen aan hoge veiligheids- en prestatienormen. De klinische evaluatie van de doelmatigheid als medische toepassing blijft een uitdaging, want deze doelmatigheid is nog steeds lastig te bewijzen. Al deze vereisten zijn echter noodzakelijk om exoskeletten te kunnen gebruiken voor revalidatiedoelinden of medische toepassingen, of om daarvan gebruik te maken binnen het toepassingsgebied (Schick, 2018).

Risicobeoordeling van de werkplek met exoskeletten

Werkgevers hebben een algemene plicht om te zorgen voor een veilige en gezonde werkomgeving en om de potentiële risico's tijdens het werk te beperken. Risicobeoordelingen van de werkplek, waarbij rekening wordt gehouden met alle mogelijke arbeidsrisico's, zijn verplicht en moeten door alle werkgevers in Europa worden uitgevoerd. In de Europese richtlijn die is bedoeld om uitvoering te geven aan de verplichtingen op het gebied van risicobeoordeling in de zin van Kaderrichtlijn 89/391/EEG zijn specifieke maatregelen beschreven. Dergelijke maatregelen bestaan onder meer uit preventie van arbeidsrisico's, verstrekking van informatie en opleiding aan werknemers en organisaties, en de middelen om de nodige maatregelen uit te voeren. Op grond van deze regelgeving moet in verband met exoskeletten rekening worden gehouden met mogelijke risico's op bepaalde werkplekken.

De potentiële risico's van exoskeletten in een werkomgeving zijn talrijk en houden verband met hun ontwerp en functionaliteit. Actieve systemen kunnen mechanische en technische defecten vertonen. In dat geval kan een storing leiden tot verwondingen, aangezien het aandrijfmechanisme van actieve exoskeletten extra kracht kan uitoefenen op het lichaam van de werknemer. Het is op dit moment moeilijk te bepalen hoe de kracht van op het lichaam gedragen apparaten zich verhoudt tot mogelijke verwondingen. Als algemene referentie kunnen de biomechanische drempelwaarden voor zogenoemde 'collaborative robots' (cobots) (ISO/TS 15066: 2016) worden geraadpleegd (Schick, 2018). Het is niet uitgesloten dat exoskeletten het risico op verwondingen vergroten wanneer een werknemer uitglijdt, struikelt of valt. Dit risico wordt momenteel echter als laag ingeschat wanneer de exoskeletten voor het bovenlichaam worden gedragen tijdens het lopen op een horizontale ondergrond (Kim et al., 2018). Afhankelijk van de constructie en het gewicht van het exoskelet kunnen werknemers niettemin in hun natuurlijke bewegingsvrijheid worden beperkt. Hierdoor is het moeilijk om bij een val door middel van compenserende bewegingen het evenwicht te hervinden. De gevolgen zouden dan ernstiger kunnen zijn dan wanneer men geen exoskelet had gedragen. Bovendien moet rekening worden gehouden met mogelijke botsingen tussen het exoskelet en apparatuur, robots of bouw machines. Er zijn in dit verband computersimulaties uitgevoerd om onderzoek te doen naar de praktische toepassingen van exoskeletten in virtuele fabrieksomgevingen (Constantinescu et al., 2016). Tot slot worden er diverse beperkingen genoemd wat betreft het herontwerp van werkplekken met geïntegreerde exoskeletten. In noodgevallen moeten gebouwen snel worden ontruimd om de veiligheid en gezondheid van alle werknemers te waarborgen. Het is daarom van essentieel belang dat het exoskelet snel kan worden afgedaan. Ontwerpers moeten ook rekening houden met situaties waarin werknemers alleen werken.

Samengevat kan worden gesteld dat de veiligheids- en gezondheidsrisico's van exoskeletten kunnen worden ingeschat aan de hand van scenario's maar nog niet kunnen worden gespecificeerd. Redenen hiervoor zijn het geringe wetenschappelijke bewijs (Schick, 2018) en het gebrek aan praktijkervaring.

Het is met name onbekend wat de langetermijneffecten van exoskeletten op het bewegingsapparaat zijn. Daarom bestaat er nog steeds behoefte aan uitgebreide onderzoeken waarbij rekening wordt gehouden met de persoonsgebonden, fysiologische, medische en biomechanische aspecten van exoskeletten.

