

# Exoskeletten als oplossing voor fysiek zwaar werk?

Exoskeletten zijn hot. Bijna dagelijks verschijnen nieuwe artikelen in de pers en filmpjes op YouTube, onder andere over exoskeletten als oplossing voor lichamelijk zwaar werk. Hoe ver staat het nu met de ontwikkeling van deze exoskeletten? Gaan ze de werknemer straks echt helpen bij het verrichten van lichamelijk zwaar werk?

**Michiel de Looze, Frank Krause en Wietse van Dijk**

## Mens-robot-samenwerking

De maatschappelijke discussie over de toekomst van werk wordt beheerst door het thema robotisering. Sinds Frey en Osborne (2014) stelden dat robots bijna 50% van onze banen kunnen overnemen, gaat het vooral over de negatieve effecten op de arbeidsmarkt: 'De robots pakken onze banen af'. Het eind 2015 verschenen WRR-rapport (2015) nuanceert dit beeld. Een deel van de banen zal verdwijnen, maar een veel groter deel van de banen gaat veranderen. Binnen banen wordt een deel van de taken door robots en ICT systemen overgenomen, terwijl andere taken bij de mens zullen liggen. WRR (2015) pleit daarom voor de inzet op complementariteit (in plaats van op vervanging van mensen door robots), waarbij de specifieke kwaliteiten van techniek en mens optimaal benut worden

Een mooi voorbeeld van complementariteit betreft het exoskelet: een mens-gestuurd robotsysteem dat op het lichaam gedragen wordt. Het exoskelet benut de menselijke kwaliteit van snel de omgeving scannen, veranderingen waarnemen, beslissen en gedrag aanpassen, terwijl het exoskelet fysieke vermogen toevoegt dat de mens mogelijk te kort komt in het geval van fysiek zwaar werk.

In de huidige tijd is er nog veel fysiek zwaar werk, ondanks mechanisering en robotisering. Een aanzienlijk deel van de beroepsbevolking in de EU wordt blootgesteld aan het manueel verplaatsen van lasten (30%), repeterende bewegingen (63%) en belastende lichaamshoudingen (46%) (Eurofound 2012). De vraag is of het exoskelet hiervoor een oplossing zal worden. Dragen bouwvakkers, verplegers en magazijnmedewerkers straks allemaal een exoskelet?

Afbeelding 1. Diverse exoskeletten in ontwikkeling binnen Europees project RoboMate: een romp-exoskelet en een arm-exoskelet ([www.robomate.eu](http://www.robomate.eu)).

In dit artikel bespreken we: (1) verschillende soorten exoskeletten en hun werking (2) mogelijke toepassingen, (3) de effectiviteit in termen van reductie van fysieke arbeidsbelasting en (4) de stand der techniek ofwel 'hoe ver zijn we verwijderd van toepassing in de beroepspraktijk'.

## Exoskeletten en werkingsprincipe

Exoskeletten zijn er in alle soorten en maten. Exoskeletten kunnen we onderscheiden op basis van de lichaamsregio's die ze ondersteunen: exoskeletten voor de onderste extremiteiten die het lopen of staan kunnen ondersteunen, exoskeletten die de armen ondersteunen bij hand-arm taken, exoskeletten die de romp ondersteunen (figuur 1) en de zogenoemde 'full-body' exoskeletten.

Exoskeletten kunnen we ook onderscheiden in de mate waarin de vorm van het menselijk lichaam 'gevolgd' wordt. Een antropomorf exoskelet omvat segmenten en gewrichten, die nauwaansluiten bij de antropometrie van het menselijk lichaam. Zo'n exoskelet is minder



beperkend voor de bewegingsvrijheid, maar is al snel complexer om te bouwen dan een non-antropomorf exoskelet. Non-antropomorfe (delen van) exoskeletten kunnen de oplossing bieden daar waar het nauw aansluiten van op het bewegende menselijk lichaam uitermate complex wordt, bijvoorbeeld rond het schoudergewricht.

Tot slot is er een onderscheid tussen actieve exoskeletten en passieve exoskeletten. Actieve exoskeletten zijn uitgerust met actuatoren, zoals bijvoorbeeld elektrische motoren. Passieve exoskeletten hebben geen actuatoren. Deze systemen gebruiken bijvoorbeeld veersystemen die energie opslaan wanneer ze op spanning worden gebracht, bijvoorbeeld wanneer iemand voorover bukt. Die energie kan vervolgens worden aangewend ter ondersteuning van een gebogen houding of het inzetten van een tilbeweging. Een voorbeeld van zo een exoskelet is de in Nederland ontwikkelde Laevo door het gelijknamige bedrijf (Knittel e.a., 2015).

