

EXOSKELETEN VOOR FYSIEK ZWAAR WERK

DE STAND VAN ZAKEN



TNO innovation
for life

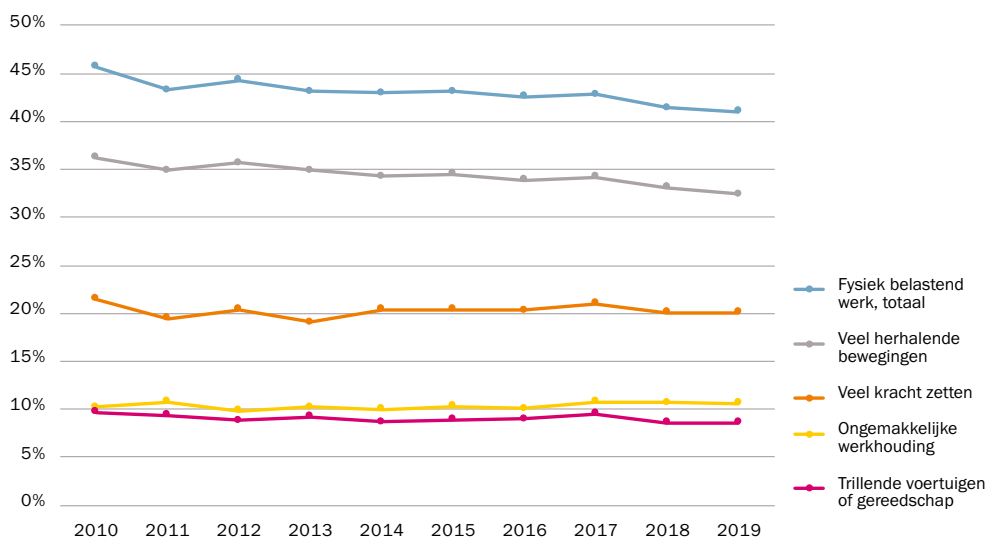
INHOUD

1	Inleiding – exoskeletten ter preventie van overbelasting	3
2	Exoskeletten – een overzicht	4
3	De effectiviteit van exoskeletten – onderzoek naar objectieve factoren	6
3.1	De effectiviteit van rompexoskeletten	6
3.2	De effectiviteit van schouderexoskeletten	7
3.3	Mogelijke langetermijneffecten	8
4	Acceptatie en beleving van exoskeletten – onderzoek naar subjectieve factoren	9
5	Aandachtspunten bij de verdere ontwikkeling en inzet van exoskeletten	11
5.1	Positie binnen de arbeidshygiënische strategie	11
5.2	Toepassing in de praktijk	12
5.3	Noodzakelijke ontwikkelingen	13
6	Conclusies	15
7	Referenties	16

1 INLEIDING – EXOSKELETEN TER PREVENTIE VAN OVERBELASTING

Exoskeletten voor inzet bij arbeid, ook wel industriële exoskeletten, zijn een relatief nieuwe technologie waarvoor veel belangstelling is. Werkgevers zien in exoskeletten een potentiële oplossing voor preventie van overbelasting bij mensen met fysiek zware beroepen. Human factors specialisten zien de aan de technologie verbonden ontwerpuitdagingen en mogelijke effecten voor de gebruiker. En beleidsmakers moeten, mede op basis van de effecten, deze nieuwe technologie positioneren in het geheel van maatregelen. Maar welke exoskeletten zijn er, in hoeverre zijn ze geschikt voor preventie van fysieke overbelasting en wat is het effect op deze belasting en de kans op klachten? In deze paper gaan we in op deze vragen en geven we een overzicht van de beschikbare soorten exoskeletten.

Ondanks de snelle ontwikkelingen van nieuwe technologieën zoals robotisering, laat onderzoek zien dat problemen op het gebied van fysieke belasting nog allerm minst tot het verleden behoren. Van alle werkenden in Nederland geeft 41% aan regelmatig met een of meerdere vormen van fysieke overbelasting te maken te hebben (NEA 2019, TNO/CBS). Trendcijfers laten weinig verbetering zien over de afgelopen 10 jaar (zie figuur 1). 'Regelmatig repeterende bewegingen maken' en 'kracht moeten zetten' zijn de meest genoemde vormen van fysieke belasting.



Figuur 1: Trend in blootstelling aan fysieke belasting: percentage werknemers die naar eigen zeggen regelmatig aan een vorm van fysieke belasting zijn blootgesteld (NEA 2019, TNO/CBS).

Goede maatregelen om de fysieke belasting te verminderen zijn blijkbaar schaars of vinden hun weg naar de praktijk niet. De vraag rijst of exoskeletten een oplossing kunnen bieden door werkenden bij lichamelijk zware taken te ondersteunen. Op dit moment worden exoskeletten nog weinig toegepast voor dit doel. De technologie is niet onomstreden en roept vragen op.

In de volgende vier hoofdstukken gaan we in op de volgende vragen:

- De techniek: wat zijn exoskeletten, wat is hun werking en wat beogen ze te doen? (hoofdstuk 2)
- Hoe effectief zijn exoskeletten in het verlagen van de belasting of in het voorkomen van klachten? (hoofdstuk 3)
- In hoeverre accepteren gebruikers exoskeletten, wat zijn hun ervaringen? (hoofdstuk 4)
- Welke beleidsmatige, praktische en technische aspecten zijn van belang bij de verdere ontwikkeling en inzet van exoskeletten? (hoofdstuk 5)

We richten ons op preventieve toepassing van exoskeletten bij de 'gezonde' werkende en niet op de inzet van exoskeletten bij mensen die al klachten hebben.

