



VERSUS

**ONLINE
TIJDSCHRIFT
VOOR
FYSIOTHERAPIE**

2010

Auteur(s): H. Faber
Titel: Eerlijk delen
Jaargang: 28
Maand: maart
Jaartal: 2010

Deze online uitgave mag, onder duidelijke bronvermelding, vrij gebruikt worden voor (para-) medische, informatieve en educatieve doeleinden en ander niet-commercieel gebruik.

Zonder kosten te downloaden van: www.versus.nl

Eerlijk delen?

Herre Faber

drs. Herre Faber

Vakgroep Wiskunde & (Bio)Mechanica, Opleiding Bewegingstechnologie, Lectoraat Leefstijlverandering bij Jongeren, Haagse Hogeschool, Den Haag

Inleiding

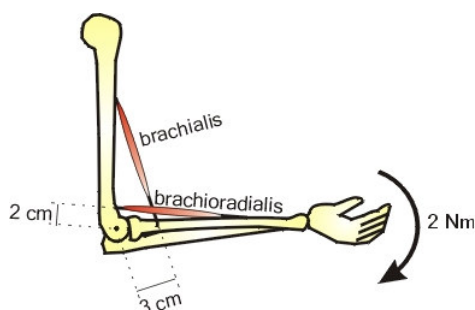
Stel, u hangt aan twee handen boven een diep ravijn. Het vooruitzicht van een enkele reis richting het dal staat u waarschijnlijk niet aan. U zult daarom alles in het werk stellen om zo lang mogelijk van uw leven te “genieten”. Een cruciale factor daarbij is hoe u uw gewicht verdeelt over uw twee armen. Als u aan één arm hangt, houdt u het niet zo lang vol, terwijl het gewicht gelijk verdelen over de twee armen de beste overlevingskansen biedt. Tot zover zal er geen verschil van mening bestaan. Maar nu hangt Roger Federer boven het ravijn. Dit is een toptennisser die urenlang achter elkaar zijn slagarm oefent. Hij zal qua spierkracht een behoorlijk links-rechts verschil hebben. Is het voor hem een goed idee om zijn lichaamsgewicht gelijk te verdelen over beide armen? Nee, stel dat zijn rechter arm bij een maximale contractie twee keer zoveel kracht kan leveren als zijn linker. Dan is het verstandiger om zijn rechter arm ook twee keer zo zwaar te belasten als zijn linker boven het ravijn. Hij zal het dan langer volhouden.

Er is dus sprake van een “verdeelp probleem” tussen de twee armen, dat opgelost wordt door de sterkste ook de zwaarste last te laten dragen. Dit is enigszins vergelijkbaar met ons belastingstelsel. De rijken betalen zowel absoluut als relatief gezien meer belasting dan de minder draagkrachtigen.

Binnen één arm bestaat ook een verdeelp probleem. Wij bezitten vier flectoren van de elleboog: de m. biceps, m. brachialis, m. pronator teres en de m. brachioradialis. Stel dat iemand staat met een gebogen elleboog. Er is sprake van een statische situatie (de arm beweegt niet). In principe kan deze persoon allerlei combinaties van spierkrachten kiezen om zijn onderarm stil te houden. Met andere woorden: het totaal benodigde moment rond de elleboog kan op vele verschillende manieren worden verdeeld over de drie spieren. De last kan bijvoorbeeld gelijk worden verdeeld over de vier spieren, maar er kan in principe ook voor andere verdelingen worden gekozen. De mechanica schrijft geen specifieke verdeling dwingend voor. Dus welke verdeling kiest het zenuwstelsel? In de literatuur wordt dit aangeduid met het “onbepaaldheid probleem”. Bewegingswetenschappers hebben verschillende strategieën bedacht om dit probleem op te lossen. In dit artikel worden deze besproken en kritisch beschouwd.

Het onbepaaldheid probleem en optimalisaties

Het onbepaaldheid probleem kenmerkt zich door een gebrek aan informatie. In figuur 1 wordt dit met een voorbeeld schematisch weergegeven.



Figuur 1. De onderarm wordt in evenwicht gehouden door het samenspel van twee spieren. De verhouding waarin deze twee spieren zullen aanspannen wordt niet gedicteerd door de mechanica.

