



Koolhydraten en sportvoeding

Prestatievermogen verbeteren met sportvoeding

Op basis van resultaten uit wetenschappelijk onderzoek geeft Kenniscentrum suiker en voeding in deze position paper haar standpunt over de rol van koolhydraten in sportvoeding.

KENNISCENTRUM

suiker & voeding

Koolhydraten en sportvoeding

Een gezonde voeding, aangepast aan de specifieke eisen die training en competitie vragen van de individuele sporter, kan doorgaans het prestatievermogen aantoonbaar verbeteren. Dit kan bereikt worden door verstandige keuzes te maken ten aanzien van de kwantiteit en kwaliteit van de voeding. Specifieke keuzes aangaande de samenstelling van de voeding en het gebruik van sportvoeding kan hierbij een belangrijke meerwaarde bieden. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van sportdranken, welke veelvuldig gebruikt worden om de beschikbaarheid van koolhydraten tijdens en na intensieve inspanning te optimaliseren. Een goede voeding, met inbegrip van het verstandig gebruik van sportdranken, garandeert geen topprestaties maar zonder de juiste voeding zal een optimale prestatie onbereikbaar blijven.

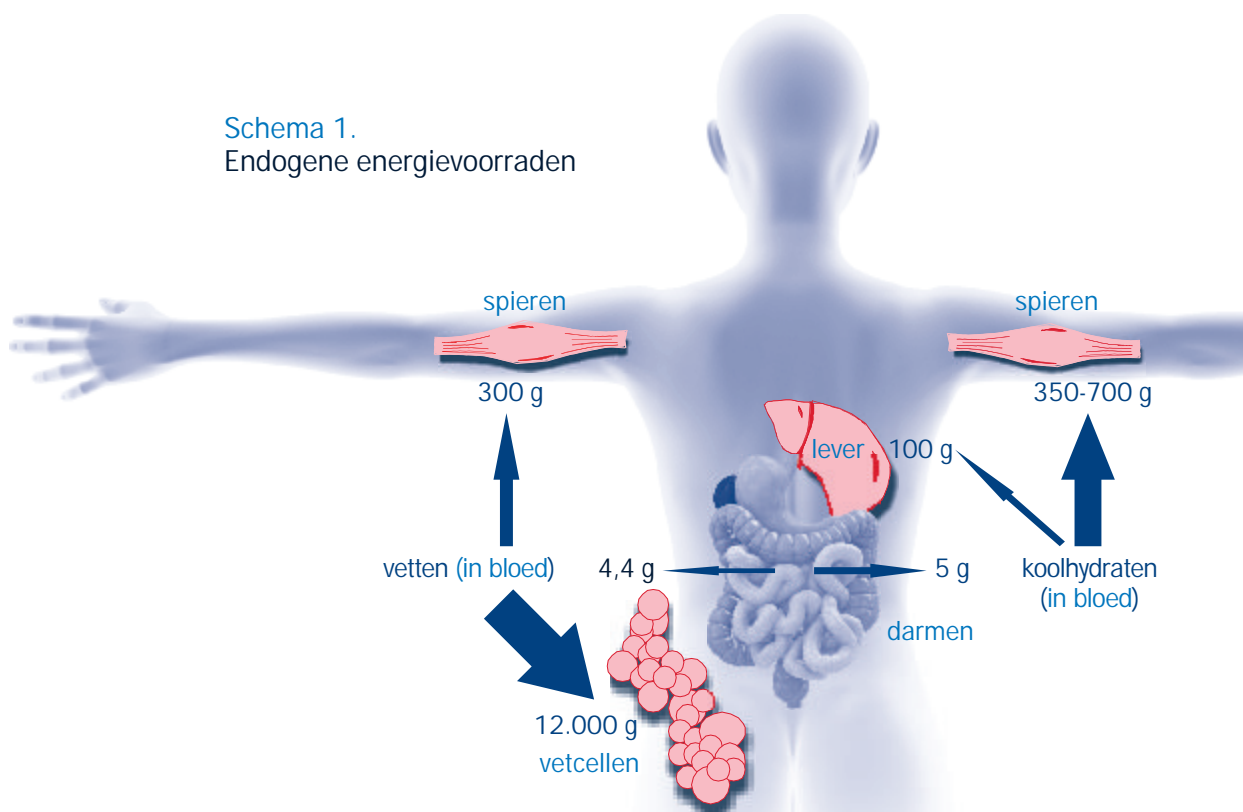
Op basis van resultaten uit wetenschappelijk onderzoek geeft Kenniscentrum suiker en voeding in deze position paper haar standpunt over de rol van koolhydraten in sportvoeding.

Inleiding

Koolhydraten en vetten zijn de belangrijkste brandstoffen die geoxideerd kunnen worden om de skeletspier van de benodigde energie, in de vorm van adenosine triphosphate (ATP), te voorzien. De relatieve bijdrage van deze brandstoffen aan de energiebehoefte tijdens inspanning wordt bepaald door de intensiteit en de duur van inspanning^{1,2}, evenals de training status van de individuele atleet³. Gedurende laag-tot-middelmatig intensieve inspanning (30-65% van het maximale zuurstof opname vermogen, oftewel de VO_{2max}) vormen vetten kwantitatief de belangrijkste brandstofbron. Zodra de inspanningsintensiteit stijgt, neemt de bijdrage van de koolhydraatoxidatie aanzienlijk toe en worden koolhydraten de belangrijkste energiebron tijdens intensieve inspanning¹.

Koolhydraten worden in ons lichaam opgeslagen als glycogeen in de lever en in de skeletspieren. Deze koolhydraatvoorraden omvatten minder dan 5% van

Schema 1.
Endogene energievoorraden



onze totale endogene energievoorraad⁴. Het gebruik van spierglycogeen draagt echter voor meer dan 50% bij aan de energiebehoefte tijdens langdurige inspanning van een middelmatige-tot-hoge intensiteit^{5,6}. De koolhydraat beschikbaarheid is daarom een belangrijke voorwaarde om prestaties te kunnen leveren tijdens intensieve training of competitie. Vermoeidheid en uitputting tijdens intensieve fysieke inspanning is dan ook vaak een gevolg van de depletie van voorraden spierglycogeen en/of een daling van de glucose concentratie in het bloed⁷. Om een optimale prestatie te kunnen leveren is het essentieel om gedurende intensieve inspanning van langere duur (>1-2 h) extra koolhydraten in te nemen.

1 Historisch perspectief

Veel onderzoek naar de invloed van koolhydraatsuppletie op het prestatievermogen is gebaseerd op studies die aan het begin van de vorige eeuw zijn uitgevoerd. Krogh and Lindhart⁸ waren de eersten die het belang van koolhydraten voor een optimale prestatie onderzochten; zij deden dit door de hoeveelheid koolhydraten in de voeding te manipuleren. De proefpersonen rapporteerden dat het gemakkelijker was om fysieke inspanning te leveren wanneer een koolhydraatrijke voeding in plaats van een koolhydraatarme (vetrijke) voeding gebruikt werd⁸. Enkele jaren later werd de meerwaarde van koolhydraatsuppletie tijdens inspanning pas echt aangetoond. Levine et al⁹ onderzochten de veranderingen in glucose waarden in het bloed bij atleten tijdens de Boston Marathon. Naar het einde van de race toe werden zeer lage bloedglucose waarden gerapporteerd. Op basis hiervan suggereerde Levine dat lage bloedglucose concentraties mogelijk vermoeidheid of uitputting veroorzaken⁹. Deze hypothese werd het daaropvolgende jaar getoetst tijdens de Boston Marathon van 1924. Een aantal atleten werd nu gevraagd om koolhydraten te consumeren tijdens de race. Koolhydraatsuppletie voorkwam de daling in de bloedglucose spiegel en verbeterde de prestaties bij deze atleten⁹. Daarmee is dit de eerste studie die de prestatiebevorderende effecten van koolhydraatsuppletie tijdens intensieve inspanning beschrijft.

In 1932, toonde Christensen¹⁰ aan dat een toename in de intensiteit van inspanning gepaard gaat met een grotere bijdrage van de koolhydraatoxidatie aan het totale energiegebruik. Dit onderzoek kreeg een verdere verdieping na de herintroductie van de spierbiopt techniek door Bergstrom et al^{6,11}. Deze onderzoekers waren de eersten die konden aantonen dat de omvang

van de glycogeenvoorraden in de spieren een essentiële rol spelen tijdens fysieke inspanning en dat het onvermogen om een bepaalde inspanning te continueren vaak gepaard gaat met een (te) lage voorraad spierglycogeen. Dezelfde onderzoekers stelden ook de relatie vast tussen voeding en de hoeveelheid spierglycogeen door aan te tonen dat de voorraad spierglycogeen eenvoudig gemanipuleerd kan worden door de hoeveelheid koolhydraten in de voeding te veranderen¹². Hierop volgde de observatie dat een hogere voorraad glycogeen het vermogen om intensieve inspanning langer vol te houden vergroot¹². Met deze studies werd de basis gelegd voor het concept 'koolhydraat laden', dat inmiddels een standaard procedure is geworden binnen de (duur)sport. Middels het supercompenseren van een geleegde voorraad spierglycogeen door relatief veel koolhydraten in te nemen kan het prestatievermogen tijdens de daaropvolgende intensieve duurinspanning (>90 min) aanzienlijk worden verbeterd met 2-3%¹³. Het baanbrekende werk van Bergstrom en Hultman⁶ was het startpunt voor talloze studies naar de invloed van koolhydraatname tijdens inspanning op de spierstofwisseling^{14,23}. Deze studies vormen samen een solide basis voor de bewijsvoering dat koolhydraatname tijdens inspanning de sportieve prestaties aanzienlijk kan verbeteren^{17,21,24,32}. In de praktijk heeft dit geleid tot het drinken van koolhydraatrijke dranken door sporters, dat vervolgens ook resulteerde in de ontwikkeling en commercialisatie van sportdranken.



Clarence DeMar verbreekt het wereldrecord in 1924 tijdens de marathon van Boston. Hij zou deze zeven maal winnen.

Het gebruik van koolhydraatrijke sportdranken tijdens intensieve (duur)inspanning is inmiddels gemeengoed geworden en wordt zowel door de recreatieve als de professionele atleet toegepast tijdens intensieve training en competitie.

Duuratleten krijgen momenteel het advies om een koolhydraatrijke voeding te gebruiken, om aan de verhoogde koolhydraatbehoefte tijdens training en competitie te kunnen voldoen. Koolhydraatrijke voeding wordt geconsumeerd voor, tijdens en onmiddellijk na intensieve inspanning om de beschikbaarheid van de koolhydraten te optimaliseren. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van tal van sportvoedingsproducten, die koolhydraten aanbieden in allerhande vormen (vloeibaar, gelvorm en vast) met daarin verschillende typen koolhydraten (glucose, glucose polymeren zoals maltodextrines, fructose en sacharose) in verschillende concentraties.

Deze position paper beschrijft de relevantie voor koolhydraatsuppletie tijdens en onmiddellijk na intensieve (duur) inspanning. In het bijzonder zal ingegaan worden op de soort, hoeveelheid en vorm waarin deze koolhydraten genuttigd zouden moeten worden om de sportieve prestaties te maximaliseren. Een recente meta-analyse heeft de resultaten van 88 gerandomiseerde cross-over studies bekeken met als doel de ergogene effecten van koolhydraatinname te onderzoeken. Koolhydraatinname tijdens inspanning bleek het prestatievermogen te verbeteren met maar liefst 2-6%³³. Hoewel het dus wel duidelijk is dat koolhydraatinname tijdens inspanning het prestatievermogen kan verbeteren, blijven er nog veel vragen bestaan ten aanzien van de mogelijke mechanismen die hieraan ten grondslag zouden kunnen liggen. In de volgende secties zullen we de twee meest gangbare mechanismen bespreken die mogelijk kunnen verklaren waarom koolhydraatsuppletie tijdens intensieve inspanning de prestatie kan verbeteren: 1) het sparen van spierglycogeen en 2) het voorkomen van een daling van de bloedglucose concentratie tijdens inspanning.

