

Beat Knechtle<sup>1</sup>, Jürgen Zapf<sup>2</sup>, Daniel Zwysig<sup>3</sup>, Kurt Lippuner<sup>4</sup>, Hans Hoppeler<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Institut für Sportmedizin, Schweizer Paraplegiker-Zentrum, CH-6207 Nottwil

<sup>2</sup> Institut für Sportwissenschaft, Universität Bayreuth, D-95447 Bayreuth

<sup>3</sup> POLAR, Leuenberger Medizintechnik, CH-8304 Wallisellen

<sup>4</sup> Departement DURN, Einheit für Osteoporose, Universitätsspital, CH-3010 Bern

<sup>5</sup> Anatomisches Institut, Universität Bern, CH-3000 Bern

# Energieumsatz und Muskelstruktur bei Langzeitbelastung: eine Fallstudie

## Zusammenfassung

Wir haben bei einem Athleten an einem Triple-Ultra-Triathlon über 11,4 km Schwimmen, 540 km Radfahren und 126,6 km Laufen mittels permanenter Messung der Herzfrequenz die Belastungsintensität und anhand dieser Daten die Art der zur Energiebedarfsdeckung eingesetzten Substrate untersucht. Das Energieumsatzäquivalent der Herzfrequenz wurde vor dem Wettkampf in Leistungstests unter Verwendung indirekter Kalorimetrie bestimmt. Vor und nach dem Wettkampf wurden die intramyozellulären Lipidspeicher elektronenoptisch quantifiziert und Hinweise auf allfällige strukturelle Muskelzellschädigungen gesucht. Die Körperzusammensetzung wurde ebenfalls vor und nach dem Wettkampf mittels Dual-Photon-Absorptiometrie (DXA) bestimmt. Die Resultate zeigen, dass ein sehr gut vorbereiteter Extremausdauerathlet eine Nonstop-Belastung von zwei Tagen bei einer Intensität von rund 55%  $\dot{V}O_2$ max durchhalten kann. Bei dieser Belastungsintensität war der Verbrauch an Kohlenhydraten so tief, dass er adäquat über die zugeführte Nahrung gedeckt werden konnte. Das Persistieren der intramyozellulären Lipidspeicher nach dem Wettkampf könnte darauf hinweisen, dass Lipide auch in grösserem Umfang während der Belastung in die Muskelzellen gelangen können. Das Körpergewicht nahm bei gleich bleibendem Anteil an Subkutanfett um 2,1 kg zu. Aufgrund der DXA-Messungen ist die Zunahme des Körpergewichts vermutlich auf Ödeme der belasteten Muskeln zurückzuführen. Die erhöhten Plasma-Kreatinkinasewerte nach dem Wettkampf deuten auf Muskelzellschädigungen hin, auch wenn diese elektronenmikroskopisch nicht nachgewiesen werden konnten.

## Summary

Using permanent recording of the heart rate, we investigated in a well prepared athlete the exercise intensity as well as the substrate selection during a triple ultra triathlon race. Muscle biopsies were carried out before and after the race to quantitate intramyocellular lipid stores and to detect eventual muscle fiber damage. Body composition was determined before and after the race with dual-photon absorptiometry (DXA). Our results indicate that a well-trained endurance athlete is able to perform at an intensity close to 55%  $\dot{V}O_2$ max over two days of a non-stop competition. Consumption of carbohydrates seems to be sufficiently covered by nutrition during the race. Intramyocellular lipid stores were not depleted after the race indicating that muscle cells must have been adequately supplied with fatty acids. Body weight was increased by 2.1 kg. The DXA estimates of fat free mass indicate that this increase is due to edema of muscles involved in exercise. We found plasma creatine kinase to be increased, however there was no ultrastructural evidence of muscle fiber damage.

Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 51 (4), 180–187, 2003

## Einleitung

Die physiologischen Reaktionen auf die extreme Dauerbelastung eines mehrfachen Ultra-Triathlons ist bis heute wenig untersucht worden. Bei dieser Art der Belastung entstehen einerseits Probleme der adäquaten Energieaufnahme und Energiebereitstellung, andererseits kann die exzentrische Belastung auf der Laufstrecke zu Muskelzellschädigungen führen [2, 3, 4]. In diesem Sinne müssen Beobachtungen von Wettkämpfern an Ultra-Marathons interpretiert werden, die auf einen Muskelmasseverlust nach Läufen hinweisen [23]. Das Ziel dieser Arbeit war, einerseits das Energiebudget eines Triple-Ultra-Triathlons zu erstellen und andererseits mit Hilfe von Laborwerten und elektronenoptischer Untersuchungen von Muskelbiopsien allfällige Zellschädigungen nachzuweisen. Ausserdem ermöglichte die ultrastrukturelle Analyse der Biopsien ein Abschätzen der intramyozellulären Substratreserven am Ende des Wettkampfs. Dies war von Interesse, da sich der Athlet vor dem

