

DE MENSELIJKE MOTOR

Prof.dr. L.J.C. van Loon

Inhoudsopgave

Voeding als energie	2
Energiegebruik tijdens inspanning	5
Inspanningsintensiteit	5
Training	6
Sportvoeding	8
Voeding vóór intensieve duurinspanning	8
Voeding tijdens intensieve duurinspanning	10
Voeding na intensieve (duur)inspanning	14
Voeding en de adaptieve respons op training	16
Tot slot	18
Referenties	19



DE MENSELIJKE MOTOR



Komt de man met de hamer? Of is er nog net voldoende energie over voor een winnende eindsprint? Juiste sportvoeding kan het verschil maken tussen winnen en verliezen.

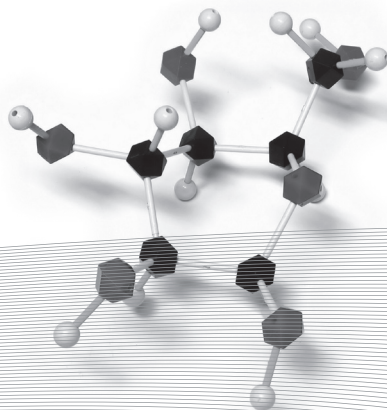
Beweging kost energie, bij sporters soms zelfs heel veel energie. De spieren halen die energie uit de voeding, vooral uit de energiebronnen koolhydraten en vetten. De keuze voor de energiebron hangt af van de omstandigheden. De intensiteit van de inspanning, de voedingstoestand en de trainingsstatus van de sporter zijn van grote invloed. Bovendien is de voeding van de sporter interessant voor de wetenschap: voortdurend zijn er onderzoeken die weer nieuwe inzichten opleveren.

Wist u bijvoorbeeld dat...

- ... een getraind persoon meer vet kan verbranden dan een ongetraind persoon?
- ... regelmatig trainen ervoor zorgt dat een sporter langere tijd een bepaalde inspanningsintensiteit kan handhaven voordat de glycogeenvoorraad op raakt?
- ... dit komt doordat het lichaam van getrainde personen meer gebruik maakt van de vetoxidatie?
- ... het koolhydraatgehalte, het natriumgehalte en de osmolaliteit van een sportdrink van groot belang zijn ter compensatie van vochtverlies door transpiratie?
- ... een combinatie van eiwitten en koolhydraten zorgt voor een sneller herstel na de inspanning?

In deze publicatie 'De menselijke motor' leest u meer over de energievoorraden in het lichaam en energiegebruik bij inspanning. Daarnaast wordt er uitgebreid aandacht besteed aan de noodzaak van een gebalanceerde (sport)voeding, mét daarbij een toelichting. Compacte kaders met korte adviezen maken het geheel compleet. Auteur is Prof.dr. Luc van Loon, hoogleraar Fysiologie van Inspanning aan de Universiteit Maastricht. Van Loon doet veel onderzoek op het gebied van voeding en (top)sport. Hij verstaat de kunst zijn kennis te vertalen in duidelijke taal.

Met de juiste brandstofkeuze blijft de motor langer draaien!



VOEDING ALS ENERGIE



Om ons lichaam te kunnen bewegen is een goed samenspel van spiercontractie en ontspanning noodzakelijk. Om dergelijke spieractiviteit te kunnen genereren hebben onze spieren energie, in de vorm van de universele energiedonor ATP, nodig. De benodigde energie wordt met name geleverd door oxidatie van de, uit onze voeding afkomstige, koolhydraten en vetten. Slechts wanneer de energievoorziening middels koolhydraten en vetten onvoldoende blijkt, kan de oxidatie van eiwitten een substantiële bijdrage gaan leveren. Omdat ons lichaam voortdurend energie nodig heeft om te kunnen functioneren is een ruime endogene brandstofvoorraad noodzakelijk. Vandaar dat koolhydraten en vetten na inname via de voeding, in beperkte mate, in ons lichaam kunnen worden opgeslagen.

Tabel 1. Endogene brandstofvoorraden

	brandstof	gewicht (gram)	energie (kJ)
Vetten	- vetzuren in het bloed	0.4	16
	- vetten in het bloed	4.0	156
	- vetten in de spieren	300	1.700
	- vetweefsel	12.000	468.000
Koolhydraten	- glucose in het bloed	5	90
	- glycogeen in de lever	100	1.800
	- glycogeen in de spieren	350	6.300

Gebaseerd op schattingen t.a.v. een gemiddelde, slanke man met een gewicht van ± 70 kg. Bij de oxidatie van 1 gram vet komt 39 kJ energie vrij, voor koolhydraten ligt dit rond de 18 kJ per gram¹.

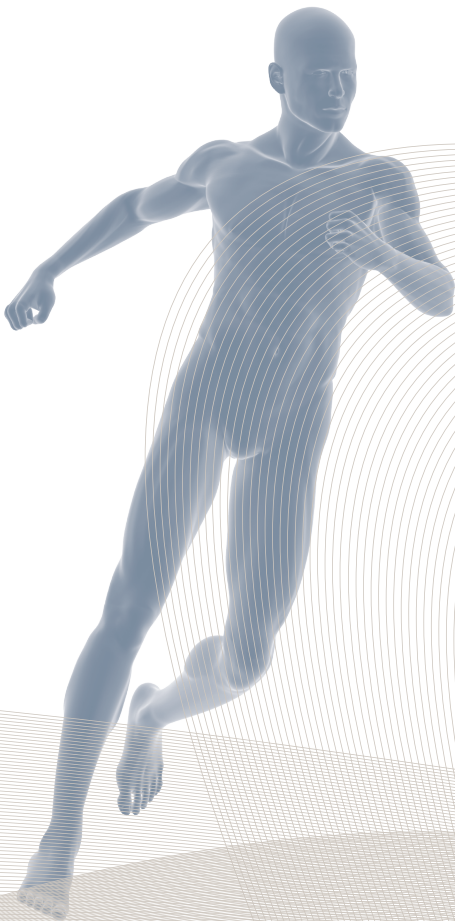
Vetten worden voornamelijk opgeslagen als triacylglycerol in de vetcellen, oftewel adipocyten. Deze adipocyten bevinden zich voornamelijk in het onderhuids vetweefsel en in het vetweefsel tussen de organen in de buikholte. Daarnaast wordt een beperkte hoeveelheid triacylglycerol opgeslagen in de spier zelf, als vele kleine vetdruppeltjes in de spiervezels (intramusculaire of intramyocellulaire triglyceriden). Natuurlijk is een kleine hoeveelheid vet ook aanwezig in de circulatie, in de vorm van lipoproteïne partikels (VLDL, LDL, IDL, HDL) en als zogenaamde vrije (niet-veresterde) vetzuren in het bloed. Middels lipolyse worden vanuit het

De totale energievoorraad opgeslagen in de vorm van vet is enorm groot en zou (hypothetisch) voldoende energie kunnen leveren om dagenlang onafgebroken hard te lopen.

vetweefsel vetzuren vrijgemaakt, hetgeen voornamelijk gereguleerd wordt via hormoon gevoelig lipase (HSL). Een gedeelte van de vrijgemaakte vetzuren zal vervolgens, gebonden aan albumine, via de bloedcirculatie getransporteerd worden naar onze spieren. Aldaar kunnen de spieren deze vetzuren opnemen, waarna ze vervolgens ingebouwd kunnen worden in de intramyocellulaire triacylglycerol voorraad of onmiddellijk kunnen worden omgezet ten behoeve van de vetoxidatie. De totale energievoorraad opgeslagen in de vorm van vet is enorm groot en zou (hypothetisch) voldoende energie kunnen leveren om dagenlang onafgebroken hard te lopen.

