Hoofdstuk 7

De statica van het menselijk lichaam

7.1 Het evenwicht van lichamen

7.1.1 De evenwichtsvoorwaarden

Overeenkomstig de tweede wet van Newton zal een lichaam geen lineaire en angulaire versnellingen hebben indien de netto kracht en het netto krachtmoment die inwerken, nul zijn. Bijgevolg zal de (lineaire of angulaire) snelheid van het lichaam constant zijn of nul. Indien de versnelling nul is, wordt het lichaam beschouwd als zijnde in evenwicht. Is daarenboven de snelheid ook nul dan is het lichaam in rust of in ***statisch evenwicht***.

Dus zijn er twee voorwaarden die moeten voldaan zijn voor evenwicht:

$$\sum_i \overline{F}_{i,\text{uitw}} = 0$$

en

$$\sum_i \overline{\tau}_{i,\text{uitw}} = 0$$

Een lichaam is dus in evenwicht als de vectorsom van alle uitwendige krachten en alle uitwendige krachtmomenten t.o.v. een willekeurige inertiële oorsprong nul is.

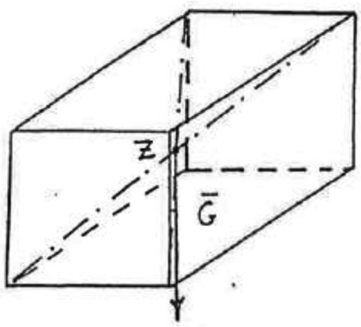
Deze voorwaarden moeten gelden t.o.v. een willekeurig assenstelsel, wat in het geval van een driedimensionale beweging aanleiding geeft tot zes scalaire evenwichtsvoorwaarden.

7.1.2 Bepaling van het zwaartepunt

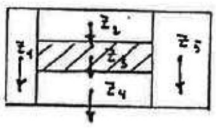
In de biomechanica is de gravitatiekracht erg belangrijk. De stevigheid van het menselijk beendergestel, spieren e.d. wordt door de gravitatiekracht bepaald doordat de ontwikkeling ervan en alle activiteit die erdoor moet verricht worden, plaats grijpt in het gravitatieveld van de aarde. Hier noemt men de gravitatiekracht dan gewicht.

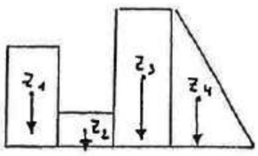
Elk voorwerp in het gravitatieveld van de aarde kan beschouwd worden als opgebouwd uit een oneindig aantal deeltjes waarop de aantrekkingskracht inwerkt. Voor vele toepassingen mogen we echter onderstellen dat de zwaartekracht, die inwerkt op een voorwerp, gebundeld is tot één enkele kracht die aangrijpt in het ***zwaartepunt*** van het voorwerp. Een begrip dat nauw verbonden is met het zwaartepunt is het ***massamiddelpunt*** dat <u>bij definitie</u> het punt is waarin al de massa van het voorwerp geconcentreerd is. In het algemeen is er een verschil tussen het zwaartepunt en het massamiddelpunt van een voorwerp (vooral bij voorwerpen die zo groot zijn dat de grootte van de gravitatieversnelling verschilt van deel tot deel van het voorwerp). Voor de toepassingen in de biomechanica refereren het zwaartepunt en het massamiddelpunt hier naar hetzelfde punt.

Bij homogene lichamen kan men het zwaartepunt bepalen uit symmetrieoverwegingen zoals bv. bij de balk (zie figuur).



Bij niet homogene of onregelmatige lichamen kan men niet onmiddellijk het zwaartepunt bepalen uit symmetrieoverwegingen. Bij dergelijke lichamen verdeelt men dit in delen en bepaalt men de deelzwaartepunten. De deelzwaartepunten worden dan samengesteld om de ligging van het zwaartepunt van het totale lichaam te bepalen.

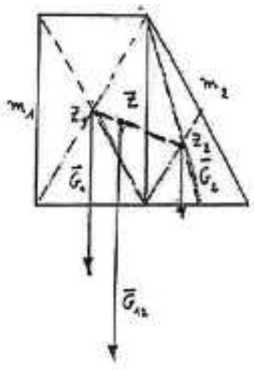




Regels voor de samenstelling:

Het zwaartepunt van een systeem bestaande uit de massa's m_1 en m_2 met deelzwaartepunten Z_1 en Z_2 verdeelt het lijnstuk Z_1Z_2 zodanig dat de afstanden van Z tot Z_1 en Z_2 omgekeerd evenredig zijn met de massa's m_1 en m_2.

$$\frac{ZZ_1}{ZZ_2} = \frac{m_2}{m_1}$$



Z kan dus grafisch bepaald worden. Voor de bepaling van het zwaartepunt van een lichaam met meerdere deelmassa's past men de regel achtereenvolgens toe: men stelt Z_1 en Z_2 samen tot Z_{12}, vervolgens Z_{12} met Z_3 tot Z_{123}, …

Zijn de deelmassa's en coördinatensystemen bekend dan kan men voor de coördinaten van het zwaartepunt van het totale lichaam de algemene formules afleiden.

Voor de coördinaten van het zwaartepunt t.o.v. een gekozen assenstelsel geldt:

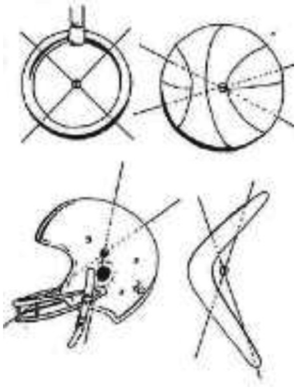
$$x_z = \frac{1}{m}\int x dm \qquad y_z = \frac{1}{m}\int y dm \qquad z_z = \frac{1}{m}\int z dm$$

Als we een voorwerp opvatten alsof het is opgebouwd uit een eindig aantal puntmassa's m_1 tot en met m_n, dan kan de integraal als een som geschreven worden:

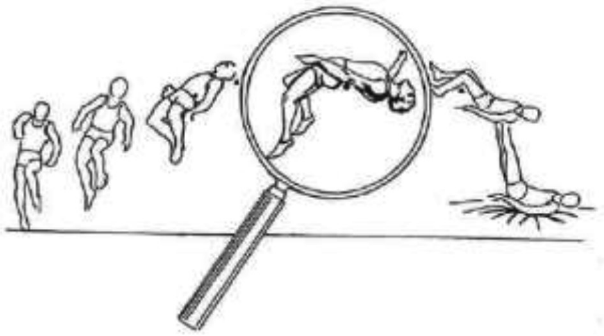
$$x_z = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i} \qquad y_z = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i} \qquad z_z = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i z_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}$$

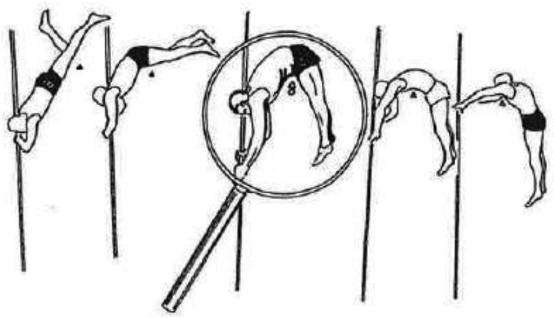
waarbij x_i, y_i *en* z_i de afstanden van m_i tot een gekozen oorsprong zijn.

Er dient opgemerkt te worden dat het zwaartepunt van een lichaam niet noodzakelijk binnen de fysische grenzen van dat lichaam hoeft te liggen (zie figuur).



Indien bij het hoogspringen of het polstokspringen de atleet de houding aanneemt van de boomerang, dan kan men inzien dat, terwijl hij fysisch zich boven de dwarslat bevindt, zijn zwaartepunt (massamiddelpunt) “in” de lat of eronder ligt.

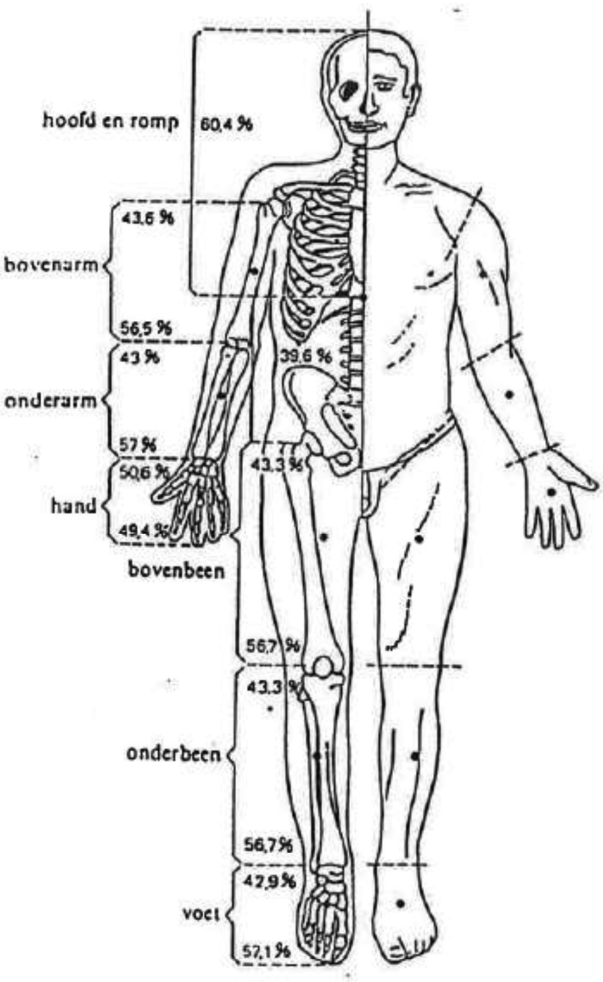




7.1.3 Het zwaartepunt van het menselijk lichaam

In tegenstelling tot starre lichamen heeft het menselijk lichaam geen vast zwaartepunt. Het verschilt van persoon tot persoon, afhankelijk van de bouw van de persoon. Voor een bepaalde persoon kan het zwaartepunt nog variëren afhankelijk van de relatieve positie van de lichaamsuiteinden gedurende bepaalde fysische activiteiten. Dit wil zeggen dat elke verplaatsing van lichaamsdelen t.o.v. elkaar een vormverandering betekent zodat een verplaatsing van het lichaamszwaartepunt t.o.v. het lichaam zelf plaatsgrijpt. De plaats van de zwaartepunten van de bovenuiteinden en de onderuiteinden kunnen ook verschillen. Bijvoorbeeld wordt het zwaartepunt van het been naar achter verschoven als de knie gebogen wordt. Het zwaartepunt van de ganse arm verschuift naar voor als de elleboog gebogen wordt.