Wettkampf fettreich ernährt hatte. Es ist bekannt, dass die Ernährung im Vorfeld einer Belastung auf die Substratselektion während der Belastung einen Einfluss haben kann [21, 22]. Eine fettreiche Ernährung begünstigt möglicherweise die Fettverbrennung, was gerade für Belastungen im Ultramarathonbereich eine Bedeutung haben könnte [10]. Konkrete Daten zum Energiemetabolismus und zur Substratselektion unter diesen extremen Formen der Belastung fehlen aber zurzeit.

Im Sinne einer Fallstudie untersuchten wir im Jahr 2001 einen Athleten am Défi Mondial de l'Endurance in Frankreich, einem Ultra-Triathlon über 11,4 km Schwimmen, 540 km Radfahren mit über 3000 Höhenmetern und 126,6 km Laufen. Wir stellten uns die Frage, inwiefern eine fettreiche Ernährung vor dem Wettkampf die intramuskulären Lipidspeicher in der Oberschenkelmuskulatur beeinflussen könnte. Mittels Herzfrequenzmessung versuchten wir die Wettkampfbelastungsintensität und daraus den Energieverbrauch zu bestimmen sowie einen Einblick in die Substratselek-

tion zu gewinnen. Allfällige Muskelzellschädigungen sollten an Muskelbiopsien, entnommen unmittelbar am Ende des Wettkampfs, mittels Elektronenmikroskopie nachgewiesen werden.

**Material und Methoden**

**Proband:** Der Proband ist ein 37-jähriger, 177 cm grosser und 77 kg schwerer Triathlet mit mehrjähriger Erfahrung im Langstreckenbereich. Er startete zum vierten Mal an diesem Wettkampf. Aufgrund seiner Wettkampfergebnisse von 1997 bis 2000 gehörte er zu den 10 weltbesten Ultra-Triathleten und zum engeren Kreis der Siegesanwärter an diesem Wettkampf. Die vorliegende Studie wurde von der Ethischen Kommission des Kantons Bern bewilligt.

**Maximal- und Stufentest vor dem Wettkampf:** 2 Wochen vor dem Wettkampf absolvierte der Proband einen  $\dot{V}O_2$ max-Test auf dem Fahrradergometer (Ergoline 900, ergoline, Bitz, Deutschland) mit Start bei 100 Watt und einer Stufenerhöhung von 30 Watt alle 3 Minuten sowie nach einer Pause von zwei Stunden mit aktiver Erholung (Schwimmen) einen Test auf dem Laufband (Saturn HP Cosmos, München, Deutschland) mit Start bei 10 km/h und Stufenerhöhung alle 3 Minuten um 1 km/h bis zur Erschöpfung.  $\dot{V}O_2$  und  $\dot{V}CO_2$  wurden unter Belastung kontinuierlich gemessen (Oxycon Pro, Jaeger, Würzburg, Germany). Anschliessend folgten an einem anderen Tag ein 6-Stufen-Test mit Ruhemessung und Messung unter Belastung bei 25, 35, 45, 55 und 65% von  $\dot{V}O_2$ max auf Fahrrad wie Laufband über je 10 Minuten pro Stufe. Die Tests lagen 2 Stunden auseinander, während dieser Zeit erholte sich der

Proband aktiv beim Schwimmen.  $\dot{V}O_2$  und  $\dot{V}CO_2$  wurden unter Belastung kontinuierlich gemessen (Oxycon Pro, Jaeger, Würzburg, Germany). Bei Erreichen des «Steadystate» nach 6 Minuten Belastung wurden die Fett- sowie die Kohlenhydratoxidation nach der Formel von Frayn [1] mit dem Korrekturfaktor für die Eiweissoxidation gemäss der Arbeit von Romijn et al. [25] berechnet. Die absolute Menge an oxidiertem Fett wurde mit 9.45 multipliziert, um den Kalorienverbrauch an Fett zu berechnen, die absolute Menge an oxidierten Kohlenhydraten wurde mit 4.3 multipliziert, um den Kalorienverbrauch an Kohlenhydraten zu berechnen (Tab. 1).

Diese Werte dienten der Berechnung des Energieverbrauches an Fett und Kohlenhydraten während des Wettkampfes.

