

Die Empfehlungen zur Kohlenhydratzufuhr im Sport: eine historische Betrachtung

Colombani PC

Consulting Colombani GmbH

Abstract

The importance of the carbohydrates for an intense exercise performance is known since at least the 1920s. Many research findings have since then led to development of generic recommendations for the carbohydrate intake before, during and after the exercise. The past years have witnessed, however, a growing understanding that the specific recommendations need to be defined in accordance to the short but also longer-term goals of each athlete. In an extreme situation, it is thus possible that for the same athlete the daily carbohydrate intake needs to change within a couple of days from 3 to 10 g per kilogram of body mass. The often-requested one-size-fits-all recommendation is wishful thinking and will never become reality.

Keywords: Carbohydrates, glucose, recovery, glycogen, performance

Zusammenfassung

Die Bedeutung der Kohlenhydrate für die intensive sportliche Leistung ist seit spätestens Mitte der 1920er-Jahre bekannt. Seither lieferten viele Forschungen zahlreiche Erkenntnisse, anhand derer die Leitplanken zur Kohlenhydratzufuhr vor, während und nach der sportlichen Belastung aufgestellt werden können. In den letzten Jahren wuchs aber das Verständnis, dass die konkreten Empfehlungen auf die akuten, aber auch mittel- bis längerfristigen Ziele des Sportlers bzw. der Sportlerin massgeschneidert werden müssen. So kann im Extremfall für denselben Sportler die sinnvolle tägliche Zufuhr innert weniger Tage zwischen 3 und 10 g Kohlenhydrate pro Kilogramm Körpergewicht schwanken. Die oft gewünschte einheitliche Empfehlung für alle verschiedenen sportlichen Situationen ist und wird für immer Wunschenken bleiben.

Schlüsselwörter: Kohlenhydrate, Glucose, Regeneration, Glykogen, Leistung

Einleitung

Mitte des 19. Jahrhunderts ist die Zeit des Starphysiologen Justus von Liebig. Würde er heute leben, so hätte er in den sozialen Medien zweifelsfrei zigtausende Follower. Liebig war für die damalige Meinung verantwortlich, dass Proteine die Energiequelle für die Muskelarbeit sind [1]. Diese Auffassung fiel erst nach einer Untersuchung aus dem Jahre 1865, in der Forscher der Universität Zürich die stickstofffreien Substanzen und nicht die Proteine als Energiequelle der Muskeln identifizierten [2]. Trotz dieser 150 Jahre alten Erkenntnis glauben heute noch viele, dass die Energie für ihre sportliche Tätigkeit aus dem Steak stammt.

Die Zürcher Forscher schlossen zwar die Proteine als Energiequelle der Muskulatur aus. Sie konnten aber die Identität der Energieträger nicht ermitteln. Erst Ende des 19. Jahrhunderts entstand mit der Einführung des respiratorischen Quotienten die prinzipielle Möglichkeit, das Verhältnis von Fetten zu Kohlenhydraten als Energielieferanten bei muskulärer Arbeit zu bestimmen [3].

Dennoch lieferten die Studien der folgenden 40 Jahre unklare Ergebnisse bezüglich der Frage, ob Fette oder doch Kohlenhydrate die Hauptenergiequelle während Muskelarbeit darstellen [4]. Christensen und Hansen schafften schliesslich mit ihrer Versuchsreihe aus dem Jahr 1939 Klarheit. Sie ermittelten die Faktoren, welche die Anteile der Kohlenhydrate und Fette an der Energiebereitstellung unter Belastung beeinflussten: Intensität und Dauer der Belastung, Ernährungsstatus sowie Trainingszustand [4–8]. Die Bestätigung dieser Erkenntnisse erfolgte durch eine weitere Versuchsreihe skandinavischer Forscher Ende der 1960er-Jahre, in denen auch die durch Bergström wieder eingeführte Technik der perkutanen Muskelbiopsie [9] für die Analyse des Muskelglykogens in verschiedenen sportlichen Situationen zum Einsatz kam [10–15]. Die 1939 identifizierten Faktoren gelten heute noch als Hauptmodulatoren der Energiebereitstellung während muskulärer Arbeit [16].

Für alle intensiven sportlichen Belastungen und allgemein ab einem bestimmten Trainingsumfang sind die Kohlenhydrate die wichtigste Energiequelle. Dennoch wird selbst im Spitzensport nicht pauschal eine hohe Kohlenhydratzufuhr empfohlen. Ganz im Gegenteil. Die Empfehlungen müssen auf die aktuelle Situation angepasst und individuell massgeschneidert werden. Denn die so oft auch im Spitzensport gewünschte und zum Teil sogar geforderte allgemeingültige Sporternährung gibt es nicht. Im Sport müssen die Empfehlungen der Makronährstoffzufuhr, insbesondere der Kohlenhydrat- und Proteinzufuhr, individualisiert hergeleitet werden [17,18].