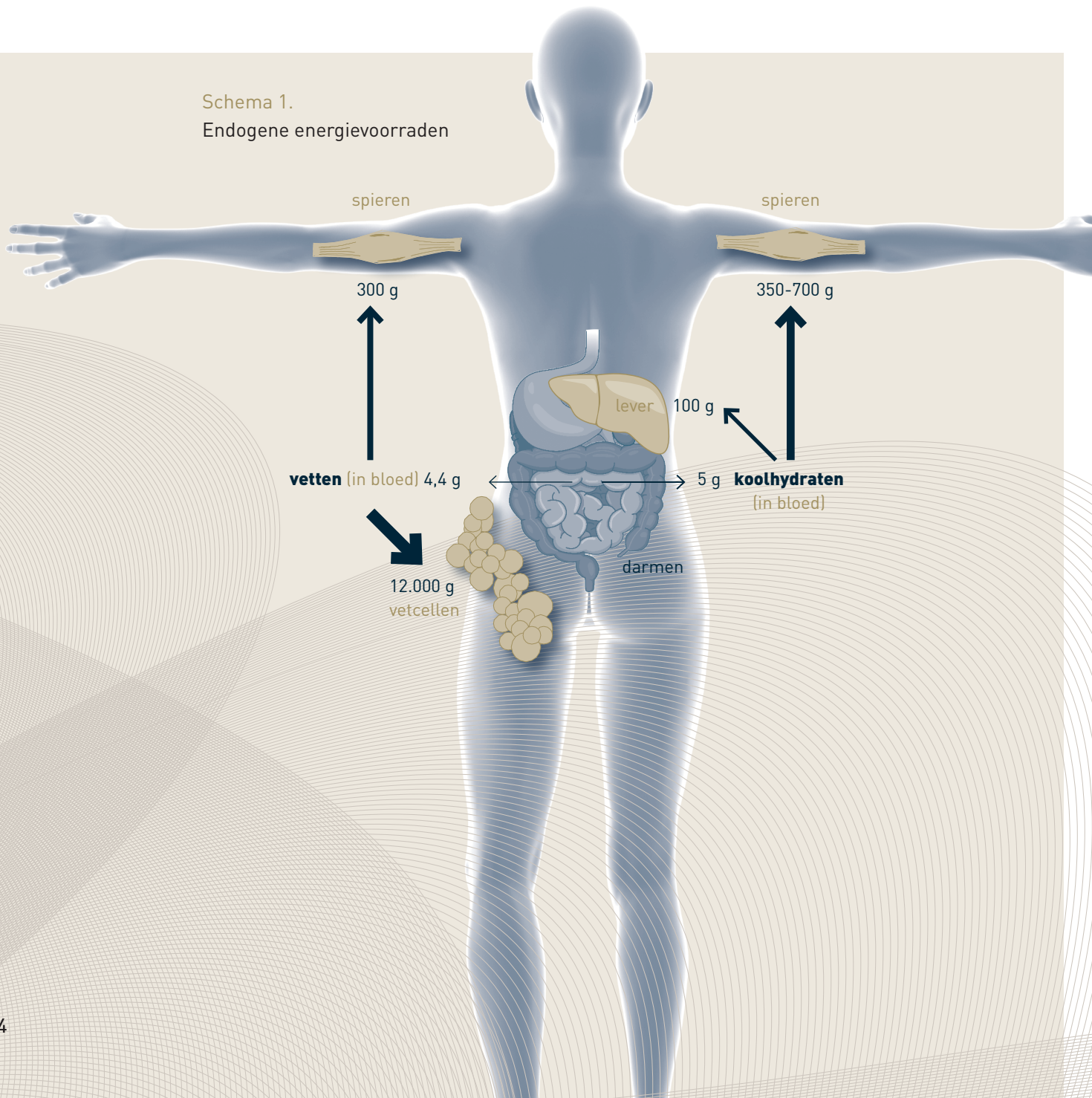
Koolhydraten worden vaak omschreven als een 'snelle' brandstof en vetten als 'langzame' energiebron.

Koolhydraten worden als glycogeen opgeslagen in de lever en in de spieren. Daarnaast is natuurlijk een kleine hoeveelheid glucose aanwezig in de circulatie. Leverglycogeen kan, middels het enzym glycogeen-6-fosfatase, afgebroken worden tot glucose en vervolgens via de circulatie getransporteerd worden naar de spieren. Na opname in de spier kan glucose opgeslagen worden als spierglycogeen of onmiddellijk gebruikt worden in de energieleverende processen (glycolyse en/of volledige oxidatie). Aangezien het enzym glycogeen-6-fosfatase niet aanwezig is in spierweefsel, kan glucose na opname het spierweefsel niet meer verlaten. Het moge daarmee dan ook duidelijk zijn dat de lever (en met name de hoeveelheid leverglycogeen) een primaire rol speelt bij het handhaven van de glucoseconcentratie in het bloed. De totale hoeveelheid energie opgeslagen in de vorm van endogene koolhydraten is vele malen kleiner dan onze vetvoorraad en zou in theorie slechts voldoende energie opleveren voor 60 tot 90 minuten intensieve inspanning. In de praktijk ligt dit zelfs aanzienlijk lager (30-40 minuten) daar bij intensieve inspanning de dominante spiervezels in de benen al eerder door hun glycogeenvoorraad zullen heen raken¹.



Koolhydraten en vetten verschillen van elkaar wanneer we de metabole processen in acht nemen. Bij de verbranding van 1 gram vet komt 39 kJ aan energie vrij, terwijl dit in het geval van koolhydraten maar zo'n 18 kJ per gram bedraagt. Met andere woorden, het is niet vreemd dat meer dan 95% van onze totale endogene energievoorraad is opgeslagen in de vorm van vet, want vet is de meest efficiënte vorm van energieopslag. Dit is echter niet het enige verschil tussen deze twee brandstoffen. De hoeveelheid energie die per tijdseenheid vrijgemaakt kan worden middels de oxidatie van glycogeen is namelijk hoger dan bij de oxidatie van vet². Vandaar dat koolhydraten vaak worden omschreven als een "snelle" brandstofbron en vetten als "langzame" energiebron. Dit laatste heeft natuurlijk consequenties voor het gebruik van de verschillende brandstofbronnen onder verschillende omstandigheden.

Schema 1.
Endogene energievoorraden



ENERGIEGEBRUIK TIJDENS INSPANNING

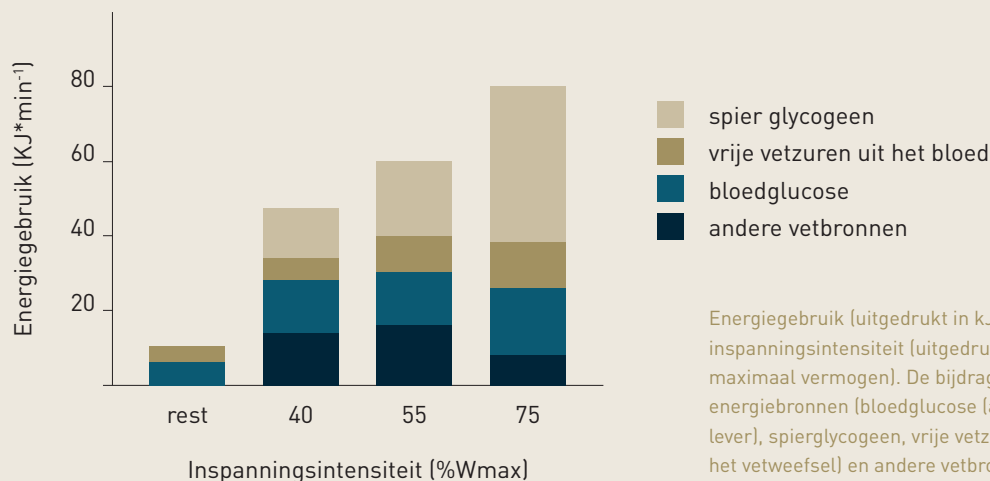


Eén van de meest opzienbarende eigenschappen van onze spieren is dat ze in staat zijn hun brandstofkeuze aan te passen aan de omstandigheden. Hierdoor kan de mens dan ook als een zeer efficiënte en ingewikkelde motor beschouwd worden, nog steeds ongeëvenaard door de hedendaagse technologie. Vanwege de verschillende eigenschappen van de brandstoffen, de plaats van opslag, als ook de beschikbaarheid ervan zal de bijdrage van de verschillende energiebronnen aan het energiegebruik tijdens inspanning variëren onder verschillende omstandigheden. De meest belangrijke factoren die de brandstofkeuze tijdens inspanning bepalen zijn de inspanningsintensiteit en de trainingsstatus. Daarnaast kunnen we middels onze (sport)voeding de substraatkeuze verder moduleren.

Inspanningsintensiteit

De inspanningsintensiteit bepaalt de energiebehoefte tijdens fysieke inspanning. Middels het gebruik van stabiele isotoop tracers hebben we het gebruik van de verschillende endogene brandstofvoorraden in relatie tot inspanningsintensiteit kunnen kwantificeren³ (Figuur 1). Tijdens licht- tot middelmatig intensieve inspanning wordt een ongeveer evenredige hoeveelheid van de opgeslagen koolhydraten en vetten geoxideerd om in de energiebehoefte te voorzien. De hoogste (absolute) vetoxidatie snelheden worden bereikt bij middelmatig zware inspanning (50-60% van het maximaal vermogen). Hierbij leveren niet alleen de vetzuren afkomstig uit het bloed, maar ook de intramusculaire triglyceriden een belangrijke bijdrage aan de totale vetoxidatie.

Figuur 1. Energiegebruik als functie van de inspanningsintensiteit



Energiegebruik (uitgedrukt in kJ per minuut) als functie van inspanningsintensiteit (uitgedrukt als percentage van het maximaal vermogen). De bijdrage van de verschillende energiebronnen (bloedglucose (afkomstig van glycogeen uit de lever), spierglycogeen, vrije vetzuren in het bloed (afkomstig van het vetweefsel) en andere vetbronnen (som van het gebruik van de triglyceriden uit de spier en de lipoproteïnen-partikels in het bloed)) zijn aangegeven in de legenda³.