**Berechnung Kalorienverbrauch unter Belastung.** Mit der Pulsuhr S610 wurde die Herzfrequenz alle 60 Sekunden während des Wettkampfes kontinuierlich erfasst (Abb. 1–3). Anhand der Software (Polar S-Series Precision Toolkit, POLAR, Polar Electro, Kempele, Finnland) wurde der Kalorienverbrauch pro Zeiteinheit bestimmt. Mit den Daten Grösse, Gewicht, Alter, Geschlecht und  $\dot{V}O_2$ max wird individuell der Energieverbrauch bei der aktuell gemessenen Herzfrequenz bestimmt [7, 8]. Zusätzlich wurde die Substratselektion anhand der im Stufentest ermittelten Respirationsquotienten (RQ) abgeschätzt. Dazu wurden die im Wettkampf ermittelten Herzfrequenzwerte den in Tabelle 1 aufgeführten Intensitätsgrade zugeordnet und mit den entsprechenden Zeiten, über welche diese Intensitäten eingehalten wurden, verrechnet (Tab. 2).

**Analyse der Ernährung:** Die gesamte Nahrungszufuhr und Mahlzeitenverteilung wurden in den 14 Tagen vor dem Wett-

Intensität und Gerät	Fettoxidation	Kalorienverbrauch aus Fettoxidation	Kohlenhydratoxidation	Kalorienverbrauch aus Kohlenhydratoxidation	RQ	%Anteil von Fett am gesamten Energieverbrauch	Herzfrequenz
Velo	(g/min)	(kcal/min)	(g/min)	(kcal/min)		(%)	(bpm)
Ruhe	0.174	1.644	0.101	0.434	0.76	63	66
25 % $\dot{V}O_2$ max	0.656	6.199	0.079	0.339	0.70	87	91
35 % $\dot{V}O_2$ max	0.764	7.219	0.218	0.937	0.73	77	103
45 % $\dot{V}O_2$ max	0.975	9.213	0.273	1.173	0.73	78	118
55 % $\dot{V}O_2$ max	1.104	10.432	0.680	2.924	0.76	61	135
65 % $\dot{V}O_2$ max	1.009	9.535	1.540	6.622	0.81	39	153
Laufen	(g/min)	(kcal/min)	(g/min)	(kcal/min)		(%)	(bpm)
Ruhe	0.212	2.003	0.059	0.253	0.74	78	66
25 % $\dot{V}O_2$ max	0.601	5.679	0.084	0.361	0.72	87	84
35 % $\dot{V}O_2$ max	0.698	6.596	0.162	0.696	0.73	81	94
45 % $\dot{V}O_2$ max	0.801	7.569	0.476	2.046	0.76	62	112
55 % $\dot{V}O_2$ max	1.088	10.281	0.541	2.326	0.75	66	128
65 % $\dot{V}O_2$ max	1.136	10.735	0.746	3.207	0.76	60	143

Tabelle 1: Energiebilanz der Stufentests.

Intensität und Disziplin	Zeit	Fettverbrauch	Kohlenhydratverbrauch	Totaler Energieverbrauch pro Stufe	Kalorienverbrauch aus Fett	Kalorienverbrauch aus Kohlenhydraten
	(min:sec)	(g)	(g)	(kcal)	(kcal)	(kcal)
Velo						
25-35 % $\dot{V}O_2$ max	39:45	30	8	322	285	37
35-45 % $\dot{V}O_2$ max	307:42	300	84	3'193	2'832	360
45-55 % $\dot{V}O_2$ max	628:30	693	427	8'394	6'556	1'837
55-65 % $\dot{V}O_2$ max	335:30	338	516	5'420	3'198	2'221
> 65 % $\dot{V}O_2$ max	27:30	27	42	444	262	182
<b>Total</b>		<b>1'390</b>	<b>1'079</b>	<b>17'774</b>	<b>13'135</b>	<b>4'639</b>
Laufen						
35 % $\dot{V}O_2$ max	44:31	31	7	324	293	30
45 % $\dot{V}O_2$ max	158:45	127	75	1'523	1'199	324
55 % $\dot{V}O_2$ max	762:00	829	412	9'606	7'834	1'772
65 % $\dot{V}O_2$ max	139:00	157	103	1'937	1'492	445
<b>Total</b>		<b>1'145</b>	<b>598</b>	<b>13'592</b>	<b>10'819</b>	<b>2'573</b>

Tabelle 2: Intensität und Energieverbrauch während der Rad- und Laufstrecke.