De bovenarm staat vast en het evenwicht van de onderarm, voor wat betreft rotatie, wordt beschouwd. Er werken in dit voorbeeld drie krachten op de onderarm: de zwaartekracht levert een strekkend moment van 2 Nm. De m. brachialis en m. brachioradialis leveren beiden een buigend moment. De m. biceps en m. pronator teres zijn voor de eenvoud weggelaten. De momentarmen van beide spieren zijn respectievelijk 3 en 2 cm. Aangezien de onderarm in evenwicht is, geldt dat de momenten op de onderarm in evenwicht zijn. Dit wordt vastgelegd met de volgende momentenvergelijking:

$$0.03F_{bc} + 0.02F_{br} = 2$$

waarbij:

F_{bc} : kracht van de m. brachialis

F_{br} : kracht van de m. brachioradialis

De momentsarmen zijn in meters uitgedrukt. Links staan de momenten van de spierkrachten en rechts het moment van de zwaartekracht op de onderarm.

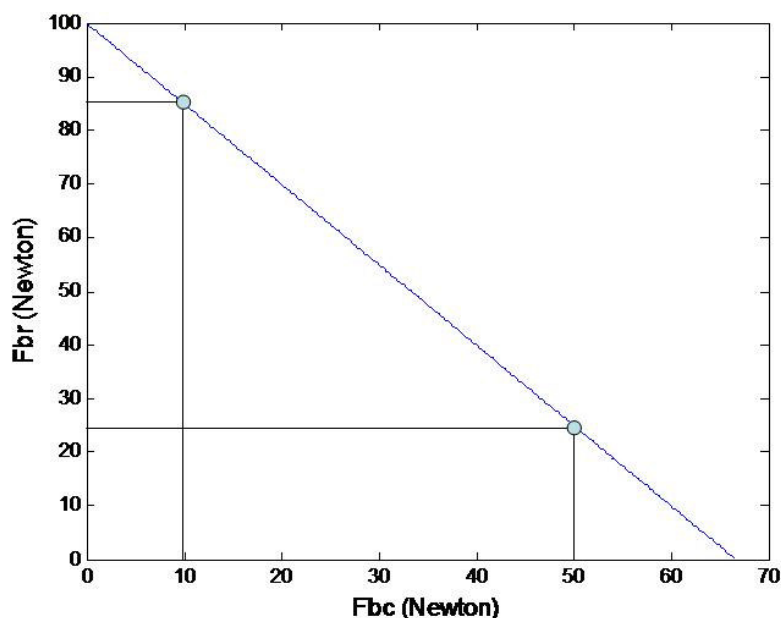
Dit is één vergelijking met twee onbekenden: de spierkrachten van de m. brachialis en m. brachioradialis. Dit is wat wordt bedoeld met een gebrek aan informatie. Er zijn meer vergelijkingen dan onbekenden. Een mogelijke oplossing is de volgende: $F_{bc} = 50$ en $F_{br} = 25$. We kunnen controleren of dit inderdaad een goede oplossing is door de getallen in te vullen en uit te werken:

$$0.03 \cdot 50 + 0.02 \cdot 25 = 2$$

$$1.5 + 0.5 = 2$$

$$2 = 2$$

Aangezien aan beide kanten van het "="-teken hetzelfde getal staat, is de conclusie dat $F_{bc} = 50$ gecombineerd met $F_{br} = 25$ een goede oplossing is. Echter, dit is geen unieke oplossing! De combinatie $F_{bc} = 10$ en $F_{br} = 85$ kan ook. Zo zijn er heel veel combinaties van oplossingen. Het zenuwstelsel zal dus moeten kiezen uit deze set van oplossing. In figuur 2 zijn alle combinaties van F_{bc} en F_{br} in een grafiek weergegeven. De schuine lijn van linksboven naar rechtsonder representeert de verzameling van alle oplossingen. Tevens zijn de twee combinaties (50,25) en (10,85) extra benadrukt. De lijn loopt niet verder door naar beneden. Dit zou namelijk betekenen dat de m. brachioradialis negatieve (duw)krachten zou leveren, wat fysiologisch niet mogelijk is.



Figuur 2.