Kohlenhydratzufuhr, Muskelglykogen und Leistungsfähigkeit

Heute kennt man einen praktisch linearen Anstieg des Muskelglykogengehaltes in Abhängigkeit der Kohlenhydratzufuhr [19]. Dies war nicht immer der Fall. Claude Bernard war das französische Pendant zum deutschen Starphysiologen Liebig. Er beschrieb Mitte des 19. Jahrhunderts zum ersten Mal den Zusammenhang zwischen der Kohlenhydratzufuhr und dem Leberglykogen, noch bevor er das Glykogen strukturell identifiziert hatte und ihm seinen Namen gab [20,21]. Fünfzig Jahre nach der Entdeckung des Leberglykogens hat-

te man das Glykogen in praktisch allen Organen, inklusive der Muskulatur nachgewiesen [22].

Relativ alt ist auch die Kenntnis über den Zusammenhang zwischen Muskelglykogen und Leistungsfähigkeit. Seit 50 Jahren weiss man, dass eine hohe Leistungsfähigkeit von ausreichendem Muskelglykogen abhängig ist [23]. Der zugrundeliegende Mechanismus konnte jedoch bis heute nicht eindeutig geklärt werden [24].

Bei Sportlern betragen hohe Glykogengehalte um die 200 mmol/kg Muskelmasse [25–28]. Zusammen mit standardisierten Referenzwerten ergibt dies einen maximalen, absoluten Glykogengehalt in der gesamten Muskulatur von 1000 g beim Mann und 650 g bei der Frau¹. Diese Schätzwerte variieren in Abhängigkeit der Körpermasse, sind aber eine gute Annäherung des Ist-Zustandes. In einem extremen Versuch zur Ermittlung der Glykogenspeicherfähigkeit der Muskulatur, mittels mehrstündiger, hochdosierter Glucoseinfusion direkt ins Blut, ergab sich ein Glykogengehalt von 40 g pro kg Muskelmasse [30]. Dies entspricht einem geschätzten Glykogengehalt in der gesamten Muskulatur von knapp 1200 g. Neben der maximal möglichen Glykogenmenge interessiert auch die Rate der Glykogensynthese. Diese beträgt nach einer sportlichen Belastung und bei der experimentell ermittelten optimalen Kohlenhydratzufuhr von 1.2 g/kg Körpermasse pro Stunde höchstens um die 10 mmol/kg Muskelmasse pro Stunde, entsprechend 28 g/h beim Mann und 18 g/h bei der Frau [31,32].

Kohlenhydratzufuhr vor der Belastung

Ein gezieltes Füllen der Glykogenspeicher ist heute eine übliche Wettkampfvorbereitung im Ausdauersport, und dies wird auch in anderen Sportarten zu einem gewissen Grade befolgt. Die älteste praktische Methode des Füllens des Muskelglykogens leitet sich von den als Klassiker der Sporternährungsforschung geltenden Versuchen von Bergström und Hultman ab. Sie zeigten 1966, dass eine vorgängige Entleerung der Muskelglykogenspeicher die Glykogenresynthese verbessert [11]. Darauf basierend entstand die später als «Schwedendiät» bekannt gewordene Ernährungs- und Trainingsintervention [33]. Der in diesem Zusammenhang oft verwendete Terminus «Superkompensation» der Glykogenspeicher stammte aber nicht von den schwedischen Forschern, sondern aus Untersuchungen der damaligen Sowjetunion [34,35]. Dabei wurde das Glykogen von Frostmuskeln durch elektrische Stimulation mit unterschiedlichen Frequenzen entleert und anschliessend die Resynthese beobachtet. Diese erfolgte unterschiedlich schnell, und zwar in Abhängigkeit der zuvor eingesetzten Frequenz. Aufgrund der teils hohen Glykogenresynthese wurde von der Superkompensation des Glykogens gesprochen.