Het zwaartepunt van de mens in anatomische houding (rechtopstaand met gestrekte armen langs het lichaam) ligt in het bekken voor de tweede sacrale wervel. In onderstaande figuur wordt de ligging van het lichaamszwaartepunt en van de deelzwaartepunten van de mens in anatomische houding afgebeeld. De afstanden van de deelzwaartepunten tot de uiteinden worden uitgedrukt in percentages van de lengte van de lichaamsdelen. De posities van de deelzwaartepunten van de romp, de handen en de voeten liggen niet geheel vast gezien deze lichaamsdelen van vorm kunnen veranderen. Er bestaan verschillende methodes om het lichaamszwaartepunt of de plaats van de deelzwaartepunten te bepalen.



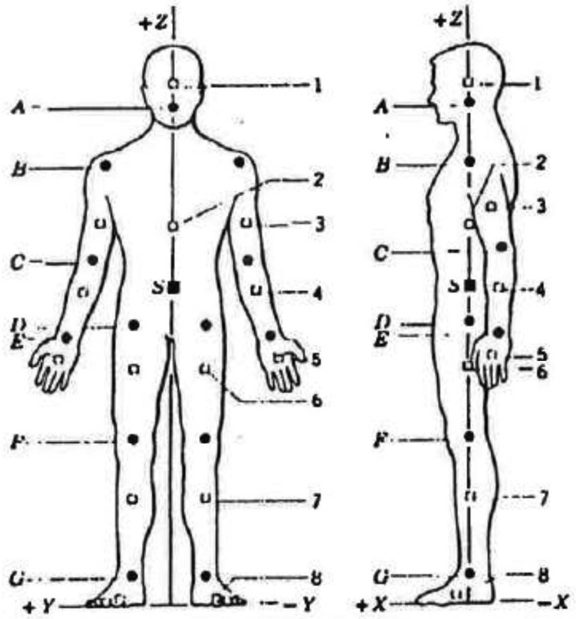
massaverdeling :

hoofd 6.9 %

romp 52.1 %

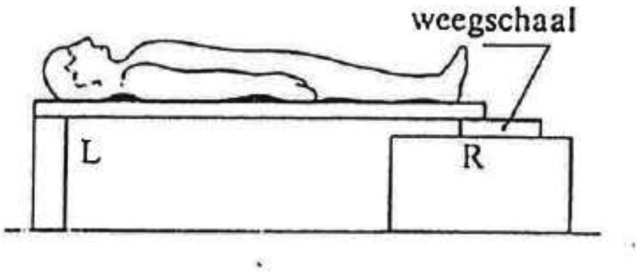
armen 2x 4.9 %

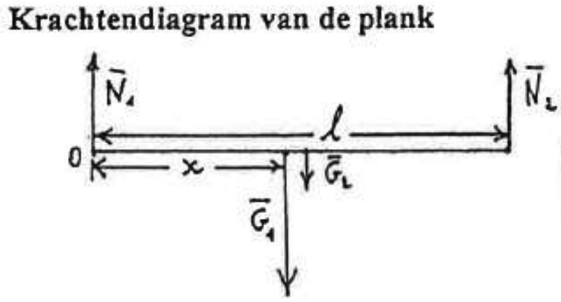
benen 2x 15.6 %



Symbool		Koördinaten van punt (percentage v.d. hoogte) X	Y	Z	Massa (percentage van totale lichaams-massa)
	Gewrichtspunten				
A	Schedel op wervelkolom	0.0	0.0	91.23	
B	Schouder	0.0	10.66	81.16	
C	Elleboog	0.0	10.66	62.20	
D	Heup	0.0	5.04	52.13	
E	Pols	0.0	10.66	46.21	
F	Knie	0.0	5.04	28.44	
G	Enkel	0.0	5.04	3.85	
	Massacentrum				
1	Hoofd	0.0	0.0	93.48	6.9
2	Borst-hals	0.0	0.0	71.09	46.1
3	Bovenarm	0.0	10.66	71.74	6.6
4	Onderarm	0.0	10.66	55.33	4.2
5	Hand	0.0	10.66	43.13	1.7
6	Dijbeen	0.0	5.04	42.48	21.5
7	Onderbeen	0.0	5.04	18.19	9.6
8	Voet	3.85	6.16	1.78	3.4
S	Totaal (geheel lichaam)			57.95	100.00

7.1.4 Experimentele bepaling van het lichaamszwaartepunt met een weegschaal (in vivo)





De optredende uitwendige krachten zijn:

- **N_1** de normaalkracht uitgeoefend ter hoogte van het steunpunt bij het hoofd;
- **N_2** de normaalkracht uitgeoefend door de weegschaal (in grootte gelijk aan het gewicht waarmee de weegschaal belast wordt: actie=reactie)
- **G_1** de zwaartekracht van de persoon met massa m
- **G_2** de zwaartekracht van de plank met massa M

Bij evenwicht geldt:

$$\sum_i \bar{\tau}_{\mathrm{i,uitw}} = 0$$

Toepassing van de voorwaarde t.o.v. het steunpunt ter hoogte van het hoofd geeft:

$$-xG_1 - \frac{L}{2}G_2 + LN_2 = 0$$

$$\text{of} \quad x = \frac{LN_2 - \frac{L}{2}G_2}{G_1} = \frac{Lm_{\mathrm{afl}} - \frac{L}{2}M}{m}$$

met m_{afl} de massa aflezing op de schaal

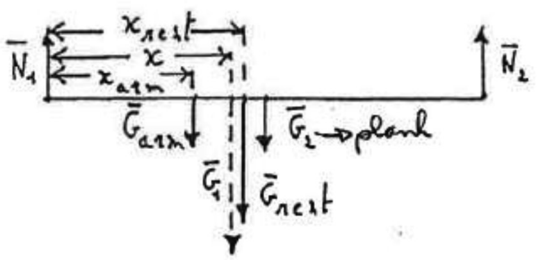
<u>Voorbeeld:</u>

m=75 kg; M=10 kg, m_{afl}=41 kg, L=2 m

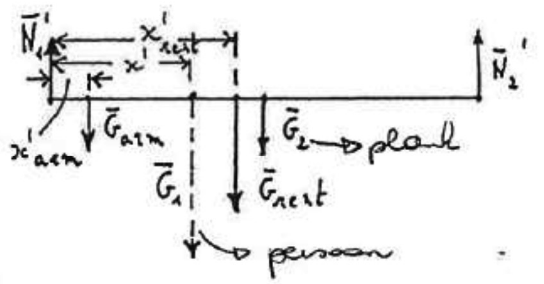
Hieruit volgt dat x=0,96 m m.a.w. het lichaamszwaartepunt bevindt zich op 96 cm van het hoofdeinde.

7.1.5 Experimentele bepaling van de plaats van het deelzwaartepunt van de armen

Het aflezen op de weegschaal levert de ligging van het lichaamszwaartepunt in deze houding: x′



Krachtendiagram armen
naast het lichaam



Krachtendiagram armen
boven het lichaam

Het totale lichaam is samengesteld uit de bovenste extremiteiten en de rest (2 deellichamen). Er geldt

$$x_{rest} = x'_{rest}$$

$$x = \frac{m_{arm}x_{arm} + m_{rest}x_{rest}}{m_{lichaam}} = 0,098x_{arm} + 0,902x_{rest}$$

$$x' = \frac{m_{arm}\left(x_{arm} - d\right) + m_{rest}x_{rest}}{m_{lichaam}} = 0,098x_{arm} - 0,098d + 0,902x_{rest}$$

met $d = x_{arm} - x'_{arm}$ de verplaatsing van het deelzwaartepunt
van de armen

Hieruit volgt:

$$x - x' = 0,098d$$

$$d = \frac{x - x'}{0,098}$$

De afstand van het deelzwaartepunt van de armen tot het schoudergewricht is d/2.

Voorbeeld:

m=75 kg, M=10 kg, L=2m

armen langs het lichaam: m_{afl}=41 kg $\Rightarrow$ x=0,96 m armen langs het hoofd: m_{afl}=39,5 kg $\Rightarrow$ x′=0,92 m

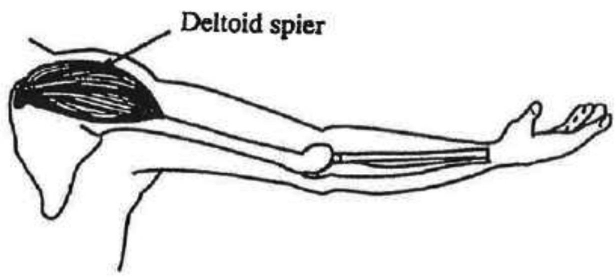
dus wordt d=0,61 m.

De afstand van het deelzwaartepunt van de armen tot het schoudergewricht wordt nu: 30,5 cm.

7.1.6 Voorbeelden

7.1.6.1 Bepaling van het zwaartepunt van de arm

Om de spierkracht te kunnen bepalen die bijvoorbeeld de deltoidspier moet uitoefenen om een arm horizontaal gestrekt te houden moeten we het aangrijpingspunt van de zwaartekracht op de arm kennen, waarbij de arm bestaat uit de hand, de voorarm en de bovenarm (figuur).



Beschouw een persoon met een massa van 75 kg en een lengte van 1,80 m. Uit bovenstaande tabel kunnen we aflezen dat :

$$m_{hand} = \frac{1,7}{2} x0,75 = 0,64 \text{ kg}$$

$$m_{voorarm} = \frac{4,2}{2} x0,75 = 1,58 \text{ kg}$$

$$m_{bovenarm} = \frac{6,6}{2} x0,75 = 2,48 \text{ kg}$$

De afstanden voor een persoon van 1,80 m worden dan:

$$\begin{aligned}
&\text{schouder - massacentrum hand} &&= (81,16 - 43,13)x1,8 = 68,5 \text{ cm} \\
&\text{schouder - massacentrum voorarm} &&= (81,16 - 55,33)x1,8 = 46,5 \text{ cm} \\
&\text{schouder - massacentrum bovenarm} &&= (81,16 - 71,74)x1,8 = 17,0 \text{ cm}
\end{aligned}$$

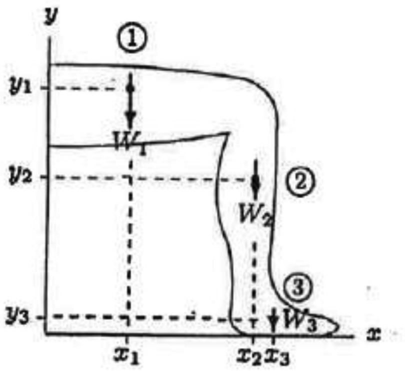
Het massacentrum van de totale arm ligt dan, gemeten vanaf de schouder, op een afstand van:

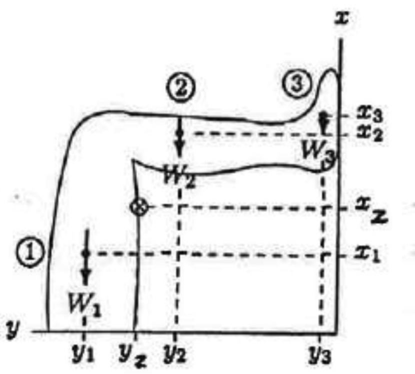
$$x_{MC} = \frac{m_{hand}x_{MC,hand} + m_{voorarm}x_{MC,voorarm} + m_{bovenarm}x_{MC,bovenarm}}{m_{hand} + m_{voorarm} + m_{bovenarm}}$$

$$= \frac{0{,}64\text{x}68{,}5 + 1{,}58\text{x}46{,}5 + 2{,}48\text{x}17{,}0}{0{,}64 + 1{,}58 + 2{,}48} = 34 \text{ cm}$$

7.1.6.2 Bepaling van het zwaartepunt van een gebogen been

Beschouw een been gebogen onder een hoek van 90° (figuur). De coördinaten van de zwaartepunten van het bovenbeen, het onderbeen en de voet gemeten vanaf de begane grond en vanaf het heupgewricht worden in tabel 2 weergegeven alsook de procentuele gewichten van deze onderdelen t.o.v. het totale gewicht van de persoon.