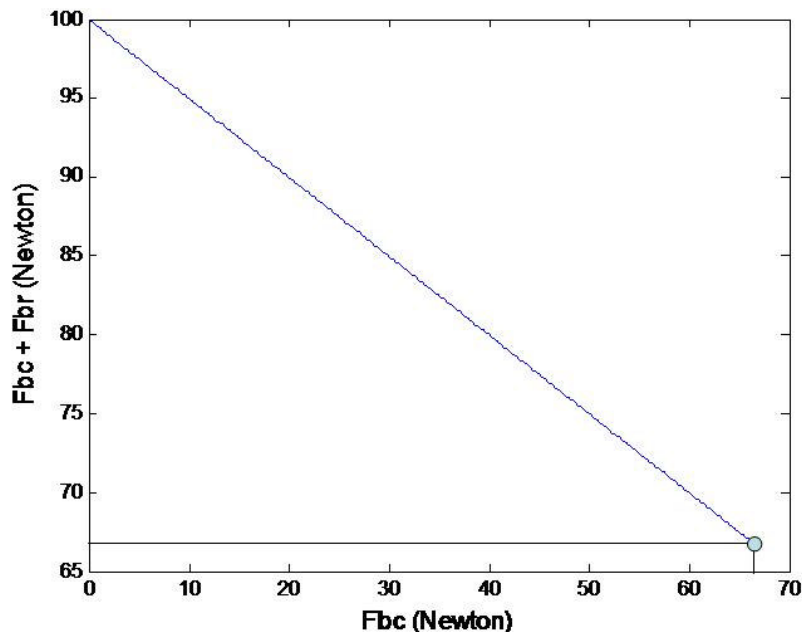
Alle mogelijke combinaties van spierkrachten, geleverd door de m. brachialis (horizontale as) en de m. brachioradialis (verticale as). Twee combinaties zijn apart aangegeven: (10,85) en (50,25).

De vraag dient zich nu aan: welke combinatie is de beste? Welke combinatie moet het zenuwstelsel kiezen? Er zijn twee manieren om dit op te lossen. De eerste is het toevoegen van extra informatie, een extra vergelijking. Bijvoorbeeld een eis als: de m. brachialis levert twee keer zoveel kracht als de m. brachioradialis. Dit wordt vertaald in de vergelijking:

$$F_{bc} = 2F_{br}$$

Nu zijn er twee vergelijkingen met nog steeds twee onbekenden. Dit leidt tot één unieke oplossing. Deze is benadrukt weergegeven in figuur 2: $F_{bc} = 50$ en $F_{br} = 25$. Wat betreft de fysiologische basis van deze tweede vergelijking zouden we kunnen argumenteren dat de m. brachialis twee keer zo dik is als de m. brachioradialis (dat nemen we dan in dit voorbeeld aan) en daarom levert de m. brachialis ook twee keer zoveel kracht. Helaas stuit dit op problemen zodra er meer dan één gewricht in de beschouwing wordt betrokken.

Onder andere daarom gebruikt men in de bewegingswetenschappen ander methodes: optimalisatiemethodes. Bij een dergelijke methode wordt er vanuit gegaan dat het zenuwstelsel iets maximaliseert of minimaliseert. Een voorbeeld is: minimaliseer de totale hoeveelheid kracht die alle spieren samen leveren. Een argument hiervoor is dat, als de spiervezellengtes van de betrokken spieren onderling niet teveel verschillen, de totale hoeveelheid geactiveerde spiermassa in een statische situatie dan minimaal is. Daarom zal het totale energieverbruik ook minimaal zijn en dat is een belangrijke factor voor natuurlijke selectie. Dit criterium wordt zichtbaar gemaakt in figuur 3. Op de horizontale as wordt weer F_{bc} uitgezet. Op de verticale as staat nu niet F_{br} , maar $F_{br} + F_{bc}$ (de totale spierkracht).



Figuur 3.

De optelsom van beide spierkrachten (verticale as) als functie van de kracht van de m. brachialis (horizontale as). Het minimum bevindt zich bij een kracht van de m. brachialis van 67 N..