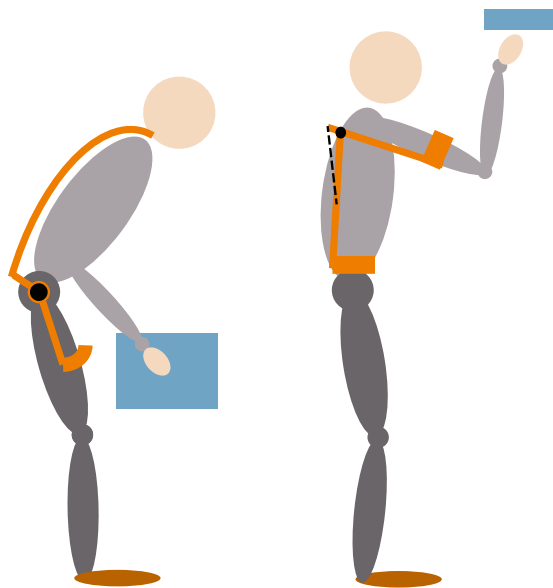
2 EXOSKELETEN – EEN OVERZICHT

Wat zijn exoskeletten en welke industriële exoskeletten zijn er te onderscheiden? Dit hoofdstuk geeft een overzicht.

Van oorsprong is een exoskelet een uitwendige structuur die stevigheid aan een dier geeft, zoals bij een krab (zie figuur 2). Net als bij inwendige skeletten hechten de spieren aan het exoskelet en maken zo beweging mogelijk. De exoskeletten die wij hier beschrijven zijn feitelijk ook uitwendige structuren, in de meeste gevallen ook 'hard', in de vorm van stangen en scharnierpunten. Exoskeletten bieden ondersteuning aan een lichaamsdeel, bijvoorbeeld de romp of de bovenarm, waardoor spieren minder kracht hoeven te leveren.



Figuur 2: Het exoskelet bij een krab



Figuur 3: Tekeningen van de twee belangrijkste soorten exoskeletten en de gewrichten waarover zij werken: links het rompexoskelet dat de rugspieren ondersteunt, rechts het arm- of schouderexoskelet dat spieren rond de schouder ontlast.

De meeste exoskeletten richten zich op ondersteuning van spieren rond een specifiek gewricht, zoals rompexoskeletten die de rugspieren ontlasten en armondersteunende of schouderexoskeletten die de spieren rond de schouder ondersteunen. Rompexoskeletten en armondersteunende of schouderexoskeletten vormen verreweg de grootste groep exoskeletten (zie figuur 3).

Zogenaamde full-body exoskeletten vormen een aparte categorie. Zij ondersteunen niet het lichaam, maar dragen zelf de last waardoor de medewerker wordt ontlast. De medewerker is in dit geval meer de bestuurder van een machine die om hem heen zit (zie figuur 4). Omdat deze vorm nog nauwelijks voorkomt buiten de laboratoria, gaan we verder niet op dit type exoskeletten in.

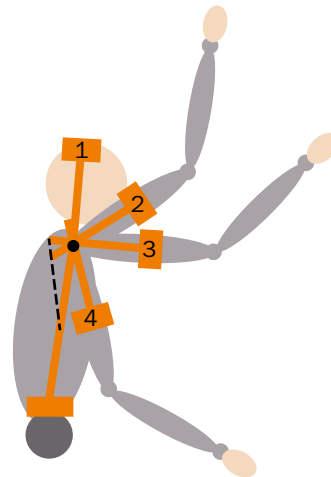


Figuur 4: De Sarcos Guardian XO, voorbeeld van een full-body exoskelet. Met dit exoskelet wordt momenteel geëxperimenteerd op een militaire scheepswerf (zie: <https://www.sarcos.com/company/news/press-releases/u-s-navy-partners-with-sarcos-robotics/>)

PASSIEF – ACTIEF

Er zijn twee manieren waarop exoskeletten werken: met of zonder motor. Een passief exoskelet heeft geen motor, maar maakt handig gebruik van de veereigenschappen van materialen: eenmaal ingedrukt, uitgerekt of gebogen, wil het materiaal terug naar de beginpositie. Hoe meer gebogen, hoe groter de tegendruk. Deze kracht wordt gebruikt om ondersteuning te bieden. Bij een rompexoskelet wordt een veer geladen door de hoek tussen romp- en bovenbenen te verkleinen. Om de veer van een armondersteunend exoskelet te spannen, moet de bovenarm eerst van omhoog, de uitgangspositie bij het aantrekken van het exoskelet, naar beneden worden gebracht (zie figuur 5).

Meer en meer partijen zijn bezig met de ontwikkeling van actieve exoskeletten, oftewel exoskeletten met een motor. Door toepassing van actuatoren (motoren) en sensoren kunnen zij, in potentie, de mate van ondersteuning beter op de situatie afstemmen. Daarmee ondervangen zij een belangrijk nadeel van passieve exoskeletten, die niet adaptief zijn, soms te weinig ondersteuning geven of zelfs een ongewenste tegenkracht geven. Full-body exoskeletten buiten beschouwing gelaten, is er maar een zeer beperkt aantal actieve industriële exoskeletten op de markt: twee voor de ondersteuning van de romp en één voor ondersteuning van de hand. Van de actieve rompexoskeletten is alleen de Cray X van German Bionic toegelaten op de Europese markt. Het merendeel van de exoskeletten op de markt is op dit moment nog passief.