DEEL	X (cm)	Y (cm)	% W
1	17,3	51,3	10,6
2	42,5	32,8	4,6
3	45,0	3,3	1,7

De x- coördinaat van het zwaartepunt van het ganse been wordt dan gevonden door:

$$x_z = \frac{x_1W_1 + x_2W_2 + x_3W_3}{W_1 + W_2 + W_3}$$

$$x_z = \frac{17{,}3x0{,}106W + 42{,}5x0{,}046W + 45{,}0x0{,}017W}{0{,}106W + 0{,}046W + 0{,}017W} = 26{,}9 \text{ cm}$$

Om de y coördinaat van het zwaartepunt van het been te vinden wordt het been over een hoek van 90° gedraaid zoals voorgesteld in de rechter figuur.

$$y_z = \frac{y_1 W_1 + y_2 W_2 + y_3 W_3}{W_1 + W_2 + W_3}$$

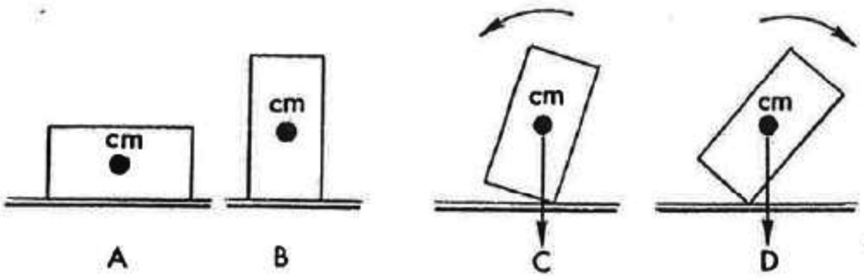
$$y_z = \frac{51{,}3x0{,}106W + 32{,}8x0{,}046W + 3{,}3x0{,}017W}{0{,}106W + 0{,}046W + 0{,}017W} = 41{,}4 \text{ cm}$$

7.1.7 Vormen van evenwicht

Indien een lichaam in statisch evenwicht is en er op dat lichaam een kracht inwerkt die het lichaam lichtjes verplaatst dan zij er drie mogelijkheden:

- Het lichaam keert terug naar zijn oorspronkelijke evenwichtspositie=STABIEL EVENWICHT;
- Het lichaam keert niet terug naar zijn evenwichtspositie=LABIEL EVENWICHT;
- Het lichaam verplaatst zich naar een nieuwe evenwichtspositie=NEUTRAAL EVENWICHT.

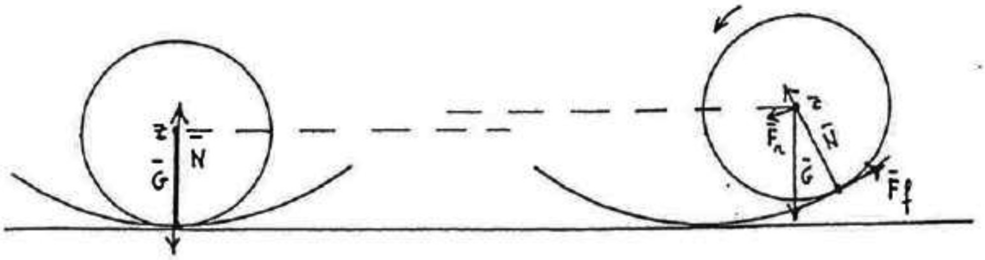
Onderstaande figuur geeft de mogelijke vormen van evenwicht aan. Het evenwicht van een lichaam hangt af van de hoogte van de plaats van zijn zwaartepunt t.o.v. het steunvlak. Een lichaam met een lager gelegen zwaartepunt is stabieler dan een lichaam met een hoger gelegen zwaartepunt!



7.1.7.1 *Stabiel evenwicht*

Het lichaam keert na elke storing uit zichzelf terug naar de oorspronkelijke evenwichtstoestand. Dit treedt op wanneer het zwaartepunt omhoog gaat bij de verstoring: men veroorzaakt een storing door een zekere hoeveelheid kinetische energie in het systeem te brengen. Gaat het zwaartepunt omhoog dan neemt de potentiële energie toe en neemt de kinetische energie af zodat na verloop van tijd de snelheid nul wordt en het lichaam terugkeert naar de toestand van minimale potentiële energie.

Voorbeeld: een bal op een hol vlak

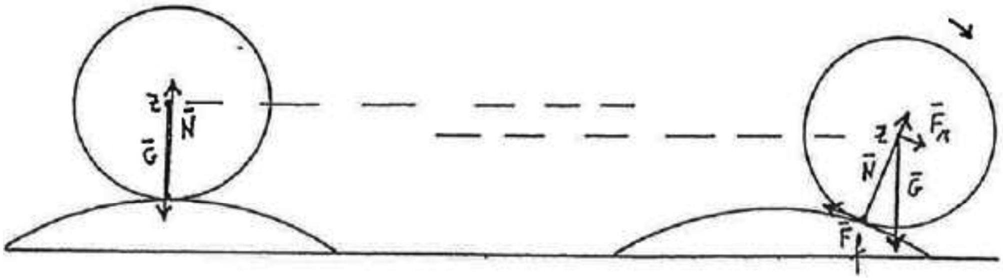


$\mathbf{F_r}$ is de resultante van de zwaartekracht, de normaalkracht en de wrijvingskracht.

7.1.7.2 *Labiel evenwicht*

Na een willekeurige kleine verstoring verwijdert het lichaam zich verder en blijvend van de oorspronkelijke evenwichtstoestand. Dit treedt op wanneer het zwaartepunt daalt door die verstoring: de potentiële energie neemt af ten voordele van de kinetische energie.

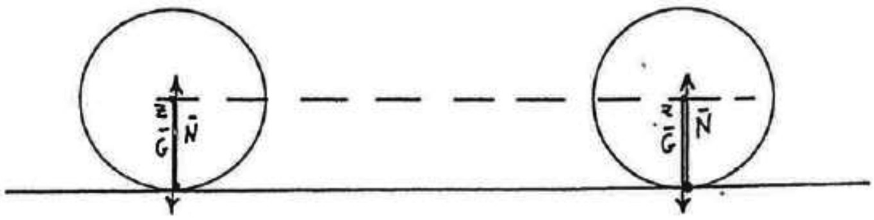
Voorbeeld: een bal op een bol vlak



7.1.7.3 *Neutraal evenwicht*

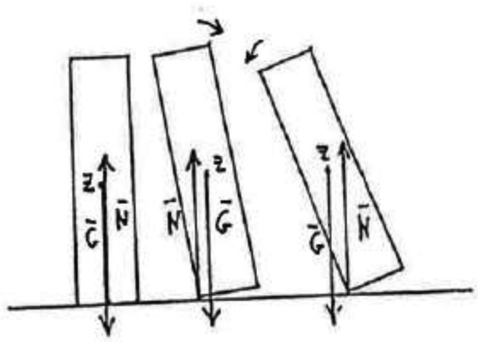
Elke positie van het lichaam komt overeen met een evenwichtstoestand.

Voorbeeld: een bal op een plat vlak



Indien een lichaam zich voor een voldoende kleine verstoring stabiel gedraagt maar bij een storing, die een door omstandigheden bepaalde grens overschrijdt, labiel gedraagt dan spreekt men van een **METASTABIEL EVENWICHT**. Het zwaartepunt van het lichaam stijgt tot een kritische positie en daalt daarna bij een grotere verstoring.

Voorbeeld: het kantelen van een overeind staande balk



Kantelen is een rotatie met als draaias één van de zijden van het grondvlak van de balk. Deze zijde wordt dan de kantellijn genoemd. Is de verstoring zo dat het zwaartepunt langs dezelfde kant blijft van het verticale vlak genomen door de kantellijn als bij de evenwichtsstand, dan vormen de normaalkracht en de zwaartekracht een koppel dat een rotatie veroorzaakt van de balk naar de evenwichtstoestand toe.

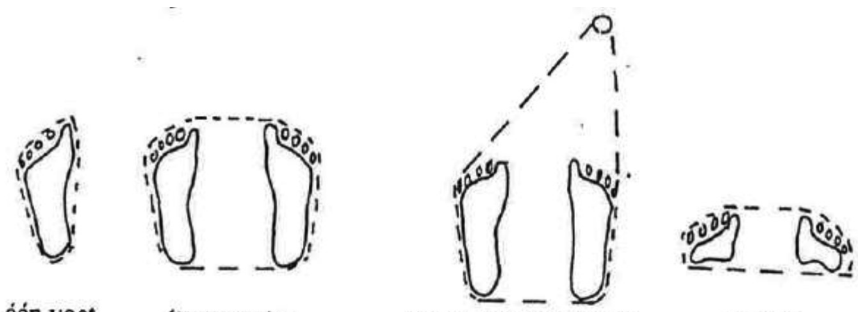
Komt het zwaartepunt langs de andere zijde van het verticaal vlak terecht dan zal het krachtmoment van het krachten koppel G-N de balk nog verder van de oorspronkelijke evenwichtstoestand wegdraaien.

Opmerking: Echt labiel evenwicht komt haast niet voor. Meestal wordt dit opgevat als een metastabiel evenwicht waarbij de grens tussen stabiel en labiel al voor zeer kleine uitwijkingen overschreden wordt. Denk aan handenstand bij de ringen, aan koorddansen…

7.1.8 Steunvlak en stabiliteit

Het steunvlak is het gedeelte van het grondvlak waarop een lichaam rust. Het wordt aangeduid door de omhullende van alle steunpunten. Een lichaam is in evenwicht als de verticale projectie van het zwaartepunt binnen het steunvlak valt.

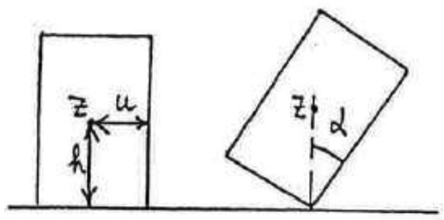
Bij het menselijk lichaam bepaalt de stand van de voeten de grootte van het steunvlak. Zoals men op de figuur kan zien is de stabiliteit van het lichaam het kleinst bij het steunen op één voet of bij hurkzit. Bij het steunen op twee voeten kan men het steunvlak nog vergroten door het gebruik van één of twee steunstokken.



