

AUXIVO

# EXOSUSTAIN

## Whitepaper Hoe Exoskeletten Ondersteunen

[exosustain.nl](http://exosustain.nl)



# Inleiding

Hartelijk welkom. Dit artikel bespreekt de belangrijkste mechanische en biomechanische principes die verklaren hoe draagbare exoskeletten werken en hoe ze hun gebruikers ondersteunen.

Draagbare exoskeletten zijn apparaten die door mensen gedragen worden en fysieke ondersteuning bieden. Ze worden tegenwoordig gebruikt in medische toepassingen, bijv. om gebruikers met mobiliteitsbeperkingen te helpen, en in werkomgevingen, waar ze werknemers ondersteunen door de werklust te verminderen om uitputting en letsels door overbelasting te voorkomen.

Ons doel is het om de lezer de informatie te geven die nodig is om de interactie tussen mens en exoskelet te begrijpen en hoe exoskeletten de fysieke belasting van het menselijk lichaam kunnen verminderen. Het artikel behandelt algemene ondersteuningsconcepten op een conceptueel niveau om een goed overzicht te geven en voegt alleen technische of wetenschappelijke details toe waar dat nodig is voor een goed begrip.

Als potentiële gebruiker van exoskeletten willen wij u informeren over de mogelijkheden en beperkingen van exoskeletten, zodat u een weloverwogen, op feiten gebaseerde beslissing kunt nemen of exoskeletten de juiste keuze voor u zijn.

Wij wensen u veel leesplezier! Aarzel niet om contact met ons op te nemen als u nog vragen hebt.

Het document bestaat uit drie delen:

## Deel I

Introduceert de belangrijkste principes van engineering mechanics en biomechanica die nodig zijn om te begrijpen hoe exoskeletten ondersteuning bieden.

## Deel II

Bespreekt de mechanismen en concepten van hoe draagbare exoskeletten hun gebruikers ondersteunen.

## Deel III

Behandelt enkele van de meest voorkomende misvattingen over ondersteuning door exoskeletten, voortbouwend op de informatie en concepten die in deel I en II zijn geïntroduceerd.

ExoSustain



# Deel 1

## Belangrijke (Bio)Mechanische Principes

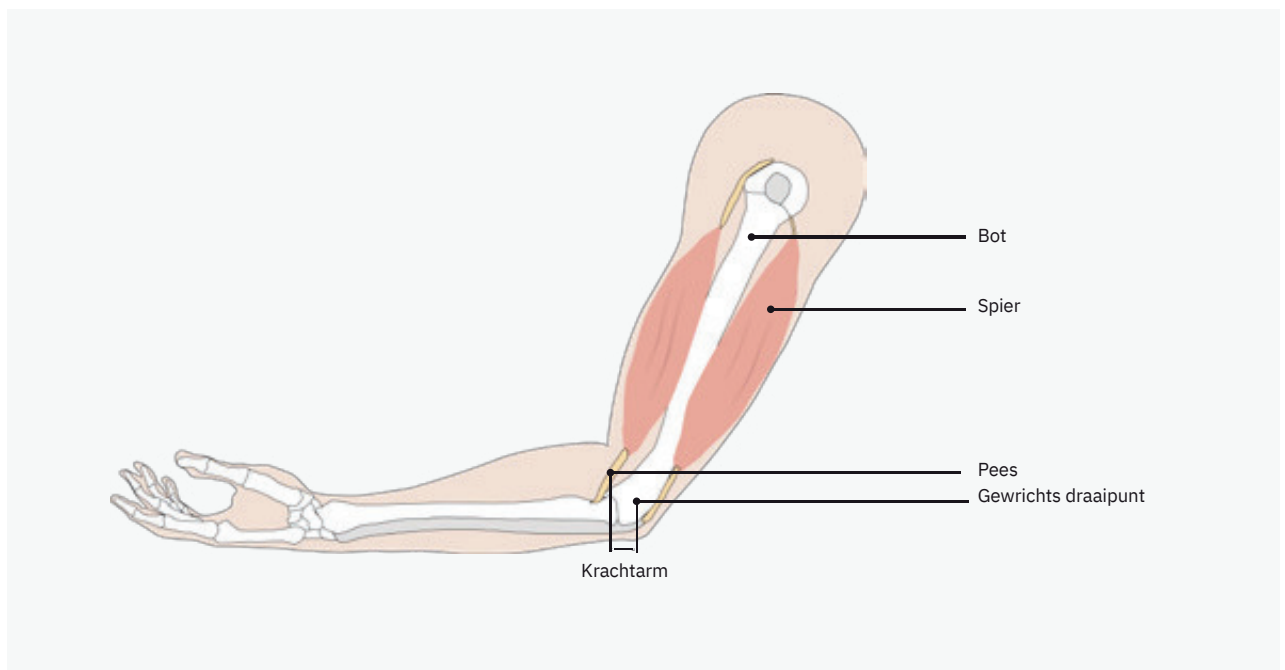
Voordat we bespreken hoe exoskeletonten ondersteuning bieden, willen we enkele belangrijke mechanische en biomechanische principes introduceren. Dit zal helpen te begrijpen hoe fysiek zwaar werk spanning op het menselijk lichaam veroorzaakt en hoe een mechanisch systeem deze spanning kan helpen verminderen. Als we deze basisprincipes hebben uitgelegd, zult u de ondersteuningsmechanismen van exoskeletonten gemakkelijk kunnen begrijpen, omdat ze op deze principes gebaseerd zijn.

### Het Menselijk Bewegingsapparaat

Laten we eerst uitvinden hoe het menselijk lichaam voorwerpen kan verplaatsen, vasthouden en optillen, door naar het menselijk bewegingsapparaat te kijken. De botten van ons (endo)skelet zijn met elkaar verbonden door gewrichten die beweging mogelijk maken. Spieren verbinden de verschillende botten over één of meerdere gewrichten door middel van pezen. Wanneer de spieren samentrekken, creëren ze een trekkracht op de botten. Er is een bepaalde afstand tussen de spieraanhechting en het gewrichts draaipunt, die we de krachtarm of arm noemen. Door deze krachtarm resulteert de spierkracht in een draaikracht (ookwel krachtmoment of moment genoemd) ter hoogte van het gewricht, waardoor de botten in een rotatiebeweging rond het gewricht bewegen.

Als een externe last (of het gewicht van het menselijk lichaam zelf) een moment uitoefent op een gewricht, moeten de spieren samentrekken en een tegenmoment rond dit gewricht genereren, om een balans tussen de momenten te creëren. Hierdoor kan de mens een externe last vasthouden of verplaatsen met behulp van spierkracht. Menselijke spieren kunnen alleen een trekkracht genereren. Ze kunnen niet tegen een bot duwen. Om beweging in twee richtingen te genereren, hebt u (minstens) twee spieren per gewricht nodig, die tegenover gesteld moment kunnen genereren. We noemen een set tegenover gesteld werkende spieren agonist en antagonist.

Als u tegelijkertijd de agonistische en antagonistische spieren van een gewricht activeert, wordt het gewricht erg stijf. Op deze manier kunt u voorkomen dat het beweegt en stabiliteit creëren. Dit wordt co-contractie genoemd. Co-contractie kan ook gebruikt worden om een reeks gewrichten te stabiliseren, zoals de wervelkolom. In het dagelijks leven werken de rug- en buikspieren bijvoorbeeld samen om een rechte houding aan te nemen en vast te houden.