- 1 = Beginstand exoskelet
- 2 = Ondersteuning
- 3 = Maximale ondersteuning
- 4 = Geen ondersteuning, mechanisme uitgeschakeld

Figuur 5: Werking van een armondersteunend exoskelet. Bij het aantrekken staat de arm omhoog. Door de arm naar beneden te bewegen komt meer spanning op het exoskelet en geeft het meer ondersteuning aan de arm. In positie 4 ($< 20^\circ$) schakelt het systeem zich uit waardoor de armen ontspannen langs het lichaam kunnen hangen.

3 DE EFFECTIVITEIT VAN EXOSKELETEN – ONDERZOEK NAAR OBJECTIEVE FACTOREN

Hoe effectief zijn exoskeletten in het verlagen van de fysieke belasting en daaraan gekoppelde vermoeidheid en, op de lange termijn, in het voorkomen van klachten? Dit hoofdstuk beschrijft wat er vanuit de wetenschappelijke literatuur bekend is over kortetermijneffecten. Omdat onderzoek naar langetermijneffecten ontbreekt, worden mogelijke effecten vanuit de theorie besproken.

Exoskeletten kunnen op verschillende vlakken effect sorteren. Een direct effect is het verlagen van de belasting op het lichaam. Op de korte termijn leidt dit tot minder discomfort, minder vermoeidheid en een langere volhoudtijd. Op de langere termijn zou dit tot minder klachten aan het bewegingsapparaat kunnen leiden. Tabel 1 geeft een overzicht van de parameters die directe, korte- en langetermijneffecten kunnen aantonen. Het aantonen van langetermijneffecten vraagt om kostbaar, gecontroleerd onderzoek bij grote groepen gebruikers over langere tijd, zogenaamde *randomized clinical trials* (RCT's). Dit type studies is, voor zover bekend, nog niet uitgevoerd.

Tabel 1: Parameters die op directe, korte termijn of lange termijn effecten van het exoskelet duiden

Direct Lichamelijke belasting	Korte termijn Vermoeidheid / discomfort	Lange termijn Gezondheid
<ul style="list-style-type: none"> • ervaren belasting • spieractiviteit (EMG) • hartfrequentie • zuurstofopname • gewrichtsmomenten • inwendige krachten 	<ul style="list-style-type: none"> • lokaal ervaren ongemak (LEO) • volhoudtijd werктаak • veranderingen in spieractiviteit (EMG) 	<ul style="list-style-type: none"> • prevalentie en incidentie van gezondheidsklachten

Er is veel onderzoek gedaan naar directe en kortetermijneffecten en er zijn inmiddels verschillende reviewstudies beschikbaar (o.a. Toxiri e.a., 2019, McFarland en Fischer, 2019 en de Vries & de Looze, 2019). In welke mate en volgens welke karakteristieken er effect wordt bereikt, hangt sterk samen met het type exoskelet, het ontwerp van het exoskelet en de uitgevoerde taken.

3.1 DE EFFECTIVITEIT VAN ROMPEXOSKELETEN

Het merendeel van de rompexoskeletten waarmee experimenteel onderzoek is gedaan, bevindt zich in een pre-productiefase (Baltrusch e.a., 2018). Uit de experimenten blijkt dat het exoskelet zorgt voor een afname in de rugbelasting, wat ook te verwachten is als de romp een tegenkracht van het exoskelet ondervindt. Uit het onderzoek van Bosch e.a., (2016) met de Laevo, kwam naar voren dat gebruikers een taak in een voorovergebogen, statische houding langer volhielden en dat hun discomfort afnam. Een vergelijkbaar onderzoek met een ander passief rompexoskelet met dezelfde werking maar een ander ontwerp, leverde soortgelijke resultaten op (Graham e.a., 2009).

In onderzoek wordt gekeken hoe de kracht die de rugspieren moeten leveren in een bepaalde houding, uitgedrukt in Newtonmeter (Nm), zich verhoudt tot de kracht die het exoskelet levert. Bij passieve exoskeletten zoals de Laevo, is de tegendruk waarmee de romp weer rechtop wordt geduwd beperkt. Bij een houding met beperkte rompbuiging kan hiermee 40% reductie van de spieractiviteit worden bereikt (Bosch e.a., 2016). Bij een rompbuiging van 45 graden levert het exoskelet met 25 Nm ongeveer een kwart van het moment dat banden en rugspieren moeten leveren (Koopman e.a., 2019). De ondersteuning verandert niet wanneer je een gewicht in handen hebt. Hoe zwaarder dit gewicht, hoe kleiner dus de bijdrage in de verlaging van de rugbelasting. Bij het optillen van 20 kg van de grond, moet de onderrug een moment van 250 Nm leveren om overeind te komen (Koopman e.a., 2018). Een exoskelet als de Laevo neemt in dat geval een tiende voor zijn rekening. Actieve exoskeletten kunnen een grotere romphoekafhankelijke tegenkracht leveren. In het onderzoek van Koopman e.a., (2018) zorgt het actieve exoskelet voor een reductie van 20% van compressiekrachten bij het tillen van 15 kg.

Bij sterke rompbuiging lijkt een exoskelet een deel van de belasting niet weg te kunnen nemen. In een onderzoek van Koopman e.a., (2019) blijkt uit berekeningen dat het exoskelet voor een duidelijke afname van het benodigde moment rond L5/S1¹ zorgt, terwijl dit niet bij alle proefpersonen in de spieractiviteit is terug te zien. De verklaring hiervoor ligt in gewrichtsbanden die bij een sterke buiging op spanning komen, waardoor een deel van de spieractiviteit overbodig wordt (Toussaint e.a., 1995). Dat betekent ook dat een exoskelet bij sterke rompbuiging mogelijk geen verlichting geeft aan compressie van de onderrug, omdat niet de spieren maar de gewrichtsbanden deze veroorzaken.