De scheve lijn van linksboven naar rechtsonder toont de relatie tussen enerzijds F_{bc} en anderzijds $F_{bc} + F_{br}$. Bij een waarde nul voor F_{bc} is de totale kracht volgens deze figuur gelijk aan 100. Deze wordt dan geheel door de m. brachioradialis geleverd. Als F_{bc} gelijk is aan 67 is de totale kracht ook 67 (aangegeven door de stip rechtsonder). Uit figuur 2 blijkt dat dit de combinatie $F_{bc} = 67$ en $F_{br} = 0$ is. Het ging erom de totale spierkracht te minimaliseren. Dat blijkt het geval te zijn bij de laatst genoemde combinatie: $F_{bc} = 67$ en $F_{br} = 0$. Het feit dat de m. brachialis alles alleen moet doen, wordt veroorzaakt doordat hij een grotere momentsarm heeft dan de m. brachioradialis en er daarom gunstiger voor ligt. Hij kan met minder spierkracht hetzelfde moment genereren en is dus goedkoper in het gebruik. Deze strategie heeft overigens automatisch tot gevolg dat ook het aantal deelnemende spieren wordt geminimaliseerd.

De uitwendige belasting kan zo groot worden dat de m. brachioradialis het niet meer aankan. Stel bijvoorbeeld dat de m. brachialis niet zo ontwikkeld is en maximaal maar 50 N kan leveren. Het maxima-

le moment van deze spier bedraagt dan $50 \cdot 0.03 = 1.5$ Nm. Aangezien 2 Nm was vereist, zal het zenuwstelsel het resterende moment door de m. brachioradialis laten opbrengen. De kracht van deze spier bedraagt dan 25 N. Immers $25 \cdot 0.02 = 0.5$ Nm, precies genoeg om het tekort aan te vullen. In dat geval worden dus beide spieren aangespannen, waarbij de m. brachialis het het zwaarst te verduren krijgt.

Is hiermee het probleem opgelost? Waarschijnlijk voelt u een innerlijk verzet opkomen bij de gedachte dat de m. brachialis bijna alles alleen op moet knappen. "Dat is niet eerlijk", zult u denken. Ook in het licht van de man boven het ravijn lijkt een dergelijke strategie niet bij te dragen aan de overlevingskansen. Als één spier alles moet doen, is hij snel moe en moet hij het eerder opgeven dan als de last eerlijker verdeeld was geweest. Tenzij het zenuwstelsel op het moment van opgeven overschakelt op de uitgeruste spier kan de houding niet langer worden gehandhaafd. Een dergelijke duidelijke overschakelstrategie is bij mijn weten nooit gerapporteerd in de literatuur en lijkt ook onwaarschijnlijk.

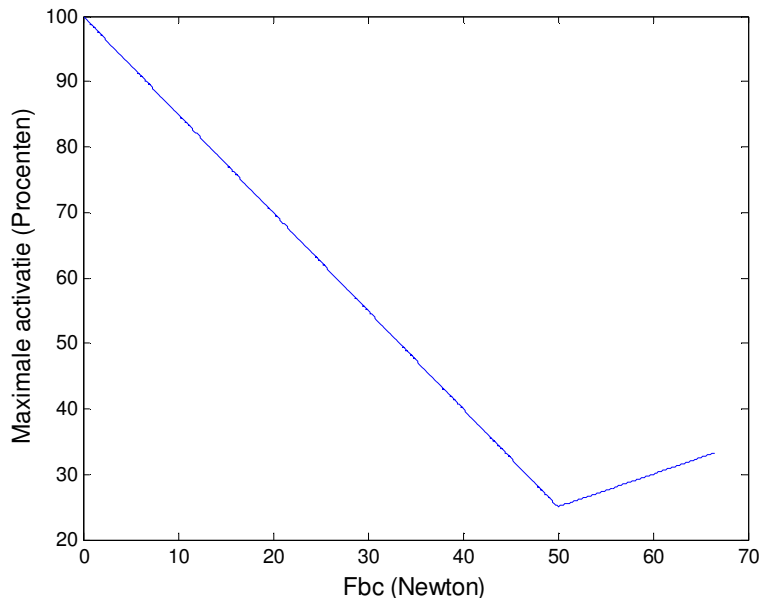
Daarom is het verstandig ook andere strategieën te onderzoeken. Een voor de hand liggende is het *minimaliseren van de hoogste spierspanning*. Dit komt in een statische situatie overeen met het *minimaliseren van de hoogste spieractivatie*. Bij wijze van voorbeeld stellen we de maximaal te leveren kracht van de m. brachialis op 200 N en van de m. brachioradialis op 100 N. In figuur 1 werden twee mogelijke oplossingen getoond:

- 1) $F_{bc} = 10$ en $F_{br} = 85$
- 2) $F_{bc} = 50$ en $F_{br} = 25$

Ad 1) De activatie van de m. brachialis is de geleverde kracht gedeeld door de maximaal mogelijke kracht: $10/200 = 0.05$ (= 5 %). De activatie van de m. brachioradialis bedraagt $85/100 = 0.85$ (= 85 %).