De mate van de stabiliteit van een lichaam in een bepaalde houding wordt met behulp van twee grootheden aangegeven:

De kantelhoek α

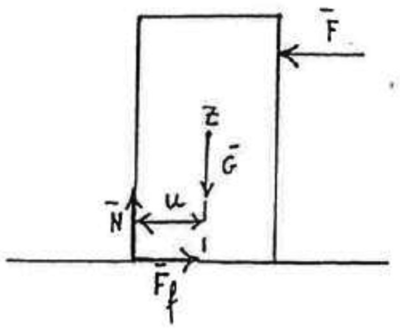
$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{\mathrm{u}}{\mathrm{h}}$$



Naarmate tgα groter is, is het lichaam stabieler t.o.v. uitwijkingen.

Het moment van het stabiliserend koppel

Als er een moment wordt uitgeoefend via een uitwendige kracht **F** ontstaat er een tegenkoppel **N – G**: het stabiliserend koppel. Om het lichaam te laten kantelen moet een moment worden uitgeoefend dat groter is dan het moment door het stabiliserend koppel. De grootte van het moment van het stabiliserend koppel is mgu. Naarmate de waarde van mgu groter is wordt de toestand van het lichaam stabieler t.o.v. krachten.



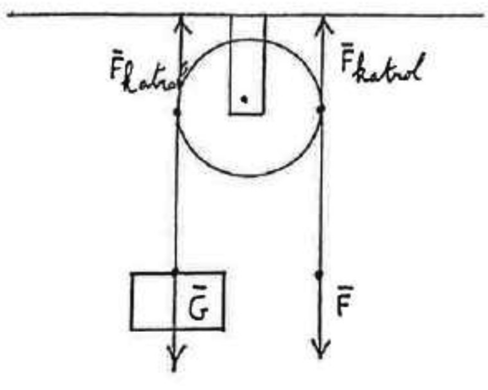
De beide stabiliteitscriteria zijn complementair. Welk criterium toegepast wordt hangt van de gegeven situatie af.

7.2 De uitwendige krachten uitgeoefend met katrollen en takels

7.2.1 Katrollen

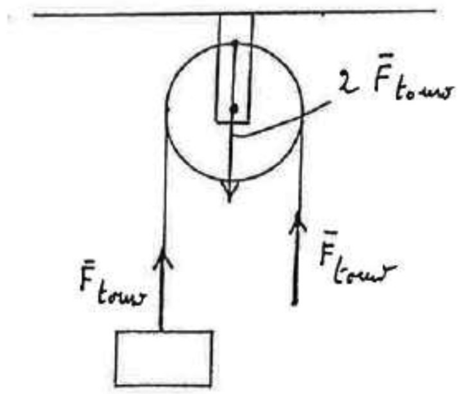
Een katrol bestaat uit een schijf aan de rand voorzien van een gleuf waarin een touw wordt gelegd. De schijf is draaibaar om een as die door een beugel gedragen wordt. Naargelang de beugel van de katrol vastgemaakt wordt of loshangt spreken we respectievelijk van een **vaste** of een **losse katrol.**

Vaste katrol



Krachten op het touw

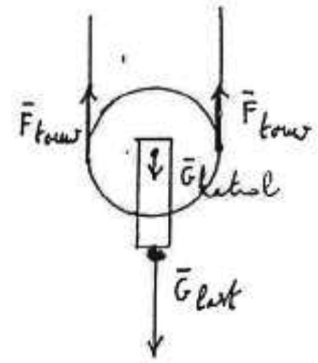
F=uitwendige kracht
F$_{katrol}$=kracht uitgeoefend door de katrol langs één zijde



krachten door het touw

F$_{touw}$=kracht uitgeoefend door het touw op de massa

Losse katrol

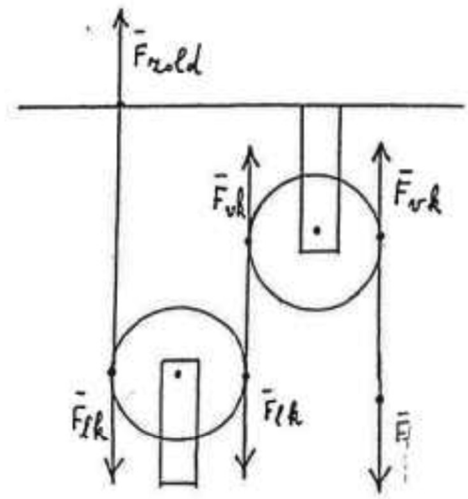


Krachten uitgeoefend op de losse katrol

$$F_{touw} = \frac{G_{katrol} + G_{last}}{2}$$

7.2.2 Takels

Een takel is een combinatie van vaste en losse katrollen. Het eenvoudigste takel is de combinatie van één vaste en één losse katrol.



F_{lk}=kracht uitgeoefend door de losse katrol langs één zijde

$$F_{lk} = \frac{G_{katrol} + G_{last}}{2}$$

F_{vk}=kracht uitgeoefend door de vaste katrol langs één zijde

F= uitwendige kracht

De toepassing van de eerste evenwichtsvoorwaarde geeft:

$$F = F_{vk} = F_{lk} = F_{zold}$$

Om een last met massa m_{last} te dragen met een takel met één losse katrol met massa m_{kat} dient er een uitwendige kracht **F** uitgevoerd te worden met grootte:

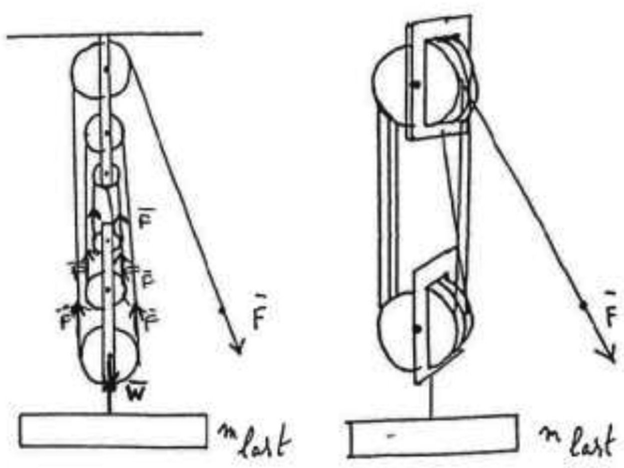
$$\frac{1}{2}g\left(m_{last} + m_{katrol}\right)$$

Bij het gebruik van een takel bestaande uit een stelsel van losse en vaste katrollen is de uitwendige kracht in grootte gelijk aan:

$$F = \frac{1}{2n}g\left(m_{last} + m_{katrol}\right)$$

n = aantal losse katrollen
m_{last} = de te dragen lastmassa
m_{katrol} = totale massa van de losse katrollen

Voorbeelden van takels:

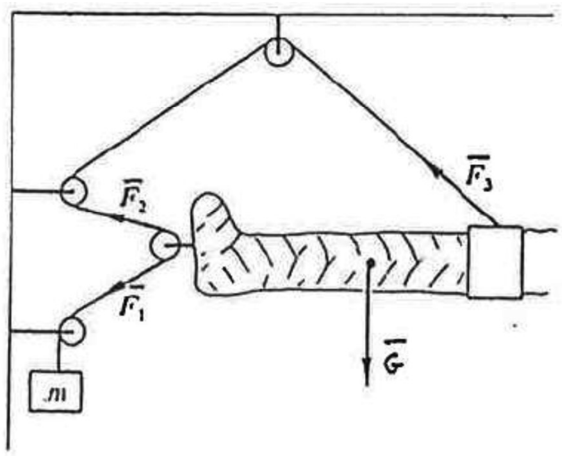


n = 3

$$F = \frac{g}{6}\left(m_{last} + m_{katrol}\right)$$

7.2.3 Uitwendige krachten op een lichaamsdeel bij het gebruik van katrollen en takels: voorbeelden

<u>**Tractie van het onderbeen met een katrol**</u>

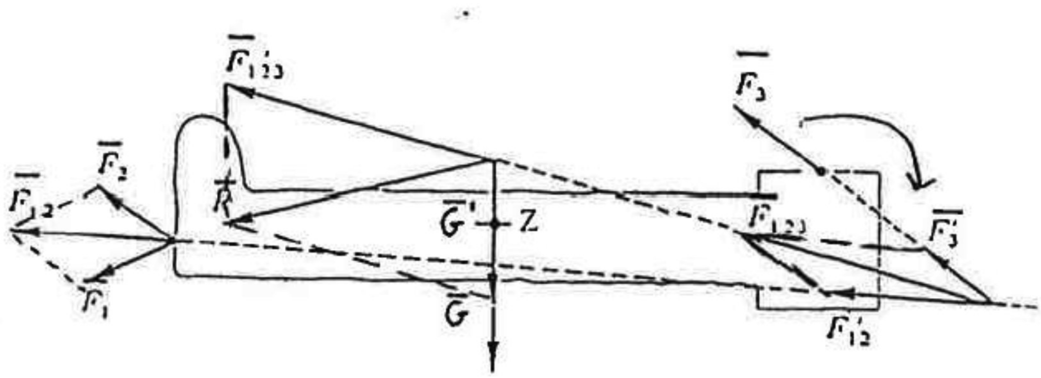


$$F_1 = F_2 = F_3 = mg$$

Het onderbeen wordt horizontaal gestrekt gehouden via een systeem van katrollen.

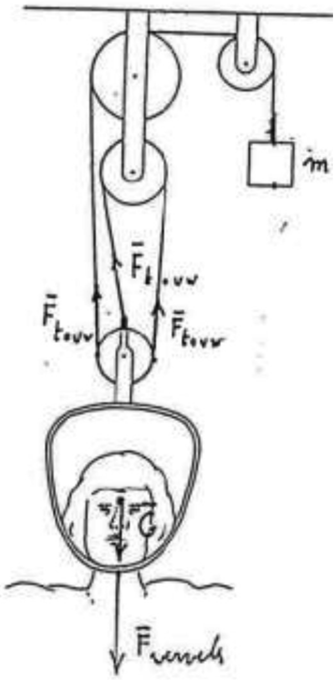
Bereken de resultante van alle uitwendige krachten op het onderbeen in de opstelling van de bovenstaande figuur.

De algemene regel voor het bepalen van de resultante van twee krachten wordt achtereenvolgens toegepast om de resultante **R** te vinden. Indien de krachten niet in één punt aangrijpen dat verschuift men ze langs hun werklijn totdat ze wel in één punt aangrijpen. Uit de onderstaande figuur blijkt dat de resultante van de uitwendige krachten niet nul is. Het evenwicht wordt hier bereikt doordat op het lichaamsdeel ook inwendige krachten via de spieren en de gewrichten inwerken.