In der Schwedendiät moduliert man über rund 7 Tage vor einem Zielevent das Training und die Kohlenhydratzufuhr

¹ Die internationale Kommission zum Strahlenschutz hat die Masse einer Referenzperson definiert. Ein erwachsener Mann wiegt demnach 73 kg, eine Frau 60 kg [29]. Die entsprechende Gesamtmuskelmasse wird für den Mann mit 29 kg angegeben (40% der Körpermasse), für die Frau sind es 18 kg (29% der Körpermasse). Der Glykogengehalt berechnet sich somit folgendermassen:

- 200 mmol/kg Muskelmasse x Molmasse Glucose von 180 g/mol = 36 g Glucose/kg Muskelmasse
- 29 kg Muskelmasse x 36 g Glucose/kg Muskelmasse = 1044 g Glucose
- 18 kg Muskelmasse x 36 g Glucose/kg Muskelmasse = 648 g Glucose

[12]. Nach einer intensiven Trainingseinheit verzichtet man für 3 Tage auf die Zufuhr von Kohlenhydraten. Darauf folgt eine weitere intensive Trainingseinheit mit anschließender Erhöhung der Kohlenhydratzufuhr bis zum Wettkampf auf bis zu 10 g Kohlenhydrate pro Kilogramm Körpermasse. Diese Strategie gilt seit langer Zeit als veraltet, sie wird jedoch immer noch häufig angewendet. Problematisch ist bei dieser Methodik der extreme Eingriff in das übliche Ess- und Trainingsverhalten, der zu einer starken Ermüdung führen kann. Dies ist zumindest aus psychologischen Gründen kein idealer Zustand vor einem Wettkampf.

Seit Anfang der 1980er-Jahre gibt es eine von Sherman und Mitarbeitenden vorgeschlagene Alternative: das ebenfalls 7 Tage dauernde Tapering [36]. Im Gegensatz zur Schwedendiät reduziert man beim Tapering die Belastung vor dem Zielevent schrittweise über eine Woche hinweg. Es gibt auch keine kohlenhydratarme Kost, sondern eine übliche Mischkost während der ersten 3 Tage des Taperings, was insgesamt dem üblichen Verhalten vor einem Wettkampf besser entspricht. Gleich wie in der Schwedendiät erfolgt auch beim Tapering in den letzten 3 Tagen vor dem Wettkampf ein Wechsel auf eine extrem kohlenhydratreiche Kost. Bezüglich Maximierung des Glykogengehalts erzielen beide Methoden Werte um 200 mmol/kg Muskelmasse. Im Tapering entfallen aber die möglichen Nebenwirkungen der Schwedendiät.

Schliesslich zeigten australische Forscher Anfang der 2000er-Jahre, dass ein einziger Tag mit extrem kohlenhydratreicher Ernährungsweise von 10 g/kg Körpermasse für die Maximierung der Speicher reicht [26,27]. Sofern die Muskelzellen unbeschädigt sind. Denn nach einem Fussballspiel konnten gut trainierte Fussballer mit Anzeichen von Mikroläsionen der Muskulatur ihre Glykogenspeicher trotz einer Kohlenhydratmenge von 10 g/kg Körpermasse erst nach 3 Tagen wieder füllen [37]. Die aktuelle Empfehlung für die Praxis lautet daher: Auch wenn im Idealfall für die Maximierung der Glykogenspeicher ein Tag genügt, kann dies situationsbedingt dennoch mehrere Tage in Anspruch nehmen.

Kohlenhydratzufuhr während der Belastung

Beim Boston Marathon im Jahre 1924 wurde bei mehreren Finishern eine Hypoglykämie diagnostiziert [38]. In den anschließenden Monaten erfolgten bei diesen Läufern mehrere Untersuchungen zum Blutglucoseverlauf während Ausdauerbelastungen. Die Erkenntnisse aus diesen Beobachtungen verleiteten die untersuchenden Mediziner dazu, den hypoglykämischen Finishern des 1924er-Laufs vor dem 1925er-Marathon – vermutlich zum ersten Mal in der Geschichte – eine kohlenhydratreiche Ernährung als Vorbereitung des Marathons zu empfehlen [39]. Zusätzlich wurden die Läufer dazu animiert, speziell hergestellte Bonbons à je 3 g Glucose während des Laufes zu verzehren. Nach dem 1925er-Lauf hatten alle Läufer, die das Jahr zuvor hypoglykämisch finishten, normale Blutglucosewerte und waren in besserer körperlicher Verfassung als im Jahre zuvor. Heute ist allgemein anerkannt, dass neben sportartspezifisch ausreichend gefüllten Glykogenspeichern auch die Energiezufuhr in Form von Kohlenhydraten während der Belastung einen nennenswerten Einfluss auf die Leistung haben kann, wenn auch nicht in allen Situationen [40–44].