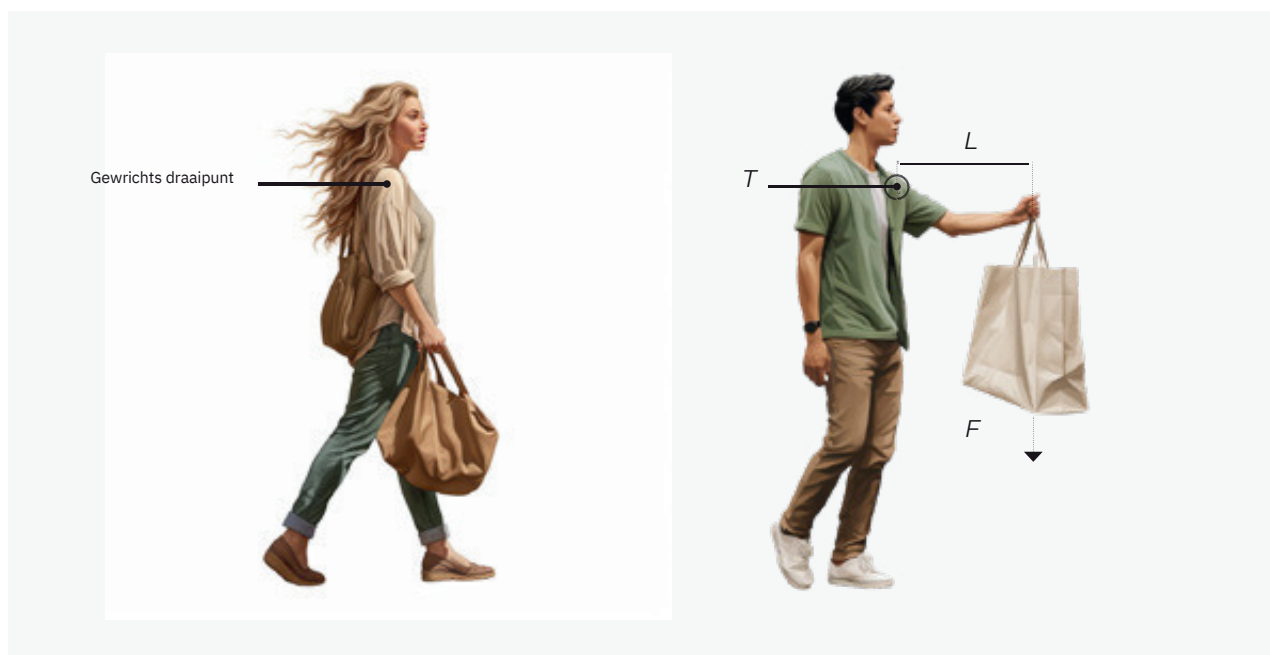


Krachtarm - Waarom Dezelfde Kracht Verschillende Belastingen op ons Lichaam kan Veroorzaken. Hoeveel kracht de menselijke spieren nodig is voor het hanteren van een externe last, hangt af van verschillende factoren. Eén aspect is het gewicht van de externe last. Er is natuurlijk een verschil tussen het vasthouden van 5 kg of 20 kg. Maar ook de krachtarm speelt een rol.

De manier waarop u de massa vasthoudt en hanteert, kan een aanzienlijke invloed hebben op de belasting die het op uw lichaam uitoefent, meer dan de massa van de last zelf. Laten we ons voorstellen (of proberen) een tas van 10 kg vast te houden. Als u de tas aan de zijkant van uw lichaam draagt, kunt u hem lange tijd zonder veel inspanning vasthouden. Maar wanneer u de tas voor uw lichaam tilt, voelt u meteen dat de belasting in uw schouder toeneemt en heeft u al snel moeite om de tas in deze positie te houden.

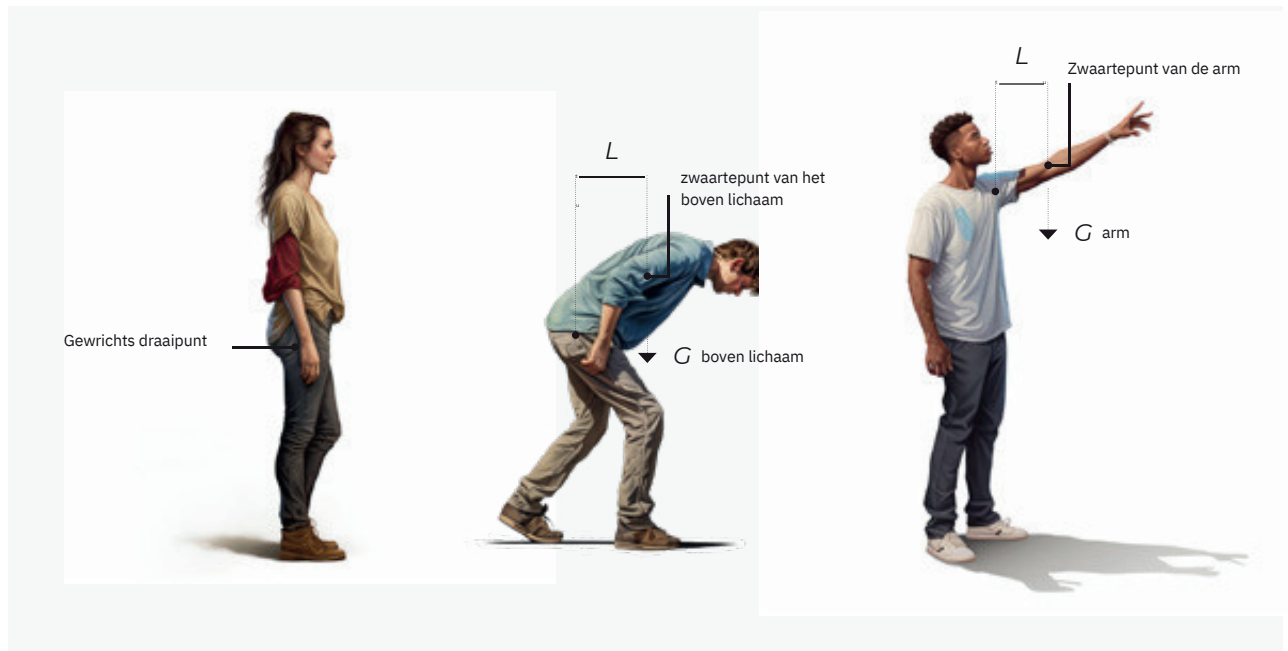
De reden voor dit effect is dat vaak niet de kracht de belasting op uw gewrichten bepaalt, maar het moment dat deze kracht genereert. Dit moment is de kracht vermenigvuldigd met de horizontale afstand tussen de kracht en het rotatiecentrum van het gewricht (arm):  $T = F * L$ , waarbij  $T$  het moment,  $F$  de kracht en  $L$  de arm is.

Dus als de arm van de kracht groter wordt, bijvoorbeeld doordat u de tas voor het lichaam houdt of doordat u met uw lichaam naar voren leunt, wordt het gewrichtsmoment ook snel groter. Regelmatige en grote gewrichtsmomenten kunnen tot overbelasting van het betreffende gewricht leiden.



Illustratie van het effect van de arm (d.w.z. de horizontale afstand tussen het menselijk gewricht en de externe kracht).  
Links: De persoon draagt een tas aan de zijkant van het lichaam. De tas is min of meer horizontaal uitgelijnd met het schoudergewricht. Hierdoor veroorzaakt het gewicht van de tas slechts een klein moment in het schoudergewricht die door de schouderpijlen moet worden tegengegaan.  
Rechts: de persoon houdt een tas voor het lichaam. Dit resulteert in een aanzienlijke horizontale afstand (arm) tussen de tas en het gewricht draaipunt in de shoulder, wat resulteert in een groter moment dat de schouderpijlen moeten compenseren.





De invloed van lichaamsmassa en lichaamshouding in het zwaartekrachtveld op de gewrichtsbelasting.

tLinks: Als het lichaam rechtop staat en de armen verticaal aan de zijkant hangen, is de belasting op de schouder, rug en heup relatief klein. pMidden: Met het bovenlichaam in een voorovergebogen positie neemt de belasting op de rug en heupen toe. uRechts: Met de arm naar voren gestrekt, heeft het zwaartepunt van de arm een horizontale afstand tot het schoudergewricht, wat resulteert in een aanzienlijk schoudergewrichtsmoment.

### Zwaartekracht en de Massa van ons Lichaam

Direct gerelateerd aan de vorige paragraaf, is de dominante rol die de zwaartekracht en de massa van het menselijk lichaam spelen als we het hebben over werkbelasting of overbelasting. Hoewel er andere aspecten meespelen, zoals dynamische kracht veroorzaakt door versnellingen en bewegingen, is de zwaartekracht onze grootste vijand als we het hebben over fysieke belasting. De zwaartekracht trekt alles de hele tijd naar beneden, inclusief elke last die we hanteren en al onze lichaamsdelen. Onze spieren moeten voortdurend werken om de zwaartekracht tegen te gaan.