Tractie van de halswervels met een takel

In dit geval wordt een takel gebruikt uit één losse en twee vaste katrollen. Het touw begint bij een losse katrol en eindigt bij een gewicht met massa m. Aan de losse katrol bevindt zich een frame waarin het hoofd bevestigd wordt.



Hoe groot is de tractiekracht op de wervels?

Eerst worden de krachten beschouwd die op het hoofd + frame inwerken:

- De 3 (nagenoeg evenwijdige) spankrachten van het touw: $\mathbf{F_{touw}=mg}$
- De zwaartekracht op het hoofd en frame+losse katrol: $\mathbf{G_{hoofd+beugel}}$
- De reactiekracht van de wervels op het hoofd of de gevraagde tractiekracht: $\mathbf{F_{wervels}}$

De eerste evenwichtsvoorwaarde levert:

$$\sum_i \bar{F}_i = 0$$

$$y-as:\ F_{wervels} + G_{hoofd+beugel} - 3mg = 0$$

$$\Rightarrow\ F_{wervels} = 3mg - \left(m_{hoofd} + m_{beugel}\right)g$$

De $\mathbf{F}_{\mathbf{wervels}}$ is ook de grootte van de gevraagde tractiekracht, doch deze is naar boven gericht (actie-reactie wet).

Voorbeeld:

m=8kg; m_{hoofd}=5 kg en m_{beugel}=3 kg $\Rightarrow$ de tractiekracht bedraagt 160 N in grootte!

7.3 Het bepalen van inwendige krachten: het biomechanisch systeem

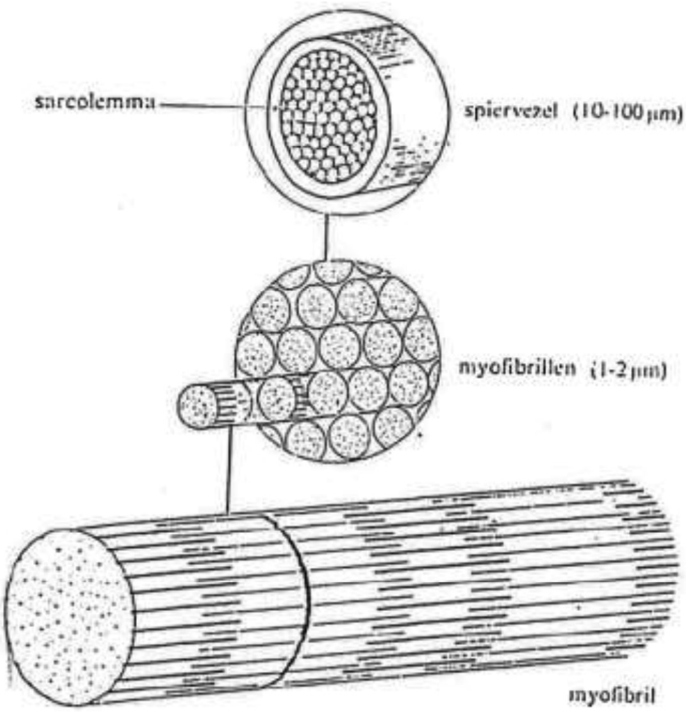
Het evenwicht van een lichaamsonderdeel is het resultaat van zowel uitwendige krachten als inwendige krachten nl. de spierkrachten en de reactiekrachten in het gewricht.

De keuze van het free body diagram hangt geheel af van de vraagstelling die men heeft. Over krachten en krachtmomenten kan alleen iets gezegd worden als ze deel uitmaken van de uitwendige krachten en krachtmomenten die van buiten op het gekozen free body diagram aangrijpen. Van de uitwendige krachten zijn hun grootte, hun richting en hun aangrijpingspunt meetbaar of bekend.

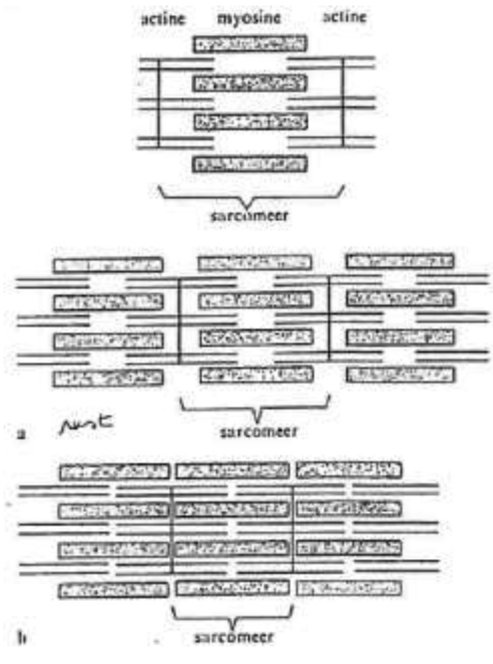
Spierkrachten zijn inwendige krachten. Wil men iets over de werking en de functie van spieren zeggen dan dient men deelsegmenten te maken zodat de spierkrachten wel deel uitmaken van de uitwendige krachten.

De spierkrachten zijn meestal groter dan de uitwendige krachten gezien de afstand van het aangrijpingspunt van de spier tot het gewricht meestal kleiner is dan het aangrijpingspunt van de uitwendige krachten tot het betrokken draaipunt. De grootte van de spierkrachten kan bij evenwicht bepaald worden uit de uitwendige krachten. De plaats van aangrijpen en de richting van deze krachten worden bepaald door anatomische analyse.

Een dwarsgestreepte spier bestaat uit een groot aantal spiervezels met een dikte van 10 –100 µm. De lengte van deze vezels kan variëren van enkele mm tot tientallen cm. De vezels zelf bestaan uit myofibrillen (1 – 2 µm dik) die opgebouwd zijn uit een aaneenschakeling van een zich herhalende structuur (sarcomeer). Een sarcomeer bestaat uit twee eiwitfilamenten: het actine-eiwit en het veel zwaardere myosine-eiwit. Deze zijn zo gerangschikt dat de actine-eiwitten tussen de myosine-eiwitten kunnen geschoven worden. In rust vindt reeds een gedeeltelijke overlapping plaats (zie figuur). De rustlengte van een sarcomeer bedraagt ongeveer 3 µm.



De contractie van een spier wordt veroorzaakt door de verkorting van de sarcomeren. Deze verkorting komt doordat het overlappende gedeelte tussen de actine- en myosine-filamenten groter is geworden (van a naar b in onderstaande figuur). Dit inschuifproces staat onder invloed van Ca^{2+} ionen en adenosinetrifosfaat (ATP). Hierdoor vormen de myosine-eiwitten dwarsverbindingen met de actinefilamenten die daardoor tussen de myosinefilamenten worden getrokken. Aldus wordt chemische energie omgezet in mechanische energie.



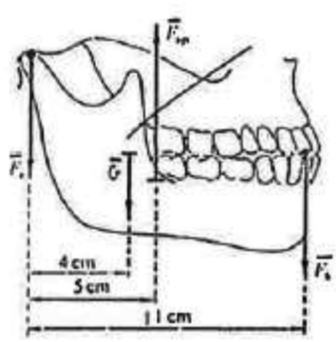
De reactiekrachten grijpen aan tussen de botten in het gewricht en zijn een resultante van de krachten die de botten op elkaar uitoefenen in het betrokken gewricht. De grootte en de richting van deze krachten zijn a priori niet gekend. De plaats van het draaipunt is te bepalen door anatomische analyse.

Voor het bepalen van de inwendige krachten zijn er verschillende oplossingsmethoden:

- Indien de werklijnen van alle krachten evenwijdig zijn past men het principe van het evenwijdig krachtensyteem toe;
- Indien de werklijnen van alle krachten niet evenwijdig zijn dan worden de krachten ontbonden in verticale en horizontale componenten of volgens de lichaamsdeel-assen.

7.3.1 Het bepalen van de spierkracht en de reactiekracht volgens het evenwijdige krachtensysteem

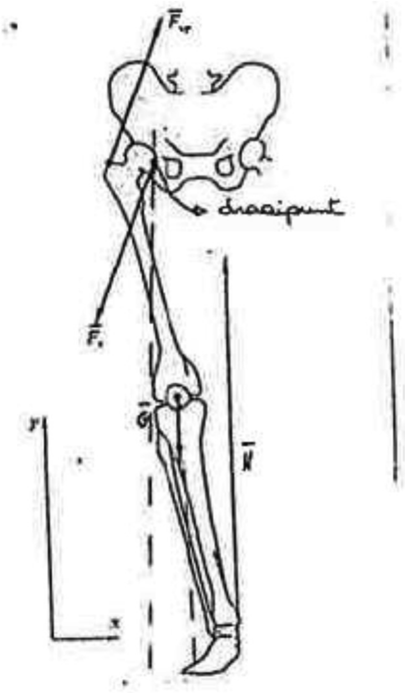
Principe: de krachtmomenten worden bepaald t.o.v. het draaipunt door de afstand te bepalen van de dragers van de krachten tot het draaipunt. Pas de evenwichtsvoorwaarden dan toe voor de componenten van de krachten en de momenten langs de as bepaald door de krachten.

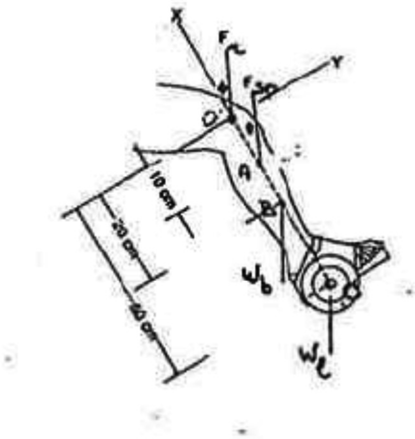


7.3.2 Het ontbinden van krachten in horizontale en verticale componenten

Principe: Hier kiest men meestal een horizontale x-as en een verticale y-as. Voor het bepalen van de grootte van de spierkracht gebruikt men de evenwichtsvoorwaarde voor de krachtmomenten t.o.v. het draaipunt.

De evenwichtsvoorwaarde voor de krachten in vectorvorm valt hier dan uiteen in twee vergelijkingen voor de x- en de y-componenten van de krachten die als resultaat de x- en de y-component van de reactiekracht in het draaipunt geven.





7.3.3 Het ontbinden van krachten langs assen horend bij een lichaamsdeel

Principe: men maakt gebruik van een assenstelsel dat bestaat uit de lengteas van het lichaamsdeel door het draaipunt, de longitudinale as, en de loodrechte op deze as. De ontbinding van de spierkracht in componenten volgens deze assen geeft de **stabiliserende** (volgens de longitudinale as) en de **roterende component**.

De stabiliserende component van de spierkracht heeft geen moment maar oefent alleen druk uit op het gewricht. Deze component houdt meestal het gewricht bijeen; hij heeft dus een stabiliserende invloed.