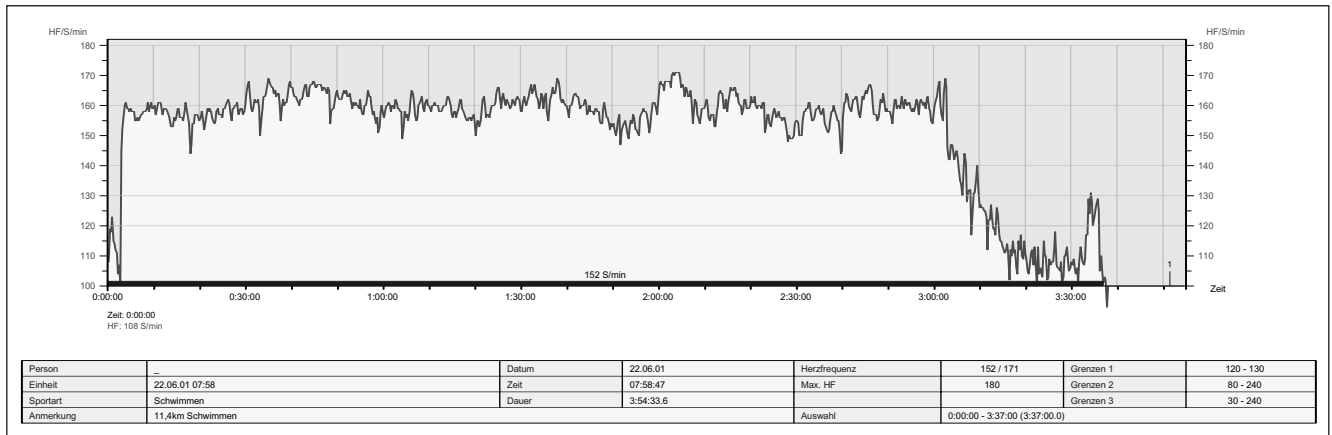


Abbildung 1: Herzfrequenz während des Schwimmens. Nach dem Schwimmen (Absinken der Herzfrequenz) erfolgte ein Transfer mit dem Auto vom Bad zum Start der Radstrecke. Eine Stunde Neutralisation wurde für jeden Athleten für den Transfer gewährt.

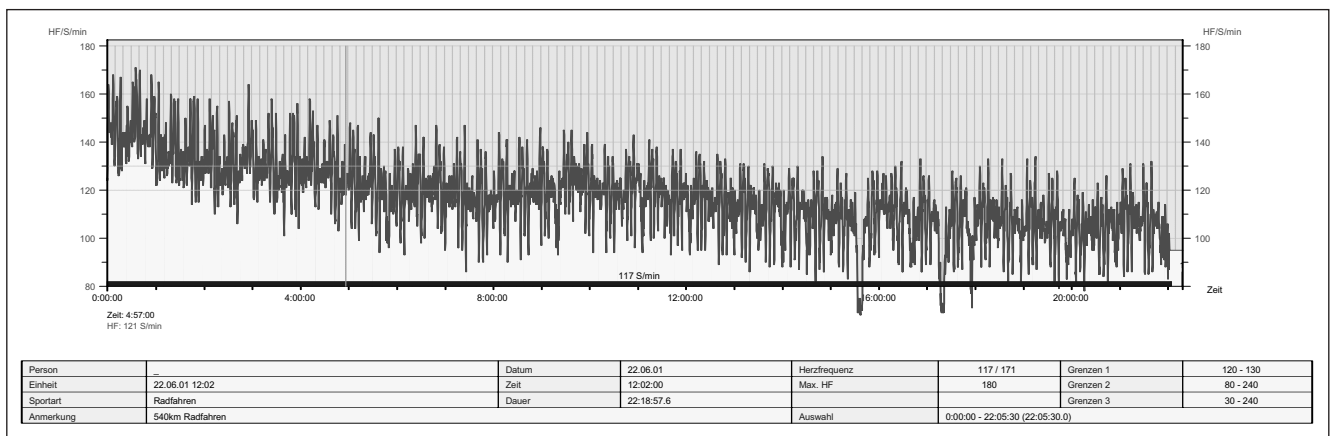


Abbildung 2: Herzfrequenz während des Radfahrens.