1.1 Spierglycogeen

Vermoeidheid en uitputting tijdens een intensieve duurinspanningsessie gaan vaak gepaard met een lediging van de voorraad spierglycogeen in de actieve spieren. Aangenomen wordt dat door de exogene aanvoer van koolhydraten tijdens inspanning de snelheid waarmee spierglycogeen wordt afgebroken (glycogenolyse) vertraagt, waardoor de beperkte voorraad glycogeen enigszins gespaard kan worden en het moment van uitputting uitgesteld wordt. Deze theorie werd als eerste onderzocht door Bergstrom and



Hultman⁶. Zij rapporteerden dat intraveneuze glucose infusie de netto afname van spierglycogeen met 20% kan verminderen gedurende een fietstest van een uur. Sindsdien zijn er verschillende studies gepubliceerd welke laten zien dat koolhydraatinname tijdens inspanning, de daling in de spierglycogeen met maar liefst 20-28% kan verminderen^{5, 20, 24, 34-37}. Daar staan echter ook enkele studies tegenover die dit glycogeen sparende effect van koolhydraatsuppletie niet kunnen bevestigen^{17, 38-41}. Een mogelijke verklaring voor deze discrepantie in de literatuur is het tijdstip waarop de verschillende studies hebben gekeken naar de mate van glycogeen gebruik tijdens inspanning met en zonder koolhydraatsuppletie. Glycogeen sparen lijkt namelijk vooral relevant gedurende het eerste uur van inspanning, wanneer de spier aangewezen is op brandstoffen die al aanwezig zijn in de spiervezels zelf. Een studie van Stellingwerff et al³⁶ laat zien dat spierglycogeen vooral gebruikt wordt in het eerste uur van inspanning en dat koolhydraatsuppletie tijdens inspanning het gebruik van spierglycogeen met name gedurende deze beginfase van inspanning doet afnemen. Dit impliceert dat atleten al vanaf de start van een wedstrijd moeten beginnen met het innemen van sportdranken om maximaal te kunnen profiteren van de voordelen van koolhydraatsuppletie tijdens duurinspanning³⁶.

Daarnaast zijn er ook studies die laten zien dat sparen van glycogeen specifiek is voor het type spiervezel dat met name gebruikt wordt. Door spierbiopten af te nemen voor en na 60 min intensief hardlopen (70% VO_2 max) met en zonder het gebruik van koolhydraatsupplementen, toonde Tsintzas et al³⁴ aan dat er 28% minder spierglycogeen werd gebruikt wanneer koolhydraten werden ingenomen tijdens inspanning. Wanneer echter naar de specifieke spiervezels werd gekeken bleken alleen de meer oxidatieve vezels (de zogenaamde type I spiervezels) glycogeen te hebben gespaard³⁴. In tegenstelling, wanneer minder intensieve inspanning werd uitgevoerd (3 uur fietsen op 63% VO_2 max), bleek het glycogeen sparende effect alleen op te treden in de meer glycolytische spiervezels (de type II spiervezels)³⁶. Deze verschillen zijn toe te schrijven aan de soort inspanning (hardlopen versus fietsen) als ook de duur en intensiteit waarmee de inspanning wordt uitgevoerd. Naarmate de inspanning langer duurt, zal het glycogeen sparen namelijk meer optreden in de type II vezels die pas later tijdens de inspanning intensief gebruikt worden⁴². Omdat de meeste studies geen vezelspecifieke analyses hebben uitgevoerd is het moeilijk om het glycogeen sparende effect van koolhydraatsuppletie aan te tonen. Kortom, koolhydraatsuppletie tijdens intensieve inspanning van relatief lange duur (>1 uur) vermindert het gebruik van de spierglycogeen voorraad en draagt zo bij aan een groter vermogen om een bepaalde inspanning langer vol te kunnen houden. In de praktijk betekent dit dat de atleet die koolhydraatsuppletie verstandig toepast meer spierglycogeen tot zijn of haar beschikking zal hebben in de eindfase van een wedstrijd. Hierdoor zal deze atleet beter kunnen presteren en in staat zijn tot een indrukwekkende eindspurt of een succesvolle ontsnapping uit het (wieler)peloton.

1.2 Bloedglucose

Gebaseerd op de bevindingen van Levine et al⁹ wordt gesuggereerd dat koolhydraatsuppletie tijdens inspanning het duurprestatievermogen verbetert, omdat het een daling van de bloedglucose concentratie voorkomt en bijdraagt aan het kunnen continueren van een hoge koolhydraat oxidatie snelheid. Coyle et al¹⁷ toonden jaren later aan dat koolhydraatsuppletie tijdens een fietstest tot uitputting (70% VO_2 max) een daling in de bloedglucose concentratie voorkomt en een hoge koolhydraat oxidatie snelheid mogelijk maakt gedurende de gehele test. De wielrenners waren in staat om de inspanning een uur langer vol te houden wanneer ze koolhydraathoudende dranken consumeerden¹⁷. In een vervolgstudie fietste een groep wielrenners driemaal tot uitputting (70% VO_2 max)

waarbij een aanzienlijke daling in de bloedglucose concentratie werd bereikt²⁵. Na uitputting (~170 min.) mochten de proefpersonen 20 minuten rusten waarna ze opnieuw op de fiets moesten stappen. Tijdens deze inspanning kregen de proefpersonen: 1) oraal glucose polymeren, 2) een intraveneuze glucose infusie of 3) oraal een placebo toegediend. Wanneer glucose (oraal of intraveneus) werd toegediend herstelde de glucose concentratie in het bloed en kon de inspanning langer volgehouden worden in vergelijking met de placebo behandeling. Op basis hiervan concludeerden de auteurs dat een daling in de bloedglucose concentratie in belangrijke mate bijdraagt aan de vermoeidheid die optreedt tijdens inspanning en dat deze hersteld kan worden door glucose ingestie of infusie²⁵. Meer bewijs dat koolhydraatsuppletie een daling in de bloedglucose concentratie tijdens inspanning kan voorkomen werd geleverd door Nybo et al⁴³. Een inspanningssessie van 3 uur op een intensiteit van 60% VO_2 max resulteerde in een daling van de bloedglucose concentratie van 4.5 tot 3 $mmol \cdot L^{-1}$ en een afname in geleverd vermogen. Wanneer deze atleten 200 g koolhydraten innamen, bleef de bloedglucose concentratie gehandhaafd op 4.5 $mmol \cdot L^{-1}$ en werd de inspanning als minder zwaar ervaren, zonder (meetbaar) verlies van vermogen⁴³. In tegenstelling tot deze bevindingen zijn er ook studies die het prestatievermogen niet wisten te verbeteren door het voorkomen van het optreden van een te lage bloedglucose spiegel¹⁵. Ondanks het feit dat de bloedglucose concentratie werd gehandhaafd door het geven van 114 g koolhydraten tijdens een inspanningstest tot uitputting (60-65% VO_2 max), bleek de tijd tot uitputting niet toegenomen en was ook het subjectieve gevoel van vermoeidheid niet verminderd in vergelijking met de placebo test¹⁵. Het is dan ook niet vreemd dat Claassen⁴⁴ een hoge variabiliteit in de relatie tussen een verlaagde bloedglucose spiegel en een verminderd prestatievermogen rapporteerde. Zelfs wanneer de bloedglucose concentratie op peil werd gehouden trad bij veel atleten uitputting op voordat de inspanningstest (150 min op 70% VO_2 max) was voltooid. Andere publicaties bevestigen dat er geen hard bewijs is voor de veronderstelde relatie tussen een sterke daling van de bloedglucose concentratie en een verminderd prestatievermogen^{45,46}. Kortom, hypoglycemie kan wel degelijk een rol spelen bij het optreden van uitputting tijdens zware inspanning maar het is zeker niet de enige factor die leidt tot het onvermogen om een bepaalde inspanning te kunnen continueren. Hoewel koolhydraatsuppletie een daling in de bloedglucose concentratie tijdens intensieve inspanning effectief kan voorkomen, leidt de preventie van hypoglycemie niet zonder meer tot een verbeterd prestatievermogen.



intensief en lange duur

2 Koolhydraatinname tijdens duurinspanning

Hoewel het nog niet geheel duidelijk is hoe koolhydraatsuppletie tijdens inspanning het prestatievermogen verbetert bij de verschillende inspanningstaken, is er wel voldoende bewijs dat koolhydraatsuppletie het prestatievermogen verbetert bij intensieve duurinspanning (>2 uur). Een voorwaarde hiervoor is natuurlijk wel dat de ingenomen koolhydraten effectief opgenomen en geoxideerd kunnen worden. Het vermogen om koolhydraten die tijdens inspanning worden ingenomen effectief te oxideren, wordt bepaald door verschillende factoren zoals; de soort koolhydraten, de hoeveelheid koolhydraten, en de intensiteit van de inspanning. Wanneer voldoende koolhydraten worden ingenomen kan de oxidatiesnelheid oplopen tot $1.0-1.1 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ tijdens intensieve duurinspanning. De bijdrage van koolhydraten aan de energie voorziening neemt toe naarmate de inspanningsintensiteit wordt verhoogd. Dit gaat ook op voor exogene koolhydraat oxidatiesnelheden. Pirnay et al⁴⁷ observeerde lagere exogene koolhydraat oxidatiesnelheden tijdens laag- versus middelmatig intensieve inspanning. Wanneer de inspanningsintensiteit echter verhoogd werd boven de

60-75% VO_2max , bleek er geen verdere toename in de exogene koolhydraat oxidatiesnelheid op te treden⁴⁸. Dus maximale exogene koolhydraat oxidatiesnelheden worden bereikt tijdens inspanning van een middelmatige tot hoge intensiteit (>50-60% VO_2max). Om dit te kunnen realiseren dienen wel de juiste soort en hoeveelheid koolhydraten ingenomen te worden.

2.1 Hoeveelheid en type koolhydraten

De exogene koolhydraat oxidatiesnelheid tijdens inspanning is mede afhankelijk van de soort koolhydraten die worden ingenomen⁴⁹. De oxidatiesnelheden van tijdens inspanning ingenomen fructose, galactose, sacharose, maltose en verschillende glucose polymeren zijn alle vergeleken met de snelheid waarop exogeen glucose verbrand kan worden. Hieruit blijkt de oxidatiesnelheid van fructose iets lager te liggen dan die van glucose⁵⁰. De oxidatiesnelheid van galactose ligt bijna 50% onder die van glucose^{50,51}. De lagere oxidatiesnelheden van exogeen fructose en galactose zijn toe te schrijven aan mogelijke verschillen in de digestie en absorptie kinetiek in de darm maar ook aan de omzetting van deze monosachariden in de lever in bruikbare substraten (glucose of lactaat) voor de skeletspier. De oxidatiesnelheden van maltose, sacharose en glucose polymeren (maltodextrine) blijken niet meetbaar

verschillend van die van glucose. Ook blijken er geen duidelijke verschillen te bestaan in de oxidatiesnelheid van oraal ingenomen glucose polymeren met een hoog- of laag moleculair gewicht. Glucose polymeren met een hoog moleculair gewicht worden veelvuldig gebruikt in sportdranken, omdat hiermee een grotere hoeveelheid koolhydraten in dranken verwerkt kan worden zonder de osmolaliteit aanzienlijk te verhogen⁵². Omdat glucose en glucose polymeren met een relatief hoge maximale snelheid ($1.0-1.1 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$) geoxideerd kunnen worden, wordt atleten aangeraden om tijdens intensieve inspanning van langere duur (60-90 min) koolhydraatsupplementen te gebruiken die hoofdzakelijk uit deze soorten koolhydraten bestaan. Dit komt enigszins overeen met de adviezen opgesteld door het American College of Sports Medicine (ACSM) waarbij de inname van 30 - 60 gram koolhydraten per uur wordt geadviseerd voor intensieve inspanning van langere (>60 min) duur⁵³.