Die Empfehlungen für die Kohlenhydratzufuhr während der Belastung werden in Abhängigkeit von Belastungsdauer und -intensität sowie der intestinalen Absorbierbarkeit der

Kohlenhydrate abgestuft (Tab. 1). Der Grund für die Berücksichtigung der Absorbierbarkeit sind die Erkenntnisse aus einer eindrücklichen Versuchsreihe der 2000er-Jahre. Bei gleichzeitiger Einnahme von Kohlenhydraten, die über unterschiedliche intestinale Transporter absorbiert werden, also «multipel transportierbar» sind, erzielte man eine intestinale Absorption von bis 1.75 g/min [45–54]. Die Absorptionsrate eines einzeln zugeführten Kohlenhydrattyps liegt hingegen bei nur rund 1 g/min [55].

Ebenfalls aus den 2000er-Jahren stammt die Idee der Mundspülung mit einem kohlenhydrathaltigen Getränk als leistungsverbessernde Methode [40,44,56,57]. Möglicherweise führt die Aktivierung bestimmter Gehirnareale durch orale Kohlenhydratsensoren zu einer Reduktion der Ermüdung und besseren Leistungsfähigkeit [58]. Auch wenn die entsprechende Evidenz nicht klar ist, sind negative Auswirkungen im praktischen Einsatz nicht zu erwarten. Die Anwendung soll dabei nicht identisch wie in den Studien erfolgen (also ein paar Sekunden Mundspülung und anschließendes Ausspucken). Sie soll vielmehr dahingehend verstanden werden, dass selbst bei kurzen Belastungen die Einnahme eines Sportgetränks von Vorteil sein kann, auch wenn die Glykogenreserven ausreichend wären. Die Mundspülung wird daher als eine Möglichkeit der Leistungsverbesserung empfohlen [59].

Die aktuellen Empfehlungen zur Kohlenhydratzufuhr während sportlicher Belastung beinhalten für sehr lange Leistungen eine hohe Kohlenhydratmenge von 90 g/h (Tab. 1). Da solch hohe Mengen zu gastrointestinalen Beschwerden führen können, gilt hier die Empfehlung einer Gewöhnung an diese Menge als essenziell. Inwiefern die intestinale Absorptionsfähigkeit für Kohlenhydrate wie im Tiermodell [60] auch im Menschen durch erhöhte Exposition an Kohlenhydraten verstärkt werden kann, wird zurzeit noch diskutiert. Es macht aber auf jeden Fall Sinn, die Verträglichkeit einer hohen Kohlenhydratzufuhr im Training zu testen, um möglichen gastrointestinalen Problemen im Wettkampf aus dem Wege zu gehen [61].

Dauer	Menge an Kohlenhydraten	Art der Kohlenhydrate	Gewöhnung
30–75 min	Geringe Menge oder Mundspülung	Einzeln oder multipel transportierbar	Sehr empfehlenswert
1–2 h	30 g/h	Einzeln oder multipel transportierbar	Sehr empfehlenswert
2–3 h	60 g/h	Einzeln oder multipel transportierbar	Sehr empfehlenswert
>2.5 h	90 g/h	Multipel transportierbar	Absolut essenziell

Tabelle 1: Empfohlene Kohlenhydratzufuhr während sportlicher Belastung [57].

Kohlenhydratzufuhr für die Regeneration

Die Forschung in der Sportphysiologie der letzten Jahre führte zu einer verfeinerten Betrachtung der Regenerationsphase. Liegt der Fokus auf einer mehr oder weniger unmittelbar folgenden Belastung, also bei einer Erholungszeit von wenigen Stunden bis maximal der nächtlichen Schlafphase, geht

es um die «rasche Erholung» und entsprechenden Regenerationsmassnahmen. Stehen hingegen Trainingsfortschritte, inklusive Veränderungen der Körpermasse oder -zusammensetzung im Vordergrund, spricht man von adaptiven Massnahmen bei mittel- bis längerfristigen Zielen. Bei den Kohlenhydraten geht es in der Regeneration primär um die Glykogenresynthese. Die wichtigsten Faktoren, welche die Resyntheserate beeinflussen, sind die zugeführte Menge an Kohlenhydraten, der Zeitpunkt und die Häufigkeit ihrer Einnahme, der Entleerungsgrad der Glykogenspeicher selbst sowie zum Teil der Typ der Kohlenhydrate [32].