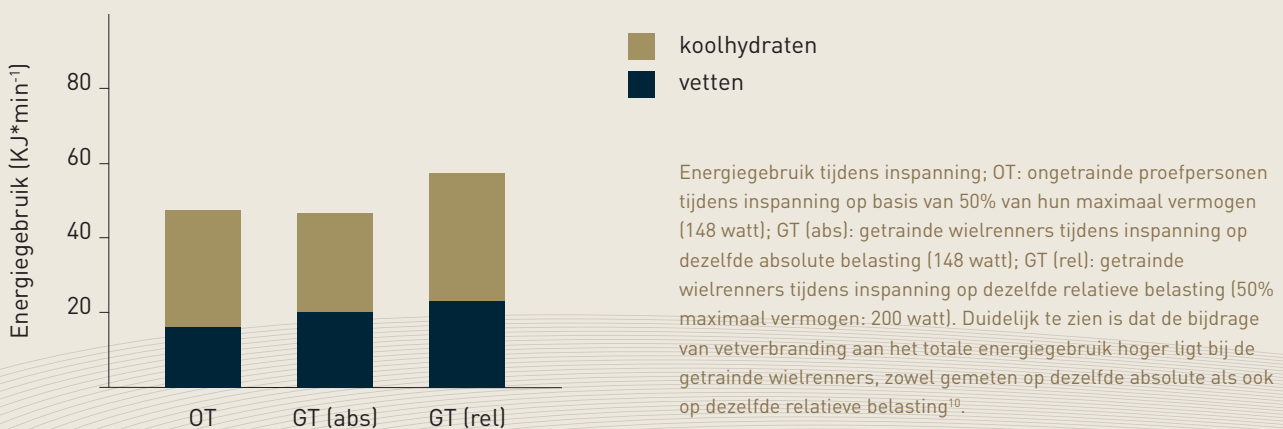
Wanneer de inspanningsintensiteit verder wordt verhoogd (boven 70% van het maximale vermogen) neemt de vetoxidatie, zowel relatief als absoluut gezien, significant af en schakelen de spieren vooral over op het gebruik van de endogene glycogeenvoorraden. Bij middelmatig tot hoge intensiteit (duur)inspanning vormen de glycogeenvoorraden, en met name het spierglycogeen, dus kwantitatief gezien veruit de belangrijkste energiebron. Dit laatste ondanks het feit dat onze glycogeenvoorraden zeer beperkt zijn.

Tijdens langdurige intensieve inspanning zal het prestatievermogen dan ook afnemen wanneer de glycogeenvoorraden opraken⁴⁻⁶. Voor atleten is dit in de praktijk een bekend fenomeen wat vaak in termen als “de man met de hamer tegenkomen”, “benen als pap hebben” en “kapot zitten” wordt verwoord. Gezien de beperkte endogene glycogeenvoorraad speelt de hoeveelheid bruikbare koolhydraten dus een kritieke rol bij het vermogen om prestaties te leveren tijdens (duur)inspanning van middelmatige tot hoge intensiteit⁴. Om deze reden is het dan ook van groot belang de glycogeenvoorraad vóór inspanning te optimaliseren en het gebruik van deze voorraden tijdens inspanning te minimaliseren. Dit vormt de basis van vele effectieve training- en (sport)voedingsinterventies en heeft de aanleiding gegeven tot de ontwikkeling van specifieke sportvoedingsproducten.

Training

Regelmatige training heeft een aantal belangrijke gevolgen voor ons lichaam. Behalve het verbeteren van de conditie van hart, bloedvaten en longen, leidt training ook tot verregaande adaptatie van het spierweefsel⁷⁻⁹. Duurtraining doet de grootte en het aantal mitochondriën in onze spieren toenemen. In deze mitochondriën vindt de oxidatie van koolhydraten en vetten plaats en daarmee de productie van het benodigde ATP. De verhoogde mitochondriële dichtheid leidt ertoe dat de spieren beter in staat zijn in een bepaalde energiebehoefte te voorzien. Deze verhoogde mitochondriële dichtheid leidt ertoe dat de spieren beter in staat zijn in een bepaalde energiebehoefte te voorzien. Dientengevolge is een goed getraind persoon beter in staat vet te verbranden tijdens inspanning. Sterker nog, we hebben tevens aangetoond¹⁰ dat een getraind persoon meer vet kan verbranden bij zowel eenzelfde absolute als ook eenzelfde relatieve intensiteit inspanning wanneer dit wordt vergeleken met een ongetraind persoon (Figuur 2).

Figuur 2. Effect van training op het brandstofgebruik tijdens duurinspanning



Bij eenzelfde absolute als ook relatieve inspanningsbelasting draagt de vetoxidatie meer bij aan het energiegebruik in getrainde personen, zodat minder gebruik hoeft te worden gemaakt van de beperkte glycogeenvoorraden¹⁰. Regelmatige training zorgt er derhalve voor dat men gedurende langere tijd een bepaalde inspanningsintensiteit kan handhaven alvorens de glycogeenvoorraad opraaft en de inspanning moet worden gestaakt. Daarnaast leidt regelmatige training ook tot een verhoogde capaciteit om koolhydraten op te slaan; getrainde atleten kunnen namelijk tot wel 50% meer glycogeen in hun spieren opslaan (350-700 gram). Tevens is aangetoond dat ook de opslag van vetten in de spier, de intramusculaire triglyceriden, sterk verhoogd is in duuratleten¹¹. Hiermee neemt het vermogen om deze vetbronnen te mobiliseren verder toe, hetgeen de vetoxidatie tijdens inspanning verder kan doen toenemen¹¹⁻¹³. Regelmatige training is daarmee één van de meest effectieve manieren om de vetoxidatiecapaciteit te verhogen, waardoor de beperkte glycogeenvoorraden gespaard kunnen worden en het prestatievermogen kan worden verbeterd.

**Een goed getraind persoon is beter in staat
vet te verbranden tijdens inspanning.**



SPORTVOEDING



Sinds de ontdekking van spierglycogeen als een belangrijke brandstof voor spieractiviteit^{4,14}, zijn allerlei interventies ontworpen om de glycogeenbeschikbaarheid te optimaliseren. Door regelmatige training kan de beperkte glycogeenvoorraad efficiënter gebruikt worden tijdens inspanning. Maar middels onze voeding kunnen we de koolhydraatbeschikbaarheid verder optimaliseren. Omdat vetzuren niet omgezet kunnen worden in koolhydraten, is het belangrijk dat we voldoende koolhydraten innemen vóór, tijdens, en na intensieve inspanning.

Voeding vóór intensieve duurinspanning

Allereerst is het maximaliseren van de glycogeenvoorraad vóór inspanning een belangrijk doel bij de voorbereiding op een belangrijke wedstrijd^{15,16}. Om dit te bereiken zijn in de loop van de jaren de nodige voedingsmanipulaties toegepast. De meest succesvolle is het zogenaamde klassieke “supercompensatie dieet”. Hierbij wordt 6 dagen vóór een belangrijke wedstrijd middels intensieve training de gehele glycogeenvoorraad gebruikt. De eerste 3 dagen wordt dan koolhydraatarm (oftewel vet-/eiwitrijk) gegeten,

waardoor de spier vrijwel geen glycogeen kan synthetiseren, ondanks maximale inzet van de daarvoor benodigde enzymsystemen.

Drie dagen voor de wedstrijd wordt dan opnieuw tot uitputting getraind, waarop gedurende 3 dagen een koolhydraatrijke voeding wordt gebruikt (70-80 energieprocent koolhydraten) en er niet meer wordt getraind. Deze voedings- en trainingsinterventie resulteert in een zogenaamde supercompensatie van de spierglycogeenvoorraden waarbij een extra toename van 25 tot 45% kan worden bereikt.

Sportvoeding vóór
intensieve (duur)inspanning

Volg een gemodificeerd supercompensatie dieet

Vermijd vezelrijke producten de dag vóór competitie

Drink voldoende water, met name bij de voorbereiding op competitie in een warme omgeving bij een hoge luchtvochtigheid

Doe allereerst ervaring op met voedingsinterventies alvorens implementatie ervan in de voorbereiding voor competitie

Omdat vetten niet omgezet kunnen worden in koolhydraten, is het belangrijk dat we voldoende koolhydraten innemen vóór, tijdens, en na intensieve inspanning.

Het nadeel van deze methode is echter de verre van smakelijke voeding die gebruikt moet worden. Ook staan psychische spanningen en irritaties, als gevolg van onder andere het strikt wel of niet mogen trainen, een optimale voorbereiding vaak in de weg. Daarnaast is de kans op blessures door de maximale trainingssessies ook niet ondenkbeeldig. Met andere woorden, alhoewel wetenschappelijk zeer interessant, biedt het klassieke supercompensatie dieet dus geen praktisch bruikbare methode om de glycogeenbeschikbaarheid te verhogen. Om de nadelige bijwerkingen te vermijden wordt in de praktijk daarom gebruik gemaakt van het zogenaamd gemodificeerd supercompensatie regime¹⁷. Gedurende een periode van 6 dagen wordt volgens een zogenaamd “tapering-down” regime het trainingsvolume verlaagd, terwijl de inspanningsintensiteit gehandhaafd wordt. In deze periode wordt de koolhydraatname middels de voeding langzaam verhoogd van 50 tot ongeveer 70-75 energieprocent. Het betreft hier dus het verlagen van de hoeveelheid vet in de voeding en het gebruik van

koolhydraatrijke voedingsmiddelen, zoals aardappelen, pasta's, bananen, winegums, (sport)dranken etc. Een verhoging van het aandeel koolhydraten in de voeding verandert de dagelijkse energie-inname dus niet, maar in de praktijk eet men dus qua gewicht aanzienlijk meer. Dat laatste is natuurlijk logisch daar een gram koolhydraten minder dan de helft zoveel energie levert vergeleken met een gram vet. Gezien het grotere volume van de voeding en de invloed hiervan op de energieinname, kan de deskundigheid van een (sport)diëtist bij de begeleiding van (professionele) atleten hier waardevol zijn. Dit gemodificeerde regime, waarbij koolhydraatstapelen wordt gecombineerd met tapering, resulteert in vrijwel identieke glycogeenconcentraties als bij de toepassing van het klassieke supercompensatie protocol, maar dan zonder de negatieve bijwerkingen. Het volgen van een dergelijk gemodificeerd supercompensatie protocol gedurende 6-7 dagen voor een belangrijke wedstrijd is inmiddels gemeengoed geworden binnen de (duur) sportwereld.