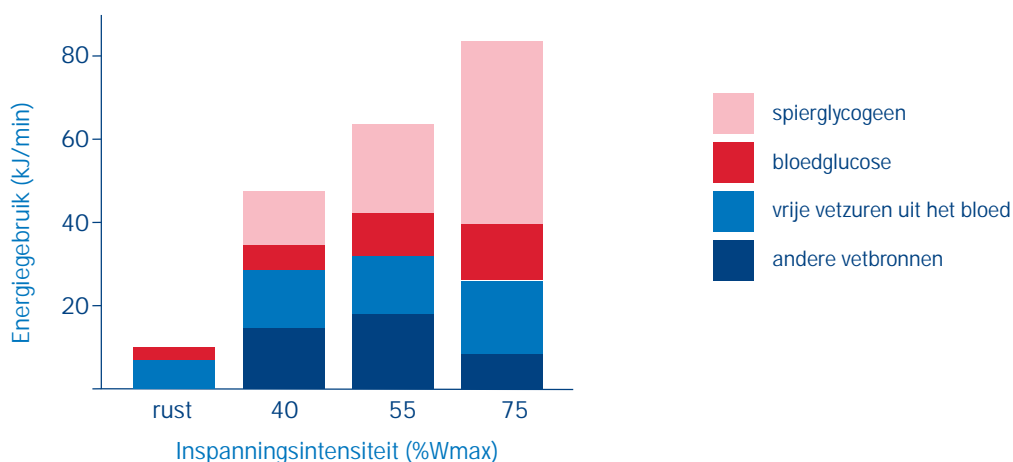
Er zijn weinig studies die gekeken hebben naar de dosis-respons effecten van koolhydraatsuppletie tijdens inspanning. Toch zijn er aanwijzingen dat een dergelijke dosis-respons relatie wel degelijk bestaat. Hogere oxidatiesnelheden van exogene koolhydraat lijken gepaard te gaan met betere prestaties. Smith et al.⁵⁴ onderzochten de invloed van de inname van 15, 30 en 60 g koolhydraten per uur op het prestatievermogen tijdens een 20 km tijdrit na 2 uur intensief fietsen (77% VO_2max). Tijdens de tijdrit bleek het geleverde

vermogen het hoogst wanneer 60 g koolhydraten per uur werd ingenomen, terwijl het laagste vermogen werd gemeten wanneer slechts 15 g per uur werd ingenomen⁵⁴. De oxidatiesnelheden van exogene koolhydraten lagen aanzienlijk hoger wanneer 60 g in plaats van 15 g koolhydraten per uur werd geconsumeerd. Wanneer echter meer dan 1 g glucose of glucose polymeren per minuut wordt gegeven (>60 g per uur), dan neemt de maximale oxidatiesnelheid niet verder meer toe. Om deze reden werd atleten lange tijd geadviseerd om nooit meer dan 60-70 g koolhydraten per uur in te nemen. Desondanks blijken veel topatleten tijdens zware duurinspanning meer koolhydraten tot zich te nemen. Dit leidde tot verder onderzoek dat inmiddels heeft aangetoond dat het mogelijk is om oxidatiesnelheden van exogene koolhydraten te realiseren die ruim hoger liggen dan de eerder gestelde plafondwaarde van 1.0 g per min. Dit is mogelijk onder specifieke condities waarbij verschillende typen koolhydraten naast elkaar worden ingenomen, de zogenaamde multiple transporteerbare koolhydraten.

2.2 Multiple transporteerbare koolhydraten

De laatste jaren zijn er verschillende studies verschenen die suggereren dat het innemen van sportdranken, met daarin multiple transporteerbare koolhydraten, de oxidatiesnelheid van exogene koolhydraten verder kan doen toenemen⁵⁵⁻⁶⁰ en het prestatievermogen tijdens intensieve duurinspanning

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 de glycogeen uit de lever), spierglycogeen, bloed vrije vetzuren (afkomstig van het vetweefsel) en andere vetbronnen (somma van het gebruik van de triglyceriden uit de spier en de lipoproteïnen in het bloed) zijn aangegeven in de legenda⁴¹.

kan verbeteren⁶¹. Op basis van het in de vorige paragraaf beschreven onderzoek wordt aangenomen dat de oxidatiesnelheid van exogene koolhydraten een plafondwaarde kent van $\sim 1.0\text{-}1.1 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$, ongeacht de hoeveelheid koolhydraten die ingenomen wordt. Hoewel nog veel vragen onbeantwoord blijven, lijkt de beperking voor deze oxidatiesnelheid van exogene koolhydraten tijdens inspanning te liggen in de opname capaciteit voor glucose in de darm⁶². Glucose wordt in de darm opgenomen via een natriumafhankelijk transport eiwit met de naam SGLT1. Dit transporteiwit is aanwezig in de darmwand en verzorgt het transport van glucose en galactose, maar niet voor dat van fructose, over de darmwand⁶³. Wanneer grote hoeveelheden glucose of glucose polymeren worden ingenomen ($>1.2 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$) worden deze transporters volledig verzadigd, waardoor de snelheid van exogene glucose opname en daarmee de oxidatie ervan beperkt wordt^{56, 59}. Fructose wordt niet getransporteerd door SGLT1 maar door een niet natrium-afhankelijk transporteiwit in de darmwand, GLUT-5⁶⁴. Theoretisch zou een gecombineerde inname van glucose en fructose de totale opnamecapaciteit voor exogene koolhydraten dus moeten kunnen verhogen, waarmee de oxidatiesnelheid van exogene koolhydraten verhoogd zou kunnen worden. Recente studies bevestigen deze hypothese en tonen aan dat de gecombineerde inname van glucose en fructose ($>1.2\text{-}1.8 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$) tijdens inspanning de oxidatiesnelheid van exogene koolhydraten met maar liefst 20-55% verhoogd in vergelijking met een situatie waarin een iso-calorische hoeveelheid glucose of glucose polymeren wordt gegeven^{55-60, 65}.

Jentjens et al.⁵⁸ liet 8 getrainde wielrenners viermaal een inspanningstest uitvoeren waarbij A) water, B) $1.2 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ glucose, C) $1.8 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ glucose of D) $1.2 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ glucose plus $0.6 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ fructose werden ingenomen. De oxidatiesnelheid van exogeen

glucose bleek niet te verschillen wanneer 1.2 of $1.8 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ werd ingenomen (oxidatiesnelheid: $0.83 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$), maar de gecombineerde inname van glucose plus fructose resulteerde in een $\sim 55\%$ hogere oxidatiesnelheid (oxidatiesnelheid: $1.26 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$). In een vervolgstudie⁵⁹ liet dezelfde onderzoeksgroep zien dat het innemen van een grote hoeveelheid glucose en sacharose ($1.2 + 0.6 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$) tot hogere oxidatiesnelheden van exogene koolhydraten leidt dan wanneer eenzelfde hoeveelheid glucose ($1.8 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$) of glucose plus maltose ($1.2 + 0.6 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$) werd ingenomen. De oxidatiesnelheden van exogene koolhydraten lijken niet verder toe te nemen wanneer grotere hoeveelheden glucose plus sacharose worden ingenomen⁵⁷. Wanneer we de verschillende studies van Jeukendrup et al.^{55-59, 65-70} vergelijken, lijkt de maximale oxidatiesnelheid van exogene koolhydraten ergens in de buurt van $1.75 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ te liggen, te bereiken met een gecombineerde inname van glucose plus fructose ($1.2 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ glucose + $1.2 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ fructose). Een hogere oxidatiesnelheid van exogene koolhydraten kan resulteren in betere duurprestaties. Wanneer multiple transporteerbare koolhydraten werden ingenomen tijdens inspanning bleken de subjectieve gevoelens van vermoeidheid lager⁷¹. Daarnaast is aangetoond dat de gecombineerde inname van glucose en fructose tijdens inspanning de prestatie tijdens een daaropvolgende tijdrit van 1 uur aanzienlijk verbetert⁶¹. Getrainde wielrenners kregen water, glucose ($1.8 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$) of een combinatie van glucose ($1.2 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$) en fructose ($0.6 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$) tijdens 2 uur inspanning op 55% van het maximaal vermogen⁶¹. Hierna startten de proefpersonen met een tijdrit van ~ 1 uur. Glucose inname voorafgaand aan de tijdrit, verbeterde de tijdrit prestatie met maar liefst 10%. Wanneer glucose plus fructose werden ingenomen bleek dat de tijdrit prestatie nog eens 8% verbeterde in

Tabel 1. Koolhydraat gebruik tijdens verschillende soorten duurinspanning

Inspanning	Koolhydraten	Advies	Soort koolhydraten	MT Koolhydraten
< 30 min	geen	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
30-75 min	zeer weinig	mondspoelen	meeste soorten	voorkeur
1-2 uur	weinig	tot 30 g/uur	meeste soorten	voorkeur
2-3 uur	middelmatig	tot 60 g/uur	glucose, glucose polymeren	voorkeur
> 2.5 uur	veel	tot 90 g/uur	MT koolhydraten	noodzakelijk

MT koolhydraten = multiple transporteerbare koolhydraten (glucose en fructose). Deze adviezen zijn voor atleten tijdens intensieve duurinspanning ($>17 \text{ kJ/min}$) die hun prestatie willen maximaliseren. Wanneer de inspanningsintensiteit lager ligt dienen de geadviseerde hoeveelheden koolhydraten naar beneden bijgesteld te worden (Tabel gebaseerd op Jeukendrup et al., 2008).

vergelijking met de test waarin alleen glucose werd ingenomen. Dit is de eerste studie die laat zien dat het gebruik van multiple transporteerbare koolhydraten ook een meerwaarde kan hebben op het prestatievermogen⁶¹. Meer recente studies bevestigen de meerwaarde van het gebruik van multiple transporteerbare koolhydraten tijdens intensieve duurinspanning⁷². Mogelijk zijn deze effecten niet alleen toe te schrijven aan de hogere oxidatiesnelheden van exogene koolhydraten maar ook aan het minder frequent voorkomen van maag- en/of darmklachten wanneer grote hoeveelheden koolhydraten ingenomen worden tijdens inspanning^{72,73}. Samenvattend, inname van multiple transporteerbare koolhydraten (glucose en fructose) tijdens intensieve duurinspanning (>90 min) kan de maximale oxidatiesnelheid van exogene koolhydraten aanzienlijk doen toenemen wanneer meer dan 1.2 g glucose of glucose polymeren worden ingenomen.

2.3 Vloeibaar of vast?

Koolhydraatinname tijdens inspanning verbetert het prestatievermogen ongeacht de vorm waarin deze koolhydraten worden ingenomen (vloeibaar, gel of als vaste voeding)^{20,68,69,74-76}. Hargreaves et al²⁰ gaven koolhydraten tijdens inspanning in de vorm van een energie-reep (43 g koolhydraten, 9 g vet en 3 g eiwit) en zagen een 46% verbetering in de sprintcapaciteit na een duurttest van 4 uur. Vergelijkbare bevindingen worden gerapporteerd na inname van vloeibare of vaste koolhydraatsupplementen^{75,76}. Murdoch et al vonden geen significante verschillen in plasmaglucoze concentraties tijdens intensieve inspanning na het innemen van een bananensmoothie (semi-vloeibaar) of gepelde bananen vlak voor de inspanning⁷⁴. In een meer recente studie, toonde Pfeiffer et al⁶⁹ aan dat de oxidatiesnelheid van exogene koolhydraten niet verschilt wanneer de koolhydraatsupplementen worden aangeboden als gel⁶⁹, vaste voeding⁶⁸ of vloeibaar. Kortom, de vorm waarin koolhydraten worden gegeven tijdens inspanning lijkt weinig invloed te hebben op de prestatiebevorderende effecten van koolhydraatsuppletie. Het is dan ook aan te raden om de vorm waarin de koolhydraten worden gegeven af te laten hangen van de voorkeur van de atleet, evenals de hoeveelheid water die ingenomen moet worden om verlies van transpiratievocht (zo goed mogelijk) te compenseren. Natuurlijk blijft de afstemming tussen koolhydraat- en waterinname altijd noodzakelijk om een onvertraagde maaglediging te kunnen garanderen en maag- en darmproblemen te voorkomen.





intensief en korte duur

3 Koolhydraatsuppletie tijdens intensieve inspanning van korte duur

Gezien de beperkte beschikbaarheid van de endogene koolhydraatvoorraden is het niet verwonderlijk dat koolhydraatsuppletie tijdens inspanning van langere duur de prestatie aanzienlijk kan verbeteren. Verrassend genoeg blijkt het gebruik van koolhydraatsupplementen ook de prestatie te kunnen verhogen bij meer intensieve inspanning (>75% VO_2 max) van kortere duur (~60 min)^{7, 77-81}. Jeukendrup et al⁷⁸ lieten getrainde wielrenners een tijdrit van 40 km fietsen (~1 uur) met en zonder koolhydraatsuppletie. Na koolhydraatsuppletie werd de tijdrit ongeveer 1 min sneller gereden, een 2.3% toename in het prestatievermogen⁷⁸. Er is eigenlijk geen duidelijke verklaring voor een dergelijk ergoog effect omdat de endogene koolhydraat beschikbaarheid toereikend zou moeten zijn voor een dergelijke tijdrit. De proportionele bijdrage van spierglycogeen aan het energiegebruik tijdens een dergelijke kortdurende inspanning is veel groter dan dat van plasma glucose maar zeker niet dusdanig dat de voorraden spierglycogeen uitgeput kunnen raken binnen dit tijdsbestek^{1, 2}. Daarnaast is exogeen glucose ook niet nodig om de bloedglucose concentratie op peil te

houden, omdat deze kortdurende inspanningen vaak zelfs gepaard gaan met een lichte stijging van de glucose concentratie in het bloed⁷⁹. Kortom, er moet een andere reden zijn waarom koolhydraatsuppletie tijdens korte duurinspanning het prestatievermogen zou kunnen verbeteren.