Centraal staat dat een exoskelet fysieke ondersteuning biedt aan het menselijk lichaam, terwijl de mens bepaalt hoe hij beweegt. Bij bestaande passieve systemen wordt de mate van ondersteuning direct bepaald door de mate van rompbuiging, maar niet door het gewicht dat daarbij getild wordt. Bij het tillen van een zwaar gewicht met een nagenoeg rechte rug levert een dergelijk systeem dus niet de gewenste ondersteuning.

Actieve exoskeletten bieden meer mogelijkheden om de timing en het niveau van de ondersteuning te regelen. Het is hiervoor wel noodzakelijk om de 'menselijke intentie tot bewegen' te bepalen. Dit kan door middel van sensoren.

Er zijn hier verschillende mogelijkheden. Sommige exoskeletten maken gebruik van op mechanica georiënteerde sensoren. Deze sensoren meten bijvoorbeeld krachten, momenten, houdingen, snelheden of versnellingen. Op basis van dergelijke data worden actuatoren aangezet om de door de mens ingezette beweging te ondersteunen. Exoskeletten die deze methoden gebruiken zijn bijvoorbeeld: Sarcos/ Raytheon XOS2, BLEEX, EKSO GT, ReWalk and HULC (Firestone en Maghan, 2012; Kazerooni e.a., 2006; Kim e.a. 2015, Esquenazi e.a. 2012).

Andere exoskeletten maken gebruik van EMG (Elektromyografie) om de menselijke intentie af te kunnen leiden (bijvoorbeeld mPower arm brace, Hand Mentor en HAL (Lo & Xie, 2012)). Met EMG wordt de activatie van spieren gemeten. Deze gaat vooraf aan de werkelijke beweging (de zgn. Electro-Mechanical Delay bedraagt 10-150 ms), hetgeen een tijdsvoordeel biedt ten opzichte van de eerder beschreven mechanische georiënteerde sensoren.

Een derde mogelijkheid voor het meten van de menselijke intentie vormt EEG (Elektro-Encefalografie),



Afbeelding 2. Een militaire toepassing van een exoskelet: de zogenaamde ExoBuddy, een exoskelet die het lopen met zware bepakkings ondersteunt, in ontwikkeling bij TNO en Intespring.

het meten van signalen van hersenactiviteit. De aansturing van exoskeletten door middel van EEG staat nog in de kinderschoenen, hoewel de aftrap bij het WK voetbal in 2014 al verricht werd door een patiënt met paraplegie middels een hersen-gestuurd exoskelet: imaginatie van de opeenvolgende fasen van de trapbeweging deed de eerste bal op het WK rollen!

### Toepassingen van exoskeletten

Toepassingen van exoskeletten zitten van oudsher in de medische en militaire hoek. In de medische toepassingen gaat het om het ondersteunen van mensen die kracht of aanstuuringsmogelijkheden missen om lichaamshoudingen aan te nemen. Militaire toepassingen zijn vooral gericht op het vergroten van de fysieke capaciteit van militairen.

Exoskeletten bedoeld voor toepassing in de arbeidsfeer zijn van later toepassing. Hierin gaat het met name om het beperken van de risico's van fysiek zwaar werk en het vergroten van de duurzame inzetbaarheid. In een literatuurstudie vonden we 40 wetenschappelijke artikelen waarin een exoskelet bedoeld voor ondersteuning bij arbeid werd beschreven (De Looze e.a. 2016). Deze artikelen beschreven 26 exoskeletten: 19 actieve exoskeletten en 7 passieve systemen, gericht op het ondersteunen van dynamisch tillen en dragen, statische voorovergebogen houdingen,

tillen van ziekenhuispatiënten of hand-arm taken boven schouderhoogte. Ontwikkelingen gaan echter hard. Sinds het schrijven van onze review, duiken op internet steeds weer nieuwe exoskeletten voor de arbeidspraktijk op.

Uiteraard zijn exoskeletten niet altijd de eerste en de meest voor de hand liggende oplossing voor fysiek zwaar werk. Werkplek of taakaanpassing of andere hulpmiddelen, is vaak eenvoudiger te implementeren. Toch zijn er specifieke situaties waarin een exoskelet uitkomst kan bieden:

- dynamische situaties waarin steeds andere objecten tussen wisselende locaties moeten worden verplaatst. Het onvoorspelbare karakter van de taak maakt automatisering relatief duur, zeker als de af te leggen afstand groot is. Voorbeelden zien we in het magazijn, in (thuis)zorg, bij verhuizers en bij het laden/lossen van vrachtwagens en vliegtuigen.
- situaties waarin werknemers langdurig in ongemakkelijke houdingen moeten staan (voorovergebogen romp, arm-hand taak boven schouderhoogte) of langdurig een zwaar gewicht moeten vasthouden. Voorbeelden zijn te vinden in de autogarages, in de tuinbouwkas of bij chirurgen en mondhygiënisten.