3.2 DE EFFECTIVITEIT VAN SCHOUDEREXOSKELETEN

Uit een review van de Vries & de Looze (2019) blijkt dat schouderexoskeletten over het algemeen doen wat ze zeggen te doen, namelijk het verlagen van de belasting wat tot uiting komt in een lagere spieractiviteit en uitgestelde vermoeidheid. Verschillende onderzoekers vonden een vermindering in schouder spieractiviteit en verlagingen van de ervaren belasting bij het uitvoeren van een (gesimuleerde) werктаak (Theurel e.a., 2018, Huysamen e.a., 2018). Spada e.a. (2018) en de Vries e.a. (2019) vonden langere volhoudtijden van statische houdingen met geheven armen. In het laatste onderzoek hielden proefpersonen een taak met de handen voortdurend boven ooghoogte soms tot twee keer zo lang vol.

Recent onderzoek (de Vries e.a., 2020a) waarbij stukadoors een muur (5 m²) en plafond (2,5 m²) moesten stuccen, laat eveneens een afname in spieractiviteit zien. De effecten zijn het sterkst bij het plafond. Maar ook bij de wand, waar neerwaartse armbewegingen in principe worden tegengewerkt door het exoskelet, is een afname te zien.



Figuur 6: Stukadoors aan het werk met een armondersteunend exoskelet (Skelex) tijdens het experiment door TNO en Knauf (de Vries e.a., 2020a)

Samenvattend kan worden gesteld dat er veel bewijs is dat zowel schouder- als romplexoskeletten de spieractiviteit bij belastende houdingen en bewegingen kunnen verlagen. Het aantal onderzoeken in een realistische werksituatie is echter beperkt. In hoeverre een exoskelet effectief is in de praktijk, is afhankelijk van de match tussen de taak en de functionaliteit van het exoskelet.

¹ L5/S1 is de overgang van de rug naar het bekken (sacrum). Het moment over dit gewricht wordt algemeen als maat voor rugbelasting genomen, omdat rugspieren dit moment moeten opvangen met bijbehorende compressiekrachten tot gevolg.

3.3 MOGELIJKE LANGETERMIJNEFFECTEN

Hoewel de positieve effecten op de spieractiviteit hoopvol stemmen, zijn er over de langetermijneffecten van exoskeletten geen wetenschappelijke studies beschikbaar. Zolang er nog geen RCT's met exoskeletten zijn uitgevoerd, is iedere claim dat een exoskelet zou leiden tot positieve gezondheidseffecten ongegrond. De beperkte toepassing van exoskeletten in de praktijk en de complexiteit van dergelijk onderzoek spelen zeker een rol. Dat betekent dat momenteel alleen een theoretische benadering van langetermijneffecten mogelijk is. Hieronder brengen we een aantal vragen en mogelijke effecten onder de aandacht.

- Allereerst is onbekend in hoeverre een verlaging van de spierbelasting tot een verlaging van klachten leidt. Bij beperkte rompbuiging leidt een lagere spieractiviteit door gebruik van een exoskelet tot een reductie van compressiekrachten. Algemeen wordt dit gezien als een verlaging van het risico op klachten (Koopman e.a., 2019). Bij een sterkere rompbuiging lijkt dit effect beperkt (zie 3.1.1.) De schouder is een complex gewricht met meerdere soorten klachten (de Vries & de Looze, 2019) waarbij zeker niet alleen spieractiviteit bij het werken met geheven armen een risico vormt; grote gewrichtshoeken en frequente bewegingen in dit bereik vormen zowel bij de schouder als de romp net zo goed een belangrijk risico (van Rijn e.a., 2010, van der Molen e.a., 2008). Dit risico verandert niet bij gebruik van een exoskelet.
- Een exoskelet grijpt verder in op het natuurlijke bewegingsgedrag: het laat sommige spieren minder werken, andere wellicht meer, en het verandert het biomechanische spel in gewrichten. Eventuele effecten hiervan zijn onbekend.
- Gebruik van een rompexoskelet kan leiden tot andere tiltechnieken, bijvoorbeeld door eventuele bewegingsbeperkingen in het exoskelet. Onderzoek duidt voorlopig op positieve effecten, namelijk minder buiging in de wervelkolom en lagere hoeksnelheden die weer tot lagere compressiekrachten leiden (Koopman e.a., 2019), maar het is nog onduidelijk in hoeverre er gewenning aan het exoskelet optreedt en of dit dan een effect heeft op vergelijkbare handelingen zonder exoskelet.
- Exoskeletten brengen hun kracht over via manchetten, banden of gevormde drukplaten. In alle gevallen oefenen deze structuren een plaatselijke druk uit op de huid en onderliggende structuren. Ook hiervan zijn de langetermijneffecten onbekend. Dit staat nog los van eventuele comfort- en daaraan gekoppelde acceptatieproblemen (zie hoofdstuk 4).
- Tot slot is een veelgehoorde zorg dat het exoskelet tot een verzwakking van spiergroepen zou kunnen leiden.