De in de vorige paragraaf beschreven relatie tussen kracht, arm en moment, is ook van toepassing is op de massa van onze lichaamsdelen. De belasting van onze individuele gewrichten en spieren hangt sterk af van onze lichaamshouding. Als we rechtop staan, is de belasting op onze spieren relatief klein. Zodra we echter naar voren buigen of onze armen optillen, nemen de gewrichtsbelastingen aanzienlijk toe en moeten de spieren in de rug of schouder hard werken, zoals hieronder geïllustreerd wordt.

Vaak is de belasting die door ons eigen lichaamsgewicht wordt veroorzaakt de grootste belasting tijdens fysiek werk. Om dit te begrijpen, kijken we naar de voorovergebogen lichaamshouding in de illustratie. Ongeveer 60% van het menselijk lichaamsgewicht bevindt zich in het hoofd, de armen en de romp. De rug- en heupspieren van een 80 kg zware persoon die voorover leunt, moeten ongeveer 50 kg belasting stabiliseren. Dit betekent dat de belasting door het eigen gewicht vaak groter is dan de extra belasting veroorzaakt door het tillen van een voorwerp van bijvoorbeeld 10 kg. Daarom kan het gebruik van een exoskelet om het lichaamsgewicht te compenseren het lichaam op een relevante manier ontzien.

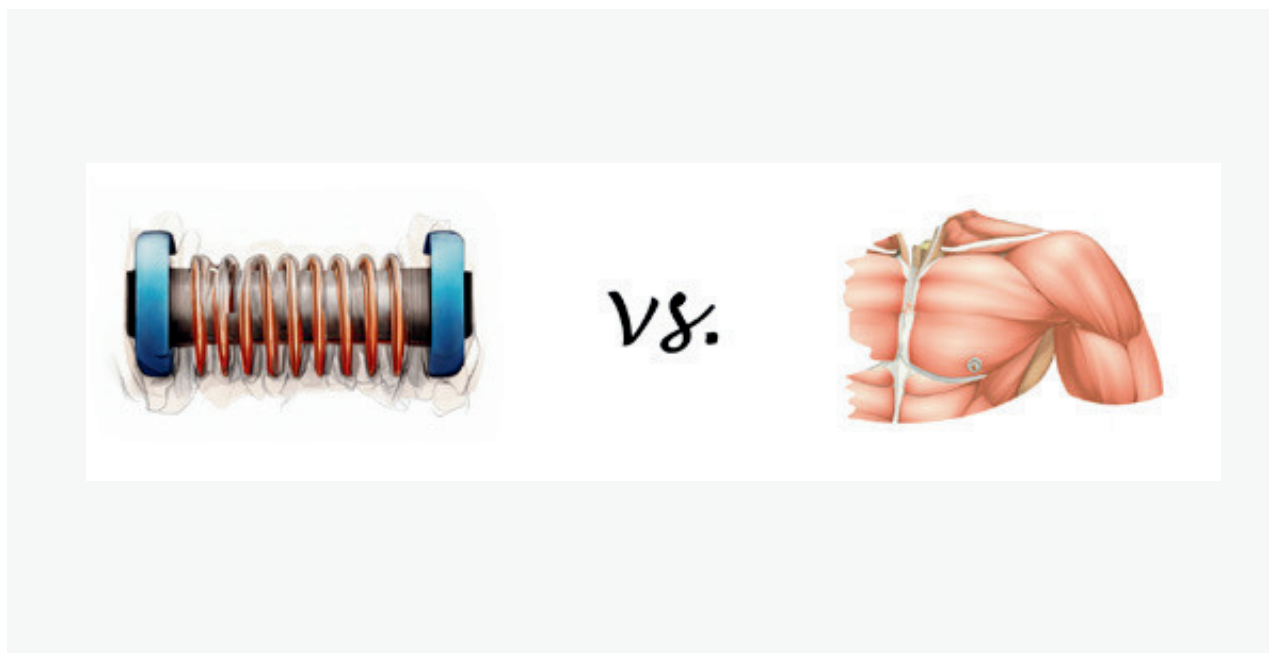


### Belangrijke Verschillen Tussen Technische Mechanica en Biomechanica

Het menselijk lichaam is geen machine. En hoewel dit misschien nogal voor de hand liggend klinkt, is het essentieel om te begrijpen wat dit betekent op mechanisch en biomechanisch niveau. Veel principes in technische mechanica (die te maken hebben met krachten en bewegingen in machines) en biomechanica (die te maken hebben met krachten en bewegingen in het menselijk lichaam) zijn vergelijkbaar. Maar er zijn ook verschillen. Een in de context van exoskeletten belangrijk verschil is de manier waarop menselijke spieren en mechanische veren kracht creëren. Een spier onder spanning is energetisch gezien heel anders dan een mechanische veer onder spanning. Het uitrekken van een mechanische veer kost energie. Deze energie komt vrij wanneer de veer ontlast wordt. Tijdens het uitrekken creëert de mechanische veer permanent een kracht zonder dat er extra energie nodig is. Deze kracht kan gebruikt worden om een lading tegen de zwaartekracht in te ondersteunen.

Aan de andere kant genereren menselijke spieren kracht door samentrekking met behulp van eiwitten die chemische energie omzetten in mechanische energie. De eiwitten in de spier kunnen in elkaar schuiven, waardoor de spiervezels korter worden en er een trekkracht ontstaat. Terwijl de spier actief is, heeft deze voortdurend energie nodig die geleverd wordt door cellulaire stofwisselingsprocessen. Dit kan leiden tot een uitputting van de energiereserves, neuromusculaire vermoeidheid en andere metabolische en neuromusculaire effecten die energie nodig hebben en het vermogen van de spier om samen te trekken beperken.

Samengevat kan een mechanische veer, eenmaal uitgerekt, een permanente kracht creëren zonder extra energie. Een menselijke spier daarentegen heeft een constante energietoevoer nodig om samengetrokken te blijven, wat leidt tot vermoeidheid en uitputting.



Het is essentieel om te begrijpen dat mechanische veren en menselijke spieren op verschillende manieren kracht opwekken. Een voorgespannen mechanische veer heeft geen energie nodig om een constante kracht te genereren en kan een belasting onbeperkt ondersteunen. De menselijke spieren daarentegen hebben een constante energietoevoer nodig en zullen snel vermoeid raken.