### **Effectiviteit van exoskeletten in het reduceren van arbeidsbelasting**

Voor verschillende passieve systemen, o.a. PLAD, BNDR, HappyBack, zijn de effecten op de activatie van de voornaamste rugspieren bij het tillen van lasten bestudeerd (o.a. Abdoli en Stevenson 2008, Ulrey en Fathallah 2013, Barret en Fathallah 2001). Het dragen van een passief systeem blijkt bij het tillen van lasten (5-25 kg) een reductie van zo'n 15 tot 25% van de activiteit van de lage rugspieren tot gevolg te hebben. Dit laat zich grof gezegd door vertalen naar een afname van de compressie-kracht op de lumbale wervelkolom in een vergelijkbare orde van grootte. Een enigszins verlaagd risico op het ontstaan van rugklachten bij mensen die veel moeten tillen kan daarom het gevolg zijn (De Looze e.a. 2016).

TNO heeft het effect van het Laevo systeem gemeten (Bosch e.a. 2015), niet bij het tillen van lasten, maar bij het werken in een statische voorovergebogen werkhouding zonder gewicht in de handen.

Voor de lage rugspieren vonden we een significante afname van spieractivatie van 35-38%. Omdat het vasthouden van een gewicht niet tot meer ondersteuning vanuit dit systeem zal leiden, valt aan te nemen dat de procentuele afname in rugspieractiviteit ten gevolge van tillen lager zal liggen.

Ook voor enkele actieve exoskeletten zijn de effecten op spieractiviteit onderzocht.

Dit is onder andere gedaan voor de Muscle Suit. De Muscle Suit is een actief exoskelet dat de bovenbenen, romp en armen ondersteunt. Dit exoskelet leidt bij het

tillen van lasten tot positieve effecten op de arm- en schouderspieren, namelijk een reductie in spieractiviteit van de Deltoideus Anterior in de range van 20 tot 35% en van de Flexor Carpi Radialis van 40 tot 65% (o.a. Muramutsu e.a., 2011). Het vasthouden van een gewicht boven het hoofd leidde zelf in de Biceps Brachii en de Trapezius spieren tot afnames tot wel 70%.

Uit evaluaties van andere actieve exoskeletten blijkt dat exoskeletten de spieractiviteit kunnen verlagen, zowel in de benen (bij lopen en trap lopen), in de rug (bij tillen en voorover buigen) en in de schouders en armen bij hand-arm taken (onder andere Galle e.a., 2013; Luo & Yu, 2013; Lee e.a., 2012; Naito e.a., 2007).

### **Stand der techniek**

Er gebeurt veel op het gebied van exoskeletten. Dit geldt ook voor exoskeletten met een toepassing in de arbeidsfeer. Wereldwijd zien we allerlei initiatieven voor nieuwe en toepasbare exoskeletten. De stap tussen lab omgeving en de praktijk is echter groot. Dit geldt zeker voor de actieve exoskeletten. De belangrijkste technische obstakels die acceptatie en grootschalige toepassing nog in de weg staan (ongeacht of het om een arm-, een been- of een full-body exoskelet gaat) zijn de volgende:

- Exoskeletten zijn vaak te zwaar en te groot. Het gewicht kan de positieve effecten van een exoskelet neutraliseren en leidt al snel tot druk op lichaamsdelen en discomfort. De omvang van veel exoskeletten beperkt vooral de bewegingsvrijheid en maakt het gebruik in een beperkte ruimte onmogelijk.
- Exoskeletten sluiten vaak niet goed aan op het menselijk lichaam. Het blijkt lastig een zodanige fit te maken tussen exoskelet en menselijk lichaam (zeker bij beweging), dat discomfort, balans verstoring, beperking van de bewegingsvrijheid en/of nadelige verplaatsingen van kracht uitblijven.
- Exoskeletten ondersteunen vaak niet effectief. Vloeiende en snelle bewegingen zijn doorgaans niet mogelijk met een exoskelet. Voor iemand die zonder exoskelet niet kan lopen maar met een exoskelet wel is dit misschien een minder harde eis, maar in de industrie ziet men niet graag iemand op gehalveerde snelheid bewegen.

Lange tijd heeft de nadruk in de ontwikkeling van exoskeletten gelegen op de techniek en kreeg de toepassing en de drager minder aandacht.