Evaluatie van exoskeletten

De voor- en nadelen van exoskeletten zijn momenteel onderwerp van discussie in de vakliteratuur. Over het algemeen bieden deze onderzoeken een veelbelovende mogelijkheid voor onderzoekers om de ergonomische arbeidsomstandigheden te verbeteren en aandoeningen aan het bewegingsapparaat die vaak worden geassocieerd met handmatige materiaalbehandeling te verminderen (Hensel et al., 2018). De fysieke eisen die worden gesteld aan het bewegingsapparaat zijn echter niet de enige aspecten waarmee rekening moet worden gehouden. Exoskeletten kunnen ook van invloed zijn op de sociale omgeving of op andere fysiologische factoren, zoals bloeddruk, zuurstofverbruik en hartslag.

Fysiologische aspecten

Het aanbrengen van een externe structuur zoals een exoskelet op het lichaam van een werknemer kan negatieve fysiologische effecten hebben. In de literatuur is al aangetoond dat het extra gewicht van een exoskelet mogelijk hogere eisen stelt aan het hart- en vaatstelsel (Theurel et al., 2018), hoewel men nog weinig weet van de effecten daarvan. In een eerder onderzoek is het effect van het gewicht op het energieverbruik tijdens het bewegen aangetoond: hoe hoger het gewicht dat werd gedragen, hoe hoger het energieverbruik. Niettemin is het energieverbruik in hoge mate afhankelijk van geslacht, loopsnelheid en lichaamsgewicht (Holewijn et al., 1992). Daarentegen werd door Whitfield et al. in 2014 aangetoond dat een ergonomisch tilhulpmiddel geen verhoging van het zuurstofverbruik tijdens repetitieve taken tot gevolg heeft, hoewel rekening was gehouden met de extra massa van het tilhulpmiddel. Bovendien komen deze resultaten overeen met de bevindingen van diverse onderzoeksgroepen die hebben aangetoond dat er geen veranderingen van de hartslag optreden bij personen die een persoonlijk tilhulpmiddel droegen (Godwin et al., 2009; Lotz et al., 2009). De conclusie van Whitfield et al. (2014) was dat een persoonlijk tilhulpmiddel bij industriële toepassingen niet mag worden ingezet om het takenpakket uit te breiden. Deze verschillende conclusies zijn mogelijk te verklaren door de diversiteit aan exoskeletten die eerder zijn bestudeerd. Naast de mechanische structuur en functie van een exoskelet zijn de aard van de werkzaamheden, zoals werkzaamheden in dynamische of statische omstandigheden, eveneens van invloed op de stofwisseling, en dit maakt het nog moeilijker om algemene uitspraken te doen. In specifieke omstandigheden kunnen exoskeletten echter spiervermoeidheid verminderen en op deze manier grote voordelen hebben voor de gezondheid van werknemers, aangezien wordt aangenomen dat spiervermoeidheid het risico op letsel vergroot (Godwin et al., 2009; Lotz et al., 2009). Permanente ondersteuning kan ook negatieve langetermijneffecten voor het bewegingsapparaat hebben. Het is niet uitgesloten dat zich een vermindering van de spiermassa en bijgevolg een afname van de lichaamskracht voordoet, maar deze effecten houden nauw verband met de mate waarin de spieren worden ondersteund door het exoskelet.

Bovendien kunnen er drukpunten ontstaan op de plekken waar het exoskelet aan het lichaam is bevestigd. Dit kan mettertijd tot ongemak leiden. Bovendien is het denkbaar dat externe druk op de bloedvaten, veroorzaakt door riemen of banden, de doorbloeding van het lichaamsdeel in kwestie vermindert. Daarnaast kunnen hartslag en bloeddruk invloed ondervinden van het gebruik van een exoskelet bij repetitieve werkzaamheden waarbij boven het hoofd wordt gewerkt. Tot slot kan zich huidirritatie als gevolg van wrijving of allergische reacties voordoen. Dit zijn echter speculatieve factoren die slechts met de nodige omzichtigheid in overweging moeten worden genomen.