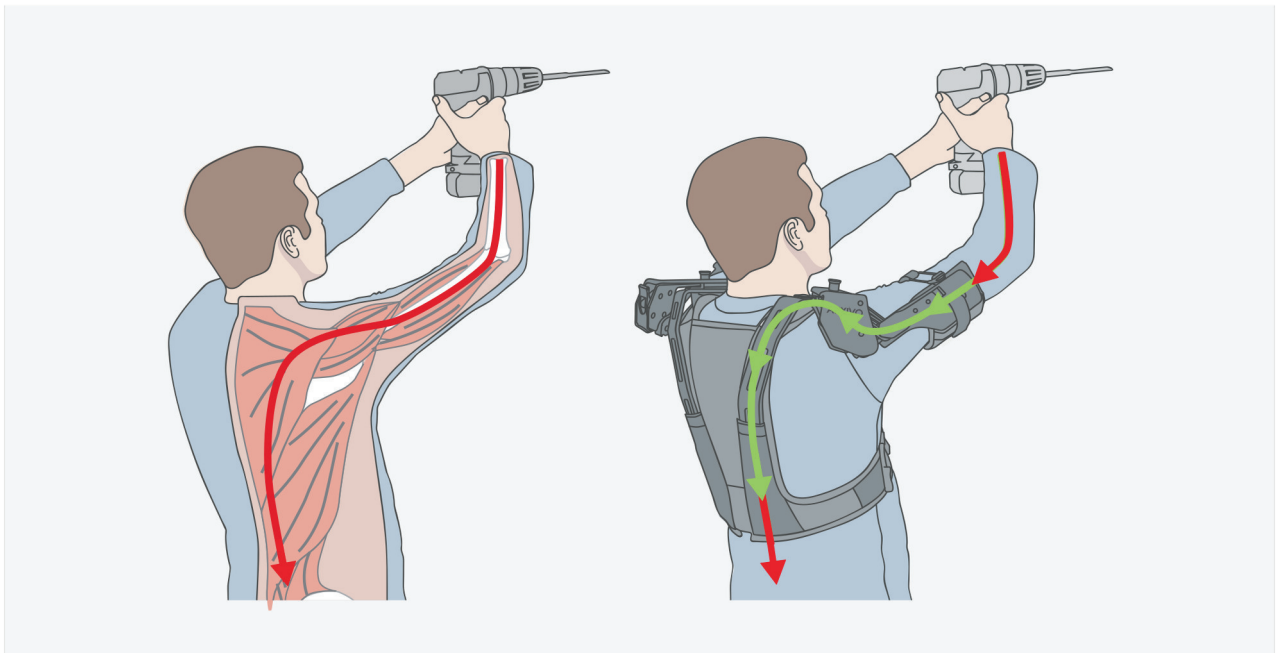
## Deel 2

# Hoe Exoskeletten hun Gebruikers Onderteunen

Nu we de belangrijkste (bio)mechanische basisprincipes hebben behandeld, gaan we onderzoeken hoe exoskeletten ondersteuning kunnen bieden. De meeste exoskeletten combineren meerdere van de volgende principes, maar we bespreken ze een voor een. Het Omleiden van Krachten

Dit is een relatief eenvoudige maar effectieve aanpak. Veel exoskeletten omzeilen de belasting rond één of meer menselijke gewrichten. Voor de lichaamsdelen die door het exoskelet worden bedekt, verplaatst het exoskelet de belasting (of een deel ervan) van uw lichaam naar het exoskelet. De krachten lopen door het exoskelet in plaats van door de gewrichten. Bij het onderste bevestigingspunt van het exoskelet wordt de belasting weer naar het lichaam overgedragen, en via het lichaam naar de grond geleid, vergelijkbaar met het belastingstraject zonder het exoskelet.

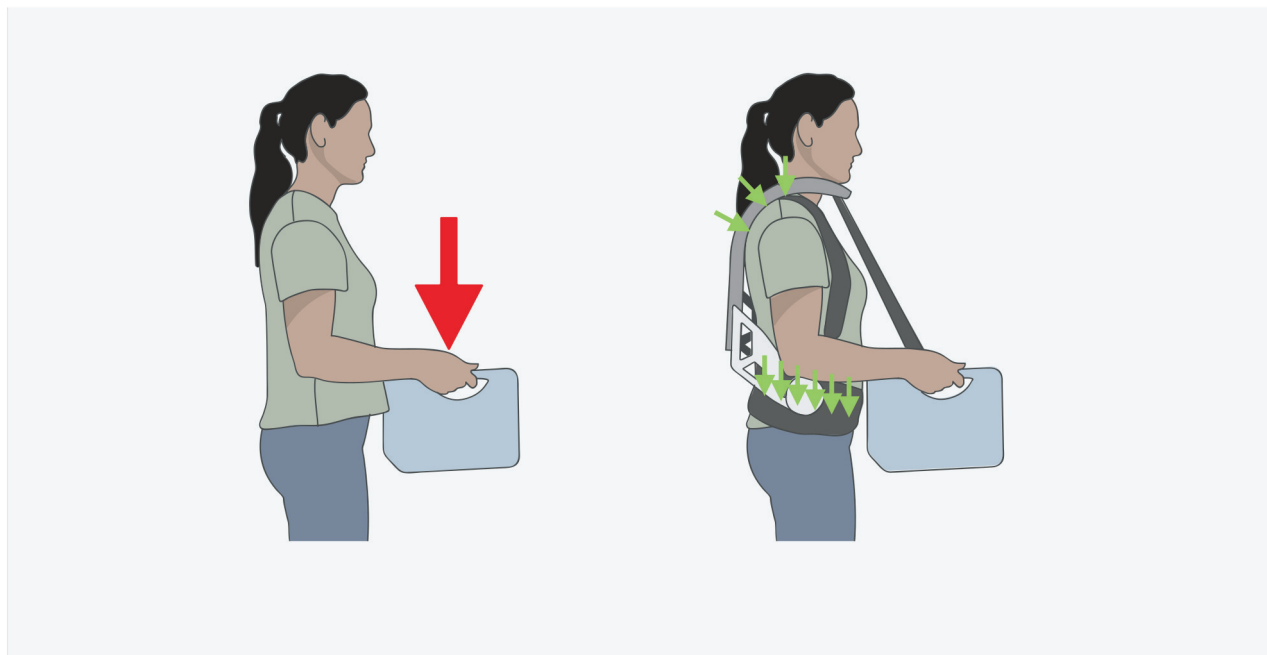
Wanneer u bijvoorbeeld een massa van 5 kg in uw hand houdt, wordt deze belasting via uw pols, elleboog en schouder, langs uw wervelkolom, via de heup naar uw benen, knieën en enkels en uiteindelijk naar de grond geleid. Onderweg worden al deze lichaamsdelen belast. Bij gebruik van een schouderexoskelet, zoals de Auxivo DeltaSuit, wordt een aanzienlijk deel van de belasting rechtstreeks van uw bovenarm naar uw romp overgebracht, waarbij het relatief kwetsbare schoudergewricht wordt omzeild.



Het krachtomleidingsprincipe wordt geïllustreerd aan de hand van de Auxivo DeltaSuit.

De rode pijl geeft het belastingstraject door het lichaam aan en de groene pijl door het exoskelet. Het overbrengen van de belasting naar het exoskelet kan de belasting op de spieren, pezen en gewrichten langs de overgeslagen gewrichten verminderen.





Illustratie van het herverdelen van de belasting.

† Links: de last wordt in de handen gedragen en beïnvloedt van daaruit het lichaam. Rechts: De CarrySuit verdeelt de bevestiging van de belasting over het hele bovenlichaam, waardoor lokale pieken worden verminderd.

### Belasting Hervedelen en Spreiden

Wanneer een externe belasting uw lichaam plaatselijk of asymmetrisch beïnvloedt, bijvoorbeeld wanneer u iets zwaars met één hand draagt, belast dit meestal slechts een klein deel van uw lichaam. Het belastingstraject volgt de meest directe weg door uw lichaam naar de grond. Hierdoor ontstaat een groot risico voor lokale overbelasting in de betrokken gewrichten, terwijl de rest van uw lichaam nauwelijks wordt belast.

Exoskeletten kunnen dit veranderen door de belasting gelijkmatiger te verdelen over grotere oppervlakten van het lichaam, en weg van lichaamsdelen met een hoog risico voor lokale overbelasting. Een voorbeeld van een exoskelet dat gebruik maakt van belastingsherverdeling is de Auxivo CarrySuit. Dit exoskelet bestaat uit een frame rond het bovenlichaam. Wanneer een last aan het frame wordt bevestigd, verdeelt het frame de last over de schouders en heupen van de gebruiker. Hierdoor worden de pols, elleboog, schouder en rug minder belast.

De toepassing van dit principe betekent dat het exoskelet de belasting op andere lichaamsdelen, zoals de heup, kan verhogen. Dit kan contraproductief klinken. Het betekent echter ook dat de belasting gelijkmatiger over uw lichaam wordt verdeeld, waardoor lokale piekbelastingen, die vaak het risico op blessures verhogen, worden vermeden.