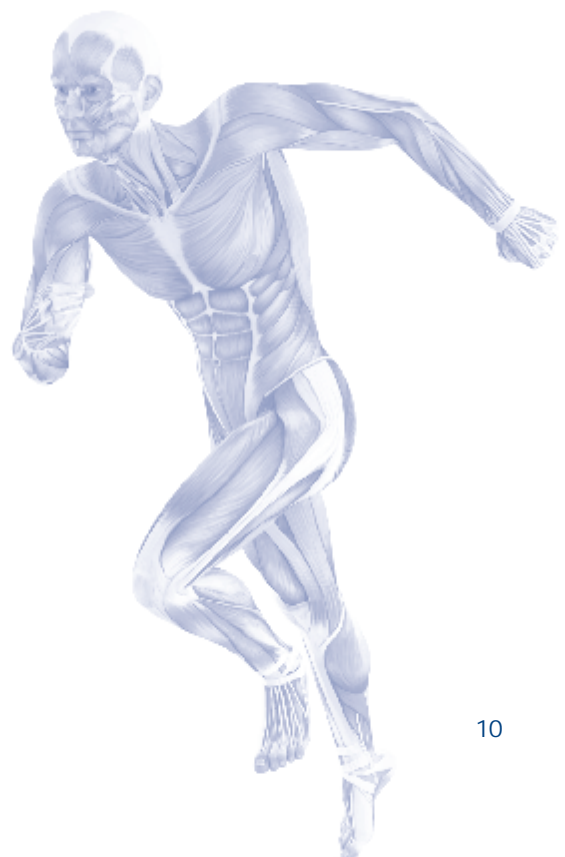
3.1 Koolhydraatinname en het centraal zenuwstelsel
Om een antwoord te krijgen op de vraag hoe koolhydraatsuppletie een positief effect kan hebben op het prestatievermogen tijdens korte duurinspanning voerden Carter et al⁸² een studie uit waarin glucose of een placebo intraveneus werden toegediend tijdens een tijdrit van ~1 uur. Intraveneuze glucose infusie ($1.0 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$) verhoogde de beschikbaarheid van glucose in het bloed en leidde tot een toename in de glucose oxidatie. Dit bleek echter geen enkel effect te hebben op de prestatie in de tijdrit⁸². Hierna werd de hypothese opgesteld dat een positief effect van glucose inname mogelijk al optreedt voordat exogeen glucose opgenomen en gemetaboliseerd is. Om dit te toetsen werd een vervolgstudie uitgevoerd waarin vergelijkbare wielrenners wederom eenzelfde tijdrit uitvoerden waarbij ze regelmatig hun mond spoelden met een koolhydraat houdende drank of een placebo (water met een zoetstof)⁸³. Op gezette tijden werd de koolhydraat- of placebodrank dus in de mond genomen maar

vervolgens weer uitgespuugd zodat de exogene koolhydraten niet opgenomen konden worden. Tot ieders verbazing resulteerde het mondspoelen met koolhydraten (6.4% maltodextrine oplossing) tot een 2.8% verbetering van de prestatie vergeleken met de placebo test. Op basis hiervan wordt gespeculeerd dat de mondholte mogelijk receptoren bevat die bij de aanwezigheid van glucose signalen naar de hersenen sturen. Vergelijkbare mechanismen zijn eerder ook aangetoond in de respons op rehydratie en inspanning in de hitte^{84, 85}. Het is dus mogelijk dat de aanwezigheid van koolhydraten in de mondholte al een signaalcascade in gang zet die het centraal zenuwstelsel laat weten dat op korte termijn koolhydraten beschikbaar zullen komen. Dit leidt mogelijk tot een verminderd gevoel van vermoeidheid, hetgeen de prestatie zou kunnen verbeteren. Andere onderzoekers konden de bevindingen van Carter et al⁸³ echter niet herhalen⁸⁶. Sindsdien zijn er verschillende studies over dit onderwerp gepubliceerd en deze hebben wel⁸⁷⁻⁹⁰ of geen⁹¹ ergoegen effect kunnen aantonen na mondspoelen met een koolhydraatoplossing in verschillende inspanningstesten. De discrepantie in de literatuur is mogelijk toe te schrijven aan verschillen in de voedingsstatus van de proefpersonen in deze studies. Er is gesuggereerd dat de positieve effecten van mondspoelen met een koolhydraatdrink mogelijk sterker zijn wanneer proefpersonen nuchter zijn⁸³ dan wanneer ze pas gegeten hebben^{86, 91}. Mogelijk speelt de beschikbare hoeveelheid leverglycogeen hier een belangrijke modulerende rol.

De hypothese dat receptoren in de mondholte de aanwezigheid van koolhydraten zouden kunnen detecteren en daarop een stimulus kunnen geven aan het centraal zenuwstelsel is niet zomaar uit de lucht gegrepen. Haase en collega's⁹² hebben functionele magnetische resonantie spectroscopie (fMRI) gebruikt om de centrale response op smaak te onderzoeken onder verschillende condities zoals honger en verzadiging. Deze studies tonen aan dat er allerlei gebieden in de hersenen zijn die meer geactiveerd worden wanneer de smaak wordt getest in een conditie waarin een persoon honger heeft. Daarnaast bleken koolhydraten de meest uitgesproken reacties op te wekken, meer dan andere stimuli zoals verschillende kunstmatige zoetstoffen^{92, 93}. Het feit dat verschillende hersengebieden wel oplichtten bij inname van koolhydraten en niet bij de inname van non-calorische zoetstoffen lijkt een teken aan de wand^{92, 93} en geeft onderbouwing aan de suggestie dat mondspoelen met koolhydraten ergoegen kan zijn. Daarnaast geeft het ook onderbouwing aan de veronderstelling dat dergelijke centrale effecten van mondspoelen met

koolhydraten afhankelijk kunnen zijn van de voedingsstatus van de atleet in kwestie⁹². Toch laat een recente studie van Fares et al⁸⁸ zien dat mondspoelen met koolhydraten ergoegen kan zijn in zowel een gevaste als ook een gevoede toestand. Het mondspoelen met koolhydraten verbeterde de tijd tot uitputting tijdens een fietstest op 60% Wmax uitgevoerd na een overnacht vasten als ook na het eten van een koolhydraatrijke maaltijd. Deze bevindingen lijken echter niet in overeenstemming met eerder werk in de gevoede toestand⁸⁶. Dit is mogelijk toe te schrijven aan het feit dat in de studie van Fares et al⁸⁸ de proefpersonen ongetraind waren en dat prestatievermogen werd getest met een uitputtingstest in tegenstelling tot een tijdrif.

Vanuit praktisch oogpunt heeft het mondspoelen met koolhydraten een aantal interessante toepassingen. Indien mondspoelen leidt tot het kiezen van een hogere trainingsintensiteit kan de trainingsbelasting worden verhoogd zonder de energie inname te verhogen. Dit zou een interessante toepassing zijn voor hen die een intensief trainingsprogramma moeten combineren met gewichtsverlies. Daarnaast zou het natuurlijk ook een meerwaarde hebben voor die atleten die gevoelig zijn voor gastro-intestinale klachten bij het toepassen van koolhydraatsuppletie tijdens intensieve inspanning van korte duur. Kortom, er zijn sterke aanwijzingen dat mondspoelen met koolhydraten de prestatie kan verbeteren tijdens intensieve inspanning van korte duur (<1 h, >75% VO₂max). Ondanks dat er nog wel enige discrepantie bestaat in de literatuur betreft het een eenvoudige en praktische interventie die atleten risicoloos kunnen toepassen bij intensieve inspanning van korte duur.





intensief en herhalend

3.2 Herhaalde inspanning van hoge intensiteit

De sportieve inspanning bij de meeste sporten betreft geen continue duurinspanning. In de meeste bal- en/of teamsporten bestaat de activiteit uit een serie herhaalde hoge intensiteit inspanningen (>100% VO_2 max) over een periode die varieert van 40 min tot meerdere uren. Deze atleten moeten sprinten, stoppen, springen etc. De energie die nodig is voor dit soort intermitterende inspanning wordt voor een groot deel geleverd door de omzetting van glycogeen en glucose naar lactaat (via de glycolyse of substraat gebonden fosforylering). Dit faciliteert een snelle energievoorziening maar heeft als nadeel dat erg veel glycogeen moet worden gebruikt om aan de hoge energiebehoefte te kunnen voldoen. Analyses van wedstrijd Bewegingen tijdens veldsporten (zoals voetbal, rugby en hockey) laten zien dat de gemiddelde inspanningsintensiteit rond de 70-80% VO_2 max ligt, en dus vergelijkbaar is met zeer intensieve duurinspanning^{7,94}. Hoewel metabool onderzoek naar dit soort activiteiten beperkt is, is het te verwachten dat bij deze hoog intensieve inspanningen de voorraden spier- en leverglycogeen snel op kunnen raken. De beschikbaarheid van spierglycogeen gedurende herhaalde inspanning van hoge intensiteit kan op termijn de hoeveelheid geleverde inspanning, de afgelegde afstand en het sprintvermogen dan ook sterk

beperken, vooral in de eindfase van een training of wedstrijd⁹⁵. Het is aannemelijk dat koolhydraatsuppletie een afname in het prestatievermogen tijdens herhaalde inspanning van hoge intensiteit kan voorkomen. Koolhydraatsuppletie tijdens langdurige fietsinspanning met een intermitterend karakter verbetert het prestatievermogen^{32,96}. Murray et al³² lieten hun proefpersonen fietsen op een variabele intensiteit (blokken van 55 en 65% VO_2 max) waarbij een koolhydraatdrink werd genuttigd in de rustperiodes tussen de blokken. Het experiment werd afgesloten met een inspanningstest waarin de proefpersonen 11-13% beter presteerden wanneer een sacharose plus glucose of een glucose polymeer plus fructose oplossing was ingenomen dan wanneer geen koolhydraten waren gebruikt. Natuurlijk zijn dit soort (duur)inspanningen met een intermitterend karakter niet vergelijkbaar met de inspanning die geleverd moet worden tijdens team- en/of balsporten. Mede daarom is een inspanningsprotocol ontwikkeld dat de inspanningsbelasting tijdens een voetbalwedstrijd simuleert, de Loughborough Intermittent Shuttle Test (LIST)⁹⁷. Nicholas et al⁹⁸ gebruikten dit model en toonden aan dat het gebruik van een koolhydraatdrink (6.9%) voor en tijdens de shuttle test de prestatie met maar liefst 33% kon verbeteren. Sindsdien zijn er verschillende protocollen ontwikkeld waarmee wordt

aangetoond dat koolhydraatsuppletie het prestatievermogen kan verbeteren bij herhaalde inspanning van hoge intensiteit⁹⁹⁻¹⁰⁶. Daarnaast zijn er ook een aantal studies die laten zien dat koolhydraatsuppletie de depletie van de voorraden glycogeen tijdens een voetbalwedstrijd¹⁰⁷ als ook tijdens een shuttle run test¹⁰² kan voorkomen. Zulke shuttle run testen (zoals de LIST) worden nu veelal gebruikt om het prestatievermogen van atleten in team- en/of balsporten te testen¹⁰⁸.

Het prestatievermogen van een atleet in een team- en/of balsport wordt natuurlijk niet alleen bepaald door het vermogen goed te kunnen presteren in een shuttle run test. Het is dan ook aangetoond dat koolhydraatsuppletie tijdens veldsporten ook een positieve invloed kan hebben op andere factoren, zoals de motorische vaardigheden en het gevoel van vermoeidheid^{103, 109-112}. Currell et al¹¹³ rapporteerden dat bij voetballers de wendbaarheid en accuratesse bij het doelschieten aanzienlijk verbeterde wanneer een koolhydraatrijke drank werd gebruikt in plaats van een placebo. Ook zijn er data die aantonen dat koolhydraatsuppletie een afname van de precisie en snelheid van de tennisslagen tijdens de eindfase van een lange tenniswedstrijd aanzienlijk kan beperken¹¹⁴.