Für die rasche Erholung und eine hohe Glykogenresyntheserate liegt der Konsens zur Kohlenhydratzufuhr bei stündlich 1.0 bis 1.2 g/kg Körpermasse, während den ersten rund 4 Stunden nach der Belastung [62]. Eine höhere Kohlenhydratzufuhr führt zu keiner verstärkten Resyntheserate in der Muskulatur [63]. In der Praxis ist es manchmal schwierig, die erforderliche Kohlenhydratmenge zu erreichen. In solchen Fällen verbessert die gleichzeitige Einnahme von etwas Protein die Glykogenresynthese. Die Resyntheserate fällt dann aber nicht höher aus, als bei einer ausschliesslichen Zufuhr an Kohlenhydraten mit der idealen Menge von 1.2 g/kg Körpermasse. Bei einer suboptimalen Menge an Kohlenhydraten sollte die Proteinbeigabe um die 0.2 bis 0.4 g/kg Körpermasse pro Stunde betragen [64–68], entsprechend rund 15 bis 30 g/h bei einem Mann von 73 kg. Die weitere Kohlenhydratzufuhr im Tagesverlauf hängt dann von der aktuellen Belastungssituation ab (Tab. 2).

Die maximale Glykogenresyntheserate lässt sich mit der Wahl der Kohlenhydratquelle etwas modulieren, sie sollte aber generell eine Glucosequelle sein. Beim Einsatz eines Getränks, das auf Kartoffelstärke mit hochmolekularen Glucosepolymeren basiert und eine sehr niedrige Osmolalität von 85 mmol/L aufweist, erhöht sich die Resyntheserate während den ersten beiden Stunden nach der Belastung um gut 20% [69]. Die Einnahme eines solchen Getränks führte auch zu einer besseren Leistung nach einer sehr kurzen Erholung von zwei Stunden und ist somit für Situationen mit mehreren Belastungen am gleichen Tag interessant [70,71].

Die gesamte, tägliche Zufuhr an Kohlenhydraten hängt in erster Linie vom Ausmass und Ziel des an diesem Tag durchgeführten Trainings ab, was zusätzlich auch die mittel- und längerfristigen Ziele des Athleten berücksichtigt (Tab. 2) [62]. Die empfohlenen Mengen sind bewusst grob gehalten und teils überlappend, da sie vor einer Umsetzung in die Praxis immer zuerst auf die individuelle Situation angepasst

werden müssen. Der regelmässige Konsum von Alkohol kann die tägliche Glykogenresynthese negativ beeinflussen. Dies dürfte aber nur der Fall sein, wenn die Alkoholeinnahme sehr hoch ist und die alkoholhaltigen Getränke anstelle von Kohlenhydratquellen zugeführt werden [72].

Schlussfolgerungen

Die Empfehlungen zur Kohlenhydratzufuhr im Sport entstanden als Quintessenz vieler Untersuchungen der letzten 100 Jahre. Je nach aktuellem und mittel- bis längerfristigem Ziel bedarf es selbst bei demselben Sportler oder bei derselben Sportlerin unterschiedliche Empfehlungen. Entsprechend gibt und wird es nie pauschale Empfehlungen zur Kohlenhydratzufuhr im Sport geben.

Praktische Bedeutung

- Für die Optimierung einer bevorstehenden (Wettkampfs) Leistung müssen die Muskelglykogenspeicher ausreichend gefüllt sein, was man in 1 bis 3 Tagen mit einer täglichen Kohlenhydratzufuhr von etwa 7 bis 10 g/kg Körpermasse erzielen kann.
- In Abhängigkeit von Dauer & Intensität sowie Ziel der bevorstehenden Leistung verzögert die Zufuhr von 30 bis 90 g Kohlenhydraten pro Stunde die Ermüdung während der Leistung und erhöht die Leistungsfähigkeit.
- Die tägliche Zufuhr an Kohlenhydraten muss je nach aktuellem und mittel- bis längerfristigem Ziel zwischen 3 und 10 g/kg Körpermasse liegen.
- Für massgeschneiderte Empfehlungen im Sport ist es ratsam, eine zertifizierte Fachperson in Sporternährung zu konsultieren (<http://www.sns.ch/support>).

Korrespondenzadresse

Dr. sc. nat. Paolo C. Colombani
Consulting Colombani GmbH
3076 Worb
consulting@colombani.ch