Acceptatie door gebruikers en psychosociale effecten

Hoewel de fysieke effecten van exoskeletten van invloed kunnen zijn op de werknemer, kan acceptatie door gebruikers ook een belangrijke rol spelen in de werkomgeving. Voor langdurig gebruik is het van essentieel belang dat het exoskelet acceptabel wordt geacht. Momenteel wordt onderzoek gedaan naar subjectieve evaluaties van exoskeletten om vast te stellen in hoeverre het gebruik van technologie acceptabel wordt geacht (Gilotta et al., 2018; Hensel et al., 2018). Hoewel harde exoskeletten door veel gebruikers positief worden beoordeeld, hebben Hensel et al. in 2018 aangetoond dat deze acceptatie

in de loop der tijd kan afnemen en dat deze sterk samenhangt met ongemak en bruikbaarheid. Ongemak is een van de meest uitdagende aspecten en kan een brede toepassing van exoskeletten op industriële werkplekken (Bosch et al., 2016) in de weg staan. Ook hier dient erop gewezen te worden dat deze evaluaties nauw verband houden met het gebruik van exoskeletten bij specifieke werkzaamheden en dat deze derhalve niet mogen worden gegeneraliseerd. De bevindingen wijzen er echter op dat ontwikkelaars rekening moeten houden met de functionaliteit en het gewicht alsook het ergonomische ontwerp van exoskeletten. Bovendien kunnen werknemers zich minderwaardig voelen als ze een exoskelet gebruiken voor het uitvoeren van hun dagelijkse werkzaamheden, omdat het gebruik van het apparaat ook verband houdt met het fysieke aspect van presteren. Gilotta et al. hebben in 2018 sociale aspecten genoemd als factor die van negatieve invloed kan zijn op de acceptatie. Het dragen van exoskeletten kan ook leiden tot stigmatisering op de werkplek, omdat de schijn wordt gewekt dat werknemers afhankelijk zijn van de ondersteuning door dit hulpmiddel.

Biomechanische aspecten

Momenteel zijn er tal van onderzoeken waaruit blijkt dat exoskeletten de fysieke belasting van bepaalde delen van het lichaam, zoals de schoudergewrichten of de onderrug, kunnen verlichten (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). Tegelijkertijd kan het echter relevant zijn dat de herverdeling van de fysieke belasting leidt tot een grotere belasting van andere delen van het lichaam als de uitgeoefende kracht niet naar de grond wordt overgebracht (Theurel et al., 2018; Weston et al., 2018). In dit verband hebben Weston et al. in 2018 ontdekt dat een exoskelet voor het bovenlichaam de belasting van het onderste deel van de wervelkolom doet toenemen. Theurel et al. hebben in 2018 aangetoond dat een exoskelet voor het bovenlichaam de spieractiviteit in de schoudergewrichten kan doen afnemen. Er is ook melding gemaakt van lichamelijke gevolgen zoals grotere spieractiviteit in andere lichaamsdelen of afwijkende bewegingspatronen. Bovendien heeft het extra gewicht van een exoskelet niet alleen gevolgen voor de eisen die aan het hart- en vaatstelsel worden gesteld, maar zorgt het er ook voor dat het lichaamsswaartepunt van de drager zich verplaatst, wat van invloed is op de spieractiviteit van de gebruiker. Het is belangrijk om op te merken dat de effecten van exoskeletten op het menselijk lichaam niet kunnen worden gegeneraliseerd. De onderzoeksvragen over biomechanische effecten hebben vaak betrekking op zeer specifieke bewegingen en spieractiviteiten, en in deze vragen wordt geen rekening gehouden met alle mogelijke toepassingen en alle soorten exoskeletten. In deze onderzoeken kan echter worden ingegaan op het gebrek aan functionaliteit dat het gevolg is van de mechanische effecten van bepaalde exoskeletten en de gevolgen daarvan voor de belasting van het lichaam.

Uitdagingen op het gebied van veiligheid en gezondheid op het werk

Bij de invoering van nieuwe technologieën op de werkplek moet altijd een kritische beoordeling worden gemaakt van de veiligheid en gezondheid op het werk voor belanghebbenden. Over het algemeen is een ergonomisch ontwerp overeenkomstig Kaderrichtlijn 89/391/EEG een basisvereiste. In engere zin zou dit betekenen dat voor standaardwerkplekken geen extra maatregelen nodig zijn. Als gevolg van de huidige werksituatie in Europa en het verband tussen nieuwe technologieën en aandoeningen van het bewegingsapparaat zijn goede ergonomische omstandigheden echter niet vanzelfsprekend. Om een goede werkomgeving te waarborgen, moeten overeenkomstig Kaderrichtlijn 89/391/EEG technische, organisatorische en individuele maatregelen worden genomen. Gezien de invloed daarvan op de veiligheid en gezondheid op het werk is een hiërarchische toepassing vereist. Wanneer alle technische maatregelen zoals het gebruik van tilhulpmiddelen of herontwerp van een werkplaats zijn uitgeput, moet worden gekeken naar de organisatorische aspecten zoals de reorganisatie van werkprocessen. Tot slot kunnen persoonsgebonden maatregelen worden overwogen om de werknemers te beschermen.