Ad 2) De activatie van de m. brachialis is $50/200 = 0.25$ (= 25 %) en de activatie van de m. brachioradialis bedraagt $25/100 = 0.25$ (= 25 %).

In de eerste situatie bedraagt de hoogste activatie 85 %, in de tweede 25 %. In de tweede situatie is duidelijk sprake van een eerlijker verdeling en daarom kan de houding het langst worden volgehouden. In figuur 4 staat op de horizontale as weer F_{bc} . Op de verticale as wordt de maximale activatie van de twee spieren uitgezet.



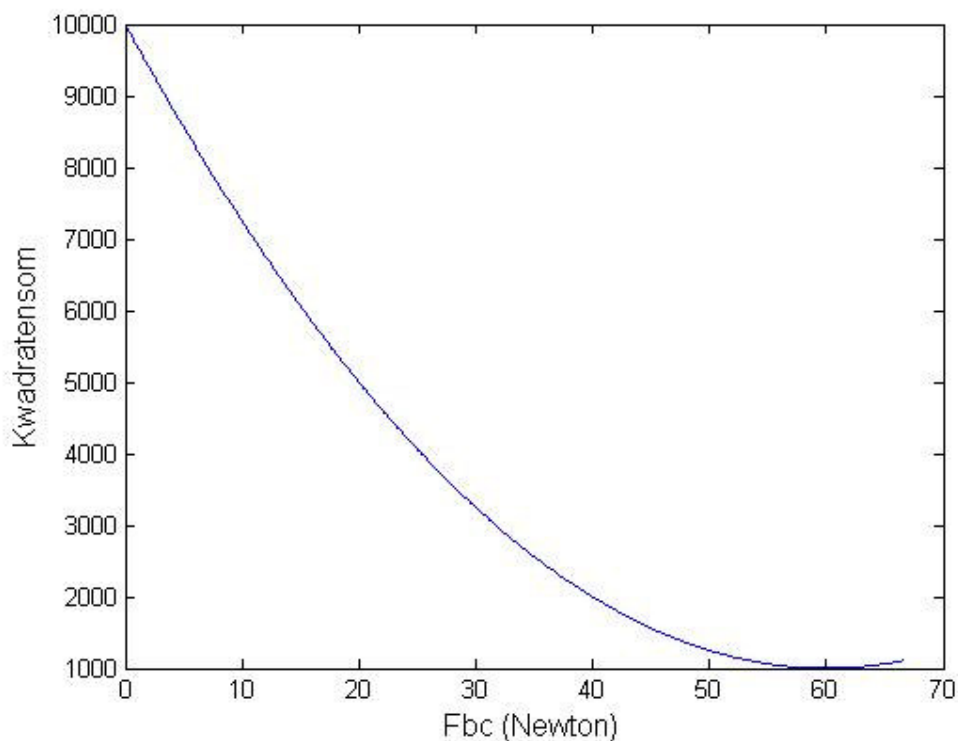
Figuur 4. Horizontale as: kracht van de m. brachialis. Verticale as: hoogste activatie van de m. brachialis en m. brachioradialis. Er bevindt zich een minimum bij een kracht van 50 N van de m. brachialis.

Het is duidelijk dat bij een kracht van 50 N van de m. brachialis de maximale activatie minimaal is. De bijbehorende kracht van de m. brachioradialis wordt vervolgens opgezocht met behulp van figuur 2 en blijkt 25 N.

Is hiermee het probleem dan opgelost? Helaas niet. Een optimalisatiecriterium voorspelt bij een bepaalde stand of beweging voor iedere betrokken spier een bepaalde spieractivatie. Er zijn veel onderzoeken verricht met behulp van electromyografie (EMG) waarbij is gecontroleerd of de voorspelde activatie ook daadwerkelijk wordt gemeten. Alhoewel er veel op EMG is af te dingen, lijken we er toch niet onderuit te komen dat er een beter optimalisatiecriterium bestaat. Beter in de zin dat de voorspellingen van dit criterium beter overeen komen met de EMG metingen en daardoor vrij algemeen is geaccepteerd in de literatuur⁽⁶⁾. Het luidt als volgt: *minimaliseer de kwadratensom van de spieractivaties*.