Literatur

1. Liebig J von. Ueber die Quelle der Muskelkraft. III. Die Quelle der Muskelkraft. Ann Chem Pharm. 1870;153(2):157-228.
2. Fick A, Wislicenus J. LXX. On the origin of muscular power. Phil Mag. 1866;31(212):485-503.
3. Zuntz N. Ueber den Stoffverbrauch des Hundes bei Muskularbeit. Pflüger, Arch. 1897;68(5-7):191-211.
4. Christensen EH, Hansen O. Untersuchungen über die Verbrennungsvorgänge bei langandauernder, schwerer Muskularbeit. Skand Archiv f Physiol. 1939;81:152-9.
5. Christensen EH, Hansen O. Arbeitsfähigkeit und Ernährung. Skand Archiv f Physiol. 1939;81:160-71.
6. Christensen EH, Hansen O. Hypoglykämie, Arbeitsfähigkeit und Ermüdung. Skand Archiv f Physiol. 1939;81:172-9.
7. Christensen EH, Hansen O. Respiratorischer Quotient und O₂-Aufnahme. Skand Archiv f Physiol. 1939;81:180-9.
8. Christensen EH, Hansen O. Zur Methodik der Respiratorischen Quotient-Bestimmung in Ruhe und bei Arbeit. Skand Archiv f Physiol. 1939;81:137-51.
9. Lindholm B, Alvestrand A. Jonas Bergstrom MD, PhD (1929-2001): scientist in metabolism and nutrition in renal disease. Nutrition. 2002;18(1):120-1.

Trainingsintensität	Umschreibung	Tägliche Kohlenhydratzufuhr
Leicht	Tiefe Intensität oder vorwiegend Geschicklichkeitsaktivitäten	3–5 g/kg Körpermasse
Moderat	Mässiges Trainingsprogramm (ca. 1 h/d)	5–7 g/kg Körpermasse
Hoch	Ausdauerprogramm (moderate bis hohe Intensität, 1–3 h/d)	6–10 g/kg Körpermasse
Sehr hoch	Extrem (moderate bis hohe Intensität, >4–5 h/d)	8–12 g/kg Körpermasse

Tabelle 2: Leitplanken zur täglich empfohlenen Kohlenhydratzufuhr im Sport [62].