**“DE INZET VAN EXOSKELETEN
BIJ ARBEID
STELT HOGE EISEN
AAN HET ONTWERP”**

4 ACCEPTATIE EN BELEVING VAN EXOSKELETEN – ONDERZOEK NAAR SUBJECTIEVE FACTOREN

In hoeverre accepteren gebruikers exoskeletten? Wat zijn hun ervaringen? Dit hoofdstuk beschrijft wat er vanuit de wetenschappelijke literatuur bekend is over de subjectieve kant van het gebruik van exoskeletten.

Hoewel vanuit veel sectoren interesse is voor de technologie, waaronder de zorg waar sprake is van hoge rugbelasting, worden exoskeletten over het algemeen nog weinig toegepast. Er is niet of nauwelijks onderzoek beschikbaar naar de ervaringen van gebruikers van een exoskelet. Onderzoek naar ervaringen met exoskeletten in de praktijk zijn vooral uitgevoerd in logistieke bedrijven en bij auto-, trein-, en vliegtuigfabrikanten.

In het beschikbare onderzoek laten de subjectieve ervaringen van gebruikers van een exoskelet een wisselend beeld zien. Werkzaamheden bestaan in de praktijk meestal uit meerdere activiteiten met verschillende bewegingen. Exoskeletten ondersteunen daarvan een deel. Hoe beter taak en exoskelet op elkaar zijn afgestemd, hoe beter het exoskelet zijn werk kan doen en hoe minder het exoskelet zal hinderen bij het werk.

In positieve zin geven gebruikers aan een lagere belasting en minder spiervermoeidheid te ervaren (Bosch e.a., 2016, Spada e.a., 2018, de Vries e.a., 2020a). In negatieve zin ervaren gebruikers echter drukpunten van de banden en beensteunen waarmee het exoskelet kracht op het lichaam overbrengt (Hensel en Keil, 2019). Afhankelijk van de omgevingstemperatuur en inspanning tijdens gebruik, ervaren gebruikers last van warmte tussen de contactpunten en de huid, zoals de taille- en schouderbanden bij armondersteunende exoskeletten.

Met name bij armondersteunende exoskeletten is er angst voor schade aan het werk, wat de mogelijkheid van toepassing in krappe werkruimtes beperkt. Dit kwam onder andere naar voren in het onderzoek bij stukadoors (de Vries e.a., 2020b) en in de automobiellindustrie (Spada e.a., 2018). Het ontwerp speelt in bepaalde toepassingsgebieden daarom een belangrijke rol.

Als negatieve punten worden verder genoemd het tegenwerken of verstoren van bepaalde bewegingen en het gedoe rondom het aan- en uittrekken.

ACCEPTATIE – KOSTEN VERSUS BATEN

Omdat de bovenstaande minpunten direct voelbaar zijn, moet een exoskelet ook voldoende direct voelbare pluspunten hebben, wil de gebruiker het hulpmiddel uiteindelijk dragen (zie tabel 2). Dat betekent vooral minder discomfort en vermoeidheid. Omdat eventuele positieve langetermijneffecten op de gezondheid niet direct voelbaar zijn, is het effect daarvan op acceptatie gering.

Tot slot heeft het imago van het gebruik van een exoskelet een invloed op acceptatie en beleving, waarbij bedrijfscultuur een belangrijke rol speelt. Het imago kan zowel positief (geavanceerd, verantwoord) als negatief (slap) zijn.

Tabel 2: Belangrijkste voor- en nadelen van het dragen van een exoskelet

Voordelen	Nadelen
<ul style="list-style-type: none"> • minder inspanning • minder pijn • minder vermoeidheid, daardoor sneller klaar 	<ul style="list-style-type: none"> • tegenwerken of verstoren van bepaalde bewegingen • gedoe van aan- en uittrekken • opbouw van warmte • gewicht / contactdruk • uitstekende harde delen exoskelet kunnen schade veroorzaken
<ul style="list-style-type: none"> • imago 	<ul style="list-style-type: none"> • imago

In onderzoek bij eindgebruikers (o.a. Hensel en Keil, 2019; Spada e.a., 2018 en de Vries e.a., 2020b) is gevraagd in hoeverre de gebruiker geneigd is het exoskelet in de praktijk te gebruiken. De meeste stukadoors lieten zich positief uit over eventueel gebruik in de praktijk. In hoeverre dit oordeel overeenstemt met het gedrag dat uiteindelijk getoond zou worden bij gebruik in de praktijk, is moeilijk te zeggen. Uiteraard spelen kosten van het hulpmiddel een rol.

De studie van Hensel en Keil (2019) naar het gebruik van een passief rompexoskelet op verschillende werkplekken in de autoassemblage voorspelt niet veel goeds. Zowel ervaren gebruiksgemak ('perceived usability') als gebruikssintentie ('intention to use') waren lager aan het eind van de testperiode van vier weken waarbij de gebruikssintentie naar de negatieve kant doorsloeg: men zou het hulpmiddel waarschijnlijk niet gebruiken. De onderzoekers geven echter aan dat de geteste werkzaamheden van zichzelf niet als zwaar werden beoordeeld. Gebruikers in het onderzoek van Spada e.a. (2018) hechten veel waarde aan de vrijwilligheid van het dragen. Verdere cijfers over de acceptatie van exoskeletten op de langere termijn ontbreken.

Romp- en schouderexoskeletten verschillen in de kosten-baten-balans door het verschil in ontwerp en positie van ondersteuning en door het verschil in activiteiten die ondersteund worden of eventueel tegengewerkt. Duidelijk is dat het type exoskelet, het ontwerp en de gebruikssituatie een belangrijke rol spelen bij acceptatie. Een goede match tussen taak en exoskelet is een belangrijke randvoorwaarde.