De roterende component van de spierkracht staat loodrecht op de verbindingslijn tussen het aangrijpingspunt en het draaipunt. Hij oefent dus een moment uit en is verantwoordelijk voor (of het tegengaan van) de rotatie. De verhouding van de roterende en de stabiliserende component hangt sterk af van de hoek die het beschouwde lichaamsdeel maakt met de rest van het lichaam in het draaipunt.

De principes van de statica worden toegepast in de biomechanica om de krachten te bepalen die meespelen in de verschillende spiergroepen en gewrichten voor verschillende posities van het menselijk lichaam of zijn onderdelen.

Een volledige analyse van de spierkrachten die vereist zijn om de verschillende houdingen mogelijk te maken is moeilijk omwille van de ingewikkelde schikking van de spieren in het menselijk lichaam en omwille van de beperkte informatie die men heeft. In het algemeen wordt de relatieve beweging van de lichaamsdelen rond een bepaald gewricht gecontroleerd door meer dan één spiergroep. Om een welbepaald probleem uit de biomechanica te kunnen herleiden tot een probleem dat statisch kan behandeld worden en dus de evenwichtsvergelijkingen te kunnen toepassen, wordt slechts die **spiergroep** in rekening gebracht die de **belangrijkste rol** speelt in de controle over het gewricht. Mogelijke bijdragen door andere spiergroepen tot het mechanisme van het gewricht dienen buiten beschouwing gelaten te worden.

Vandaar dat in de studie van de mechanica van de menselijke gewrichten de volgende veronderstellingen en beperkingen aangenomen worden:

- De anatomische assen voor rotatie van de gewrichten zijn gekend
- De plaats van de spieraanhechtingen is gekend
- De actielijn van de spankracht in de spier is gekend
- Gewichten van onderdelen met hun zwaartepunt zijn gekend
- Wrijvingsfactoren in de gewrichten worden verwaarloosd
- Enkel tweedimensionale problemen worden hier bestudeerd

7.4 Toepassingen van de statica in de biomechanica

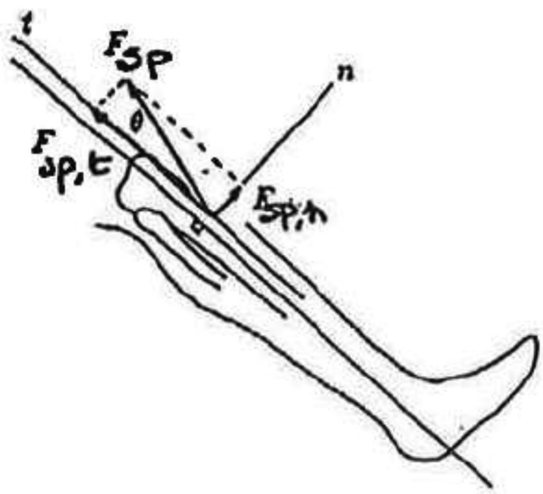
7.4.1 Invloed van de patella op de werking van de quadriceps

De patella of de knieschijf zorgt ervoor dat de kracht van de quadriceps van richting verandert. Dus werkt de patella in de eerste plaats als een katrol.

De tweede functie van de patella is het vergroten van de hoek waaronder de quadriceps met het bot gehecht is.

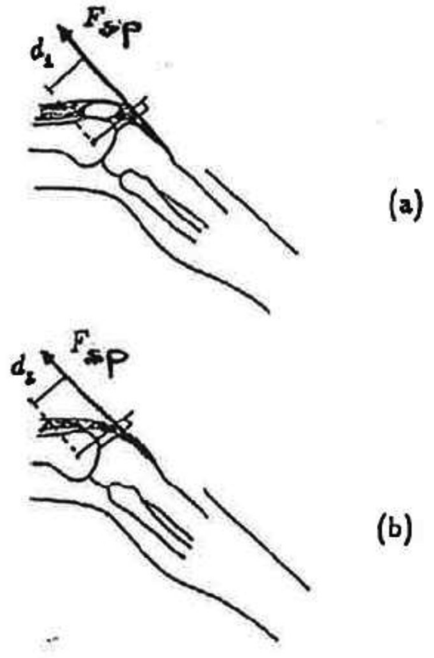
De kracht $\mathbf{F_{sp}}$ uitgeoefend door de quadriceps op de tibia via de patellapees kan uitgedrukt worden in termen van twee componenten: loodrecht en tangentiëel aan de lengteas van de tibia (zie figuur). De voornaamste functie van de normale component van de spierkracht is het roteren van de tibia rond het kniegewricht, terwijl de tangentiële component het onderbeen in een richting evenwijdig met de lengte as van de tibia tracht te brengen en aldus een samendrukkend effect veroorzaakt op het tibiofemoraal gewricht.

Aangezien de normale component de sinus van de hoek θ tussen de patella en de lengteas van de tibia bevat, duidt een grotere hoek op een groter draai- effect van de spier. Dus de functie van de patella is het vergroten van de hoek tussen de quadriceps en de tibia waardoor de roterende component van de spierkracht relatief groter wordt t.o.v. de stabiliserende component. M.a.w. een groter deel van de spierkracht wordt gebruikt voor het roteren van het onderbeen rond het kniegewricht en een kleiner deel oefent een drukkracht uit op het gewricht.



Eén van de belangrijkste biomechanische functies van de patella is het voorzien van een anterior verplaatsing van de quadriceps en het patella- ligament zodat de krachtarm van de strekspieren van de knie t.o.v. het draaipunt van de knie verlengd wordt door de hoek te vergroten (figuur).

Indien de patella verwijderd wordt gaat het patellaligament dichter bij het rotatiepunt van de knie liggen zodat de krachtarm van de spierkracht verkort. Daardoor moet de quadriceps een grotere kracht uitoefenen om het onderbeen te roteren rond het kniegewricht.

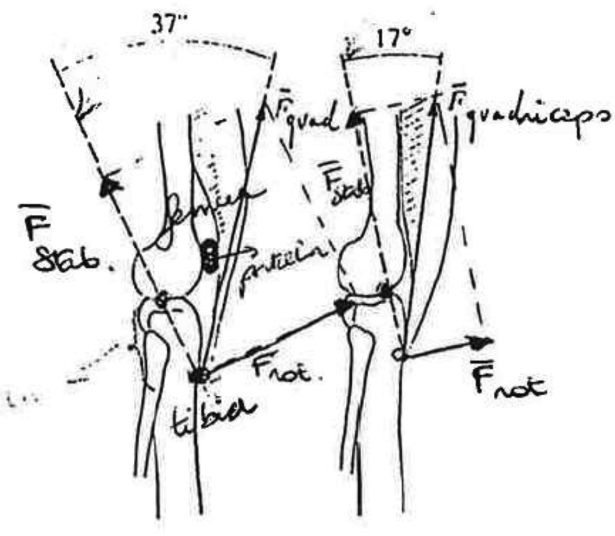


Voorbeeld:

Stel dat bij een strekoefening van de knie ten gevolge van een belasting van de voet met een gewicht een krachtmoment van 50 Nm nodig is. De afstand van de knie-as tot het aangrijpingspunt van de quadriceps bedraagt 6,25 cm.

Met een patella is de hoek tussen de spierkracht en de verbindingslijn draaipunt-aangrijpingspunt 37°, zonder patella wordt deze hoek 17°.

Bereken de grootte van de quadricepskracht en zijn stabiliserende component in beide situaties!



De roterende component van de spierkracht levert het krachtmoment (zie rotatie):

$$\tau = rF_{rot} \quad \Rightarrow \quad 50\ \text{Nm} = 0{,}0625F_{rot}$$
$$F_{rot} = 800\ \text{N}$$

Met patella:

$$F_{rot} = F_{sp} \sin 37° \quad \Rightarrow \quad F_{sp} = 1330\ \text{N}$$

De stabiliserende component wordt gegeven door:

$$F_{stab} = F_{sp} \cos 37° = 1130x0{,}799 = 1060\ \text{N}$$

Op het kniegewricht werkt dus een compressiecomponent van 1060 N.

Zonder patella:

$$F_{rot} = F_{sp} \sin 17° \quad \Rightarrow \quad F_{sp} = 2740\ \text{N}$$

De stabiliserende component wordt nu gegeven door:

$$F_{stab} = F_{sp} \cos 17° = 2740x0{,}956 = 2620\ \text{N}$$

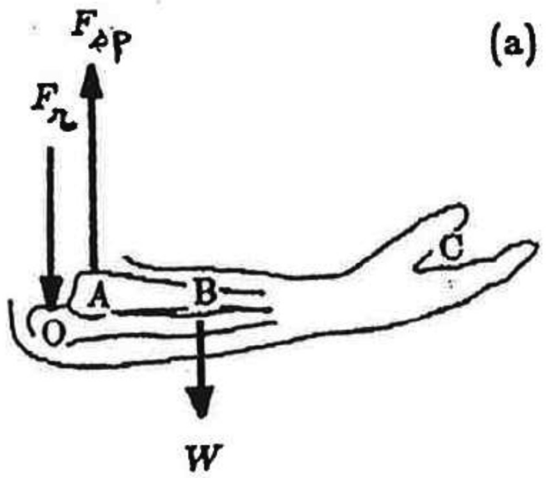
Op het kniegewricht werkt nu een compressiecomponent van 2620 N.

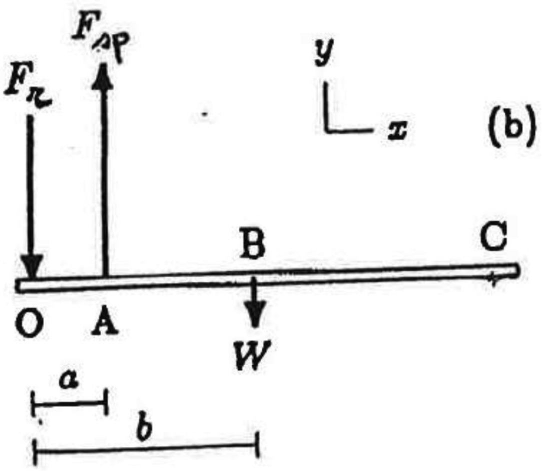
Hieruit blijkt dat de quadriceps bij afwezigheid van een patella een kracht moet leveren die ruim tweemaal zo groot is en de kracht die op het gewricht inwerkt is tweemaal en een half zo groot in vergelijking met het systeem met patella!

7.4.2 Voorbeeld van een evenwijdig krachtensysteem

Bereken zowel de kracht die de bicepsspier dient uit te oefenen om de voorarm in een horizontale positie te houden als de reactiekracht in het ellebooggewricht.

Onderstaande figuur geeft de krachten weer die inwerken op de voorarm en in figuur 61b wordt het krachtendiagram weergegeven.





Dit model veronderstelt dat de biceps de hoofdbuiger is en dat de werkingslijn van de kracht in de biceps verticaal is.

Het punt O duidt het draaipunt in het ellebooggewricht aan dat hier als vast ondersteld wordt voor de eenvoud. B is het zwaartepunt van de voorarm met **W** het totale gewicht van de voorarm. $\mathbf{F_{sp}}$ is de kracht uitgeoefend door de biceps op de radius en $\mathbf{F_r}$ is de reactiekracht in het gewricht.