Zoals eerder besproken, kunnen exoskeletten worden omschreven als technische of medische hulpmiddelen en tevens worden gedefinieerd als beschermingsmiddel. Hun classificatie is sterk afhankelijk van hun toepassing, ontwerp en beoogd gebruik. Exoskeletten kunnen derhalve momenteel uitsluitend per geval worden beoordeeld. In de praktijk is het niet uitgesloten dat exoskeletten worden gebruikt als technische hulpmiddelen om werkprocessen te vergemakkelijken. Als exoskeletten echter worden gebruikt om het ontwerp van een werkplek waar ergonomische maatregelen nodig zijn te

verbeteren teneinde de werknemers te beschermen tegen overbelastingsblessures, dan moeten ze als persoonlijk beschermingsmiddel worden aangemerkt.

In de toekomst moet de evaluatie van exoskeletten worden geïntegreerd in de traditionele ergonomische benadering (ontwerp waarin de mens centraal staat), omdat exoskeletten van invloed zijn op werksituaties en organisatorische aspecten.

Werknemers

De gebruikerseisen voor werknemers zijn afhankelijk van de specifieke classificatie van het exoskelet in kwestie. Wanneer exoskeletten als technisch hulpmiddel zijn gecertificeerd, zijn zij gebonden aan bepaalde werkplekken en kunnen zij niet in alle denkbare werksituaties worden gebruikt, tenzij zij voor deze toepassing in aanmerking zijn genomen. Technische hulpmiddelen zijn echter niet te classificeren als persoonsgebonden maatregelen en hun gebruik is vrijwillig. Indien een exoskelet als persoonlijk beschermingsmiddel is gecertificeerd, is het gebruik daarvan wettelijk verplicht. In dat geval moet een werknemer zijn uitgerust met een exoskelet zolang hij of zij werkt met een zwaardere werklast.

Werkgevers

Tijdens invoering en gebruik moeten werkgevers rekening houden met verschillende aspecten. De hygiënevoorschriften voor persoonlijke beschermingsmiddelen zijn uitgebreider dan die voor technische hulpmiddelen. Wanneer het exoskelet dient als persoonlijk beschermingsmiddel, is het gebruik ervan verplicht. Om aan deze eisen te voldoen, moet elke werknemer die werkt op een werkplek waar een exoskelet verplicht is als persoonlijk beschermingsmiddel met een exoskelet worden uitgerust. Dit kan opslagproblemen tot gevolg hebben. Voorts moet rekening worden gehouden met een langdurig aanpassingsproces, het bewegingsapparaat, gevolgen voor het hart- en vaatstelsel en prestatieaspecten. Bovendien moeten er voldoende wasmiddelen of wasmachines beschikbaar zijn om aan de hygiënenormen te voldoen. Exoskeletten die zijn gedefinieerd als technisch hulpmiddel zijn facultatief en hoeven niet aan iedere werknemer op de werkplek beschikbaar te worden gesteld. Wanneer er exoskeletten worden gebruikt, moeten zij echter worden beschouwd als een hulpmiddel (ondersteuning) en niet als een manier om de prestaties of efficiëntie van de werknemers te verbeteren.

Beleidsmakers

In de toekomst moeten beleidsmakers rekening houden met regelgeving betreffende de technische aspecten en toepassing van exoskeletten, teneinde certificering van de nieuwe technologie te vergemakkelijken. Dit stelt fabrikanten in staat hun producten duidelijker te classificeren en biedt werkgevers de mogelijkheid om exoskeletten voor hun beoogde doel te gebruiken. Er moet echter worden opgemerkt dat het beoogde gebruik van het product en de bijbehorende certificering altijd onder de verantwoordelijkheid van de fabrikant valt.