5 AANDACHTSPUNTEN BIJ DE VERDERE ONTWIKKELING EN INZET VAN EXOSKELETEN

Welke beleidsmatige, praktische en technische aspecten zijn van belang bij de verdere ontwikkeling en inzet van exoskeletten? Dit hoofdstuk geeft een antwoord op deze vragen.

De technologie van exoskeletten is veelbelovend als het gaat om het verlagen van de belasting. Echter, de inzet van exoskeletten bij arbeid stelt hoge eisen aan het ontwerp: een medewerker wil niet gehinderd worden bij de uitvoering van zijn of haar werk. Verschillende exoskeletten zijn marktrijp en geschikt voor specifieke zware taken. Voor een flexibele toepassing en brede acceptatie zijn er technische uitdagingen. Verder moet de meer politieke discussie gevoerd worden over de rol die exoskeletten bij arbeid innemen.

5.1 POSITIE BINNEN DE ARBEIDSHYGIËNISCHE STRATEGIE

Een belangrijke vraag over de huidige op de markt zijnde industriële exoskeletten is “wat zijn het?”. Zijn het arbeidsmiddelen, gereedschap, persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM), medische hulpmiddelen of een combinatie daarvan? Deze vraag is van belang met het oog op de eisen die worden gesteld aan de veiligheid en gezondheid bij toepassing van exoskeletten. Tegelijkertijd speelt de vraag welke rol deze middelen hebben binnen de arbeidshygiënische strategie, waarin bronaanpak voorop staat?

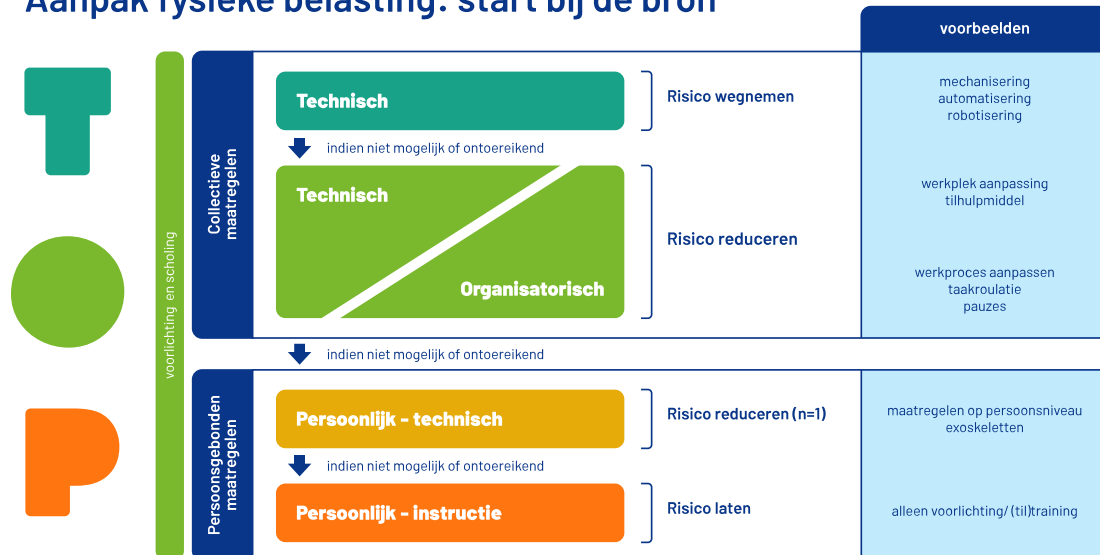
Wat betreft de eerste vraag: medio 2020 is nog onduidelijk hoe exoskeletten geclassificeerd zouden moeten worden en welke certificatie-eisen gelden. Volgens de FEES² zouden alle in Europa gebruikte exoskeletten gecertificeerd zijn als medisch hulpmiddel. Samen met ESF (European Safety Federation) pleiten zij voor certificering als PBM bij de EU en CEN³. Naar onze mening zijn industriële exoskeletten bij toepassing voor vermindering van de fysieke arbeidsbelasting in de eerste plaats arbeidsmiddelen, waarop ook de machinerichtlijn van toepassing is. Dit houdt in dat ze volgens ergonomische richtlijnen ontwikkeld moeten worden en niet tot risico's voor de veiligheid en gezondheid van de werknemer mogen leiden.

Wat betreft de positie in de arbeidshygiënische strategie zijn we van mening dat een exoskelet geen bronaanpak is, omdat het niet de belasting zelf wegneemt, maar de effecten van een belasting probeert te verkleinen. Vanwege het persoonlijke karakter en de noodzaak tot het op het lichaam dragen, zien we een exoskelet als een individueel hulpmiddel. Exoskeletten vallen daarmee in één van de laatste categorieën maatregelen die een werkgever kan nemen om risico's op het gebied van fysieke belasting te verkleinen (zie figuur 7). Bronaanpak moet het streven blijven bij de aanpak van risico's van fysieke arbeidsbelasting.

² FEES: Federation of European Ergonomics Societies, zie: <https://ergonomics-fees.eu/node/266>

³ Comité Européen de Normalisation, Europees comité voor standaardisering

Aanpak fysieke belasting: start bij de bron



Figuur 7: Schema van bronaanpak bij risico's op het gebied van de fysieke belasting (bron: TNO)

Persoonlijk beschermingsmiddel (PBM)?

Een exoskelet als persoonsgebonden maatregel maakt het nog geen persoonlijk beschermingsmiddel. Het belangrijkste argument hiertegen is het onbewezen beschermende effect van exoskeletten, noch tegen acute aandoeningen, noch op de langere termijn tegen werkgerelateerde klachten aan het bewegingsapparaat.