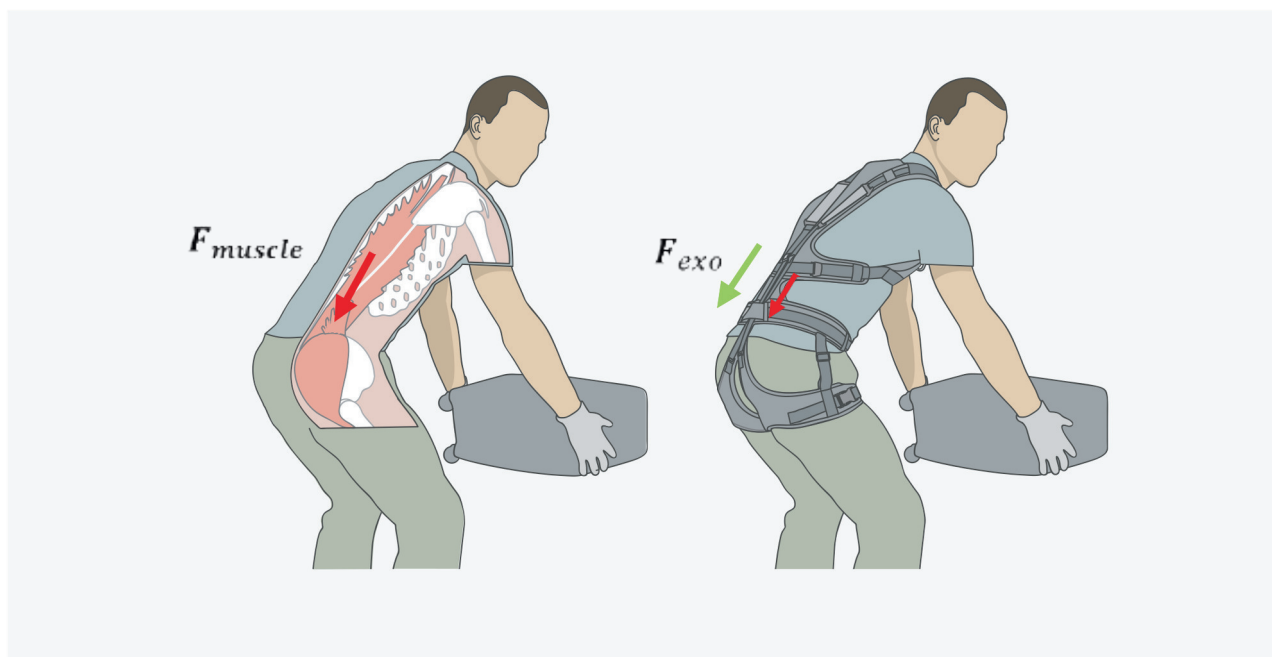


### Spierondersteuning met Kunstmatige Spieren

Het idee van kunstmatige spierondersteuning is eenvoudig: passieve of actieve systemen aan de buitenkant van het lichaam creëren een ondersteunende kracht die vergelijkbaar is met de kracht die door de menselijke spieren wordt gecreëerd. Exoskeletonen die dit concept gebruiken, hebben "kunstmatige spieren" die met het lichaam verbonden zijn, meestal met behulp van textiele interfaces, en zo geplaatst zijn dat ze een trekkracht creëren parallel aan de menselijke spier eronder, waardoor deze spier ondersteund wordt. Deze kunstmatige spieren kunnen aangedreven worden door een actuator die verbonden is met een kabel of gerealiseerd worden door veren of elastische banden die uitrekken tijdens de beweging en een mechanische trekkracht creëren.

Dit concept wordt vaak gebruikt door textiele exoskeletonen (ook wel exosuits genoemd), omdat het zonder star frame gebruikt kan worden. In dit geval vertrouwen de kunstmatige spieren voor stabiliteit op het menselijke (endo)skelet.

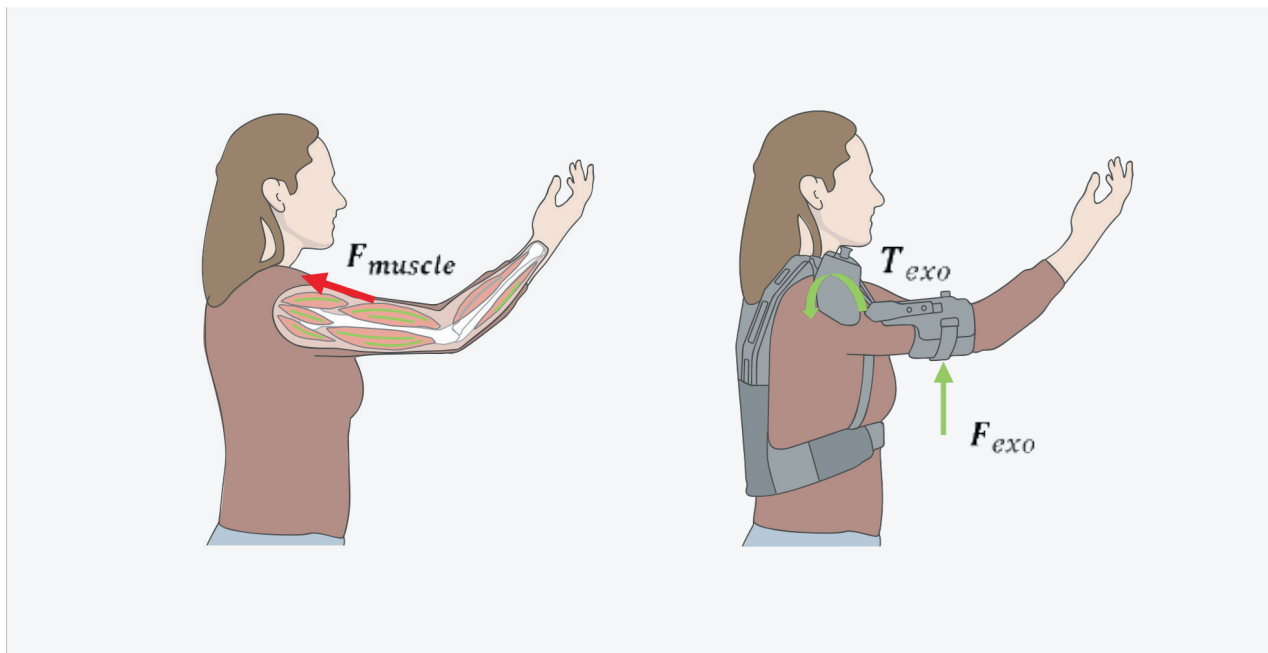
Het belangrijkste doel van kunstspieren is om de spieren en pezen van de gebruiker minder te belasten. Als de spieren van de gebruiker minder hard hoeven te werken, raken ze minder snel vermoeid. Als spieren moe zijn, wordt het moeilijker om ze te coördineren. Herhaaldelijke belasting en vermoeidheid zijn risicofactoren voor het ontwikkelen van aandoeningen aan het bewegingsapparaat. Het belangrijkste idee is dus om menselijke spieren te ondersteunen met kunstmatige spieren en spiervermoeidheid, uitputting, het risico op blessures en de algehele werkbelasting te verminderen.



Illustratie van de LiftSuit's kunstmatige spieren en hoe deze de rugspieren van de gebruiker ondersteunen.

Wanneer de gebruiker voorover leunt, moeten de rugspieren samentrekken en een kracht creëren om het lichaam in de voorover leunende positie te houden. De "kunstmatige spieren" van het exoskelet creëren een kracht die de onderliggende rugspieren direct ondersteunt en zo de spierspanning vermindert.





Illustratie van exoskeletondersteuning op gewrichtsniveau.

† Links: Wanneer de gebruiker haar arm optilt, trekken de corresponderende spieren in de schouder samen en creëren een trekkracht, die vervolgens een moment in het schoudergewricht creëert waardoor de arm wordt opgetild. Rechts: Met het gewricht ondersteund door het exoskelet, levert het exoskelet een moment in het gewricht dat een opwaartse kracht creëert op het raakvlak tussen bovenarm en onderarm om het optillen van de arm te ondersteunen.

**Gewrichtsondersteuning door een draaimoment**  
Een andere mogelijkheid hoe exoskeletten hun gebruikers kunnen ondersteunen is door een ondersteunend moment rond een specifiek gewricht uit te oefenen.

Exoskeletten kunnen op verschillende manieren gewrichtsmoment genereren. Actieve exoskeletten maken meestal gebruik van aangedreven actuatoren, en passieve exoskeletten maken meestal gebruik van veren die zo geplaatst zijn dat ze een moment op gewrichtsniveau genereren. In beide gevallen kunnen de menselijke spieren zich tot op zekere hoogte ontspannen, omdat ten minste een deel van het vereiste gewrichtsmoment, bijvoorbeeld om de arm op te tillen, door het exoskelet wordt geleverd.