Een tweetal voorbeelden laten zien wat een kwadratensom is. Eén van de mogelijke oplossingen was: $F_{bc} = 10$ en $F_{br} = 85$. De respectievelijke activaties bij deze situatie zijn al eerder berekend (in procenten): 5 en 85. De kwadraten van 5 en 85 bedragen 25 en 7225. De kwadratensom is nu de optelling hiervan: $25 + 7225 = 7250$. Een andere oplossing was $F_{bc} = 50$ en $F_{br} = 25$ met activaties 25% en 25%. De kwadratensom hiervan bedraagt $25^2 + 25^2 = 625 + 625 = 1250$.

Volgens dit optimalisatiecriterium is de tweede situatie beter dan de eerste, immers 1250 is kleiner dan 7250. Maar welke van alle oplossingen geeft de allerkleinste kwadratensom? Dit wordt in figuur 5 getoond. Wederom staat op de horizontale as F_{bc} uitgezet. De bijbehorende kwadratensom wordt langs de verticale as getoond.



Figuur 5. Horizontale as: kracht van de m. brachialis. Verticale as: kwadratensom van de procentuele activaties. Er is een minimum bij $F_{bc} = 60$.

Het minimum bevindt zich bij 60 N voor de kracht van de m. brachialis. Figuur 2 laat zien dat de bijbehorende waarde voor de m. brachioradialis 10 N bedraagt. De activaties van de m. brachialis en m. brachioradialis zijn nu respectievelijk $100\% \cdot 60/200 = 30\%$ en $100\% \cdot 10/100 = 10\%$. Dit optimalisatiecriterium heeft de eigenschap dat spieren met grote momentsarmen en/of grote fysiologische doorsneden relatief meer worden geactiveerd dan spieren met kleine momentsarmen en/of fysiologische doorsneden. Het eerste optimalisatiecriterium (*minimaliseer de totale spierkracht*) deed dit ook maar dan veel extremer.

Het minimaliseren van de kwadratensom heeft geen enkele fysiologische of neuronale basis. Het lijkt er sterk op dat deze vorm van minimaliseren is geleend van andere toepassingen. Het is een wiskundig gereedschap dat al klaar lag en zijn nut in andere disciplines had bewezen, waardoor Crowning-shield en Brand⁽⁴⁾ het idee opvatten om het voor het onbepaaldheidsprobleem toe te passen. In hun originele artikel is hun motivatie dat hierdoor de volhoudtijd van een stand of beweging wordt gemaximaliseerd. Zoals eerder betoogd is dit niet waar. Om dit te bereiken moet de maximale activatie worden geminimaliseerd en dit geeft een duidelijk andere uitkomst (vergelijk figuur 4 en 5). Het is daarom des te verbazingwekkender dat juist dit optimalisatiecriterium betere voorspellingen lijkt te genereren dan de twee besproken criteria die wél een fysiologische basis bezitten.

Een mogelijke oplossing

Iemand wiens zenuwstelsel kiest voor minimalisatie van de totale spierkracht is in het nadeel in situaties waarbij behoorlijke belastingen langere tijd moeten worden volgehouden. Door de oneerlijke verdeling van spierspanningen verbruikt hij in zijn totaliteit weliswaar weinig energie, maar kan hij het ook minder lang volhouden. Het minimaliseren van de maximale spierspanning is dan een betere keus. In een dergelijke noodsituatie is minimaal totaal energieverbruik irrelevant om te overleven. Aan de andere kant bestaat het leven niet louter uit noodsituaties. Er moet ook vaak langdurige arbeid op een minder hoog niveau worden verricht, bijvoorbeeld in de zoektocht naar voedsel. Minimaal energieverbruik is dan wel een belangrijke factor. Bij een relatief laag inspanningsniveau is er weinig gevaar voor lokale spierversmoeidheid en houdt die ene gunstig gelegen spier het toch wel lang genoeg vol.

Het ligt daarom wellicht voor de hand dat de optimale strategie juist het midden houdt tussen deze twee. Figuur 4 (minimalisatie van maximum spierspanning) liet een optimum zien bij $F_{bc} = 50$ N. Figuur 3 (minimalisatie van totale spierkracht) liet een optimum zien bij $F_{bc} = 67$ N. Wat ligt daar ongeveer tussenin? Juist, het minimum van de kwadratensom zoals getoond in figuur 5 ($F_{bc} = 50$ N). Als dit als argument naar voren werd geschoven, zou men het gebruik van dit optimalisatiecriterium beter legitimeren dan door alleen te verwijzen naar een goede overeenkomst tussen voorspelling en EMG-metingen.