In de meest recente jaren zien we daar toch een verschuiving, getuige enkele recente exoskeletten (RoboMate, Fortis (Lockheed Martin) en Panasonic) waarin meer dan voorheen gestreefd wordt naar praktische bruikbaarheid. De rol van human factor specialisten is hierbij van cruciaal belang. Door exoskeletten te ontwerpen met een duidelijke toepassing en gebruiker in gedachten is het mogelijk

om lichtere en effectievere exoskeletten te ontwerpen met een betere fit op het menselijk lichaam.

Dit geldt ook voor passieve exoskeletten. Diverse commerciële producten zoals Laevo, zijn al verkrijgbaar. Deze exoskeletten zijn niet universeel inzetbaar, maar kunnen voor medewerkers in specifieke werksituaties ondersteuning geven. Of deze systemen werkelijk tot een verlaagd risico op rugklachten leiden moet nog blijken. Acceptatie vormt ook hier natuurlijk een punt van aandacht.

Naarmate exoskeletten comfortabeler, sneller en effectiever worden, komen steeds meer toepassingen in beeld. Gezien de huidige snelheid van ontwikkeling lijkt het een kwestie van tijd voordat exoskeletten, passieve en actieve, hun weg naar de praktijk zullen vinden.

## Referenties

- Abdoli-E, M en Stevenson JM, 2008. The effect of on-body lift assistive device on the lumbar 3D dynamic moments and EMG during asymmetric freestyle lifting. *Clin. Biomech.* 23, 372-380.
- Barret, AL en Fathallah FA (2001) Evaluation of four weight transfer devices for reducing loads on the lower back during agricultural stoop labor. Paper number 01-8056 of the ASAE Meeting, Sacramento, USA.
- Bosch T, Looze MP de, Eck J van, Knittel K (2016) The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics* 54, 212-217
- Esquenazi A, Talaty M, Packel A en Saulino M (2012) The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 91(11), 911-921.
- Eurofound. (2012). Fifth European Working Conditions Survey. Publications Office of the European Union, ISBN: 978-92-897-1062-6.
- Firestone J en Maghan C (2012) Design and Implementation of the XOS2 Exoskeleton for the United States Military. University of Pittsburgh, Pittsburgh.
- Frey, C. B., & Osborne, M. A. (2013). The future of employment: how susceptible are jobs to computerisation. [http://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/The\\_Future\\_of\\_Employment.pdf](http://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/The_Future_of_Employment.pdf)
- Galle S, Malcolm P, Derave W, en De Clercq D (2013) Adaptation to walking with an exoskeleton that assists ankle extension. *Gait & Posture*, 38(3), 495-9
- Kazerooni H, Steger R en Huang L (2006) Hybrid control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *The International Journal of Robotics Research*, 25(5-6), 561-573.
- Kim, HG, Lee JW, Jang J, Park S en Han C (2015) Design of an exoskeleton with minimized energy consumption based on using elastic and dissipative elements. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 13(2), 463-474.
- Knittel K, Eck J van, Bosch T, Looze MP de (2015) Innovatieve rugondersteuning. De effecten van een passief exoskelet op spieractiviteit en volhoudtijd. *Tijdschrift voor Human Factors* 40(1), 4-9
- Lee H, Lee B, Kim W, Gil M, Han J en Han C (2012) Human-robot cooperative control based on pHRI (Physical Human-Robot Interaction) of exoskeleton robot for a human upper extremity. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(6), 985-992
- Luo Z en Yu Y (2013) Wearable stooping-assist device in reducing risk of low back disorders during stooped work. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* 2013, 230-236
- Lo, HS en Xie SQ (2012) Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: state of the art and future prospects. *Medical engineering & physics*, 34(3), 261-268.

## Abstract

Exoskeletons are hot. Numerous types of exoskeletons are described in the scientific literature, in the press and on the internet, including exoskeletons aimed to reduce the mechanical load on workers exposed to heavy work. In this review, we discuss the state-of-the-art of these industrial exoskeletons. Herein, we distinct active exoskeletons using actuators from passive exoskeletons using materials, springs or dampers with the ability to store and release energy. Both have the potential to significantly reduce the mechanical loading on body structures as illustrated by experimental observations of muscle activity reduction. Several issues however still stands in the way of a wide acceptance and application in industry, today.

---

## Over de auteurs



Prof. dr. M.P. de Looze  
Senior onderzoeker  
Sustainable Productivity & Employability  
TNO Leiden  
Hoogleraar Ergonomie van productie  
en productiemiddelen  
VU Amsterdam  
michiel.delooze@tno.nl



Drs. F. Krause Eur. Erg.  
Onderzoeker/adviseur  
Sustainable Productivity & Employability  
TNO Leiden



Dr. W. van Dijk  
Onderzoeker  
Sustainable Productivity & Employability  
TNO Leiden