Een ander voordeel van deze methode is dat het de druk op de gewrichten kan verminderen en mogelijk gewrichtsschade zoals artrose kan voorkomen. De reden hiervoor is dat gewrichtsondersteuning ook leidt tot een vermindering van spierkracht, vergelijkbaar met kunstspieren. In tegenstelling tot een kunstmatige spier wordt echter niet de ene trekkracht door een andere vervangen. Het creëert een moment rond het gewricht van het exoskelet en brengt dit moment vervolgens over via het stijve frame als een kracht loodrecht op het lichaam. Dit mechanische verschil kan resulteren in een algehele verminderde compressiekracht op het gewricht.

Het is belangrijk om te weten dat natuurlijke compressie van gewrichten niet slecht is. Het helpt zelfs om het gewricht onder belasting te stabiliseren. Als er echter vaak grote krachten op een gewricht worden uitgeoefend, kan dit leiden tot overbelastingsblessures en pijn door schade aan de gewrichtsbanden en het kraakbeen van het gewricht.

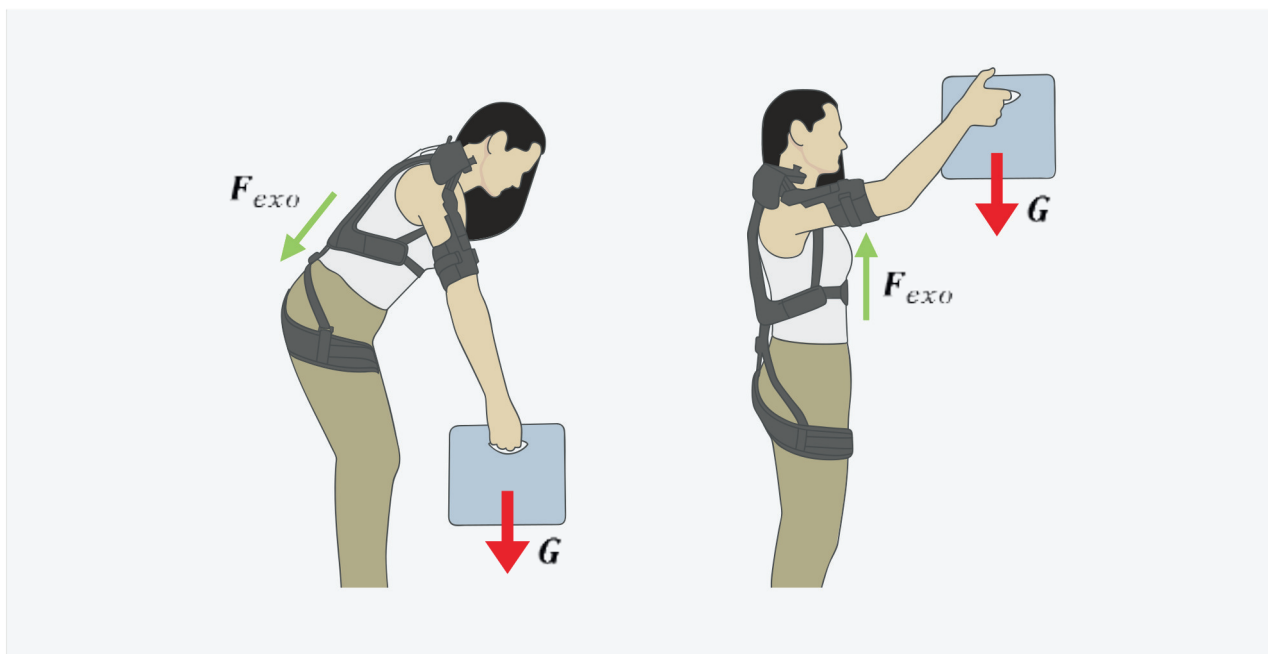


### Zwaartekrachtcompensatie

Aangezien zwaartekracht een van de belangrijkste oorzaken is van een hoge fysieke belasting, is het compenseren van de effecten van zwaartekracht met behulp van een exoskelet een prominente aanpak. De zwaartekrachtcompensatie door de ondersteuningsmodule voor de rug, van het rug en shoulder support exoskelet OmniSuit, begint te werken wanneer de gebruiker voorover leunt en de zwaartekracht het bovenlichaam naar beneden begint te trekken. Zonder rug ondersteuning van het exoskelet moeten de rug- en heupspieren deze zwaartekracht compenseren door samen te trekken en het bovenlichaam omhoog te trekken. Wanneer de OmniSuit wordt gedragen, worden elastische veren op de rug automatisch uitgerekt wanneer het bovenlichaam naar voren buigt, waardoor een deel van deze belasting wordt geabsorbeerd en de menselijke spieren worden ontlast. Een ander voorbeeld is de ondersteuningsmodule voor de schouder van het OmniSuit exoskelet. Tijdens het dragen zal deze automatisch de schouder geleidelijk ondersteunen wanneer de arm wordt opgetild. De veerconstructie van het schoudergewricht is ontworpen om maximale ondersteuning te bieden wanneer de arm een horizontale positie bereikt, dus wanneer deze maximaal "blootgesteld" is aan de zwaartekracht.

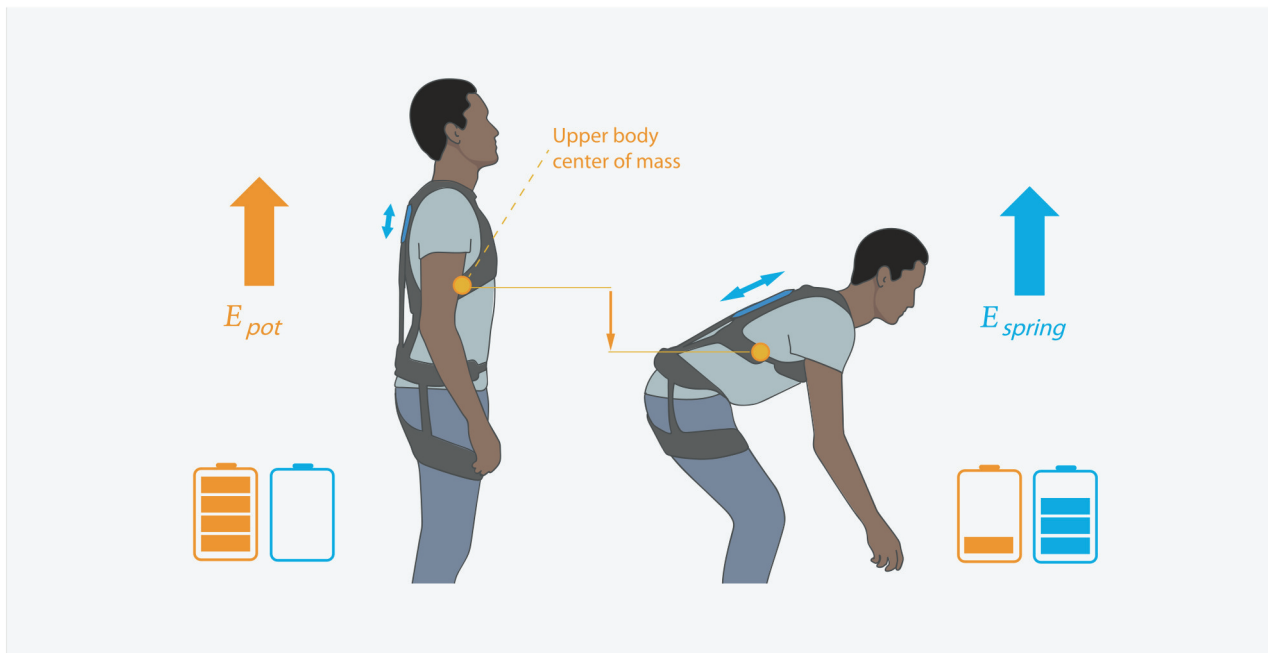
Een belangrijk detail hierbij is dat beide ondersteuningsmodules van het exoskelet alleen zwaartekrachtcompensatie bieden wanneer de zwaartekracht door een arm een belasting op de betreffende gewrichten uitoefent. In onze voorbeelden trekt de ondersteuningsmodule voor de rug dus niet als de drager rechtop staat, en duwt de ondersteuningsmodule voor de schouders niet omhoog als de armen verticaal langs het lichaam hangen. Pas wanneer de gebruiker naar voren leunt of zijn armen optilt, beginnen de exoskeletonen te ondersteunen. Over het algemeen zal een exoskelet de zwaartekracht niet volledig compenseren. Het compenseert gewoon een bepaald percentage (meestal 20%-50%) van de zwaartekrachtbelasting op het lichaam en maakt daardoor elke herhaling of elke seconde die u werkt gemakkelijker. Deze gedeeltelijke compensatie betekent ook dat de menselijke spieren de veren van een passief exoskelet niet hoeven aan te spannen - dat doet de zwaartekracht.