Om dit idee verder te exploreren en het wat realistischer te maken wordt niet alleen de flexie-extensie, maar ook de pro/supinatie in het volgende voorbeeld betrokken. Iemand staat met een 90 graden gebogen elleboog en een gewicht in zijn hand. Het gewicht is aan de mediale zijde zwaarder dan aan de laterale zijde. De proefpersoon moet dus een flecterend en een supinerend moment rond de elleboog leveren, respectievelijk 10 en 3 Nm. Van deze situatie wordt een mechanisch model gemaakt. De momentsarmen van de betrokken spieren voor flexie, supinatie en pronatie staan in figuur 6 weergegeven. Tevens staan de in het model gebruikte fysiologische doorsneden genoemd.

Spier	Momentsarm flexie (cm)	Momentsarm supinatie (cm)	Momentsarm pronatie (cm)	Fysiologische doorsnede (cm ²)
<i>Brachialis</i>	3	0	0	8
<i>Brachioradialis</i>	2,5	0	0	5
<i>Biceps</i>	4	2	0	10
<i>Pronator teres</i>	2	0	2,5	6
<i>Pronator quadratus</i>	0	0	3	5
<i>Supinator</i>	0	2,5	0	7

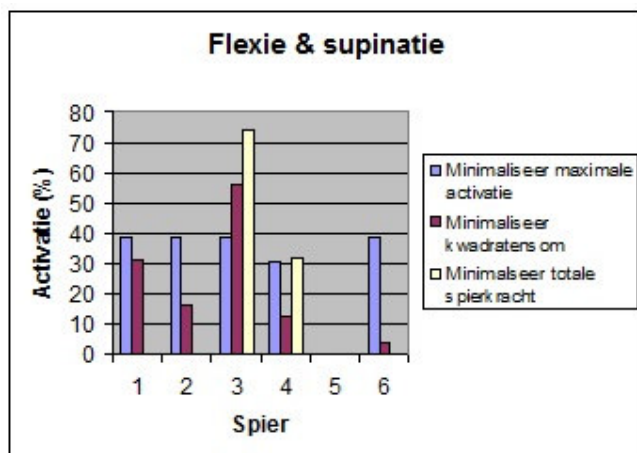
Figuur 6.

Momentsarmen en fysiologische doorsneden van de betrokken spieren. Voor de maximaal mogelijke spanning in spierweefsel is 30 N/cm² gekozen. Er is geen moeite gedaan om realistische momentsarmen en fysiologische doorsneden in de literatuur te zoeken. Dit zou het te onderzoeken principe niet veranderen.

De drie genoemde optimalisatiecriteria zijn uitgevoerd op basis van deze gegevens.

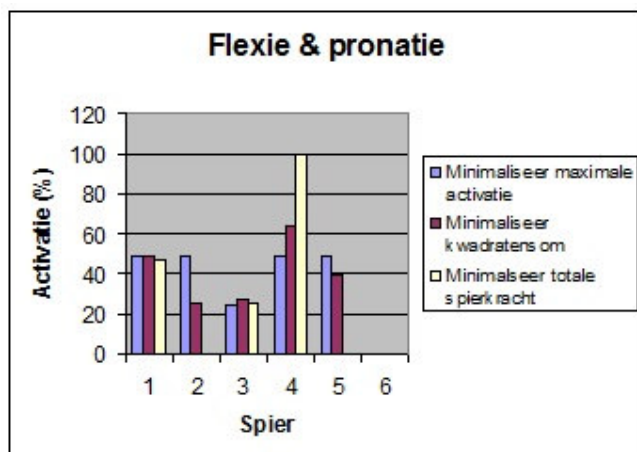
Voor de liefhebbers. Het minimaliseren van de kwadraten-som is gedaan door alle mogelijke combinaties van spieren te proberen en voor iedere combinatie met behulp van een pseudoinverse matrix het minimum van de kwadraten-som van de spieractivaties te berekenen⁽¹⁾. Van alle combinaties die geen negatieve spierkrachten gaven werd de kleinste kwadraten-som geselecteerd. Het minimaliseren van de maximale activatie en de totale spierkracht werd uitgevoerd met de lineaire programmeertechniek van Dantzig^(2,3,5).