Binnen Nederland zal het ministerie van SZW in samenspraak met het RIVM en TNO het bovenbeschreven standpunt gaan hanteren ten aanzien van de positie binnen een arbeidshygiënische strategie en het al dan niet zijn van een persoonlijk beschermingsmiddel. In andere landen is de discussie nog gaande, maar het lijkt onwaarschijnlijk dat exoskeletten binnen Europa als bronaanpak zullen worden gezien.

5.2 TOEPASSING IN DE PRAKTIJK

De uiteindelijke effecten van exoskeletten zullen zich in de toepassing ervan openbaren. Doordat de taakflexibiliteit van exoskeletten op dit moment beperkt is en doordat het dragen ervan niet voor elke taak nodig is, kan het een voordeel hebben om taken zodanig in te delen dat taken waarin een exoskelet wordt gedragen, worden geclusterd, zoals figuur 8 laat zien. Los van de effecten op arbeidsinhoud, levert dit een andere fysieke belasting op, die niet noodzakelijkerwijs beter is. Het effect kan zijn dat de gebruiker, die minder moe wordt dankzij het exoskelet, sneller gaat werken of langer door blijft werken. Ook bestaat het gevaar dat de gebruiker in het geval van een rompexoskelet zwaarder gaat tillen (zie figuur 9). In beide situaties kunnen eventuele positieve gezondheidseffecten teniet worden gedaan. Het is dus van groot belang de ontwikkelingen goed te volgen, zowel in algemene zin als in specifieke praktijksituaties, om kansen te benutten en eventuele negatieve gevolgen te voorkomen.



Figuur 8: Mogelijke taakverandering door exoskeletten: zware taken (hoge balk) worden gegroepeerd, zodat een exoskelet niet steeds aan- en uitgetrokken hoeft te worden.



Figuur 9: Beeld uit een promotievideo van Atoun waarbij een medewerker een ogenschijnlijk zwaar pakket tilt.

5.3 NOODZAKELIJKE ONTWIKKELINGEN

Een belangrijke voorwaarde voor acceptatie door gebruikers is een verbeterde draagbaarheid. Er moet worden voorkomen dat het exoskelet te warm is, te zwaar is of beperkend werkt, bijvoorbeeld door zijn omvang of uitstekende en harde delen. Verschillende partijen doen daarom onderzoek naar 'soft exoskeletons' of 'exo-suits'.

Minstens zo belangrijk voor uitgebreide toepassing van exoskeletten is dat zij adaptief worden, met andere woorden: zich beter aanpassen aan de gebruikssituatie en de daarin gevraagde ondersteuning. Dat vraagt ten eerste om actieve exoskeletten en ten tweede om een exoskelet dat weet wat de gebruiker gaat doen door *user intention recognition*. Figuur 10 toont mogelijke bronnen voor het herkennen van de intentie van de gebruiker, waar momenteel onderzoek naar wordt gedaan. Hoewel op dit terrein al grote doorbraken zijn geboekt, is een lange weg te gaan voordat exoskeletten met deze technologie in een arbeidssituatie toegepast kunnen worden.



Figuur 10: Mogelijke bronnen voor het herkennen van de intentie van de gebruiker (foto: <https://www.germanbionic.com/>)

Het succes van *user intention recognition* bepaalt mede de richting waarin exoskeletten zich zullen doorontwikkelen. Deze technologie is nodig voor de grootste groep exoskeletten, namelijk die waarbij de mens blijft tillen of (zwaar) gereedschap blijft hanteren en daarbij door het exoskelet wordt ondersteund. Het alternatief is dat van de 'draagbare' robot waarbij de robot de externe krachten ondergaat en de mens alleen bestuurt, zoals bij de Sarcos Guardian XO (zie figuur 4). Een dergelijk exoskelet heeft als voordeel dat het te zwaar is om echt te dragen. Het exoskelet draagt zichzelf. Dat betekent dat de gebruiker geen gewicht van deze 'jas' ervaart. Hoewel werkenden hiermee veel sterker gemaakt kunnen worden en het aantrekkelijk zouden kunnen vinden een dergelijke machine te besturen, levert deze techniek weer andere uitdagingen op, onder andere op het gebied van veiligheid. De toekomst zal uitwijzen wat het dominante principe wordt.

“DE EFFECTIVITEIT EN ACCEPTATIE VAN EXOSKELETEN IS STERK USE-CASE AFHANKELIJK; HET TYPE EXOSKELET, HET ONTWERP EN DE GEBRUIKSSITUATIE ZIJN BEPALEND”

6 CONCLUSIES

EFFECTIVITEIT EN ACCEPTATIE

Exoskeletten kunnen in bepaalde gevallen de fysieke belasting omlaag brengen waar dit op een andere manier niet mogelijk is. In hoeverre dit zich vertaalt in een lagere kans op klachten op de lange termijn is nog niet te zeggen, omdat gericht onderzoek hiernaar ontbreekt.

De effectiviteit en acceptatie van exoskeletten is sterk use-case afhankelijk; het type exoskelet, het ontwerp en de gebruikssituatie zijn bepalend.

GOEDE ANALYSE VAN MATCH TUSSEN TAAK EN EXOSKELET

Bedrijven die gebruik van een exoskelet overwegen, doen er daarom goed aan eerst een goede taakanalyse uit te voeren en na te gaan wat de effecten van een exoskelet kunnen zijn op de taken die de mens uitvoert.