Zwaartekrachtcompensatie, in combinatie met het feit dat menselijke spieren constante energie nodig hebben wanneer ze een kracht vasthouden, zijn de belangrijkste principes van de ondersteuning van het exoskelet tijdens statische taken, zoals langdurig voorover leunen of boven het hoofd werken.



Illustratie van het zwaartekrachtcompensatieconcept met de Auxivo OmniSuit.

<sup>†</sup> Links: Als de gebruiker voorover gaat leunen of een last voor het lichaam houdt, zal de zwaartekracht het bovenlichaam naar beneden trekken. Wanneer de gebruiker de OmniSuit draagt, begint voorover leunen automatisch ook de veren aan de achterkant van het exoskelet uit te rekken. De resulterende veerkracht trekt de gebruiker naar achteren en compenseert een deel van de voorwaarts trekkende zwaartekracht. Rechts: De schoudersteun van OmniSuit wordt geïllustreerd. Wanneer de gebruiker een arm begint op te tillen, zal hij voelen dat de zwaartekracht hem naar beneden trekt. Wanneer de gebruiker de OmniSuit draagt, zal het exoskelet de schouder geleidelijk ondersteunen naarmate de arm hoger geheven wordt, waardoor de neerwaartse zwaartekracht gecompenseerd wordt door de arm omhoog te duwen.



Illustratie van het energieopslag- en recuperatieconcept.

Als de mens rechtop staat, slaat de massa van het bovenlichaam potentiële energie op, terwijl er geen energie wordt opgeslagen in de veren van het LiftSuit exoskelet voor rugondersteuning. Wanneer de gebruiker voorover leunt, waardoor het massamiddelpunt van het bovenlichaam daalt, komt de potentiële energie vrij en wordt deze overgedragen naar de veren van het exoskelet, waar ze wordt opgeslagen. Wanneer de gebruiker weer rechtop gaat zitten, wordt de energie weer omgezet in potentiële energie en wordt de beweging op deze manier ondersteund.

**Energiereducatie: Het Werk Maar Één Keer Doen.**  
Een erg belangrijk concept van passieve, op veren gebaseerde exoskeletten is energiereducatie. Een veelgestelde vraag is waar de energie vandaan komt die nodig is om de veren op te spannen. Het antwoord is: de energie is er al, opgeslagen in uw lichaam wanneer u rechtop staat. Om dit uit te leggen, moeten we wat natuurkunde introduceren: Elk voorwerp met een massa in een zwaartekrachtveld heeft opgeslagen zogenaamde potentiële energie. De energie die in dit voorwerp is opgeslagen is  $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ , dus de massa  $m$  van het voorwerp vermenigvuldigd met de hoogte  $h$  vermenigvuldigd met de zwaartekrachtsversnelling van de aarde  $g$ . Deze potentiële energie verandert als we de hoogte van het voorwerp vergroten (er is extra energie nodig) of verkleinen (er komt energie vrij).

Voor een rugsupport exoskelet zoals de Auxivo LiftSuit is de energie waar we het over hebben de potentiële energie van de massa van het bovenlichaam. Als een persoon rechtop staat, bevindt het bovenlichaam zich op het hoogste punt en de massa van het lichaam draagt potentiële energie in zich. Wanneer de persoon naar voren leunt, beweegt het massamiddelpunt naar beneden, de potentiële energie komt vrij en het grootste deel ervan gaat verloren door energiedissipatie. Wanneer we weer omhoog willen, moeten onze spieren extra energie investeren om de potentiële energie te herstellen.

De veren op de rug van een gebruiker wordt uitgerekt wanneer de gebruiker voorover leunt. Een deel van de potentiële energie die vrijkomt wanneer de gebruiker naar voren buigt wordt overgedragen op de veer. Deze energie blijft behouden in het systeem in plaats van verloren te gaan. De vergelijking voor veerenergie is:  $E_{veer} = 1/2 \cdot k \cdot x^2$ , waarbij  $k$  being the spring's stiffness and  $x$  being the displacement of the spring from its equilibrium position. Wanneer de gebruiker weer rechtop gaat staan, wordt de opgeslagen veerenergie weer omgezet in potentiële energie. Dit proces wordt bij elke beweging herhaald, en de opgeslagen energie wordt heen en weer overgedragen tussen het menselijk lichaam en het exoskelet.

Natuurlijk kan de veer niet alle potentiële energie van het menselijk bovenlichaam opslaan, en het proces is ook niet 100% efficiënt, bijvoorbeeld door wrijving. Anders zouden we alle energie tijdens elke tilbeweging in een nulsum energiebalans terugwinnen, en zouden we dit in principe eeuwig kunnen blijven doen. Maar zelfs als slechts een percentage van de potentiële energie wordt opgeslagen en na elke beweging wordt teruggewonnen, vermindert dit proces de werkbelasting aanzienlijk.

Het principe van energiereducatie is de reden waarom exoskeletten op basis van veren zo energiezuinig zijn en een goed ondersteuningsniveau kunnen bieden terwijl ze klein, licht en kosteneffectief zijn.

# Deel 3

## Vaak Voorkomende Misvattingen

In dit laatste deel willen we enkele veel voorkomende misvattingen bespreken die we vaak horen en die een bron van verwarring vormen. Als u de vorige delen hebt gelezen, zult u snel de verkeerde veronderstellingen kunnen identificeren waarop deze misvattingen gebaseerd zijn.

Misvatting één: Alleen actieve exoskeletten bieden echte ondersteuning omdat u voor passieve systemen eerst energie moet investeren.

De belangrijkste misvatting is dat bij een passief exoskelet uw spieren de kracht moeten leveren om de veren van het exoskelet op te rekken. U zou dus eerst energie moeten leveren die u later ondersteunt. Daarom zou de ondersteuning van passieve systemen geen "echte" ondersteuning zijn. Actieve systemen daarentegen leveren extra kracht en energie. Daarom is het logisch dat alleen actieve systemen u kunnen ondersteunen.

Deze misvatting berust op verschillende verkeerde aannames die snel kunnen worden opgelost door de concepten van zwaartekrachtcompensatie, energierecuperatie en de verschillen tussen technische mechanica en biomechanica toe te passen.

De eerste verkeerde aanname hier heeft betrekking

op de krachten.

Er wordt aangenomen dat de menselijke spieren actief de veren van het passieve exoskelet moeten aanspannen. Zoals we weten, zolang de passieve veren alleen de zwaartekrachtbelasting op uw lichaam compenseren, hoeft u geen extra kracht te investeren om de veer voor te spannen omdat de zwaartekracht dat voor u doet! Bij een goed ontworpen exoskelet zal de veerondersteuning uw lichaamsgewicht in geen enkele positie overcompenseren en hoeft u nooit uw spieren te gebruiken om de veer aan te spannen.

De tweede verkeerde aanname heeft betrekking op

de energiebalans.

Er wordt van uitgegaan dat u met een passief systeem altijd energie moet investeren en, als u geluk hebt, slechts een deel ervan terugkrijgt. Dit is in het beste geval een nulsom-energiebalans, wat betekent dat er geen echte ondersteuning of vermindering van de belasting bestaat.

Eén aspect van deze energiemisvatting is dat een nulsom energiebalans iets slechts en inefficiënt is. In werkelijkheid zou een nulsom energiebalans een fantastisch resultaat zijn. Het zou betekenen dat we eindeloos kunnen tillen zonder te zweten, omdat we bij elke herhaling al onze energie terugkrijgen door energierecuperatie.