Natuurlijk is er bij de meeste veldsporten vaak een beperkte mogelijkheid om koolhydraten in te nemen. Bij een voetbalwedstrijd hebben de spelers alleen voor en na de eerste helft van de wedstrijd ruim de tijd om koolhydraten tot zich te nemen. Clarke et al¹¹⁵ onderzochten het effect van koolhydraatsuppletie tijdens een gesimuleerde voetbalwedstrijd waarbij koolhydraten (of een placebo) werden ingenomen voor



en na de eerste helft van de wedstrijd (0 en 45 min.) of elke 15 min. De timing van de koolhydraatsuppletie leek weinig invloed te hebben op de metabole respons of op het prestatievermogen. Een meer frequente inname van kleinere hoeveelheden drank verminderde wel het aantal klachten over een 'opgeblazen' gevoel¹¹⁶, wat niet vreemd is aangezien de maaglediging enigszins lijkt te zijn vertraagd bij dergelijke herhaalde inspanningen van hoge intensiteit¹¹⁷. Ondanks de mogelijke praktische beperkingen wordt koolhydraatsuppletie voor, tijdens en na een langere periode (>60 min.) van herhaalde inspanning van hoge intensiteit geadviseerd om de prestaties te optimaliseren. De richtlijnen voor koolhydraatsuppletie in veldsporten is dus eigenlijk niet anders dan in de duursport: geen of zeer beperkte hoeveelheden koolhydraten tijdens inspanningen van korte duur (<60 min.: mondspoelen), gebruik van 30-60 g koolhydraten per uur tijdens wedstrijden van middelmatige duur (60-90 min.), en indien haalbaar tot 80-90 g koolhydraten per uur tijdens langdurige competitie (>150 min.)^{118, 119}.





herstel

4.0 Herstel na intensieve inspanning

Een prioriteit voor herstel na intensieve inspanning is het snel en adequaat aanvullen van gedepleteerde voorraden glycogeen in de lever en spieren. Dit is vooral van belang wanneer de atleet op korte termijn (<12-24 uur) weer optimaal moet presteren. Dit is bijvoorbeeld het geval tijdens competitie over verschillende dagen (zoals in de Tour de France) als ook tijdens intensieve trainingsperioden waarin 2 of meer keer per dag moet worden getraind. Om een maximale snelheid in het herstel van de voorraden glycogeen mogelijk te maken moeten voldoende koolhydraten ingenomen worden ($1.0\text{-}1.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{uur}^{-1}$). Koolhydraatsuppletie dient onmiddellijk gestart te worden na afloop van de inspanning en relatief kleine hoeveelheden moeten frequent (elke 20 min.) ingenomen worden. In professionele competitie is het vaak praktisch om hiervoor gebruik te maken van zogenaamde hersteldranken, maar de atleet zou wanneer mogelijk zijn koolhydraten ook uit de normale voeding moeten kunnen halen.

4.1 Repletie van leverglycogeen

De lever is verantwoordelijk voor de glucose huishouding en speelt daarmee de hoofdrol bij de preventie van hypoglycemie tijdens langdurige

inspanning¹²⁰. Het is dan ook vanzelfsprekend dat voedingsinterventies na intensieve inspanning ervoor moeten zorgen dat leverglycogeen snel wordt aangevuld om een volgende inspanningssessie mogelijk te maken. Dit is vooral belangrijk wanneer sporters meerdere keren per dag moeten presteren. Er is relatief weinig onderzoek gedaan naar repletie van leverglycogeen na intensieve inspanning. Dat is natuurlijk niet zo verwonderlijk omdat het gemakkelijker is om een spierbiops af te nemen dan een leverbiops. Studies in diermodellen suggereren dat wanneer exogene koolhydraten beschikbaar zijn na inspanning, repletie van leverglycogeen een prioriteit heeft boven de repletie van spierglycogeen¹²¹. Er zijn weinig studies die gekeken hebben naar repletie van leverglycogeen na inspanning in de mens^{122, 123}. Een humane studie heeft inmiddels eerdere bevindingen in diermodellen bevestigd en toont aan dat glucose of sacharose consumptie ($1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) gedurende de eerste paar uur na een zware inspanning (83 min op 70% VO_2max) vooral de voorraad leverglycogeen in plaats van de voorraden spierglycogeen herstelt¹²³. De repletie-snelheid van leverglycogeen lijkt beïnvloed te kunnen worden door de type koolhydraten die worden ingenomen¹²⁴. Een orale of intraveneuze hoeveelheid fructose wordt na toediening snel opgenomen in de lever en omgezet in glucose¹²⁰ zonder een toename in de glucose output

van de lever. Dat is mogelijk ook de reden waarom fructose infusie leidt tot een hogere repletiesnelheid van leverglycogeen in vergelijking met de infusie van eenzelfde hoeveelheid glucose¹²⁰. Een ander type koolhydraat dat opgenomen en gemetaboliseerd wordt in de lever is galactose. Galactose heeft net als fructose een sterk stimulerende werking op de repletiesnelheid van leverglycogeen. Decombaz et al¹²² gebruikten magnetische resonantie spectroscopie (MRI) om het leverglycogeen metabolisme te bestuderen op een non-invasieve wijze. De techniek werd toegepast om te onderzoeken of de inname van glucose polymeren (maltodextrine) met glucose, fructose of galactose tot verschillen kan leiden in repletie van leverglycogeen gedurende 6.5 uur herstel na intensieve inspanning¹²². De gecombineerde inname van fructose en galactose met maltodextrines leidde tot een tweemaal zo hoge repletiesnelheid van leverglycogeen in vergelijking met de inname van maltodextrine met glucose. Hoewel de hoeveelheid onderzoek op dit gebied nog zeer beperkt is, zijn er een aantal duidelijke aanwijzingen dat de inname van fructose of galactose samen met een glucose polymeer een sneller herstel van de voorraad leverglycogeen mogelijk zou kunnen maken tijdens het acuut herstel na inspanning.

4.2 Repletie van spierglycogeen

Glycogeenconcentraties van de skeletspier liggen normaal in de buurt van de 500-600 mmol • kg⁻¹ droog gewicht^{125, 126} maar kunnen met ruim 50-75% afnemen na een intensieve inspanningssessie (3 uur op 70% VO₂max)^{125, 127}. Aangezien spierglycogeen (kwantitatief gezien) de belangrijkste substraatbron is tijdens intensieve inspanning, is het herstel van deze glycogeenvoorraden na inspanning één van de meest belangrijke factoren die bepaalt wanneer een atleet weer optimaal kan presteren in een volgende inspanningssessie. Wanneer voldoende koolhydraten geconsumeerd worden, is een volledig herstel van de glycogeenvoorraden normaal mogelijk binnen 24 uur na intensieve inspanning¹²⁸⁻¹³¹. Voor veel atleten die op kortere termijn nieuwe prestaties moeten leveren is dit echter niet snel genoeg. In dat geval kunnen specifieke koolhydraatsuppletie strategieën gebruikt worden om de voorraden endogene glycogeen zo snel en compleet mogelijk te herstellen.

Er bestaat een exponentiële relatie tussen de repletiesnelheid van glycogeen en de tijd die nodig is om te herstellen¹³². Repletie van spierglycogeen na intensieve inspanning vindt plaats in twee fases. De eerste fase is zeer snel en insuline onafhankelijk en vindt naar schatting plaats in de eerste 30-90 minuten na inspanning¹³³. Deze fase lijkt alleen op te treden wanneer de voorraden glycogeen substantieel gedaald

zijn (<128-150 mmol • kg⁻¹ droog gewicht)¹³³ en er voldoende koolhydraten worden geconsumeerd. Na deze eerste respons neemt de repletiesnelheid van glycogeen af en is het herstel grotendeels afhankelijk van de insulineconcentratie in het bloed en de hoeveelheid ingenomen koolhydraten¹³³. Aanvankelijk werd aangenomen dat een koolhydraatinname van 0.35 g • kg⁻¹ • uur⁻¹ voldoende was om de repletiesnelheid van spierglycogeen te maximaliseren¹³⁴.

Meer recente studies laten echter hogere repletiesnelheden van glycogeen zien wanneer meer koolhydraten (0.75-1.0 g • kg⁻¹ • uur⁻¹) worden ingenomen met een hogere frequentie^{128, 135-137}. Van Loon et al¹³⁸ vergeleken repletiesnelheden van glycogeen na een glycogeen-depletietest waarna 0.8 of 1.2 g koolhydraten • kg⁻¹ • uur⁻¹ werden ingenomen gedurende 5 uur herstel. Een ruim 50% hogere repletiesnelheid van glycogeen werd waargenomen wanneer de grotere hoeveelheid koolhydraten werd ingenomen middels het gebruik van hersteldranken die elk half uur werden geconsumeerd. Het verder verhogen van de koolhydraatinname naar

1.6 g • kg⁻¹ • uur⁻¹ leek geen meerwaarde te hebben op de repletiesnelheid van glycogeen¹³⁹. Kortom, een koolhydraatinname van ~1.2 g koolhydraten • kg⁻¹ • uur⁻¹ lijkt voldoende om de repletie van spierglycogeen na intensieve inspanning te maximaliseren. De frequentie/timing van de koolhydraatinname is een belangrijke co-factor die de repletiesnelheid van de glycogeen na inspanning bepaalt.

Studies die koolhydraten meer frequent aanbieden (elke 15-30 min) rapporteren hogere repletie snelheden van glycogeen^{138, 140, 141} dan wanneer koolhydraatinname werd beperkt tot elke 2 uur¹³⁵. Wanneer de eerste 2 uur na inspanning geen koolhydraten worden ingenomen kan ook geen gebruik worden gemaakt van de snelle glycogeenrepletie fase¹⁴² en zullen de repletiesnelheden van glycogeen tijdens de herstelfase dus ook aanzienlijk lager uitkomen¹³⁵.

Het is dan ook belangrijk om onmiddellijk na afloop van inspanning voldoende koolhydraten in te nemen wanneer men het herstel van de voorraden glycogeen wil optimaliseren.



Vanuit praktisch oogpunt is de inname van $1.2 \text{ g koolhydraten} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{uur}^{-1}$ niet altijd even gemakkelijk want sommige atleten hebben moeite met het tolereren van dergelijke hoeveelheden. Er zijn echter interventies om de repletie van glycogeen na inspanning te versnellen zonder meer koolhydraten in te nemen¹⁴³. De gecombineerde inname van eiwit en/of aminozuren ($0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{uur}^{-1}$) met koolhydraten kan de repletie van glycogeen aanzienlijk versnellen wanneer suboptimale hoeveelheden koolhydraten worden ingenomen ($<1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{uur}^{-1}$)¹³⁸. Dit wordt toegeschreven aan de verhoogde endogene insuline productie door de gecombineerde inname van koolhydraten met eiwit. Deze meerwaarde van eiwit co-ingestie op de repletiesnelheid van glycogeen wordt echter niet meer waargenomen wanneer (supra)maximale hoeveelheden koolhydraten ($1.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) worden ingenomen. Natuurlijk is de inname van eiwit gedurende het herstel na intensieve inspanning tevens van belang om een adequaat herstel van spierschade en de adaptieve response van de skeletspier te faciliteren¹⁴⁴. Maar dat zullen we in deze position paper verder niet bespreken.

Andere pogingen om de repletiesnelheid van glycogeen verder te verhogen door de vorm van de koolhydraten te moduleren (vloeibaar of vaste voeding) zijn niet succesvol gebleken^{129, 145}. Met betrekking tot het type koolhydraten is wel gerapporteerd dat repletie van spierglycogeen minder snel plaatsvindt wanneer fructose in plaats van glucose wordt ingenomen^{121, 134, 146}. Van den Bergh et al¹⁴⁶ vonden een veel tragere repletie van glycogeen gedurende 8 uur herstel wanneer $\sim 40 \text{ g} \cdot \text{uur}^{-1}$ fructose in plaats van glucose werd geconsumeerd. Dit is mogelijk toe te schrijven aan de vertraagde absorptie van fructose in de darm, de omzetting in de lever, en de preferentiële opslag als leverglycogeen^{147, 148, 149}. Repletiesnelheden van spierglycogeen lijken echter vergelijkbaar na de inname van sacharose¹³⁴, de combinatie glucose plus fructose¹⁵⁰ of glucose. Natuurlijk is de aanwezigheid van fructose in de herstelvoeding vooral van invloed op de repletie van leverglycogeen^{120, 121}. Kortom, voor het herstel van spierglycogeen zijn glucose en glucose polymeren al dan niet in combinatie met fructose en/of sacharose gewenst.