10. Bergström J, Hultman E. The effect of exercise on muscle glycogen and electrolytes in normals. *Scand J Clin Lab Invest.* 1966;18(1):16-20.
11. Bergström J, Hultman E. Muscle glycogen synthesis after exercise: an enhancing factor localized to the muscle cells in man. *Nature.* 1966;210(33):309-10.
12. Hultman E, Bergström J. Muscle glycogen synthesis in relation to diet studied in normal subjects. *Acta Med Scand.* 1967;182(1):109-17.
13. Bergström J, Hultman E. Synthesis of muscle glycogen in man after glucose and fructose infusion. *Acta Med Scand.* 1967;182(1):93-107.
14. Bergström J, Hultman E. A study of the glycogen metabolism during exercise in man. *Scand J Clin Lab Invest.* 1967;19(3):218-28.
15. Bergström J, Hermansen L, Hultman E, Saltin B. Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol.Scand.* 1967;71(2):140-50.
16. Gonzalez JT, Fuchs CJ, Betts JA, van Loon LJC. Liver glycogen metabolism during and after prolonged endurance-type exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2016;311(3):E543-53.
17. Burke LM. Re-examining high-fat diets for sports performance: Did we call the, Nail in the coffin' too soon? *Sports Med.* 2015;45(Suppl 1):S33-S49.
18. Jeukendrup A. A step towards personalized sports nutrition: carbohydrate intake during exercise. *Sports Med.* 2014;44(S1):25-33.
19. Burke LM, Kiens B, Ivy JL. Carbohydrates and fat for training and recovery. *J Sports Sci.* 2004;22(1):15-30.
20. Bernard C. Sur une nouvelle fonction du foie chez l'homme et les animaux. *C R Acad Sci.* 1850;31(17):571-4.
21. Bernard C. Sur le mécanisme physiologique de la formation du sucre dans le foie (suite). *C R Acad Sci.* 1857;44(12):578-86.
22. Gage SH. Glycogen in the nervous system of vertebrates. *J Comp Neurol.* 1916;27(3):451-65.
23. Conlee RK. Muscle glycogen and exercise endurance: a twenty-year perspective. *Exerc Sport Sci Rev.* 1987;15:1-28.
24. Ortenblad N, Westerblad H, Nielsen J. Muscle glycogen stores and fatigue. *J Physiol.* 2013;591(18):4405-13.
25. Karlsson J, Saltin B. Diet, muscle glycogen, and endurance performance. *J Appl Physiol.* 1971;31(2):203-6.
26. Bussau VA, Fairchild TJ, Rao A, Steele P, Fournier PA. Carbohydrate loading in human muscle: an improved 1 day protocol. *Eur J Appl Physiol.* 2002;87(3):290-5.
27. Fairchild TJ, Fletcher S, Steele P, Goodman C, Dawson B, Fournier PA. Rapid carbohydrate loading after a short bout of near maximal-intensity exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34(6):980-6.
28. James AP, Lorraine M, Cullen D, Goodman C, Dawson B, Palmer TN et al. Muscle glycogen supercompensation: absence of a gender-related difference. *Eur J Appl Physiol.* 2001;85(6):533-8.
29. Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values: ICRP Publication 89. *Annals of the ICRP.* 2002;32(3-4):1-277.
30. Hansen BF, Asp S, Kiens B, Richter EA. Glycogen concentration in human skeletal muscle: effect of prolonged insulin and glucose infusion. *Scand J Med Sci Sports.* 1999;9(4):209-13.
31. Pedersen DJ, Lessard SJ, Coffey VG, Churchley EG, Wootton AM, Ng T et al. High rates of muscle glycogen resynthesis after exhaustive exercise when carbohydrate is coingested with caffeine. *J Appl Physiol.* 2008;105(1):7-13.
32. Jentjens R, Jeukendrup A. Determinants of post-exercise glycogen synthesis during short-term recovery. *Sports Med.* 2003;33(2):117-44.
33. Bergström J, Hultman E. Nutrition for maximal sports performance. *JAMA.* 1972;221(9):999-1006.
34. Yakovlev NN. Biochemistry of sport in the Soviet Union: beginning, development, and present status. *Med Sci Sports.* 1975;7(4):237-47.
35. Yampolskaya LJ. Supercompensatsia v sodержanii glikogena myshts v periode otdykha posle raoty raslichnogo ritma i dlitelnosti. *Sechnov Physiol Journ.* 1950;36:749-54.
36. 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(2):114-8.
37. Krstrup P, Ortenblad N, Nielsen J, Nybo L, Gunnarsson T, Iaia F et al. Maximal voluntary contraction force, SR function and glycogen resynthesis during the first 72-h after a high-level competitive soccer game. *Eur J Appl Physiol.* 2011;111(12):2987-95.
38. Levine SA, Gordon B, Derick CL. Some changes in the chemical constituents of the blood following a marathon race: With special reference to the development of hypoglycemia. *JAMA.* 1924;82(22):1778-9.
39. Gordon P, Kohn LA, Levine SA, Matton M, De MS, Whiting WB. Sugar content of runners in blood following a marathon race. *JAMA.* 1925;85(7):508-9.
40. Cermak NM, Loon, Luc J. C. The use of carbohydrates during exercise as an ergogenic aid. *Sports Med.* 2013;43(11):1139-55.
41. Baker LB, Rollo I, Stein KW, Jeukendrup AE. Acute effects of carbohydrate supplementation on intermittent sports performance. *Nutrients.* 2015;7(7):5733-63.
42. Pöschmüller M, Schwingshackl L, Colombani PC, Hoffmann G. A systematic review and meta-analysis of carbohydrate benefits associated with randomized controlled competition-based performance trials. *J Int Soc Sports Nutr.* 2016;13(1):709.
43. Hawley JA, Leckey JJ. Carbohydrate dependence during prolonged, intense endurance exercise. *Sports Med.* 2015;45(Supplement 1):5-12.
44. Stellingwerff T, Cox GR. Systematic review: carbohydrate supplementation on exercise performance or capacity of varying durations. *Appl Physiol Nutr Metab* 2014;39(9):998-1011.
45. Jentjens RLP, Underwood K, Achten J, Currell K, Mann CH, Jeukendrup AE. Exogenous carbohydrate oxidation rates are elevated following combined ingestion of glucose and fructose during exercise in the heat. *J Appl Physiol.* 2006;100:807-16.
46. Wallis GA, Rowlands DS, Shaw C, Jentjens RL, Jeukendrup AE. Oxidation of combined ingestion of maltodextrins and fructose during exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37(3):426-32.
47. Jeukendrup AE, Moseley L, Mainwaring GI, Samuels S, Perry S, Mann CH. Exogenous carbohydrate oxidation during ultra-endurance exercise. *J Appl Physiol.* 2005;100:1134-41.
48. Hulston CJ, Wallis GA, Jeukendrup AE. Exogenous CHO oxidation with glucose plus fructose intake during exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41(2):357-63.
49. Currell K, Jeukendrup AE. Superior endurance performance with ingestion of multiple transportable carbohydrates. *Med Sci Sports Exerc.* 2008;40(2):275-81.
50. Jentjens RLP, Moseley L, Waring RH, Harding LK, Jeukendrup AE. Oxidation of combined ingestion of glucose and fructose during exercise. *J Appl Physiol.* 2004;96(4):1277-84.
51. Jentjens RL, Achten J, Jeukendrup AE. High oxidation rates from combined carbohydrates ingested during exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36(9):1551-8.
52. Jentjens RLP, Venables MC, Jeukendrup AE. Oxidation of exogenous glucose, sucrose, and maltose during prolonged cycling exercise. *J Appl Physiol.* 2004;96(4):1285-91.
53. Jentjens RLP, Shaw C, Birtles T, Waring RH, Harding LK, Jeukendrup AE. Oxidation of combined ingestion of glucose and sucrose during exercise. *Metabolism.* 2005;54(5):610-8.
54. 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(4):485-92.
55. Jeukendrup AE, Jentjens R. Oxidation of carbohydrate feedings during prolonged exercise: current thoughts, guidelines and directions for future research. *Sports Med.* 2000;29(6):407-24.
56. Jeukendrup A. The new carbohydrate intake recommendations. *Nestle Nutr Inst Workshop Ser.* 2013;75:63-71.
57. de Ataide e Silva, Thays, Di Cavalcanti Alves de Souza, Maria, Amorim J de, Stathis C, Leandro C, Lima-Silva A. Can carbohydrate mouth rinse improve performance during exercise? A systematic review. *Nutrients.* 2013;6(1):1-10.
58. Turner CE, Byblow WD, Stinear CM, Gant N. Carbohydrate in the mouth enhances activation of brain circuitry involved in motor performance and sensory perception. *Appetite.* 2014;80:212-9.
59. Burke LM, Maughan RJ. The Governor has a sweet tooth – Mouth sensing of nutrients to enhance sports performance. *Eur J Sport Sci.* 2015;15(1):29-40.
60. Jeukendrup AE, McLaughlin J. Carbohydrate ingestion during exercise: Effects on performance, training adaptations and trainability of the gut. *Nestle Nutr Inst Workshop Ser.* 2011;69:1-17.
61. de Oliveira, Erick Prado, Burini RC, Jeukendrup A. Gastrointestinal complaints during exercise: prevalence, etiology, and nutritional recommendations. *Sports Med.* 2014;44(S1):79-85.
62. Burke LM, Hawley JA, Wong SHS, Jeukendrup AE. Carbohydrates for training and competition. *J Sports Sci.* 2011;29(Sup1):S17-S27.
63. Howarth KR, Moreau NA, Phillips SM, Gibala MJ. Co-ingestion of protein with carbohydrate during recovery from endurance exercise stimulates skeletal muscle protein synthesis in humans. *J Appl Physiol.* 2009;106:1394-402.
64. Berardi JM, Price TB, Noreen EE, Lemon PW. Postexercise muscle glycogen recovery enhanced with a carbohydrate-protein supplement. *Med Sci Sports Exerc.* 2006;38(6):1106-13.
65. Ivy JL, Goforth HWJ, Damon BM, McCauley TR, Parsons EC, Price TB. Early postexercise muscle glycogen recovery is enhanced with a carbohydrate-protein supplement. *J Appl Physiol.* 2002;93(4):1337-44.
66. van Loon LJC, Saris WHM, Kruijshoop M, Wagenmakers AJM. Maximizing postexercise muscle glycogen synthesis: carbohydrate supple-