Aangezien zowel de werkingslijn van $\mathbf{F_{sp}}$ en **W** verticaal zijn moet voor het evenwicht van de voorarm de werkingslijn van $\mathbf{F_r}$ ook verticaal zijn (parallel krachtensysteem).

Er zijn slechts twee onbekenden, nl. de grootten van $\mathbf{F_{sp}}$ en $\mathbf{F_r}$.

De translatie evenwichtsvoorwaarde in de y-richting geeft:

$$\sum F_y = 0 \quad \text{of} \quad F_r + F_{sp} - W = 0$$

$$F_r = -F_{sp} + W$$

De rotatie evenwichtsvoorwaarde rond het punt O (in het gewrichtscentrum, de onbekende kracht F_r heeft geen krachtmoment rond het punt O) geeft:

$$\sum \overline{\tau}_O = 0 \quad \text{of} \quad \overline{a} \otimes \overline{F}_{sp} + \overline{b} \otimes \overline{W} = 0$$

$$aF_{sp} - bW = 0$$

$$F_{sp} = \frac{b}{a} W$$

Stel dat a=4 cm, b=15 cm, W=20 N dan krijgt men :

$$F_{sp} = \frac{0,15}{0,04} 20 = 75 \ \text{N} \qquad \text{en} \qquad F_r = -75 + 20 = -55 \ \text{N}$$

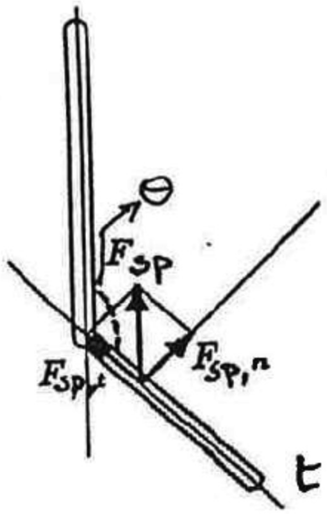
Hieruit blijkt dat de reactiekracht neerwaarts gericht is.

De bicepsspier dient dus een kracht van 75 N uit te oefenen opdat het krachtmoment in wijzerzin even groot zou zijn als dat in tegenwijzerzin.

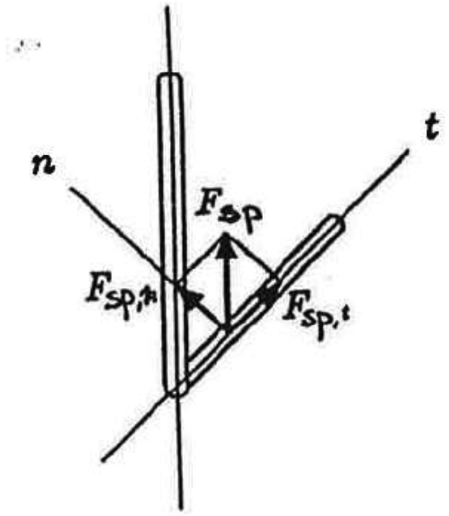
Opmerking:

De hoek tussen de actielijn van de spierkracht en de lengteas van de radius is een kritische parameter voor de werking van de spier. Als de onderarm onder een hoek van 90° met de verticale gehouden wordt heeft de spierkracht alleen een rotatie-effect op de voorarm ter hoogte van het elleboggewricht omdat de actielijn van de spierkracht een rechte hoek maakt met de lengte as van de voorarm. Voor de andere, niet horizontale houdingen van de voorarm heeft de spierkracht zowel een translatiecomponent (stabiliserende of ontwrichtende werking) als een rotatiecomponent.

In onderstaande figuur wordt de positie van de voorarm t.o.v. de bovenarm weergegeven voor verschillende standen. N is de normale richting op de lengteas van de voorarm terwijl t de tangentiële richting aangeeft. Indien de actielijn van de spierkracht evenwijdig blijft met de richting van de humerus dan kan de spierkracht in twee componenten opgesplitst worden: de $F_{sp,n}$ is de rotationele component daar haar eerste functie de rotatie van de voorarm rond het elleboggewricht is, terwijl $F_{sp,t}$ als tangentiële component een stabiliserend effect heeft en het gewricht samendrukt. Indien de hoek verhoogt naar 90° stijgt de grootte van de roterende component terwijl die van de stabiliserende daalt zodat er minder en minder energie "verbruikt" wordt om het elleboggewricht samen te drukken. Indien de hoek kleiner dan 90° wordt verandert het stabiliserend effect van de tangentiële krachtcomponent in een ontwrichtend effect.



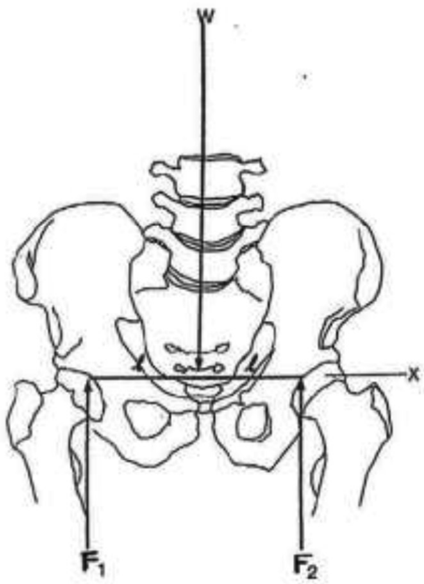
$\theta > 90°$
stabiliserende werking van $F_{sp,t}$



$\theta < 90°$
ontwrichtende werking van $F_{sp,t}$

7.4.3 Voorbeeld van het ontbinden in de krachten in horizontale en verticale componenten

Het bepalen van de reactiekracht in het heupgewricht voor een persoon met een gewicht van 890 N die rechtop staat en steunt op beide benen.



Het free body diagram in bovenstaande figuur bevat de zwaartekracht W, zijnde het gewicht van het lichaam met uitzondering van de onderste ledematen. Indien één been 15,6 % van het totale gewicht heeft, wordt W:

$$W = 0{,}688x890 = 612{,}3 \text{ N}$$

De afstand van elke heup, waarin de reactiekracht van het heupgewricht aangrijpt, tot het zwaartepunt van het bovenlichaam is 15 cm.

De evenwichtsvergelijking voor rotatie geeft (met het draaipunt in het linker heupgewricht):

$$\bar{1} \otimes \bar{W} + 2\bar{1} \otimes \bar{F}_2 = 0$$
$$-612{,}3x0{,}15 + F_2x0{,}30 = 0$$
$$F_2 = 306{,}15 \text{ N}$$

De reactiekracht in de rechterheup bedraagt dus 306,15 N en is opwaarts gericht. Om de reactiekracht F_1 in de linkerheup te vinden kan men op dezelfde wijze tewerk gaan als hierboven met de keuze van het draaipunt in het rechter heupgewricht of kan men de evenwichtsvergelijkingen voor translatie gebruiken. Aangezien alle krachten in de y-richting werken geldt er:

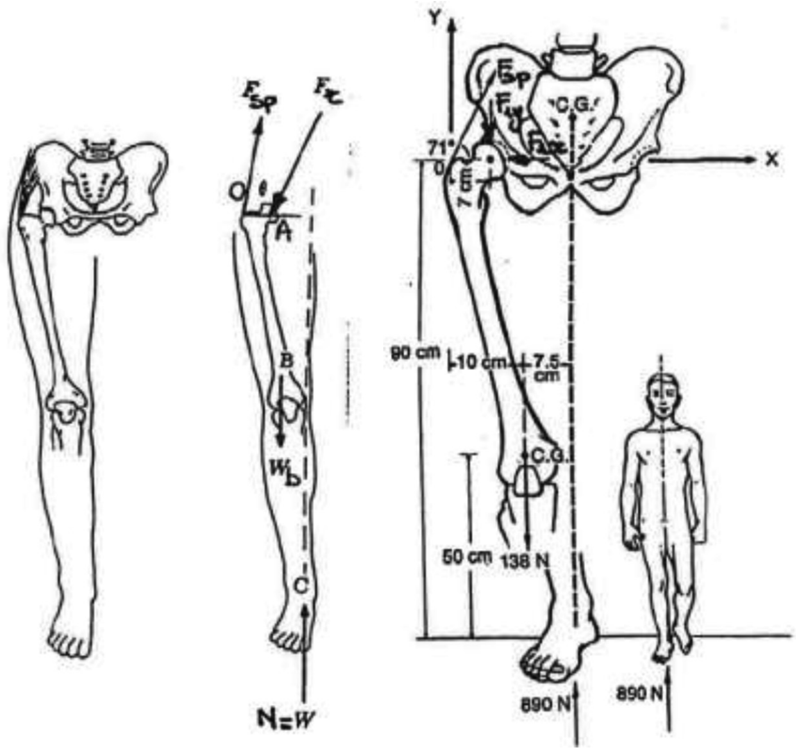
$$-W + F_1 + F_2 = 0$$
$$-612{,}3 + F_1 + 306{,}15 = 0$$
$$F_1 = 306{,}15 \text{ N}$$

Dus de reactiekracht in het linker heupgewricht is eveneens 306,15 N. Bij steunen op beide voeten wordt het gewicht van het lichaamsgedeelte boven de onderste ledematen gelijk verdeeld over de beide heupgewrichten.

Het bepalen van de reactiekracht in het heupgewricht voor een persoon met een gewicht van 890 N die steunt op het rechterbeen gebruik makend van een **free body diagram van het been.**

Wanneer een persoon steunt op één been verandert de situatie met het steunen op beide benen. Om in evenwicht te blijven dient het zwaartepunt verticaal boven het steunpunt gebracht te worden (Dit kan je zelf uitproberen door vanuit een ietwat gespreide stand naar steunen op één been over te gaan. Je voelt dan hoe je je zwaartepunt boven de steunvoet dient te brengen).

Om de krachten in het heupgewricht te bepalen moet een deelsysteem gekozen worden waarop de beschouwde krachten als uitwendige krachten inwerken. In onderstaande figuur is zo'n deelsysteem voorgesteld dat bestaat uit de voet, het onderbeen en het dijbeen. De verbinding met de rest van het lichaam gebeurt, voor zover het de krachten betreft die betrekking hebben op dit probleem, hoofdzakelijk door het heupgewricht en de abductiespieren van de heup.



In het free body diagram van bovenstaande figuur wordt aangegeven dat $\mathbf{F_{sp}}$ de resultante is van de krachten door de abductorspieren uitgeoefend. Zij maakt een hoek van 71°met de horizontale en grijpt aan in de trochanter major. De reactiekracht **N** van de grond op de steunvoet bedraagt 890 N en het gewicht van het steunbeen $\mathbf{W_b}$ grijpt aan in het massacentrum van been + voet en bedraagt 138 N. $\mathbf{F_r}$ stelt de kracht voor die door het heupbeen op de femur wordt uitgeoefend. Onafgezien van het aangrijpingspunt is van deze kracht a-priori niets geweten. Het draaipunt O wordt genomen in het aanhechtingspunt van de spiergroep.