5 Conclusies en aanbevelingen

Koolhydraatsuppletie tijdens intensieve duurinspanning kan het prestatievermogen aanzienlijk verhogen. Deze ergogene effecten van koolhydraatsuppletie zijn toe te schrijven aan het sparen van de beperkte endogene koolhydraatvoorraden. Hierdoor is de atleet in een latere fase van een inspanningssessie nog in staat een indrukwekkende eindsprint in te zetten of een succesvolle ontsnapping uit het wielerpeloton te realiseren. Tijdens intensieve duurinspanning van middellange duur (1-2 uur) zou 30-60 g koolhydraten per uur ingenomen moeten worden. Tijdens intensieve duurinspanning van langere duur (>2.5 uur) verdient het de voorkeur om 90 g multiple transporteerbare koolhydraten (glucose, glucose polymeren, fructose, sacharose) per uur te gebruiken. Sommige atleten zullen niet of nauwelijks in staat zijn deze hoeveelheden koolhydraten te tolereren. Het is belangrijk dat de desbetreffende (top)atleet getraind wordt om deze hoeveelheden koolhydraten effectief te verwerken. Hier is een individueel advies en veel praktische training essentieel. Tijdens intensieve korte duurinspanning (45-60 min) is het spoelen van de mond met een koolhydraatrijke drank mogelijk ergoogeen. Dit prestatiebevorderende effect is naar alle waarschijnlijkheid toe te schrijven aan centrale effecten in het brein. Tijdens intensieve inspanning waarbij intermitterend hoge intensiteit inspanning wordt geleverd (zoals bij veel bal- en/of teamsporten, krachtsport en vechtsporten) wordt veel aanspraak gemaakt op de voorraden spierglycogeen. Ondanks dat hier minder bewijsvoering beschikbaar is, kan men afleiden dat ook bij dit soort sporten koolhydraatsuppletie ergoogeen is wanneer de totale inspanning meer dan ~1 uur duurt.

Na intensieve inspanning van langere duur (>1 uur) is een snel herstel van de voorraden lever- en spierglycogeen van groot belang wanneer de atleet op korte termijn weer opnieuw optimaal dient te presteren. Dit betreft bijvoorbeeld competitiesporten die zich uitspreiden over verschillende dagen (zoals de Tour de France) als ook meer intensieve trainingsperioden waarin 2 of meer keer per dag intensief moet worden getraind. In dit soort gevallen wordt de atleet geadviseerd om 75-90 g koolhydraten per uur (1.2 g • kg⁻¹) te consumeren gedurende 4-6 uur na inspanning. Voor een snel herstel van de voorraden leverglycogeen lijkt een combinatie van verschillende koolhydraten (glucose, glucose polymeren, fructose, sacharose) een voorkeur te hebben. Toevoeging van een kleine hoeveelheid eiwit kan de repletie van spierglycogeen versnellen wanneer minder grote

hoeveelheden koolhydraten worden ingenomen (<1.0 g • kg⁻¹). Dit biedt mogelijk een praktische oplossing, omdat eiwit inname ook gewenst is voor adequaat herstel en reconditionering. Het lijkt weinig uit te maken of de atleet koolhydraten supplementeert in een vaste, gel of vloeibare vorm. Dit dient dan ook naar persoonlijke voorkeur en in overeenstemming met de waterbehoefte geregeld te worden.



Standpunt Kenniscentrum suiker en voeding

Bovenstaand overzicht van onderzoeksresultaten heeft geleid tot het volgende standpunt van Kenniscentrum suiker en voeding:

- Koolhydraatsuppletie tijdens intensieve inspanning (> 1 uur) kan het prestatievermogen significant verbeteren.
- Exogene glucose oxidatiesnelheden kennen een plafondwaarde van ~1.0 g per min tijdens inspanning. Meer glucose hoeft dus niet ingenomen te worden tijdens intensieve inspanning van langere duur (60 g glucose of glucose polymeren per uur)
- Het gebruik van multiple transporteerbare koolhydraten (glucose of glucose polymeren plus fructose of sacharose) kunnen de exogene koolhydraat oxidatiesnelheid verder verhogen door gebruik te maken van verschillende transportsystemen in de darm. Hiermee kunnen exogene koolhydraat oxidatiesnelheden van meer dan 1.5 g per min bereikt worden.
- Zeer goede duuratleten kunnen tot 90 g exogene koolhydraten per uur gebruiken tijdens intensieve inspanning van langere duur (>2.5 uur). Om dit te realiseren dienen multiple transporteerbare koolhydraten ingenomen te worden.
- Ook tijdens meer intermitterende inspanning van hoge intensiteit (team- en/of balsporten) kan koolhydraatsuppletie de prestatie significant verbeteren wanneer de inspanning langer duurt dan ~1 uur.
- Koolhydraatsuppletie na intensieve inspanning (tot 1.2 g/kg lichaamsgewicht per uur) versnelt de repletie van glycogeen gedurende de eerste uren na intensieve inspanning. Dit is van belang voor atleten die op korte termijn (<12-24 uur) weer opnieuw (optimaal) moeten presteren.

Deze position paper van Kenniscentrum suiker en voeding is beoordeeld door Dr. N.M. Cermak en Prof.dr. L.J.C. van Loon, Hoogleraar Fysiologie van Inspanning, Capaciteitsgroep Bewegingswetenschappen, Universiteit Maastricht.

Baarn, februari 2013



Referenties

1. Romijn J, Coyle E, Sidossis L, Gastaldelli A, Horowitz J, Endert E, et al. Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *American Journal of Physiology*. 1993;265:E380-91.
2. van Loon L, Greenhaff P, Constantin-Teodosiu D, Saris W, Wagenmakers A. The effects of increasing exercise intensity on muscle fuel utilisation in humans. *Journal of Physiology*. 2001;536:295-304.
3. van Loon L, Jeukendrup A, Saris W, Wagenmakers A. Effect of training status on fuel selection during submaximal exercise with glucose ingestion. *Journal of Applied Physiology*. 1999;87(4):1413-20.
4. McArdle W, Katch F, Katch V. Carbohydrates, lipids, and proteins. In: Darcy P, editor. *Exercise Physiology* Baltimore, MD: Lippincott Williams & Wilkins; 2001. p. 11-3.
5. Tsintzas K, Williams C. Human muscle glycogen metabolism during exercise. Effect of carbohydrate supplementation. *Sports Medicine*. 1998;25(1):7-23.
6. Bergstrom J, Hultman E. A study of the glycogen metabolism during exercise in man. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation*. 1967;19:218-28.
7. Jeukendrup A. Carbohydrate intake during exercise and performance. *Nutrition*. 2004;20:669-77.
8. Krogh A, Lindhard, J. The Relative Value of Fat and Carbohydrate as Sources of Muscular Energy. *Biochemistry Journal*. 1920;14(3-4):290-363.
9. Levine S, Gordon B, Derick C. Some changes in chemical constituents of blood following a marathon race. *The Journal of the American Medical Association*. 1924;82:1778.
10. Christensen E. Der Stoffwechsel und die Respiratorischen Funktionen bei schwerer körperlicher Arbeit. *Scandinavian Archives of Physiology*. 1932;81:160-71.
11. Bergstrom J, Hultman E. Muscle glycogen synthesis after exercise: an enhancing factor localized in muscle cells in man. *Nature*. 1966;210(5033):309-10.
12. Bergstrom J, Hermansen L, Hultman E, Saltin B. Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiologica Scandinavica*. 1967;71:140-50.
13. Hawley J, Schabert E, Noakes T, Dennis S. Carbohydrate-loading and exercise performance. An update. *Sports Medicine*. 1997;24(2):73-81.
14. Bonen A, Malcolm S, Kilgour R, MacIntyre K, Belcastro A. Glucose ingestion before and during intense exercise. *Journal of Applied Physiology*. 1981;50(4):766-71.
15. Felig P, Cherif A, Minagawa A, Wahren J. Hypoglycemia during prolonged exercise in normal men. *New England Journal of Medicine*. 1982;306(15):395-900.
16. Ivy J, Costill D, Fink W, Lower R. Influence of caffeine and carbohydrate feedings on endurance performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1979;11(1):6-11.
17. Coyle E, Coggan A, Hemert M, Ivy J. Muscle Glycogen Utilization During Prolonged Strenuous Exercise When Fed Carbohydrate. *Journal of Applied Physiology*. 1986;61(1):165-72.
18. Coyle E, Hagberg J, Hurler B, Martin W, Ehsani A, Holloszy J. Carbohydrate feeding during prolonged strenuous exercise can delay fatigue. *Journal of Applied Physiology*. 1983;55:230-5.
19. Fielding R, Costill D, Fink W, King D, Hargreaves M, Kovaleski J. Effect of carbohydrate feeding frequencies and dosage on muscle glycogen use during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1985;17(4):472-6.
20. Hargreaves M, Costill D, Coggan A, Fink W, Nishibata I. Effect of carbohydrate feedings on muscle glycogen utilization and exercise performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1984;16(3):219-22.
21. Ivy J, Miller W, Dover V, Goodyear L, Sherman W, Farrell S, et al. Endurance improved by ingestion of a glucose polymer supplement. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1983;15(6):466-71.
22. Mitchell J, Costill D, Houmar J, Flynn M, Fink W, Beltz J. Effects of carbohydrate ingestion on gastric emptying and exercise performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1988;20(2):110-5.
23. Neuffer P, Costill D, Flynn M, Kirwan J, Mitchell J, Houmar J. Improvements in exercise performance: effects of carbohydrate feedings and diet. *Journal of Applied Physiology*. 1987;62(3):983-8.
24. Bjorkman O, Sahlin K, Hagenfeldt L, Wahren J. Influence of glucose and fructose ingestion on the capacity for long-term exercise in well-trained men. *Clinical Physiology*. 1984;4:483-94.
25. Coggan A, Coyle E. Reversal of fatigue during prolonged exercise by carbohydrate infusion or ingestion. *Journal of Applied Physiology*. 1987;63(6):2388-95.
26. Angus D, Hargreaves M, Dancy J, Febbraio M. Effect of carbohydrate or carbohydrate plus medium-chain triglyceride ingestion on cycling time trial performance. *Journal of Applied Physiology*. 2000;88(1):113-9.
27. Tsintzas O, Williams C, Boobis L, Greenhaff P. Carbohydrate ingestion and single muscle fiber glycogen metabolism during prolonged running in men. *Journal of Applied Physiology*. 1996;81(2):801-9.
28. Maughan R, Bethell L, Leiper J. Effects of ingested fluids on exercise capacity and on cardiovascular and metabolic responses to prolonged exercise in man. *Experimental physiology*. 1996;81(5):847-59.
29. Langenfeld M, Seifert J, Rudge S, Bucher R. Effect of carbohydrate ingestion on performance of non-fasted cyclists during a simulated 80-mile time trial. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 1994;34(3):263-70.
30. Tsintzas K, Liu R, Williams C, Campbell I, Gaitanos G. The effect of carbohydrate ingestion on performance during a 30-km race. *International Journal of Sport Nutrition*. 1993;3(2):127-39.
31. Wright D, Sherman W, Dernbach A. Carbohydrate feedings before, during, or in combination improve cycling endurance performance. *Journal of Applied Physiology*. 1991;71(3):1082-8.
32. Murray R, Eddy D, Murray T, Seifert J, Paul G, Halaby G. The effect of fluid and carbohydrate feedings during intermittent cycling exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1987;19(6):597-604.
33. Vandenberghe T, Hopkins W. Effects of acute carbohydrate supplementation on endurance performance. *Sports Medicine*. 2011;41(9):773-92.
34. Tsintzas O, Williams C, Boobis L, Greenhaff P. Carbohydrate ingestion and glycogen utilization in different muscle fibre types in man. *Journal of Physiology*. 1995;489(Pt 1):243-50.
35. Tsintzas O, Williams C, Constantin-Teodosiu D, Hultman E, Boobis L, Clarys P, et al. Phosphocreatine degradation in type I and type II muscle fibres during submaximal exercise in man: effect of carbohydrate ingestion. *Journal of Physiology*. 2001;15(537):305-11.
36. Stellingwerff T, Boon H, Gijsen AP, Stegen JH, Kuipers H, LJ. vL. Carbohydrate supplementation during prolonged cycling exercise spares muscle glycogen but does not affect intramyocellular lipid use. *Pflügers Arch*. 2007;454(4):635-47.