Samenvatting

Het onderwerp exoskeletten staat momenteel volop in de aandacht. Ondanks hun schijnbaar veelbelovende mogelijkheden moeten er bij de toepassing van exoskeletten echter op een groot aantal terreinen vraagtekens worden geplaatst. Het valt nog te bezien of exoskeletten in de toekomst op grote schaal zullen worden gebruikt om werknemers te beschermen tegen overbelastingsblessures of om werkprocessen efficiënter te maken. Afhankelijk van de technische ontwikkelingen kan het exoskelet een standaardhulpmiddel voor handmatige werkprocessen worden of een nicheproduct blijven voor zeer specifieke toepassingen. De huidige commerciële interesse in exoskeletten kan echter ook een probleem vormen voor de toekomstige ontwikkelingen omdat prestatiegerichte of economische benaderingen prioriteit kunnen krijgen, waardoor de veiligheid op het werk wordt veronachtzaamd. Niettemin kunnen exoskeletten worden toegepast als technische of medische hulpmiddelen of als persoonlijke beschermingsmiddelen, afhankelijk van hun beoogde gebruik op de werkplek. Vanwege de verscheidenheid aan functionaliteiten, ontwerpen en toepassingen is er echter geen uniforme definitie beschikbaar, en in de praktijk compliceert dit de invoering van exoskeletten vanwege het certificeringsaspect. Hoewel er talrijke onderzoeken zijn gedaan naar de verschillende aspecten van bruikbaarheid en functionaliteit van exoskeletten, is er momenteel nog weinig inzicht in de effecten op

de gezondheid van werknemers. Met name de langetermijneffecten van exoskeletten op fysiologische, psychosociale en biomechanische factoren zijn onbekend. Om betrouwbaardere resultaten te waarborgen, moet in toekomstige studies worden gefocust op de praktijkgerichte langetermijneffecten van exoskeletten op de werkplek. Er moet worden opgemerkt dat het gebruik van exoskeletten ter verbetering van het ergonomisch ontwerp van vaste werkplekken niet aan te bevelen is, maar dat er tevens een groot aantal niet-vaste of mobiele werkplekken zijn waar ergonomische maatregelen onmogelijk zijn. Samenvattend kan gesteld worden dat het gebruik van exoskeletten een veelbelovende aanpak kan zijn voor het verminderen van het aantal aandoeningen aan het bewegingsapparaat.

Auteurs: Peters, M. en Wischniewski, S. (2019). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Federaal instituut voor veiligheid en gezondheid op het werk), Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund, Duitsland.

Projectbeheer: Annick Staren, Emmanuelle Brun, Europees Agentschap voor veiligheid en gezondheid op het werk (EU-OSHA), 2019

Wij willen graag dr. Lars Adolph, professor dr. Ute Latza en de nationale focal points van EU-OSHA bedanken voor hun kritische beoordelingen en nuttige suggesties. Wij willen ook graag Eurofound bedanken voor de gebruikte illustraties in dit document.

Dit artikel is opgesteld in opdracht van het Europees Agentschap voor veiligheid en gezondheid op het werk (EU-OSHA). Alleen de auteurs zijn verantwoordelijk voor de inhoud ervan, met inbegrip van de geuite standpunten en/of conclusies, en deze inhoud komt niet noodzakelijkerwijs overeen met de standpunten van EU-OSHA.