De evenwichtsvergelijkingen geven:

$$\sum F_x = 0 \qquad \text{of} \qquad F_{sp} \cos 71° + F_{r,x} = 0 \qquad (1)$$

$$\sum F_y = 0 \qquad \text{of} \qquad F_{sp} \sin 71° + F_{r,y} - W_b + N = 0 \qquad (2)$$

$$\sum_0 \bar{\tau} = 0 \qquad \text{of} \qquad \overline{\mathrm{OA}} \otimes \overline{F}_r + \overline{OB} \otimes \overline{W}_b + \overline{OC} \otimes \overline{N} = 0$$

$$0{,}07 F_{r,y} - 0{,}10x138 + 0{,}175x890 = 0$$

$$\Rightarrow \quad F_{r,y} = -2027{,}8 \text{ N}$$

$$(2) \Rightarrow F_{sp} = 1350 \text{ N}$$

$$(1) \Rightarrow F_{r,x} = -439{,}5 \text{ N}$$

dus wordt $\mathrm{F_r} = \sqrt{F_{r,x}^2 + F_{r,y}^2} = 2075$ N met $\mathrm{tg}\theta = \dfrac{F_{r,y}}{F_{r,x}} = 4{,}61$ of $\theta = 78°$

De femurkop dient dus een kracht van 2075 N te dragen onder een hoek van 78° met de horizontale en neerwaarts gericht.

Dit voorbeeld kan uitgebreid worden indien de persoon een last met een massa van 30 kg draagt in de rechterhand bijvoorbeeld. Stel dat die last zich op 33 cm van het lichaamszwaartepunt van de persoon bevindt.

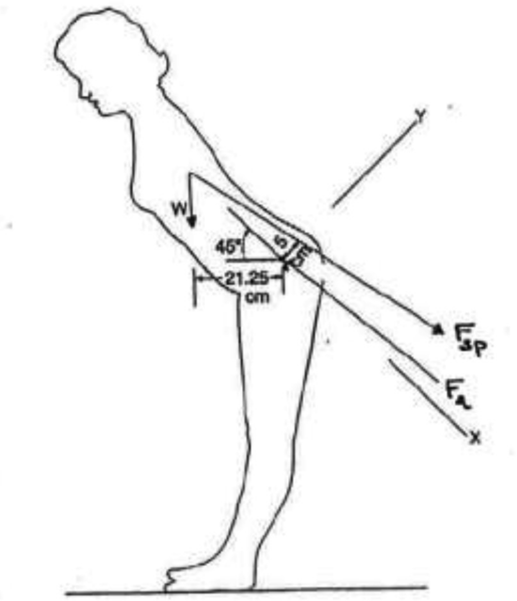
7.4.4 Voorbeeld van het ontbinden van de krachten langs assen horend bij een lichaamsdeel

Neem een persoon met een gewicht van 890 N die voorovergebogen staat zodat de romp een hoek van 45° maakt met de horizontale.

Welke kracht dienen de erector spinae uit te oefenen om de romp in die positie te houden? Hoeveel bedraagt de reactiekracht in het heupgewricht?

Van zodra de romp voorovergebogen wordt dienen de erector spinae spieren in werking te treden om de zwaartekracht tegen te werken. Hoe groter de voorwaartse buiging hoe groter de spierkracht.

Onderstaande figuur geeft de krachten weer voor een buiging van de romp van 45° met de verticale richting. De x-as wordt evenwijdig gekozen met de wervelkolom waardoor de hoek tussen de spierkracht $\mathbf{F_{sp}}$ en de x-as 8° bedraagt. De overige parameters zijn op de figuur aangeduid.



Bij keuze van het draaipunt in het gewrichtspunt wordt de evenwichtsvoorwaarde voor rotatie:

$$\sum \bar{\tau}_O = 0: \quad \overline{OA} \otimes \overline{W}_{HAR} + \overline{OB} \otimes \overline{F}_{sp} = 0$$

$$0{,}2125x0{,}60x890 - 0{,}05F_{sp} = 0$$

$$F_{sp} = 2269 \text{ N}$$

De compressiekrachtcomponent van de reactiekracht wordt:

$$\sum F_x = 0: \quad W_{HAR} \sin 45° + F_{sp} \cos 8° + F_{r,x} = 0$$

$$F_{r,x} = -0{,}60x890 \sin 45° - 2269 \cos 8° = -2624{,}5 \text{ N}$$

De schuifkrachtcomponent wordt:

$$\sum F_y = 0: \quad -W_{HAR} \cos 45° + F_{sp} \sin 8° + F_{r,y} = 0$$

$$F_{r,y} = 0{,}60x890 \cos 45° - 2269 \sin 8° = 61{,}8 \text{ N}$$

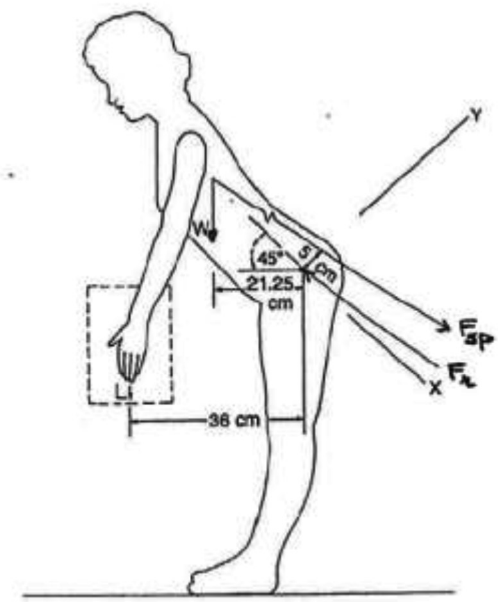
De grootte en de richting van de reactiekracht in het gewricht worden dan:

$$F_r = \sqrt{F_{r,x}^2 + F_{r,y}^2} = 2625\text{ N}$$

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{F_{r,y}}{F_{r,x}} \quad \Rightarrow \quad \phi = 1{,}3°$$

De reactiekracht in het gewricht wijst dus links opwaarts gericht.

Indien de persoon nu een last draagt zoals op onderstaande figuur aangeduid, dan zal de grootte van de krachten verhogen. Stel dat die last een gewicht van 250 N heeft bereken dan de reactiekracht in het gewricht.



Het draaipunt wordt opnieuw in het centrum van het gewricht gekozen en de keuze van het xy-assenstelsel blijft behouden zoals in het voorgaande voorbeeld.

De evenwichtsvoorwaarde voor rotatie levert dan de spierkracht van de erector spinae op:

$$\sum \bar{\tau}_0 = 0: \quad \overline{\mathrm{OA}} \otimes \overline{\mathrm{W}}_{\mathrm{HAR}} + \overline{OB} \otimes \overline{F}_{sp} + \overline{OC} \otimes \overline{W}_l = 0$$

$$0{,}2125\text{x}0{,}60\text{x}890 - 0{,}05F_{sp} + 0{,}36x250 = 0$$

$$F_{sp} = 4069{,}5\text{ N}$$

De spierkracht om een gewicht van 250 N op te heffen vergeleken met de situatie als geen gewicht opgetild wordt is dus sterk toegenomen. Die spierkracht wordt sterk beïnvloed door de momentarm van de zwaartekracht van hoofd-arm-romp W_{HAR} en de momentarm van de zwaartekracht van het opgetilde gewicht. De spierkracht van de erector spinae neemt sterk af naarmate het gewicht zich dichter bij het lichaam bevindt en naarmate de rug minder gekromd is.

De compressiekrachtcomponent van de reactiekracht op het lumbosacraalgewricht wordt:

$$\sum F_x = 0: \quad W_{HAR} \sin 45° + F_{sp} \cos 8° + F_{r,x} + W \sin 45° = 0$$

$$F_{r,x} = -0{,}60x890x \sin 45° - 4069{,}5 \cos 8° - 250 \sin 45° = -4584{,}3 \text{ N}$$

De schuifkrachtcomponent van de reactiekracht wordt:

$$\sum F_y = 0: \quad -W_{HAR} \cos 45° + F_{sp} \sin 8° + F_{r,y} - W \cos 45° = 0$$

$$F_{r,y} = 0{,}60x890x \cos 45° - 4069{,}5 \sin 8° + 250 \cos 45° = -11{,}99 \text{ N}$$

De grootte en de richting van de reactiekracht in het gewricht worden dan:

$$F_r = \sqrt{F_{r,x}^2 + F_{r,y}^2} = 4584 \text{ N}$$

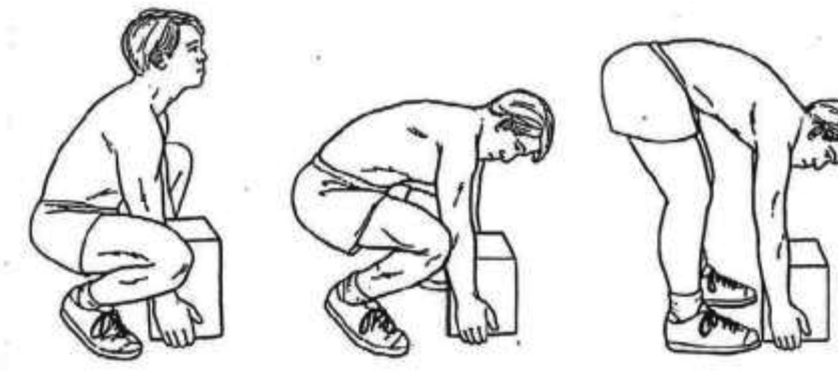
$$tg\phi = \frac{F_{r,y}}{F_{r,x}} \quad \Rightarrow \quad \phi = 0{,}15°$$

De reactiekracht in het gewricht van 4584 N werkt voor het grootste deel langs de negatieve x-as en veroorzaakt een grote compressie op het lumbosacraal gewricht.

<u>Opmerking</u>

Eén van de belangrijkste oorzaken in het ontstaan van lage rugpijn is waarschijnlijk een foutief gebruik van de rug. Dagelijkse activiteiten zoals tillen, heffen en langdurig zitten op een slechte stoel of een verkeerde lighouding zullen een oorzaak vormen voor rugpijn.

Lage rugpijn als resultaat van het optillen van lasten is in de eerste plaats een gevolg van de grootte van de getilde last en de afstand van de last tot het zwaartepunt van het lichaam van de persoon. Een correcte tiltechniek vereist een opgeheven hoofd, een licht gebogen rug, gebogen knieën en **<u>vooral</u>** het gewicht dicht bij het lichaam houden (zie figuur). Zo wordt de belasting op de onderrug geminimaliseerd. De techniek van de gebogen benen is niet beter dan de techniek van de gebogen rug (zie C) indien het gewicht ver van het lichaam gehouden wordt.



A. Correcte techniek B. Beentechniek C. Rugtechniek