De resultaten worden getoond in figuur 7. De procentuele spieractivaties staan in groepjes van drie weergegeven.



Figuur 7. Procentuele spieractivaties bij een buigend moment van 10 Nm en een supinerend moment van 3 Nm. Op de horizontale as staan de zes spieren. Iedere spier is onderverdeeld in twee of drie kolommen, één voor ieder optimalisatiecriterium. Als er twee kolommen staan is de activatie bij de minimalisatie van totale spierkracht nul.
 Spier 1: m. brachialis
 Spier 2: m. brachioradialis
 Spier 3: m biceps
 Spier 4: m. pronator teres
 Spier 5: m. pronator quadratus (niet actief)
 Spier 6: m. supinator

Voor alle spieren, behalve de m. pronator quadratus, geldt dat de activaties bij minimaliseren van de kwadraten-som inderdaad tussen de activaties van de twee andere optimalisaties in valt. In figuur 8 wordt hetzelfde gedaan als in figuur 7, maar nu wordt er een *pronerend* moment van 3 Nm geleverd.



Figuur 8. Procentuele spieractivaties bij een buigend moment van 10 Nm en een pronerend moment van 3 Nm. Op de horizontale as staan de zes spieren. Iedere spier is onderverdeeld in twee of drie kolommen, één voor ieder optimalisatiecriterium. Als er twee kolommen staan is de activatie bij de minimalisatie van totale spierkracht nul.
 Spier 1: m. brachialis
 Spier 2: m. brachioradialis
 Spier 3: m biceps
 Spier 4: m. pronator teres
 Spier 5: m. pronator quadratus
 Spier 6: m. supinator (niet actief)

Nu geldt voor alle spieren, behalve de m. biceps, dat de activaties bij minimaliseren van de kwadraten-som inderdaad tussen de activaties van de twee andere optimalisaties in valt. Het idee dat het minimaliseren van de kwadraten-som een soort compromis is van twee wél fysiologisch gefundeerde optimalisatiecriteria houdt dus goed stand in een situatie met meerdere vrijheidsgraden.

Klinische relevantie

Interpretatie van kracht en beweging en storingen hiervan in de (fysiotherapie)praktijk vindt plaats op basis van theorievorming. Het zou goed kunnen dat een fysiotherapeut op basis van zijn kennis van de anatomie besluit dat als iemand een supinerend moment moet leveren, de m. pronator teres niet wordt

ingeschakeld. Figuur 7 laat zien dat dit in combinatie met een flecterend moment hoogstwaarschijnlijk wel het geval is. Zo ook de activatie van de m. brachialis. Dit is een zuivere flexor van de elleboog. In figuur 7 en 8 worden de activaties getoond in twee situaties waarin het flecterend moment identiek is. Toch zijn er verschillen in activatie van de m. brachialis. Het is daarom raadzaam niet alleen het geïsoleerde effect van een bepaalde spier te bekijken, maar deze altijd in zijn mechanische context te beschouwen.

LITERATUUR

1. **Ait-Haddou, R., Jinha, A., Herzog, W.**
Letter to the editor.
Journal of Biomechanics, 35, 2002: 1433-1435.
2. **An, K.N., Kwak, B.M., Chao, E.Y., Morrey, B.F.**
Determination of muscle and joint forces: a new technique to solve the indeterminate problem.
Journal of Biomechanical Engineering, 106, 1984: 364-367.
3. **Bean, J.C., Chaffin, D.B., Schultz, A.B.**
Biomechanical model calculation of muscle contraction forces : a double linear programming method.
Journal of Biomechanics, 21, 1988: 59-66.
4. **Crowingshield, R.D., Brand, R.A.**
A physiologically based criterion of muscle force prediction in locomotion.
Journal of Biomechanics, 14, 1981: 793-801.
5. **Dantzig, G.B.**
Linear programming and extensions
Princeton Landmarks in Mathematics and Physics, 11^e druk, 1998.
6. **Erdemir, A., McLean, S., Herzog, W., Bogert, A.J. van den.**
Model-based estimation of muscle forces exerted during movements.
Clinical Biomechanics 22, 2007: 131-154.