De realiteit van tillen en vooroverbuigen is veel erger. Ons lichaam verbrandt energie elke seconde dat we in een voorovergebogen positie blijven. Elke keer dat we naar beneden hurken, gaat de potentiële energie van ons lichaam bijna volledig verloren en moet deze weer opgebouwd worden met behulp van spierkracht.

Een passief, op veren gebaseerd exoskelet dat middels energierecuperatie een percentage van de energie kan behouden, kan een aanzienlijk verschil maken. Het is waar dat dit exoskelet geen extra energie aan het systeem toevoegt. Toch voorkomt het dat we energie verliezen en verspillen tijdens werk, wat een erg efficiënte manier van ondersteuning is.

Een ander aspect van deze verkeerde energie-aanname is dat de verschillen tussen een mechanisch en biomechanisch systeem genegeerd worden. De mens kan veel meer energie besparen dan in de mechanische veer is opgeslagen, simpelweg omdat, zoals hierboven besproken, een permanente ondersteunende kracht van een voorgespannen mechanische veer de menselijke gebruiker elke seconde extra energie bespaart vanwege het menselijke spiermetabolisme.



Misvatting twee: Exoskeletten verminderen de belasting op het ene lichaamsdeel, maar verplaatsen die belasting naar andere lichaamsdelen, wat gevaarlijk is.

Dit is deels juist. Zoals hierboven besproken, kunnen exoskeletten op verschillende manieren gebruik maken van herverdeling van belasting. Maar zoals het hierboven staat, impliceert het dat herverdeling van belasting altijd nodig is en leidt tot verhoogde belasting op lichaamsdelen die voorheen niet belast werden. Het impliceert ook dat herverdeling van belasting van het ene onderdeel naar het andere iets intrinsiek slechts en ongezonds is, en dat is de misvatting die we willen aanpakken:

Ten eerste kan de plaatselijke belasting verminderd worden zonder de belasting elders te verhogen: Door gebruik te maken van het hierboven beschreven concept van belastingomleiding, is het mogelijk om de belasting op het menselijk lichaam en individuele lichaamsdelen te verminderen zonder deze noodzakelijkerwijs elders te verhogen. Het externe exoskelet biedt gewoon een alternatief belastingstraject naar de grond, waar uiteindelijk alle door de zwaartekracht veroorzaakte belasting van het lichaam zal aankomen. Dus waarom zou u de lichaamsdelen die het risico lopen overbelast te raken niet overslaan?

Ten tweede kan het nuttig zijn om de belasting over een groter lichaamsgebied te verdelen:

Herverdeling van de belasting, waarbij de belasting in andere delen van het lichaam bewust wordt verhoogd, is een aanpak die bewust kan worden gebruikt. En ja, dit betekent dat de belasting in sommige lichaamsdelen toeneemt, maar als dit op de juiste manier wordt gebruikt, is lastverdeling niet standaard iets slechts. Dezelfde belasting kan gelijkmatiger verdeeld worden over een groter deel van het lichaam. Belastingsherverdeling kan ook betekenen dat de belasting beter verdeeld wordt, zodat het bijvoorbeeld een asymmetrische belasting gelijkmatiger over de linker- en rechterkant van het lichaam kan verdelen. Een belasting van 120% en 50% maximale capaciteit aan de linker- en rechterkant van het lichaam zal ongezonder zijn dan een 90% - 80% verdeling.



# Samenvatting en laatste woorden

Wij hopen dat u dit artikel met plezier hebt gelezen en dat het u meer inzicht heeft gegeven in de ondersteuningsprincipes die moderne exoskeletten gebruiken. Zoals u hebt kunnen zien, zijn er veel verschillende concepten om uit te kiezen bij het ontwerpen van een exoskelet. Een goed begrip van mechanische en biomechanische principes is daarbij essentieel om een ontwerp te creëren dat optimale ondersteuning biedt en tegelijkertijd eenvoudig te gebruiken is.

De meeste principes die we hebben besproken, zijn universeel toepasbaar op alle soorten exoskeletten. Of het nu gaat om actieve of passieve, stijve of flexibele varianten – ze maken allemaal gebruik van dezelfde basisideeën, die op verschillende manieren worden toegepast. Het is dan ook niet zo dat één type exoskelet per definitie beter is dan het andere; het draait om de technologieën die het meest geschikt zijn voor een specifieke toepassing.

Bent u nieuwsgierig geworden en wilt u meer weten over exoskeletten? Neem gerust een kijkje op onze website. Daar vindt u een overzicht van onze exoskeletten voor verschillende sectoren.

Wilt u zelf meer leren over de technologie achter exoskeletten? Onze educatieve exoskeletten uit de EduExo-serie bieden u de mogelijkheid om zelf aan de slag te gaan met het ontwerpen en bouwen van uw eigen exoskelet.

# Over de Auteurs



**Volker Bartenbach**  
Volker is medeoprichter en CEO van Auxivo. Met een PhD in exoskelet robotica en meer dan 12 jaar ervaring in het ontwikkelen, onderzoeken en commercialiseren van exoskeletten, is het zijn doel om hoogwaardige exoskeletten te ontwikkelen en ze voor meer mensen toegankelijk te maken.



**Rachel van Sluijs**  
Rachel is hoofd onderzoek bij Auxivo. Met een PhD in Neurowetenschappen en een Master in Bewegingswetenschappen is haar werk erop gericht om de interactie tussen draagbare exoskeletten en de gebruiker te begrijpen en te optimaliseren, zodat het menselijk lichaam ten volle kan profiteren van de ondersteuning van het exoskelet.



**Roger Gassert**  
Roger is medeoprichter en wetenschappelijk adviseur bij Auxivo. Hij is ook hoogleraar Revalidatietechniek aan de ETH Zürich. Zijn onderzoek richt zich op de ontwikkeling en klinische validatie van draagbare revalidatietechnologieën zoals exoskeletten.



**Rob de Kievit**  
Rob is oprichter van ExoSustain. Met een passie voor ergonomie en innovatie richt hij zich op het verminderen van fysieke belasting op de werkvloer. Zijn missie is om bedrijven te ondersteunen bij het duurzaam verbeteren van arbeidsomstandigheden met praktische oplossingen zoals exoskeletten.

## Over Auxivo

Auxivo AG is een toonaangevende ontwikkelaar en fabrikant van exoskeletten, opgericht in 2019 als spin-off van de ETH Zürich. De missie van het bedrijf is om de veiligheid en het welzijn van werknemers te verbeteren door innovatieve en toegankelijke oplossingen te bieden die de fysieke belasting en het risico op letsel verminderen. Het snelgroeiende exoskeletportfolio van het bedrijf biedt praktische oplossingen voor industrieën zoals logistiek, productie, bouw of gezondheidszorg.

## Over ExoSustain

ExoSustain is dé partner voor bedrijven die fysieke belasting op de werkvloer willen verminderen. Als trotse dealer van Auxivo in Nederland combineren we onze expertise in implementatie met Auxivo's innovatieve exoskeletten, zoals de LiftSuit.

Onze nauwe samenwerking stelt ons in staat om bedrijven te voorzien van praktische, comfortabele en gebruiksvriendelijke oplossingen die direct bijdragen aan een gezondere en veiligere werkomgeving.

Of het nu gaat om logistiek, productie, bouw of zorg, ExoSustain begeleidt organisaties stap voor stap in het succesvol integreren van exoskeletten in hun dagelijkse processen.

## Copyright

Januari 2024 © Auxivo AG

De inhoud van dit document zijn auteursrechtelijk beschermd. Alle rechten voorbehouden.

Auxivo®, LiftSuit®, CarrySuit®, DeltaSuit® en OmniSuit® zijn geregistreerde handelsmerken eigendom van Auxivo AG.

Ongeacht het doel is het gebruik van deze handelsmerken verboden zonder schriftelijke toestemming van Auxivo AG.

Technische wijzigingen, fouten en weglatingen zonder voorafgaande kennisgeving.

**EXOSUSTAIN**

**AUXIVO**