Literatuur

- 89/391/EEG. Richtlijn van de Raad van 12 juni 1989 betreffende de tenuitvoerlegging van maatregelen ter bevordering van de verbetering van de veiligheid en de gezondheid van de werknemers op het werk. De Raad van de Europese Gemeenschappen.
- 89/686/EEG. Richtlijn van de Raad van 21 december 1989 inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der lidstaten betreffende persoonlijke beschermingsmiddelen. De Raad van de Europese Gemeenschappen.
- 93/42/EEG. Richtlijn 93/42/EEG van de Raad van 14 juni 1993 betreffende medische hulpmiddelen. De Raad van de Europese Gemeenschappen.
- 2006/42/EG. Richtlijn 2006/42/EG van het Europees Parlement en de Raad van 17 mei 2006 betreffende machines en tot wijziging van Richtlijn 95/16/EG (herschikking). Het Europees Parlement en de Raad van de Europese Unie.
- 2016/425. Verordening (EU) 2016/425 van het Europees Parlement en de Raad van 9 maart 2016 betreffende persoonlijke beschermingsmiddelen en tot intrekking van Richtlijn 89/686/EEG van de Raad. Het Europees Parlement en de Raad van de Europese Unie.
- Abdoli-E, M., Agnew, M. J. en 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), blz. 456-465.
- Baltrusch, S. J., van Dieën, J. H., van Bennekom, C. A. M. en Houdijk, H. (2018). The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Applied Ergonomics*, 72, blz. 94-106.
- Bevan, S. (2015). Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe. *Best Practice & Research in Clinical Rheumatology*, 29 (3), blz. 356-373.
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K. en De Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*, 54, blz. 212-217.
- Collins, J. D. en 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, blz. 85-97.
- Constantinescu, C., Muresan, P.-C. en Simon, G.-M. (2016). JackEx: the new digital manufacturing resource for optimization of exoskeleton-based factory environments. *Procedia CIRP*, 50, blz. 508-511.
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S. en O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59 (5), blz. 671-681.
- INRS. (2018). Exosquelettes au travail: impact sur la santé et la sécurité des opérateurs – état des connaissances. Parijs: Institut National de Recherche et de Sécurité. Overgenomen van INRS: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206311>
- INRS. (2019). Acquisition et integration d'un exosquelette en entreprise: Guide pour les préventeurs. Parijs: Institut National de Recherche et de Sécurité. Overgenomen van INRS: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206315>
- Eurofound. (2012). *Vijfde Europese enquête naar de arbeidsomstandigheden*. Luxemburg: Bureau voor publicaties van de Europese Unie.
- Eurofound. (2019). *Europese enquête naar de arbeidsomstandigheden 2015*. Brussel: Eurofound. Overgenomen van Eurofound: <https://www.eurofound.europa.eu/data/european-working-conditions-survey>.
- Gams, A., Petrič, T., Debevec, T. en Babič, J. (2013). Effects of robotic knee exoskeleton on human energy expenditure. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60 (6), blz. 1636-1644.
- Gilotta, S., Spada, S., Ghibaudo, L., Isoardi, M. en Mosso, C. (2018). *Acceptability beyond Usability: A Manufacturing Case Study*. Document voorgesteld op Congres van de International Ergonomics Association.

- Godwin, A. A., Stevenson, J. M., Agnew, M. J., Twiddy, A. L., Abdoli-Eramaki, M. en 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), blz. 121-126.
- Gopura, R. A. R. C. en Kiguchi, K. (2009). *Mechanical Designs of Active Upper-limb Exoskeleton Robots: State-of-the-art and Design Difficulties*. Document voorgesteld op ICORR 2009: IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics.
- Graham, R. B., Agnew, M. J. en 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), blz. 936-942.
- Hensel, R., Keil, M., Mücke, B. en Weiler, S. (2018). Chancen und Risiken für den Einsatz von Exoskeletten in der betrieblichen Praxis. *ASU Zeitschrift für medizinische Prävention*, 53, blz. 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. en Wammes, L. (1992). Physiological strain due to load carrying in heavy footwear. *European Journal of Applied Physiology Occupational Physiology*, 65 (2), blz. 129-134.
- ISO 10218-1: 2011. Robots en robot apparatuur – veiligheidseisen voor industriële robots – deel 1: robots. Genève: Internationale Organisatie voor normalisatie.
- ISO 13482: 2014. Robots en robot apparatuur – veiligheidseisen voor persoonlijke servicerobot. Genève: Internationale Organisatie voor normalisatie.
- ISO/TS 15066: 2016. Robots en robot apparatuur – collaborative robots. Genève: Internationale Organisatie voor normalisatie.
- Kim, S., Nussbaum, M. A., Mokhlespour Esfahani, M. I., Alemi, M. M., Jia, B. en 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, blz. 323-330.
- Liedtke, M. en Glitsch, U. (2018). Exoskellette — Verordnung für persönliche Schutzausrüstung. *sicher ist sicher*, 3, blz. 110-113.
- Lotz, C. A., Agnew, M. J., Godwin, A. A. en 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), blz. 331-340.
- Schick, R. (2018). Einsatz von Exoskeletten in der Arbeitswelt. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, 68 (5), blz. 266-269.
- Theurel, J., Desbrosses, K., Roux, T. en Savescu, A. (2018). Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied Ergonomics*, 67, blz. 211-217.
- Viteckova, S., Kutilek, P. en Jirina, M. (2013). Wearable lower limb robotics: a review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 33 (2), blz. 96-105.
- Weston, E. B., Alizadeh, M., Knapik, G. G., Wang, X. en Marras, W. S. (2018). Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading of the lumbar spine. *Applied Ergonomics*, 68, blz. 101-108.
- Whitfield, B. H., Costigan, P. A., Stevenson, J. M. en 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), blz. 39-44.
- Yang, C., Zhang, J., Chen, Y., Dong, Y. en 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), blz. 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), blz. 11125-11134.