-
- mentation and the application of amino acid or protein hydrolysate mixtures. *Am J Clin Nutr.* 2000;72(1):106-11.
67. Zawadzki KM, Yaspelkis BB, Ivy JL. Carbohydrate-protein complex increases the rate of muscle glycogen storage after exercise. *J Appl Physiol.* 1992;72(5):1854-9.
68. Beelen M, Kranenburg JV, Senden JM, Kuipers H, van Loon LJ. Impact of Caffeine and Protein on Post-Exercise Muscle Glycogen Synthesis. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44(4):692-700.
69. Piehl AK, Soderlund K, Hultman E. Muscle glycogen resynthesis rate in humans after supplementation of drinks containing carbohydrates with low and high molecular masses. *Eur J Appl Physiol.* 2000;81(4):346-51.
70. Stephens FB, Roig M, Armstrong G, Greenhaff PL. Post-exercise ingestion of a unique, high molecular weight glucose polymer solution improves performance during a subsequent bout of cycling exercise. *J Sports Sci.* 2008;26(2):149-54.
71. Oliver JM, Almada AL, van Eck LE, Shah M, Mitchell JB, Jones MT et al. Ingestion of high molecular weight carbohydrate enhances subsequent repeated maximal power: A randomized controlled trial. *PLoS ONE.* 2016;11(9):e0163009.
72. Burke LM, Collier GR, Broad EM, Davis PG, Martin DT, Sanigorski AJ et al. Effect of alcohol intake on muscle glycogen storage after prolonged exercise. *J Appl Physiol.* 2003;95(3):983-90.