Dergelijke manipulaties van voeding en training kunnen leiden tot een optimalisatie van de spierglycogeenvoorraden. Dit is natuurlijk van belang bij elke sporttak waar de te verrichten inspanning van middelmatige tot hoge intensiteit is en gedurende langere tijd wordt verricht (>40 min). Kortom, bij elke inspanning waar (op termijn) een tekort aan glycogeen verwacht kan worden. Dit is met name van belang



Gebruik een kleine, koolhydraatrijke maaltijd >2 uur vóór de start

Neem 6-8 ml/kg lichaamsgewicht sportdrink 5 min. vóór de start of tijdens de warming-up

Sportvoeding vlak vóór intensieve (duur)inspanning

bij duursporten zoals wielrennen, marathon, triatlon enzovoorts. Maar ook competitie spelsporten zoals voetbal, tennis, hockey en dergelijke leiden tot depletie van de glycogeenvoorraden. Het optimaliseren van de glycogeenvoorraden kan dus ook bij deze atleten leiden tot betere prestaties. Om te zorgen dat ook de leverglycogeenvoorraad vlak voor inspanning optimaal is, wordt geadviseerd om 2-3 uur voor de start van een belangrijke wedstrijd nog een lichte, koolhydraatrijke maaltijd te nuttigen. Het is vanzelfsprekend dat het verstandig is alle soorten voedingsinterventies in de praktijk per individu te testen tijdens trainingen alvorens deze te implementeren in het kader van de wedstrijdvoorbereiding.

Voeding tijdens intensieve duurinspanning

Behalve het optimaliseren van de glycogeenvoorraad vóór inspanning, kan tevens getracht worden om tijdens inspanning extra koolhydraten in te nemen om de beperkte endogene voorraden aan te vullen¹⁸. Onderzoek heeft inmiddels duidelijk aangetoond dat koolhydraatinname tijdens middelmatige tot hoge intensiteit inspanning (over een periode >45 min) het prestatievermogen significant kan verbeteren^{6,19}. Vandaar dat het gebruik van koolhydraatrijke (sport)dranken tijdens inspanning inmiddels niet meer weg te denken is tijdens (duur)sportevenementen. Koolhydraatsuppletie tijdens inspanning kan een daling in de glucoseconcentratie in het bloed voorkomen en een optimale koolhydraatoxidatie garanderen. Om deze reden is natuurlijk veel onderzoek gedaan met de intentie de exogene koolhydraatoxidatie tijdens inspanning verder te optimaliseren. Bijna alle oplosbare koolhydraten kunnen na inname met eenzelfde snelheid verbrand worden. Dit geldt voor glucose, glucose polymeren, maltose, sucrose en oplosbaar zetmeel. Uitzonderingen zijn fructose en galactose die minder snel verbrand kunnen worden²⁰⁻²³.

Naast de soort koolhydraten is natuurlijk ook de hoeveelheid koolhydraten een belangrijk gegeven. Uit een reeks van studies is gebleken dat koolhydraatinname tijdens (duur)inspanning een belangrijke bijdrage kan leveren aan het totale energiegebruik (~25%) en ervoor zorgt dat de endogene glycogeenforraden gespaard kunnen worden^{6,10,18,19}. Dit glycogeenbesparende effect speelt zich met name af tijdens de beginfase van de inspanning²⁴. Het is daarom belangrijk dat de atleet al bij de start begint met koolhydraatsuppletie, en niet wacht tot een latere fase in de race. Omdat de endogene glycogeenforraden met name in de

eerste 30-60 minuten na de start moeten worden gemobiliseerd, is vooral hier veel winst te behalen. Al het glycogeen dat door de inname van een sportdrank niet gebruikt hoeft te worden in de eerste fase van inspanning, kan in principe van pas komen tijdens de eindfase van een wedstrijd. Het is natuurlijk logisch dat dit bij een laatste versnelling of eindsprint uiteindelijk het verschil tussen winst en verlies kan betekenen.

Sportvoeding tijdens
intensieve (duur)
inspanning

Gebruik een geschikte (sport)drank

Gebruik 6-8 ml/kg lichaamsgewicht vlak vóór de start of tijdens de warming-up

Gebruik 2-3 ml/kg lichaamsgewicht elke 15-20 min tijdens inspanning

Onderzoek heeft inmiddels duidelijk aangetoond dat koolhydraatinname tijdens middelmatige tot hoge intensiteit inspanning (over een periode >45 min) het prestatievermogen significant kan verbeteren.

Toch is het aanbieden van exogene koolhydraten via een (sport)drank tijdens inspanning gebonden aan beperkingen. De oxidatiesnelheid van oraal ingenomen koolhydraten lijkt namelijk een plafondwaarde te kennen. Exogene glucose-oxidatiesnelheden blijken namelijk nooit hoger te liggen dan ~1.0-1.1 gram per minuut^{18,23,25}. Zelfs bij de inname van zeer grote hoeveelheden zal deze snelheid niet verder toenemen. Dit wijst erop dat tijdens inspanning niet meer dan 60-70 gram koolhydraten per uur ingenomen zouden hoeven te worden. Het betreft hier dus een maximale hoeveelheid glucose die alleen bij hoog intensieve (duur)inspanning zal kunnen worden gebruikt. Bij een minder intensieve inspanning kan de hoeveelheid in te nemen glucose tijdens inspanning dus nog verder naar beneden bijgesteld worden. De beperking in de exogene glucose-oxidatiesnelheid tijdens inspanning wordt toegeschreven aan het transport van glucose over de darmwand²⁶. Het transport van glucose over de darmwand verloopt via een transporteiwit genaamd SGLT1. Dit transporteiwit in de darmwand raakt verzadigd bij een inname van ~1.0-1.1 gram

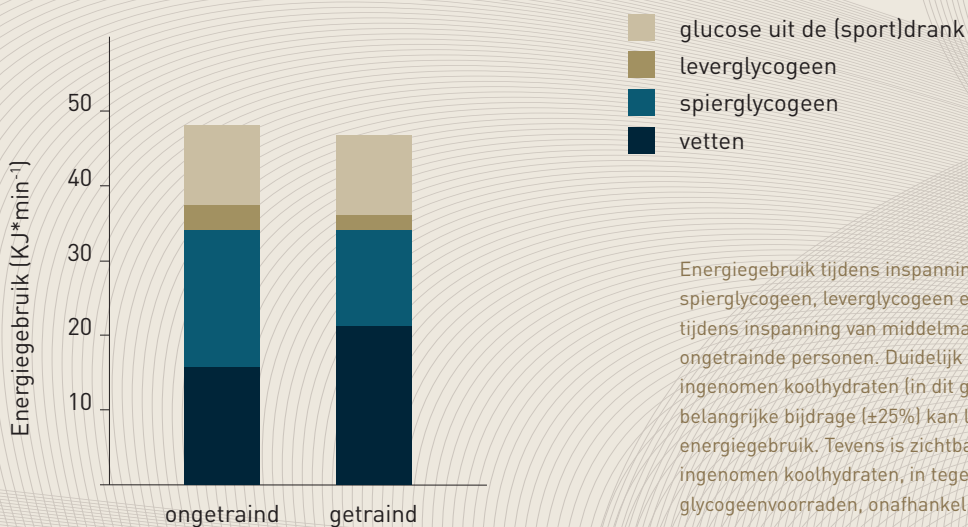
glucose per minuut. Een hogere glucose-inname leidt daarom niet tot een snellere opname en daarmee ook niet tot een hogere glucose-oxidatiesnelheid. De inname van een combinatie van verschillende koolhydraatbronnen kan echter de maximale exogene koolhydraatoxidatie verder doen toenemen²⁶⁻²⁸. Dit laatste kan worden toegeschreven aan het feit dat bij de opname



van verschillende koolhydraatsoorten gebruik wordt gemaakt van verschillende transportsystemen in darmwand. Waar glucose-opname in de darm gefaciliteerd wordt door het transporteiwit SGLT1, wordt fructose door de darmwand getransporteerd middels het transporteiwit GLUT5. Wanneer er combinaties van glucose(polymeren) met fructose (of sucrose, een disacharide bestaande uit glucose en fructose) worden ingenomen kan er dus gebruikt worden gemaakt van beide transportsystemen en kan de totale exogene koolhydraatopname en -oxidatie boven de 1.0-1.1 gram per minuut uitstijgen²⁶⁻²⁸. Onder de juiste condities kunnen zeer goed getrainde duuratleten tot wel 90 g koolhydraten per uur (1.2-1.4 g/min) verwerken wanneer zij dranken gebruiken waarin verschillende koolhydraatsoorten worden gecombineerd²⁶. Vooralsnog lijkt de combinatie van glucose(polymeren) en een beperkte hoeveelheid fructose of sucrose hiervoor het meest geschikt²⁹.