37. Erickson M, Schwartzkopf R, McKenzie R. Effects of caffeine, fructose and glucose ingestion on muscle glycogen utilization during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1987;19:579-83.
38. Flynn M, Costill D, Hawley J, Fink W, Neufer P, Fielding R, et al. Influence of selected carbohydrate drinks on cycling performance and glycogen use. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 1987;19(1):37-40.
39. Mitchell J, Costill D, Houmard J, Fink W, Pascoe D, Pearson D. Influence of carbohydrate dosage on exercise performance and glycogen metabolism. *Journal of Applied Physiology*. 1989;67(5):1843-9.
40. Hargreaves M, Briggs C. Effect of carbohydrate ingestion on exercise metabolism. *Journal of Applied Physiology*. 1988;65(4):1553-5.
41. Madsen K, MacLean D, Kiens B, Christensen D. Effects of glucose, glucose plus branched-chain amino acids, or placebo on bike performance over 100 km. *Journal of Applied Physiology*. 1996;81(6):2644-50.
42. Gollnick P, Piehl K, Saltin B. Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibres after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates. *Journal of Physiology*. 1974;241:45-57.
43. Nybo L. CNS fatigue and prolonged exercise: effect of glucose supplementation. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2003;35(4):589-94.
44. Claassen A, Lambert E, Bosch A, Rodger M, St Clair Gibson A, Noakes T. Variability in exercise capacity and metabolic response during endurance exercise after a low carbohydrate diet. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*. 2005;15(2):97-116.
45. Jentjens R, Jeukendrup A. Prevalence of hypoglycemia following pre-exercise carbohydrate ingestion is not accompanied by higher insulin sensitivity. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*. 2002;12(4):398-413.
46. Jentjens R, Jeukendrup A. Effects of pre-exercise ingestion of trehalose, galactose and glucose on subsequent metabolism and cycling performance. *European Journal of Applied Physiology*. 2003;88(4-5):459-65.
47. Pirnay F, Crielaard J, Pallikarakis N, Lacroix M, Mosora F, Krzentsowski G, et al. Fate of exogenous glucose during exercise of different intensities in humans. *Journal of Applied Physiology*. 1982;53(6):1620-4.
48. Pirnay F, Scheen A, Gautier J, Lacroix M, Mosora F, Lefebvre P. Exogenous glucose oxidation during exercise in relation to the power output. *International Journal of Sports Medicine*. 1995;16(7):456-60.
49. Jeukendrup A. Carbohydrate and exercise performance: The role of multiple transportable carbohydrates. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*. 2010;13:452-7.
50. Burrelle Y, Lamoureux M, Peronnet F, Massicotte D, Lavoie C. Comparison of exogenous glucose, fructose and galactose oxidation during exercise using 13C-labeling *British Journal of Nutrition*. 2006;96(1):56-61.
51. Leijssen D, Saris W, Jeukendrup A, Wagenmakers A. Oxidation of exogenous [13C]glucose during exercise. *Journal of Applied Physiology*. 1995;79(3):720-5.
52. Rowlands D, Wallis G, Shaw C, Jentjens R, Jeukendrup A. Glucose polymer molecular weight does not affect exogenous carbohydrate oxidation. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2005;37(9):1510-6.
53. Sawka M, Burke L, Eichner E, Maughan R, Montain S, Stachenfeld N. American College of Sports Medicine position stand: Exercise and fluid replacement. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2007;39(2):377-90.
54. Smith J, Zachwieja J, Peronnet F, Passe D, Massicotte D, Lavoie C, et al. Fuel selection and cycling endurance performance with ingestion of [13C]glucose: Evidence for a carbohydrate dose response. *Journal of Applied Physiology*. 2010;108(6):1520-9.
55. Hulston C, Wallis G, Jeukendrup A. Exogenous CHO oxidation with glucose plus fructose intake during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2009;41:357-63.
56. Jentjens R, Achten J, Jeukendrup A. High oxidation rates from combined carbohydrates ingested during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2004;36:1551-8.
57. Jentjens R, Shaw C, Birtles T, Waring R, Harding L, Jeukendrup A. Oxidation of combined ingestion of glucose and sucrose during exercise. *Metabolism*. 2005;54(5):610-8.
58. Jentjens R, Moseley L, Waring R, Harding L, Jeukendrup A. Oxidation of combined ingestion of glucose and fructose during exercise. *Journal of Applied Physiology*. 2004;96(4):1277-84.
59. Jentjens R, Venables M, Jeukendrup A. Oxidation of exogenous glucose, sucrose and maltose during prolonged cycling exercise. *Journal of Applied Physiology*. 2004;96:1285-91.
60. Rowlands DS, Thorburn MS, Thorp RM, Broadbent S, X. S. Effect of graded fructose coingestion with maltodextrin on exogenous 14C-fructose and 13C-glucose oxidation efficiency and high-intensity cycling performance. *Journal of Applied Physiology*. 2008;104(6):1709-19.
61. Currell K, Jeukendrup A. Superior endurance performance with ingestion of multiple transportable carbohydrates *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2008;40:275-81.
62. Jeukendrup A. Carbohydrate feeding during exercise. *European Journal of Sport Sciences*. 2008;8:77-86.
63. Kellett G. The facilitated component of intestinal glucose absorption. *Journal of Physiology*. 2001;531:585-95.
64. Ferraris R, Diamond J. Regulation of intestinal sugar transport. *Physiological Reviews*. 1997;77(1):257-302.
65. Janssen G, Kuipers H, Willems G, Does R, Janssen M, Geurten P. Plasma activity of muscle enzymes: quantification of skeletal muscle damage and relationship with metabolic variables. *International Journal of Sports Medicine*. 1989;10(Suppl 3):S160-S8.
66. Jentjens R, Underwood K, Achten J, Currell K, Mann C, Jeukendrup A. Exogenous carbohydrate oxidation rates are elevated after combined ingestion of glucose and fructose during exercise in the heat. *Journal of Applied Physiology*. 2006;100(3):807-16.
67. Wallis G, Rowlands D, Shaw C, Jentjens R, Jeukendrup A. Oxidation of combined ingestion of maltodextrins and fructose during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2005;37(3):426-32.
68. Pfeiffer B, Stellingwerff T, Zaltas E, Jeukendrup A. Oxidation of solid versus liquid carbohydrate sources during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2010;42(11):2030-7.
69. Pfeiffer B, Stellingwerff T, Zaltas E, Jeukendrup A. Carbohydrate oxidation from a carbohydrate gel compared to a drink during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2010;42(11):2038-45.
70. Pfeiffer B, Stellingwerff T, Zaltas E, Hodgson A, Jeukendrup A. Carbohydrate oxidation from a drink during running compared to cycling exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2011;43(2):327-34.
71. Jeukendrup A, Moseley L, Mainwaring G, Samuels S, Perry S, Mann C. Exogenous carbohydrate oxidation during ultra endurance exercise. *Journal of Applied Physiology*. 2006;100(4):1134-41.
72. Rowlands D, Swift M, Ros M, Green J. Composite versus single transportable carbohydrate solution enhances race and laboratory cycling performance. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2012;37(3):425-36.

73. O'Brien W, Rowlands D. Fructose-maltodextrin ratio in a carbohydrate-electrolyte solution differentially affects exogenous carbohydrate oxidation rate, gut comfort, and performance. *Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol*. 2011;300(1):G181-9.
74. Murdoch S, Bazzarre T, Snider I, Goldfarb A. Differences in the effects of carbohydrate food form on endurance performance to exhaustion. *International Journal of Sport Nutrition*. 1993;3(1):41-54.
75. Lugo M, Sherman W, Wimer G, Garleb K. Metabolic responses when different forms of carbohydrate energy are consumed during cycling. *International Journal of Sport Nutrition*. 1993;3(4):398-407.
76. Neuffer P, Costill D, Fink W, Kirwan J, Fielding R, Flynn M. Effects of exercise and carbohydrate composition on gastric emptying. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1986;18(6):658-62.
77. Carter J, Jeukendrup A, Mundel T, Jones D. Carbohydrate supplementation improves moderate and high-intensity exercise in the heat. *Pflugers Arch: European Journal of Physiology*. 2003;446(2):211-9.
78. Jeukendrup A, Brouns F, Wagenmakers A, Saris W. Carbohydrate-electrolyte feedings improve 1 h time trial cycling performance. *International Journal of Sports Medicine*. 1997;18(2):25-9.
79. Below P, Mora-Rodríguez R, González-Alonso J, Coyle E. Fluid and carbohydrate ingestion independently improve performance during 1 h of intense exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 1995;27(2):200-10.
80. el-Sayed M, Balmer J, Rattu A. Carbohydrate ingestion improves endurance performance during a 1 h simulated time trial *Journal of Sports Sciences*. 1997;15(2):223-30.
81. Anantaraman R, Carmines A, Gaesser G, Weltman A. Effects of carbohydrate supplementation on performance during 1 h of high intensity exercise. *International Journal of Sports Medicine*. 1995;16(7):461-5.
82. Carter J, Jeukendrup A, Mann C, Jones D. The effect of glucose infusion on glucose kinetics during a 1-h time trial. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2004;36(9):1543-50.
83. Carter J, Jeukendrup A, Mann C, Jones D. The effect of carbohydrate mouth rinse on 1-h cycle time trial performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2004;36(9):1543-50.
84. Maresch C, Herrera-Soto J, Armstrong L, Casa D, Kavouras S, Hacker FJ, et al. Perceptual responses in the heat after brief intravenous versus oral rehydration. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2001;33(6):1039-45.
85. Riebe D, Maresch C, Armstrong L. Effects of oral and intravenous rehydration on ratings of perceived exertion and thirst. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1997;29(1):117-24.
86. Beelen M, Berghuis J, Bonaparte B, Ballak S, Jeukendrup A, van Loon L. Carbohydrate mouth rinsing in the fed state: lack of enhancement of time-trial performance. *International Journal of Sports Nutrition and Exercise Metabolism*. 2009;19:400-9.
87. Chambers E, Bridge M, Jones D. Carbohydrate sensing in the human mouth: effects on exercise performance and brain activity. *Journal of Physiology*. 2009;578(8):1779-94.
88. Fares E, Kayser B. Carbohydrate mouth rinse effects on exercise capacity in pre and postprandial states. *Journal of Nutrition and Metabolism*. 2011;385962.
89. Pottier A, Bouckaert J, Gilis W, Roels T, Derave W. Mouth rinse but not ingestion of a carbohydrate solution improves 1-h cycle time trial performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2010;20(1):105-11.
90. Rollo I, Cole M, Miller R, Williams C. The influence of mouth-rinsing a carbohydrate solution on 1 hour running performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2010;42(4):798-804.
91. Whitham M, McKinney J. Effect of a carbohydrate mouthwash on running time-trial performance. *Journal of Sports Sciences*. 2007;25(12):1385-92.
92. Haase L, Cerf-Ducastel B, Murphy C. Cortical activation in response to pure taste stimuli during the physiological states of hunger and satiety. *Neuroimage*. 2009;44(3):1008-21.
93. Frank G, Oberndorfer T, Simmons A, Paulus M, Fudge J, Yang T, et al. Sucrose activates human taste pathways differently from artificial sweetener. *Neuroimage*. 2008;39(4):1559-69.
94. Bangsbo J. The physiology of soccer with special reference to intense intermittent exercise. *Acta Physiol Scand*. 1994;619((Suppl)):1-155.
95. Balsom P, Wood K, Olsson P, Ekblom B. Carbohydrate intake and multiple sprint sports: with special reference to football (soccer). *International Journal of Sports Medicine*. 1999;20(1):48-52.
96. Coggan A, Coyle E. Effect of carbohydrate feedings during high-intensity exercise. *Journal of Applied Physiology*. 1988;65(4):1703-9.
97. Nicholas C, Nuttall F, Williams C. The Loughborough Intermittent Shuttle Test: a field test that simulates the activity pattern of soccer. *Journal of Sports Sciences*. 2000;18(2):97-104.
98. Nicholas CW WC, Lakomy HK, Phillips G, Nowitz A. Influence of ingesting a carbohydrate-electrolyte solution on endurance capacity during intermittent, high-intensity shuttle running. *Journal of Sports Sciences*. 1995;13(4):283-90.
99. Davis J, Jackson D, Broadwell M, Queary J, Lambert C. Carbohydrate drinks delay fatigue during intermittent, high-intensity cycling in active men and women. *International Journal of Sport Nutrition*. 1997;7(4):261-73.
100. Davis J, Welsh R, Alerson N. Effects of carbohydrate and chromium ingestion during intermittent high-intensity exercise to fatigue. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*. 2000;10(4):476-85.
101. Davis J, Welsh R, De Volve K, Alderson N. Effects of branched-chain amino acids and carbohydrate on fatigue during intermittent, high-intensity running. *International Journal of Sports Medicine*. 1999;20(5):309-14.
102. Nicholas C, Tsintzas K, Boobis L, Williams C. Carbohydrate-electrolyte ingestion during intermittent high-intensity running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1999;31(9):1280-6.
103. Welsh R, Davis J, Burke J, Williams H. Carbohydrates and physical/mental performance during intermittent exercise to fatigue. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2002;34(4):723-31.
104. Patterson S, Gray S. Carbohydrate-gel supplementation and endurance performance during intermittent high-intensity shuttle running. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*. 2007;17(5):445-555.
105. Foskett A, Williams C, Boobis L, Tsintzas K. Carbohydrate availability and muscle energy metabolism during intermittent running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2008;40(1):96-103.
106. Davison G, McClean C, Brown J, Madigan S, Gamble D, Trinick T, et al. The effects of ingesting a carbohydrate-electrolyte beverage 15 minutes prior to high-intensity exercise performance. *Res Sports Med*. 2008;16(3):155-66.
107. Leatt P, Jacobs I. Effect of glucose polymer ingestion on glycogen depletion during a soccer match. *Canadian Journal of Sport Sciences*. 1989;14(2):112-6.