MONITOREN EN ONDERZOEKEN

Vanwege de nieuwigheid van de technologie is het van cruciaal belang dat bedrijven de situatie met een exoskelet goed monitoren, zodat eventuele nadelige effecten vroegtijdig onderkend en indien mogelijk, weggenomen kunnen worden.

Daarnaast is onderzoek nodig om de langetermijneffecten van het gebruik van exoskeletten inzichtelijk te maken.

BLIJVEN ZOEKEN NAAR (BRON)OPLOSSINGEN

Gelet op de positie van exoskeletten binnen een arbeidshygiënische strategie, zullen bedrijven allereerst naar bronoplossingen voor hun problemen op het gebied van fysieke belasting moeten zoeken. Dit is ook van belang omdat flexibel inzetbare, comfortabele, goedkope, actieve exoskeletten de eerstkomende jaren niet op de markt te verwachten zijn.

7 REFERENTIES

- Baltrusch, S. J., van Dieën, J. H., van Bennekom, C. A. M., & Houdijk, H. (2018). *The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals*. *Applied ergonomics*, 72, 94–106.
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K., & de Looze, M. (2016). *The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work*. *Applied ergonomics*, 54, 212–217.
- Graham, R. B., Agnew, M. J., & Stevenson, J. M. (2009). *Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task: Assessment of EMG response and user acceptability*. *Applied Ergonomics*, 40(5), 936–942.
- Hensel, R., en Keil, M. (2019). *Subjective evaluation of a passive industrial exoskeleton for lower-back support: A field study in the automotive sector*. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 1–9.
- Huysamen, K., Bosch, T., de Looze, M., Stadler, K. S., Graf, E., & O'Sullivan, L. W. (2018). *Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities*. *Applied ergonomics*, 70, 148–155.
- Koopman, A. S., Toxiri, S., de Looze, M. P., Kingma, I., & van Dieën, J. H. (2018, October). *Effects of an inclination-controlled active spinal exoskeleton on spinal compression forces*. In *International Symposium on Wearable Robotics* (pp. 505–509). Springer, Cham.
- Koopman, A. S., Kingma, I., Faber, G. S., de Looze, M. P., & van Dieën, J. H. (2019). *Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back in static holding tasks*. *Journal of biomechanics*, 83, 97–103.
- McFarland, T., en Fischer, S. (2019). *Considerations for Industrial Use: A Systematic Review of the Impact of Active and Passive Upper Limb Exoskeletons on Physical Exposures*. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3–4), 322–347.
- Molen, H.F. van der, Kuijjer, P. P. F. M., Hopmans, P. P. W., Houweling, A. G., Faber, G. S., Hoozemans, M. J. M., & Frings-Dresen, M. H. W. (2008). *Effect of block weight on work demands and physical workload during masonry work*. *Ergonomics*, 51(3), 355–366.
- Nationale Enquête Arbeidsomstandigheden 2019*. Leiden/Heerlen: TNO/CBS. <https://www.monitorarbeid.tno.nl/cijfers/nea-benchmarktool>
- Rijn, R.M. van, Huisstede, B. M., Koes, B. W., & Burdorf, A. (2010). *Associations between work-related factors and specific disorders of the shoulder—a systematic review of the literature*. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 189–201.
- Spada, S., Ghibaudo, L., Gilotta, S., Gastaldi, L., & Cavatorta, M. P. (2018, July). *Analysis of exoskeleton introduction in industrial reality: main issues and EAWS risk assessment*. In *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (pp. 236–244). Springer, Cham.
- Theurel, J., Desbrosses, K., Roux, T., & Savescu, A. (2018). *Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks*. *Applied ergonomics*, 67, 211–217.
- Toussaint, H. M., de Winter, A. F., de Haas, Y., de Looze, M. P., Van Dieën, J. H., & Kingma, I. (1995). *Flexion relaxation during lifting: implications for torque production by muscle activity and tissue strain at the lumbo-sacral joint*. *Journal of biomechanics*, 28(2), 199–210.
- Toxiri, S., Näf, M. B., Lazzaroni, M., Fernández, J., Sposito, M., Poliero, T., ... & Ortiz, J. (2019). *Back-support exoskeletons for occupational use: an overview of technological advances and trends*. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3–4), 237–249.

Vries, A. de, de Looze, M. (2019). *The effect of arm support exoskeletons in realistic work activities: A review study*. J Ergonomics 9:255.

Vries, A. de, Murphy, M., Könemann, R., Kingma, I., & de Looze, M. (2019). *The amount of support provided by a passive arm support exoskeleton in a range of elevated arm postures*. IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors, 1–12.

Vries A.W. de, Krause, F., de Looze, M. P. (2020a) *The effectivity of a passive arm support exoskeleton in reducing muscle activation and perceived exertion during plastering activities.*, Ergonomics (ingediend).

Vries A.W. de, Krause, F., de Looze, M. P. (2020b) *The experience of plasterers towards using an arm support exoskeleton*. WeRob2020 (publicatie in voorbereiding).

› **Auteurs**

Frank Krause
Michiel de Looze
Marjolein Douwes

TNO innovation
for life

TNO.NL

TNO Healthy Living is de innovatiepartner die in samenwerking met de publieke en private sector technologische en sociale innovaties mogelijk maakt die burgers en professionals ondersteunen bij het maken van de juiste (preventieve) keuzes die een gezonde, vitale en productieve bevolking bevorderen. Op deze manier fungeren we als het vliegwiel van innovatie dat de betaalbaarheid en kwaliteit van gezondheid, lagere zorgkosten en duurzame economische groei ondersteunt.