Zowel de recreatieve sporter als de topatleet kunnen evenveel baat hebben bij het gebruik van een sportdrank tijdens duurinspanning.

Figuur 3. Bijdrage van (sport)drank aan het energiegebruik tijdens inspanning



Energiegebruik tijdens inspanning, relatieve bijdrage van vet, spierglycogeen, leverglycogeen en glucose uit een (sport)drank tijdens inspanning van middelmatige intensiteit in getrainde en ongetrainde personen. Duidelijk is dat de verbranding van oraal ingenomen koolhydraten (in dit geval via een (sport)drank) een belangrijke bijdrage ($\pm 25\%$) kan leveren aan het totale energiegebruik. Tevens is zichtbaar dat de verbranding van de oraal ingenomen koolhydraten, in tegenstelling tot de endogene glycogeenvoorraden, onafhankelijk is van de training status¹⁰.

Er lijken overigens weinig verschillen te bestaan in de oxidatiesnelheid van de uit een (sport)drank afkomstige koolhydraten tussen inactieve volwassenen en zeer goed getrainde triatleten en wielrenners wanneer ze een vergelijkbare inspanning leveren (Figuur 3). Met andere woorden, zowel de recreatieve sporter als de topatleet kunnen baat hebben bij het (gematigd) gebruik van een koolhydraathoudende (sport)drank tijdens intensieve duurinspanning. Natuurlijk is het voor de (recreatieve) atleet wel belangrijk om prioriteiten te stellen aangaande het doel van de inspanning. Het gebruik van koolhydraathoudende (sport)dranken is namelijk niet wenselijk wanneer inspanning wordt uitgevoerd met als doel gewicht te verliezen. Het gebruik van koolhydraathoudende sportdranken gedurende middelmatig tot hoge intensiteit inspanning van langere duur (>45-60 min) is alleen relevant wanneer men de prestatie op dat moment wil maximaliseren.

Waarom moet een goede (sport)drank voldoen voor gebruik tijdens intensieve duurinspanning?

- 6-8% koolhydraat oplossing
- glucose, sucrose en maltodextrines als primaire koolhydraatbronnen
- toevoeging fructose of sucrose
- osmolaliteit <400 mosmol/kg
- iso- tot hypotoon
- natriumgehalte 200-1200 mg/L
- goed smaken



Behalve koolhydraten is het tevens belangrijk dat het waterverlies tijdens competitieve duurinspanning wordt gecompenseerd. Om deze reden worden koolhydraten tijdens inspanning vaak ingenomen in de vorm van (sport)dranken. Om een optimale aanvoer van exogene koolhydraten en water te realiseren is het belangrijk dat een goede sportdrank wordt gebruikt. Een goede sportdrank voor gebruik tijdens intensieve inspanning van langere duur moet aan een aantal voorwaarden voldoen. Gezien de maximale oxidatiesnelheid van exogene koolhydraten tijdens inspanning, zou een ideale sportdrank een koolhydraatgehalte moeten bevatten waarmee een totale inname van 60-90 gram koolhydraten per uur goed te realiseren is. Het koolhydraatgehalte mag echter niet te hoog (>18%) zijn en de drank mag tevens niet een te hoge osmolaliteit (>400 mosmol per kg) hebben, omdat dit de maaglediging vertraagt en kan leiden tot maag- en darmklachten.

Natuurlijk heeft een goede sportdrank tijdens inspanning ook de functie de vochtbalans zo goed mogelijk te handhaven. Een vochtverlies van ~2% van het lichaamsgewicht (1.4 liter in een man van 70 kg) kan het prestatievermogen al significant doet afnemen^{30,31}. Of het gebruik van een sportdrank het zweetverlies effectief kan compenseren is afhankelijk van een aantal factoren, waarbij met name het koolhydraatgehalte, het natriumgehalte en de osmolaliteit van de drank van groot belang zijn. De ideale sportdrank is iso- tot hypotoon en heeft een natriumgehalte van circa 200-1200 mg/liter. Een volledige compensatie van het zweetverlies is soms niet mogelijk, aangezien zweetverliezen van meer dan 2 liter per uur mogelijk zijn. Inname van dergelijke hoeveelheden water tijdens inspanning kan meer zijn dan het maag-darmstelsel kan verdragen. In de praktijk wordt de hoeveelheid ingenomen drank meestal bepaald door de hoeveelheid sportdrank die goed verdragen wordt. Het is daarom van groot belang dat het (voldoende) drinken tijdens inspanning actief wordt getraind. Hierin valt een belangrijk trainingseffect te behalen. Inname van grotere hoeveelheden (sport)drank leidt tot uitzetting van de maagwand, hetgeen de maaglediging meer versnelt dan de inname van kleinere hoeveelheden drank. Het advies is daarom om vlak voor de start van een training/wedstrijd te beginnen met het drinken van 6-8 ml sportdrank per kg lichaamsgewicht om de maag te vullen en vervolgens over te stappen op kleinere hoeveelheden (2-3 ml per kg lichaamsgewicht) elke 15-20 minuten.

Sommige atleten kunnen een reactieve, inspanningsgeïnduceerde, hypoglycemie ontwikkelen wanneer ze vlak voor de inspanning een koolhydraatrijke (sport)drink innemen. De stijgende insulineconcentratie kan in combinatie met de verhoogde glucose-opname in de spieren (als gevolg van de inspanning) soms leiden tot een (te) sterke daling van de bloedglucoseconcentratie die optreedt binnen 15 minuten na de start van de inspanning. Atleten die hier gevoelig voor blijken te zijn wordt geadviseerd te wachten met koolhydraat-inname tot (tijdens) de warming-up of tot (minder dan) 5 minuten voor de start. Het optreden van een reactieve hypoglycemie wordt op deze wijze normaliter voorkomen.

Om zweetverlies tijdens inspanning zoveel mogelijk te compenseren is het belangrijk om goed inzicht te krijgen in de omvang van het vochtverlies. Dit wordt vaak als een groot probleem gezien, daar het zweetverlies sterk afhankelijk is van factoren als de temperatuur, vochtigheidsgraad van de lucht en de mate van acclimatisering. Toch kan het te verwachten zweetverlies in de praktijk redelijk nauwkeurig geschat worden, met een kleine correctie voor de verbranding van lichaamsvet en koolhydraten (± 100 - 200 g per uur). Door het lichaamsgewicht vóór en na trainingen en wedstrijden te meten krijgt men een goede indruk van het individuele zweetverlies onder verschillende (klimatologische) omstandigheden en kan de sportdrinksamenstelling en inname hierop aangepast worden^{30,31}. Bij warm weer met een lage luchtvochtigheid zal meer gedronken moeten worden van een sportdrink met een relatief laag koolhydraatgehalte. Gedurende koude omstandigheden (zoals meestal in ons land) zullen kleinere hoeveelheden van een meer geconcentreerde oplossing gebruikt moeten worden. Maar de aanbevolen grenzen voor koolhydraatconcentratie en osmolaliteit (<400 mosmol per kg) moeten echter niet overschreden worden. Samenvattend dient een goede sportdrink een optimale aanvoer van koolhydraten te bewerkstelligen om de bloedglucoseconcentratie op peil te houden en een adequate koolhydraatverbranding te kunnen garanderen. Daarnaast moet een goede sportdrink voldoende water en elektrolyten aanvoeren om het zweetverlies zo volledig mogelijk te compenseren. Om het gebruik van een sportdrink te stimuleren en de aanvoer van zowel water als koolhydraten te optimaliseren dient een sportdrink goed te smaken en geen aanleiding te geven tot het ontstaan van maag- en darmklachten. Overigens moet het belang van de smaak niet onderschat worden, daar een goede smaak het (sport) drankgebruik stimuleert. Bovendien kan een ongewenste smaak en geur de snelheid van de maaglediging negatief beïnvloeden. Binnen de gestelde grenzen is de keuze van een ideale sportdrink voor het gebruik tijdens intensieve (duur)inspanning dus afhankelijk van de atleet, de duur en de intensiteit van de inspanning en de klimatologische omstandigheden waaronder de inspanning moet worden geleverd.



Voeding na intensieve (duur)inspanning

Een juiste keuze van voeding na intensieve competitieve (duur)inspanning heeft als belangrijkste doel het herstel te bespoedigen en daarmee het prestatievermogen op peil te houden³². Uit het voorgaande moge duidelijk zijn dat het herstel van de geledigde glycogeenvoorraden hierbij een belangrijke, tijdsbepalende factor vormt. Wanneer we een normale voeding gebruiken zullen geledigde glycogeenvoorraden binnen 24 uur grotendeels weer aangevuld zijn³³. Voor sommige atleten is dit echter niet voldoende, omdat zij ruim binnen die tijdslijn opnieuw optimaal dienen te presteren. Hierbij kun je denken aan wielrenners in de Tour de France, of bijvoorbeeld atleten die tweemaal per dag intensief moeten trainen. In dergelijke gevallen kunnen koolhydraatrijke hersteldranken een praktische oplossing bieden. De glycogeensynthesesnelheid na inspanning wordt voornamelijk bepaald door de hoeveelheid ingenomen koolhydraten, de soort koolhydraten

die hiervoor gebruikt worden, en het tijdstip waarop deze koolhydraten ingenomen worden³². Alhoewel in het verleden werd geopperd dat de inname van 0.75 gram koolhydraten per kg lichaamsgewicht per uur meer dan voldoende zou zijn om een maximale glycogeensynthese te realiseren¹⁵, laten meer recente

Waarom moet een goede hersteldrank voldoen?