108. Carling C, Bloomfield J, Nelsen L, Reilly T. The role of motion analysis in elite soccer: contemporary performance measurement techniques and work rate data. *Sports Medicine*. 2008;38(10):839-62.
109. Winnick J, Davis J, Welsh R, Carmichael M, Murphy E, Blackmon J. Carbohydrate feedings during team sport exercise preserve physical and CNS function. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2005;37(2):306-15.
110. Ali A, Williams C, Nicholas C, Foskett A. The influence of carbohydrate-electrolyte ingestion on soccer skill performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2007;39(11):1969-76.
111. Utter A, Kang J, Nieman D, Dumke C, McAnulty S, McAnulty L. Carbohydrate attenuates perceived exertion during intermittent exercise and recovery. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2007;39(5):880-5.
112. Russell M, Benton D, Kingsley M. Influence of carbohydrate supplementation on skill performance during a soccer match simulation. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2012;15:348-54.
113. Currell K, Conway S, Jeukendrup A. Carbohydrate ingestion improves performance of a new reliable test of soccer performance. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*. 2009;19(1):34-46.
114. Vergauwen L, Brouns F, Hespel P. Carbohydrate supplementation improves stroke performance in tennis. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1998;30(8):1289-95.
115. Clarke N, Drust B, Maclaren D, Reilly T. Strategies for hydration and energy provision during soccer-specific exercise. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*. 2005;15(6):625-40.
116. Clarke N, Drust B, Maclaren D, Reilly T. Fluid provision and metabolic responses to soccer-specific exercise. *European Journal of Applied Physiology*. 2008;104(6):1069-77.
117. Leiper J, Prentice A, Wrightson C, Maughan R. Gastric emptying of a carbohydrate-electrolyte drink during a soccer match. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2001;33(11):1932-8.
118. Burke L, Cox G. *The Complete Guide to Food for Sports Performance*. 3 ed. Sydney: Allen and Unwin; 2010.
119. Mujika I, Burke L. Nutrition in Team Sports. *Annals of Nutrition & Metabolism*. 2010;57((suppl 2)):26-35.
120. Nilsson L, Hultman E. Liver and muscle glycogen in man after glucose and fructose infusion. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation*. 1974;33(1):5-10.
121. Conlee R, Lawler R, Ross P. Effects of glucose or fructose feeding on glycogen repletion in muscle and liver after exercise or fasting. *Annals of Nutrition & Metabolism*. 1987;31(2):126-32.
122. Décombaz J, Jentjens R, Ith M, Scheurer E, Buehler T, Jeukendrup A, et al. Fructose and Galactose Enhance Post-Exercise Human Liver Glycogen Synthesis. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2011.
123. Casey A, Mann R, Banister K, Fox J, Morris P, Macdonald I, et al. Effect of carbohydrate ingestion on glycogen resynthesis in human liver and skeletal muscle measured by ¹³C MRS. *American Journal of Physiology Endocrinology and Metabolism*. 2000;278(1):E65-75.
124. McGuinness O, Cherrington A. Effects of fructose on hepatic glucose metabolism. *Current opinion in clinical nutrition and metabolic care*. 2003;6(4):441-8.
125. Bosch A, Weltan S, Dennis S, Noakes T. Fuel substrate turnover and oxidation and glycogen sparing with carbohydrate ingestion in non-carbohydrate-loaded cyclists. *Pflugers Arch*. 1996;432(6):1003-10.
126. Costill D, Sherman W, Fink W, Maresh C, Witten M, Miller J. The role of dietary carbohydrates in muscle glycogen resynthesis after strenuous running. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 1981;34(9):1831-6.
127. Bosch A, Dennis S, Noakes T. Influence of carbohydrate ingestion on fuel substrate turnover and oxidation during prolonged exercise. *Journal of Applied Physiology*. 1994;76:2364-72.
128. Casey A, Short A, Hultman E, Greenhaff P. Glycogen resynthesis in human muscle fibre types following exercise-induced glycogen depletion. *Journal of Physiology*. 1995;483(1):265-71.
129. Keizer H, Kuipers H, van Kranenburg G. Influence of liquid and solid meals on muscle glycogen resynthesis, plasma fuel hormone response, and maximal physical working capacity. *International Journal of Sports Medicine*. 1987;8:99-104.
130. Kochan R, Lamb D, Lutz S, Perrill C, Reimann E, Schlender K. Glycogen synthase activation in human skeletal muscle: effects of diet and exercise. *American Journal of Physiology*. 1979;236(6):E660-6.
131. Parkin J, Carey M, Martin I, Stojanovska L, Febraio M. Muscle glycogen storage following prolonged exercise: Effect of timing of ingestion of high glycemic index food. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1997;29(2):220-4.
132. Robergs R. Nutrition and exercise determinants of post-exercise glycogen synthesis. *International Journal of Sports Medicine*. 1991;1:307-37.
133. Jentjens R, Jeukendrup A. Determinants of post-exercise glycogen synthesis during short-term recovery. *Sports Medicine*. 2003;33(2):117-44.
134. Blom P, Hostmark A, Vaage O, Kardel K, Maehlum S. Effect of different post-exercise sugar diets on the rate of muscle glycogen synthesis. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1987;19(5):491-6.
135. Ivy J, Lee M, Brozinick J, Reed M. Muscle glycogen storage after different amounts of carbohydrate ingestion. 65. 1988;5(2018-2023).
136. McCoy M, Proietto J, Hargreaves M. Skeletal muscle GLUT-4 and postexercise muscle glycogen storage in humans. *Journal of Applied Physiology*. 1996;80(2):411-5.
137. Tarnopolsky M, Bosman M, Macdonald J, Vandeputte D, Martin J, Roy B. Postexercise protein-carbohydrate and carbohydrate supplements increase muscle glycogen in men and women. *Journal of Applied Physiology*. 1997;83(6):1877-83.
138. van Loon L, Saris W, Kruijshoop M, Wagenmakers A. Maximizing postexercise muscle glycogen synthesis: Carbohydrate supplementation and the application of amino acid or protein hydrolysate mixtures. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2000;72(1):106-11.
139. Howarth K, Moreau NA, Phillips SM, Gibala MJ. Coingestion of protein with carbohydrate during recovery from endurance exercise stimulates skeletal muscle protein synthesis in humans. *Journal of Applied Physiology*. 2009;106(4):1394-402.
140. Jentjens R, van Loon L, Mann C, Wagenmakers A, Jeukendrup A. Addition of protein and amino acids to carbohydrates does not enhance postexercise muscle glycogen synthesis. *Journal of Applied Physiology*. 2001;91(2):839-46.
141. van Hall G, Shirreffs S, Calbet J. Muscle glycogen resynthesis during recovery from cycle exercise: No effect of additional protein ingestion. *Journal of Applied Physiology*. 2000;88(5):1631-6.
142. Goodyear L, Hirshman M, King P, Horton E, Thompson C, Horton E. Skeletal muscle plasma membrane glucose transport and glucose transporters after exercise. *Journal of Applied Physiology*. 1990;68(1):193-8.
143. Beelen M, Burke L, Gibala M, van Loon L. Nutritional strategies to promote postexercise recovery. *International Journal of Sports Nutrition*

and Exercise Metabolism. 2010;20(6):515-32.

144. van Loon L. Application of protein or protein hydrolysates to improve postexercise recovery. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*. 2007;17:S104-17.

145. Reed M, Brozinick J, Lee M, Ivy J. Muscle glycogen storage postexercise: Effect of mode of carbohydrate administration. *Journal of Applied Physiology*. 1989;88(2):386-92.

146. Van Den Bergh A, Houtman S, Heerschap A, Rehrer N, Van Den Boogert H, Oeseburg B, et al. Muscle glycogen recovery after exercise during glucose and fructose intake monitored by ¹³C-NMR. *Journal of Applied Physiology*. 1996;81(4):1495-500.

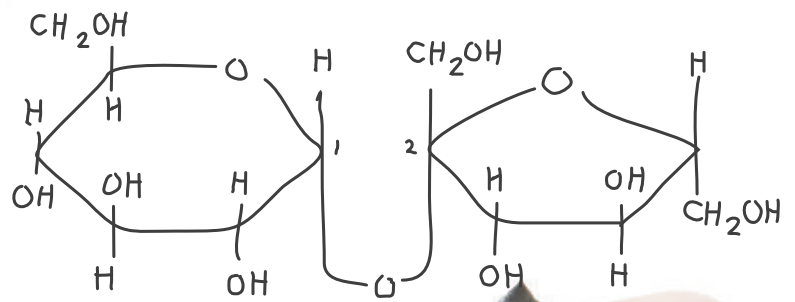
147. Fujisawa T, Mulligan K, Wada L, Schumacher L, Riby J, Kretchmer N. The effect of exercise on fructose absorption. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 1993;58(1):75-9.

148. Henry R, Crapo P, Thorburn A. Current issues in fructose metabolism. *Annual review of nutrition*. 1991;11:21-9.

149. Mayes P. Intermediary metabolism of fructose. *American Journal of Clinical Nutrition*. 1993;58:754S-65S.

150. Wallis G, Hulston C, Mann C, Roper H, Tipton K, Jeukendrup A. Postexercise Muscle Glycogen Synthesis with Combined Glucose and Fructose Ingestion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2008;40(10):1789-94.





Kenniscentrum suiker en voeding

Kenniscentrum suiker en voeding verricht onderzoek naar suiker in relatie tot voeding en gezondheid. Hierbij wordt nauw samengewerkt met (inter)nationaal erkende onderzoeksinstituten en universiteiten. Daarnaast geeft Kenniscentrum suiker en voeding voorlichting over suiker in de breedste zin van het woord en fungeert zij als vraagbaak op het gebied van suiker in relatie tot voeding en gezondheid en op het gebied van levensmiddelenwetgeving. Kenniscentrum suiker en voeding wil de wetenschappelijke informatievoorziening op het gebied van suiker in een gezonde leefstijl bevorderen.

Meer informatie:

Kenniscentrum suiker en voeding | Amsterdamsestraatweg 39a | 3744 MA Baarn
Tel. 035-543 34 55 | info@kenniscentrumsuiker.nl | www.kenniscentrumsuiker.nl