- 6-18% koolhydraatoplossing
- glucose, sucrose en maltodextrines als primaire koolhydraatbronnen
- 2-6% eiwit of eiwithydrolysaat
- natriumgehalte 200-1200 mg/L
- goed smaken

studies¹⁶ zien dat een ruimere hoeveelheid en meer frequente dosering tot betere resultaten leidt (tot een inname van 1.0-1.2 gram koolhydraten per kg lichaamsgewicht per uur). De gebruikte koolhydraatbronnen moeten gemakkelijk verteerbaar en goed opneembaar zijn, waarvoor voedingsmiddelen met een gemiddeld tot hoge glycemische index worden aangeraden.

Omdat de eerste uren na inspanning de glycogeensynthese sneller verloopt, is het van belang om zo snel mogelijk na de inspanning te beginnen met koolhydraatinname. Hierbij geven atleten meestal de voorkeur aan (koolhydraatrijke) hersteldranken boven een vaste voeding. In pogingen de glycogeensynthese verder te versnellen zijn studies uitgevoerd waarin zowel het type koolhydraten en de vorm (vast, vloeibaar, intraveneus) waarin ze werden ingenomen werd gevarieerd. Deze interventies bleken echter niet te leiden tot een verdere toename van de glycogeensynthesesnelheid in de spieren^{15,34}. In vervolg op de vele studies naar de meerwaarde van de inname van combinaties van verschillende type koolhydraten bij het maximaliseren van de exogene koolhydraatoxidatiesnelheid tijdens inspanning, zijn er ook studies uitgevoerd naar de eventuele meerwaarde van het innemen van combinaties van verschillende koolhydraten in de acute herstelfase na intensieve duurinspanning³⁵⁻³⁸. Inname van een combinatie van glucose(polymeren) met fructose of sucrose (bij een koolhydraatinname van meer dan 1.2 g per kg lichaamsgewicht per uur) bleek de spierglycogeenupslag niet verder te versnellen, maar resulteerde wel in een hogere glycogeenvoorraad in de lever³⁵. Daarnaast bleek bij een dergelijke hoge koolhydraatinname de gecombineerde inname van glucose plus fructose of sucrose voor substantieel minder maag- en darmproblemen te zorgen. Kortom, wanneer een atleet streeft om na een zware competitieve (duur)inspanning de glycogeenvoorraden zo snel mogelijk aan te vullen biedt de gecombineerde inname van glucose(polymeren) met fructose of sucrose praktische voordelen.



De gecombineerde inname van verschillende soorten koolhydraten kan de spierglycogeenopslag niet verder versnellen. Er zijn echter wel duidelijke aanwijzingen dat het toevoegen van een kleine hoeveelheid eiwit aan een koolhydraatrijke hersteldrank (0.3-0.4 gram per kg lichaamsgewicht per uur) de glycogeensynthese in de spier kan versnellen^{16,39}. Mogelijke verklaring hiervoor is een sterkere stijging van de insuline-secretie na inname van een mengsel van koolhydraten en eiwitten. Deze verhoogde insulinerespons zou leiden tot een sterkere toename van de activiteit van het enzym glycogeensynthase, welke de snelheidsbeperkende stap binnen het glycogeensyntheseproses katalyseert. Het toevoegen van een kleine hoeveelheid eiwit aan een koolhydraatrijke hersteldrank is met name interessant wanneer er onvoldoende mogelijkheid is om een optimale hoeveelheid koolhydraten in te nemen (oftewel minder dan 0.8 gram koolhydraten per kg lichaamsgewicht per uur). Door co-ingestie van een kleine hoeveelheid eiwit of aminozuren kunnen meer van de ingenomen koolhydraten als spierglycogeen opgeslagen worden^{40,41}.

Een goede herstelvoeding dient dus te voorzien in een ruime hoeveelheid koolhydraten. Omdat na inspanning ook gestreefd moet worden naar herstel van de vochtbalans ligt het gebruik van een hersteldrank voor de hand. In de herstelfase na inspanning liggen er minder restricties ten aanzien van het koolhydraatgehalte van een ideale hersteldrank. Hersteldranken bevatten dan ook vaak substantieel meer koolhydraten dan de gemiddelde sportdrink. Om de vochtbalans na inspanning te herstellen dient overigens meer (150-200%) gedronken te worden dan het geschatte netto zweetverlies. De reden hiervoor is dat niet al het ingenomen water kan worden vastgehouden in het lichaam. Van dranken met een laag natriumgehalte (bijvoorbeeld: kraanwater, mineraalwater, sappen) wordt slechts circa 50% vastgehouden. Men kan dit verlies enigszins beperken door het natriumgehalte te verhogen tot circa 600-1200 mg per liter. De vochtretentie kan hierdoor oplopen tot 70-80%. Om deze reden bevatten veel hersteldranken dan ook relatief meer natrium. Wanneer het zweetverlies aanzienlijk is gebruiken veel sporters naast een hersteldrank aanvullend water en/of de meer generieke sportdranken.

Zorg dat elke (hoofd)maaltijd ongeveer 20-25 hoogwaardig eiwit bevat

Consumeer 20-25 gram hoogwaardig eiwit na een intensieve training (dit kan een reguliere (hoofd)maaltijd zijn)

Neem een eiwitrijke snack in de avond voor je gaat slapen

Gebruik van (sport)voeding bij intensieve training

Gebruik een koolhydraatrijke hersteldrank wanneer er binnen 24 uur weer een optimale (duur)prestatie geleverd moet worden

Start met het nemen van een hersteldrank onmiddellijk na inspanning

Koolhydraatinname tussen 1.0-1.5 g/kg lichaamsgewicht per uur

Gebruik extra water indien nodig

Combineer met normale voeding wanneer mogelijk

Sportvoeding na intensieve (duur)inspanning

VOEDING EN DE ADAPTIEVE RESPONS OP TRAINING



Historisch gezien heeft het onderzoek op het gebied van (sport)voeding en fysieke inspanning zich met name gericht op het (acuut) verbeteren van het prestatie-vermogen. De nadruk lag daarbij voornamelijk op het creëren van de juiste omstandigheden om een optimale prestatie te kunnen leveren. Een belangrijk onderdeel hiervan was het optimaliseren van de koolhydraatbeschikbaarheid. In de voorgaande sectie(s) hebben we een samenvatting gegeven van de huidige kennis inzake voedingsinterventies vóór, tijdens, en na acute (duur)inspanning waarmee we de koolhydraatbeschikbaarheid kunnen verbeteren⁴². Onderzoek op het gebied van voeding en sport heeft zich in de afgelopen 20 jaar echter enorm verbreed als ook verdiept. Inmiddels is veel van de aandacht gericht op de rol van voeding bij het ondersteunen van de adaptieve respons op regelmatige kracht- en/of duurtraining. De vraag die hierbij gesteld wordt is hoe onze voeding het reconditioneren van ons lichaam tijdens kracht- of duurtraining kan faciliteren. Natuurlijk is dit zeer relevant voor het prestatievermogen van een atleet, waarbij de nadruk dus niet meer op de prestatie zelf ligt maar op de weken, maanden, of zelfs jaren aan voorbereiding die hieraan vooraf zijn gegaan. Het spreekt vanzelf dat veruit de meeste aandacht is besteed aan de invloed van voeding op de adaptieve response van de skeletspier aan regelmatige training.

Fysieke inspanning leidt tot een toename van de snelheid van de spiereiwietsynthese als ook de spiereiwitdegradatie^{43,44}. De netto balans tussen spiereiwietsynthese en degradatie blijft echter negatief in de periode na intensieve inspanning zolang er geen voeding wordt gebruikt. De inname van koolhydraten na intensieve inspanning remt de eiwitdegradatie, maar desondanks blijft de netto balans negatief⁴⁵. Wanneer eiwitten worden ingenomen wordt de spiereiwietsynthese gestimuleerd en de degradatie geremd⁴⁶⁻⁴⁸. Dit leidt tot een positieve netto spiereiwitbalans na inspanning, hetgeen impliceert dat spierschade door training als ook de biochemische en structurele aanpassingen aan regelmatige training (het reconditioneren van de spieren) optimaal kunnen verlopen. De rol van eiwit in de voeding bij de adaptieve respons op regelmatige krachttraining is voor iedereen vanzelfsprekend⁴⁹. Echter, de rol van eiwit bij de adaptatie aan regelmatige duurtraining is net zo relevant^{50,51}. Alhoewel bij regelmatige duurtraining er geen sprake is van een netto toename aan spiermassa zijn er natuurlijk wel legio aanpassingen in verschillende weefsels waarvoor bouwstenen in de vorm van aminozuren noodzakelijk zijn. De inname van koolhydraten en eiwitten kunnen een negatieve eiwitbalans tijdens en na langdurige intensieve duurinspanning voorkomen^{52,53}. Overigens speelt de co-ingestie van koolhydraten maar een beperkte rol in het verbeteren van de spiereiwitbalans. Onderzoek laat zelfs zien dat wanneer voldoende eiwit wordt ingenomen, koolhydraatinname geen meerwaarde heeft op de spiersynthese⁵⁴. Dus wanneer de sporter niet geïnteresseerd is in het spoedig (binnen 24 uur) herstellen van de glycogeenvorraden en mogelijk de energie-inname wil beperken, is de inname van eiwit zonder (veel) koolhydraten al voldoende om het herstel te faciliteren.

Inmiddels is veel onderzoek uitgevoerd naar de behoefte aan eiwit in de voeding voor het adaptieve proces aan regelmatige training. Algemeen wordt aangenomen dat een dagelijkse eiwitinname van 1.3-1.8 gram eiwit per kg lichaamsgewicht per dag meer dan voldoende is om een optimale adaptieve respons te kunnen faciliteren in een intensief trainende atleet⁵⁵. Deze hoeveelheden worden ook daadwerkelijk geconsumeerd



door veel goed getrainde atleten omdat hun intensieve training ook een hoge energie-inname heeft⁵⁶. De inname van 20-25 gram hoogwaardig eiwit is meer dan voldoende om gedurende enkele uren na inspanning een maximale spiereiwitsynthese te faciliteren⁵⁷. Atleten worden daarom geadviseerd om 20-25 gram hoogwaardig eiwit in te nemen na intensieve inspanning. Dit kan enerzijds door na een inspanningssessie een eiwitrijke snack te consumeren of de (hoofd)maaltijd te gebruiken. Een gelijke distributie van de eiwitinname gedurende de dag lijkt vooralsnog de voorkeur te hebben. Daarom worden atleten geadviseerd om middels elke (hoofd)maaltijd minimaal 20-25 g (hoogwaardig) eiwit te consumeren. Daarnaast laten studies zien dat consumptie van eiwit tussen het avondeten en het slapen gaan kan zorgen voor een toename in de spiereiwitsynthese gedurende de nacht^{58,59}. Daarom nuttigen veel atleten 's avonds voor het slapen gaan vaak nog een lichte, eiwitrijke snack⁶⁰. Aandacht voor de rol van eiwit in het herstel na intensieve inspanning is met name relevant om een optimale adaptieve response op elke trainingssessie mogelijk te maken⁴⁹. Het is dan ook niet vreemd dat veel (sport)voedingsonderzoek zich momenteel richt op de rol die voedingsinterventies zouden kunnen spelen in het optimaliseren van de adaptieve respons na kracht- en duurtraining. Hier vinden op dit moment binnen het onderzoek nog veel ontwikkelingen plaats.

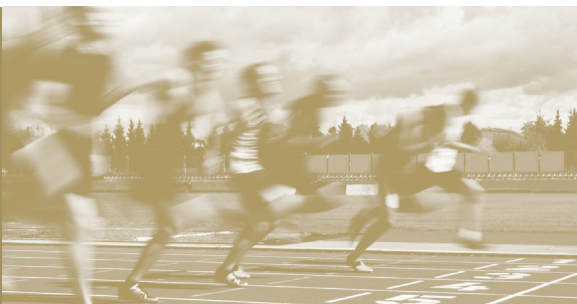
In deze brochure bespreken we de voedingsbehoefte van de atleet en hoe we middels onze voeding aan de voorwaarden kunnen voldoen die intensieve training en competitie van de atleet vragen. Aan deze behoefte kan worden voorzien middels een gezonde, gebalanceerde voeding. Specifieke producten ontwikkeld voor de toepassing in een sportspecifieke setting, zoals sportdranken en eiwit-supplementen, kunnen een praktisch hulpmiddel bieden maar dienen geen vervanging te zijn voor de basisvoeding. De hier besproken voedingsrichtlijnen hebben betrekking op het gebruik van (sport)voeding maar gaan niet in op het gebruik van specifieke sport supplementen. Gezien de veelheid aan sport-supplementen en het al dan niet bestaan van enige wetenschappelijke achtergrond die het gebruik ervan zouden kunnen onderleggen, is het onmogelijk om een kort en helder overzicht hierover te geven. Er is derhalve voor gekozen niet in te gaan op het gebruik en misbruik van allerlei sport-supplementen en de zin en onzin van deze supplementen. Maar voor wie geïnteresseerd is in het gebruik van supplementen in de (top)sport verwijzen we graag naar een recente IOC consensus statement⁶¹.

TOT SLOT



Naast regelmatige training is voeding een van de belangrijkste factoren waarmee we invloed kunnen uitoefenen op het brandstofgebruik van onze spieren tijdens (duur)inspanning en daarmee ook op ons prestatievermogen. Een gebalanceerde voeding, aangepast aan de specifieke eisen die training en competitie vragen van de individuele sporter, kan het prestatievermogen dan ook zeker verbeteren. Een goede keuze van de voeding (met inbegrip van het verstandig gebruik van (sport)dranken tijdens duurinspanning) garandeert geen topprestaties maar niettemin zal zonder een goede voeding een optimaal functioneren van onze menselijke motor onmogelijk blijken.

Finish



REFERENTIES

1. van Loon LJC. The effects of exercise and nutrition on muscle fuel selection. Maastricht: Universitaire Pers Maastricht; 2001.
2. Van der Vusse GJ, Reneman RS. Lipid metabolism in muscle. In: Rowell LB, Sheperd JT, eds. Handbook of Physiology, section 12: Exercise: Regulation and integration of multiple systems. New York: American Physiological Society, Oxford Press; 1996:952-94.
3. van Loon LJC, Greenhaff PL, Constantin-Teodosiu D, Saris WHM, Wagenmakers AJM. The effects of increasing exercise intensity on muscle fuel utilisation in humans. *J Physiol* 2001;536.1:295-304.
4. Bergstrom J, Hermansen L, Hultman E, Saltin B. Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol Scand* 1967;71:140-50.
5. Costill DL. Carbohydrate nutrition before, during, and after exercise. *Fed Proc* 1985;44:364-8.
6. Coyle EF, Coggan AR, Hemmert MK, Ivy JL. Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. *J Appl Physiol* 1986;61:165-72.
7. Henriksson J. Training induced adaptation of skeletal muscle and metabolism during submaximal exercise. *J Physiol* 1977;270:661-75.
8. Holloszy JO, Coyle EF. Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J Appl Physiol* 1984;56:831-8.
9. Saltin B, Nazar K, Costill DL, et al. The nature of the training response; peripheral and central adaptations of one-legged exercise. *Acta Physiol Scand* 1976;96:289-305.
10. van Loon LJ, Jeukendrup AE, Saris WH, Wagenmakers AJ. Effect of training status on fuel selection during submaximal exercise with glucose ingestion. *J Appl Physiol* 1999;87:1413-20.
11. van Loon LJ. Use of intramuscular triacylglycerol as a substrate source during exercise in humans. *J Appl Physiol* 2004;97:1170-87.
12. Stellingwerff T, Boon H, Jonkers RA, et al. Significant intramyocellular lipid use during prolonged cycling in endurance-trained males as assessed by three different methodologies. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2007;292:E1715-23.
13. van Loon LJ, Koopman R, Stegen JH, Wagenmakers AJ, Keizer HA, Saris WH. Intramyocellular lipids form an important substrate source during moderate intensity exercise in endurance-trained males in a fasted state. *J Physiol* 2003;553:611-25.
14. Bergstrom J, Hultman E. A study of the glycogen metabolism during exercise in man. *Scand J Clin Lab Invest* 1967;19:218-28.
15. Ivy JL. Muscle glycogen synthesis before and after exercise. *Sports Med* 1991;11:6-19.
16. van Loon LJC, Saris WHM, Kruijshoop M, Wagenmakers AJM. Maximizing postexercise muscle glycogen synthesis: carbohydrate supplementation and the application of amino acid/protein hydrolyzate mixtures. *Am J Clin Nutr* 2000;72.
17. Sherman WM, Costill DL, Fink WJ, Miller JM. Effect of exercise-diet manipulation on muscle glycogen and its subsequent utilization during performance. *Int J Sports Med* 1981;2:114-8.
18. Jeukendrup AE, Jentjens R. Oxidation of carbohydrate feedings during prolonged exercise: current thoughts, guidelines and directions for future research. *Sports Med* 2000;29:407-24.
19. Coyle EF, Hagberg JM, Hurley BF, Martin WH, Ehsani AA, Holloszy JO. Carbohydrate feeding during prolonged strenuous exercise can delay fatigue. *J Appl Physiol* 1983;55:230-5.
20. Massicotte D, Peronnet F, Allah C, Hillaire Marcel C, Ledoux M, Brisson G. Metabolic response to [¹³C] glucose and [¹³C]fructose ingestion during exercise. *J Appl Physiol* 1986;61:1180-4.
21. Massicotte D, Peronnet F, Brisson G, Bakkouch K, Hillaire Marcel C. Oxidation of a glucose polymer during exercise: comparison with glucose and fructose. *J Appl Physiol* 1989;66:179-83.
22. Saris WH, Goodpaster BH, Jeukendrup AE, Brouns F, Halliday D, Wagenmakers AJ. Exogenous carbohydrate oxidation from different carbohydrate sources during exercise. *J Appl Physiol* 1993;75:2168-72.
23. Wagenmakers AJ, Brouns F, Saris WH, Halliday D. Oxidation rates of orally ingested carbohydrates during prolonged exercise in men. *J Appl Physiol* 1993;75:2774-80.
24. Stellingwerff T, Boon H, Gijzen AP, Stegen JH, Kuipers H, van Loon LJ. Carbohydrate supplementation during prolonged cycling exercise spares muscle glycogen but does not affect intramyocellular lipid use. *Pflugers Arch* 2007;454:635-47.
25. Hawley JA, Dennis SC, Noakes TD. Oxidation of carbohydrate ingested during prolonged endurance exercise. *Sports Med* 1992;14:27-42.
26. Jeukendrup AE. Carbohydrate and exercise performance: the role of multiple transportable carbohydrates. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 2010;13:452-7.

27. Jentjens RL, Jeukendrup AE. High rates of exogenous carbohydrate oxidation from a mixture of glucose and fructose ingested during prolonged cycling exercise. *Br J Nutr* 2005;93:485-92.
28. Jentjens RL, Shaw C, Birtles T, Waring RH, Harding LK, Jeukendrup AE. Oxidation of combined ingestion of glucose and sucrose during exercise. *Metabolism* 2005;54:610-8.
29. Trommelen J, Fuchs CJ, Beelen M, et al. Fructose and Sucrose Intake Increase Exogenous Carbohydrate Oxidation during Exercise. *Nutrients* 2017;9.
30. Maughan RJ, Watson P, Shirreffs SM. Heat and cold : what does the environment do to the marathon runner? *Sports Med* 2007;37:396-9.
31. Sawka MN, Burke LM, Eichner ER, Maughan RJ, Montain SJ, Stachenfeld NS. American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39:377-90.
32. Burke LM, van Loon LJC, Hawley JA. Postexercise muscle glycogen resynthesis in humans. *J Appl Physiol* (1985) 2017;122:1055-67.
33. Burke LM, Collier GR, Hargreaves M. Muscle glycogen storage after prolonged exercise: effect of the glycemic index of carbohydrate feedings. *J Appl Physiol* 1993;75:1019-23.
34. Keizer HA, Kuipers H, van Kranenburg G, Geurten P. Influence of liquid and solid meals on muscle glycogen resynthesis, plasma fuel hormone response, and maximal physical working capacity. *Int J Sports Med* 1987;8:99-104.
35. Fuchs CJ, Gonzalez JT, Beelen M, et al. Sucrose ingestion after exhaustive exercise accelerates liver, but not muscle glycogen repletion compared with glucose ingestion in trained athletes. *J Appl Physiol* (1985) 2016;120:1328-34.
36. Fuchs CJ, Gonzalez JT, van Loon LJC. Fructose co-ingestion to increase carbohydrate availability in athletes. *J Physiol* 2019;597:3549-60.
37. Gonzalez JT, Fuchs CJ, Betts JA, van Loon LJ. Glucose Plus Fructose Ingestion for Post-Exercise Recovery-Greater than the Sum of Its Parts? *Nutrients* 2017;9.
38. Gonzalez JT, Fuchs CJ, Betts JA, van Loon LJ. Liver glycogen metabolism during and after prolonged endurance-type exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2016;311:E543-53.
39. Zawadzki KM, Yaspelkis BBd, Ivy JL. Carbohydrate-protein complex increases the rate of muscle glycogen storage after exercise. *J Appl Physiol* 1992;72:1854-9.
40. Beelen M, Burke LM, Gibala MJ, van Loon LJ. Nutritional strategies to promote postexercise recovery. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2010;20:515-32.
41. Beelen M, Kranenburg J, Senden JM, Kuipers H, Loon LJ. Impact of caffeine and protein on postexercise muscle glycogen synthesis. *Med Sci Sports Exerc* 2012;44:692-700.
42. Cermak NM, van Loon LJ. The use of carbohydrates during exercise as an ergogenic aid. *Sports Med* 2013;43:1139-55.
43. Biolo G, Maggi SP, Williams BD, Tipton KD, Wolfe RR. Increased rates of muscle protein turnover and amino acid transport after resistance exercise in humans. *Am J Physiol* 1995;268:E514-20.
44. Phillips SM, Tipton KD, Aarsland A, Wolf SE, Wolfe RR. Mixed muscle protein synthesis and breakdown after resistance exercise in humans. *Am J Physiol* 1997;273:E99-107.
45. Roy BD, Tarnopolsky MA, MacDougall JD, Fowles J, Yarasheski KE. Effect of glucose supplement timing on protein metabolism after resistance training. *J Appl Physiol* 1997;82:1882-8.
46. Rasmussen BB, Tipton KD, Miller SL, Wolf SE, Wolfe RR. An oral essential amino acid-carbohydrate supplement enhances muscle protein anabolism after resistance exercise. *J Appl Physiol* 2000;88:386-92.
47. Tipton KD, Ferrando AA, Phillips SM, Doyle D, Jr., Wolfe RR. Postexercise net protein synthesis in human muscle from orally administered amino acids. *Am J Physiol* 1999;276:E628-34.
48. Groen BB, Horstman AM, Hamer HM, et al. Post-Prandial Protein Handling: You Are What You Just Ate. *PLoS One* 2015;10:e0141582.
49. Cermak NM, Res PT, de Groot LC, Saris WH, van Loon LJ. Protein supplementation augments the adaptive response of skeletal muscle to resistance-type exercise training: a meta-analysis. *Am J Clin Nutr* 2012;96:1454-64.
50. Jonvik KL, Paulussen KJM, Danen SL, et al. Protein Supplementation Does Not Augment Adaptations to Endurance Exercise Training. *Med Sci Sports Exerc* 2019;51:2041-9.
51. Knuiman P, van Loon LJC, Wouters J, Hopman M, Mensink M. Protein supplementation elicits greater gains in maximal oxygen uptake capacity and stimulates lean mass accretion during prolonged endurance training: a double-blind randomized controlled trial. *Am J Clin Nutr* 2019;110:508-18.
52. Koopman R, Pannemans DL, Jeukendrup AE, et al. Combined ingestion of protein and carbohydrate improves protein balance during ultra-endurance exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2004;287:E712-20.
53. Koopman R, Saris WH, Wagenmakers AJ, van Loon LJ. Nutritional interventions to promote post-exercise muscle protein synthesis. *Sports Med* 2007;37:895-906.
54. Koopman R, Beelen M, Stellingwerff T, et al. Coingestion of carbohydrate with protein does not further augment postexercise muscle protein synthesis. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2007;293:E833-42.
55. Phillips SM, Van Loon LJ. Dietary protein for athletes: from requirements to optimum adaptation. *J*

- Sports Sci 2011;29 Suppl 1:S29-38.
56. Gillen JB, Trommelen J, Wardenaar FC, et al. Dietary Protein Intake and Distribution Patterns of Well-Trained Dutch Athletes. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2017;27:105-14.
 57. Moore DR, Robinson MJ, Fry JL, et al. Ingested protein dose response of muscle and albumin protein synthesis after resistance exercise in young men. *Am J Clin Nutr* 2009;89:161-8.
 58. Groen BB, Res PT, Pennings B, et al. Intragastric protein administration stimulates overnight muscle protein synthesis in elderly men. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2012;302:E52-60.
 59. Res PT, Groen B, Pennings B, et al. Protein ingestion before sleep improves postexercise overnight recovery. *Med Sci Sports Exerc* 2012;44:1560-9.
 60. Trommelen J, van Loon LJ. Pre-Sleep Protein Ingestion to Improve the Skeletal Muscle Adaptive Response to Exercise Training. *Nutrients* 2016;8.
 61. Maughan RJ, Burke LM, Dvorak J, et al. IOC consensus statement: dietary supplements and the high-performance athlete. *Br J Sports Med* 2018;52:439-55.

Colofon

Correspondentie:

Prof.dr. L.J.C. van Loon
Hoogleraar Fysiologie van Inspanning
Vakgroep Humane Biologie
Universiteit van Maastricht
Postbus 616, 6200 MD Maastricht

Tel: 043-3881397
Fax: 043-3670976
E-mail: L.vanLoon@maastrichtuniversity.nl
Website: www.m3-research.nl

Cosun Nutrition Center
Burgemeester Lambooylaan 3,
1217 LB Hilversum
Tel: +31 (0)35 543 34 55
E-mail: info@cosunnutritioncenter.com
Website: www.cosunnutritioncenter.com

Eerste druk: november 2008
Eerste herziene versie (Engels, online publicatie): mei 2012
Tweede herziene versie (drukwerk en online publicatie):
februari 2013
Derde herziene versie (drukwerk en online publicatie):
januari 2020

De menselijke motor



Deze brochure biedt inzicht in de rol van inspanning en voeding in relatie tot het spiermetabolisme: van de noodzaak van voeding als bron van energie tot de opslag van brandstofvoorraden in het lichaam en het gebruik van deze energiebronnen tijdens sport. Het legt hiermee de wetenschappelijke basis voor het gebruik van specifieke (sport)voeding rondom sportieve (duur)inspanningen. Het betreft een basaal verhaal waarin wetenschappelijke diepgang met opzet is vermeden om de leesbaarheid te garanderen en sommige praktische zaken duidelijk op de voorgrond te laten treden. Het geheel wordt vergezeld van tips voor het verstandig gebruik van sportvoeding vóór, tijdens en na intensieve competitieve (duur)inspanning.

Prof.dr. L.J.C. van Loon
Hoogleraar Fysiologie van Inspanning
Vakgroep Humane Biologie
Universiteit van Maastricht