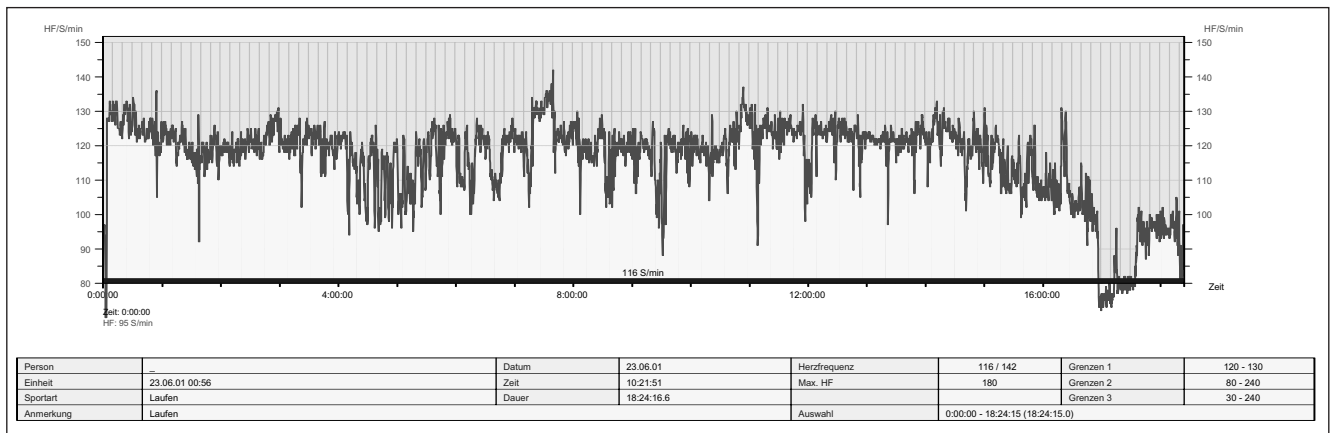


Abbildung 3: Herzfrequenz während des Laufens. Nach rund 17 Stunden auf der Laufstrecke (Absinken der Herzfrequenz) erfolgte die Muskelbiopsie. Anschließend lief der Proband noch rund 1½ h und brach dann das Rennen ab.

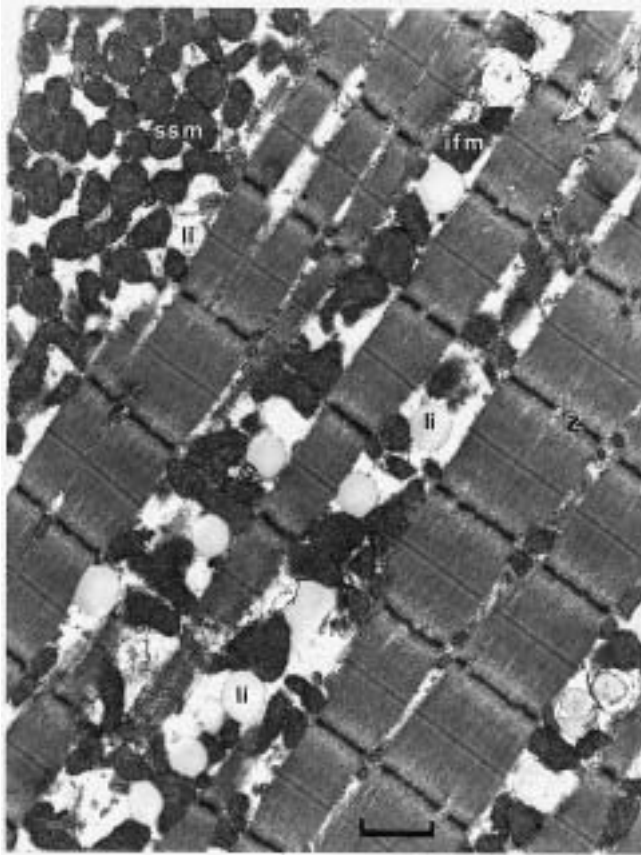
kampf, während des gesamten Wettkampfes und in den ersten 6 Tagen nach Wettkampfe protokolliert und die verzehrsfertigen Anteile jeweils abgewogen (vereinfachte Wiegemethode) [26]. Die elektronische Datenauswertung erfolgte mit dem Ernährungsanalyseprogramm Prod 4.5 LE expert plus der Firma NutriScience auf der Basis des Bundeslebensmittelschlüssels (BLS) II.3 und mit dem Softwareprogramm Excel 2000 der Firma Microsoft. Es wurden jeweils die Mittelwerte mit Standardabweichung sowie die Minima und Maxima der Makronährstoffe für die einzelnen Zeitabschnitte errechnet und beschrieben.

**DXA-Messung:** 1 Tag vor sowie 1 Tag nach dem Wettkampf wurde die Körperzusammensetzung in Bezug auf Fettmasse, Kno-

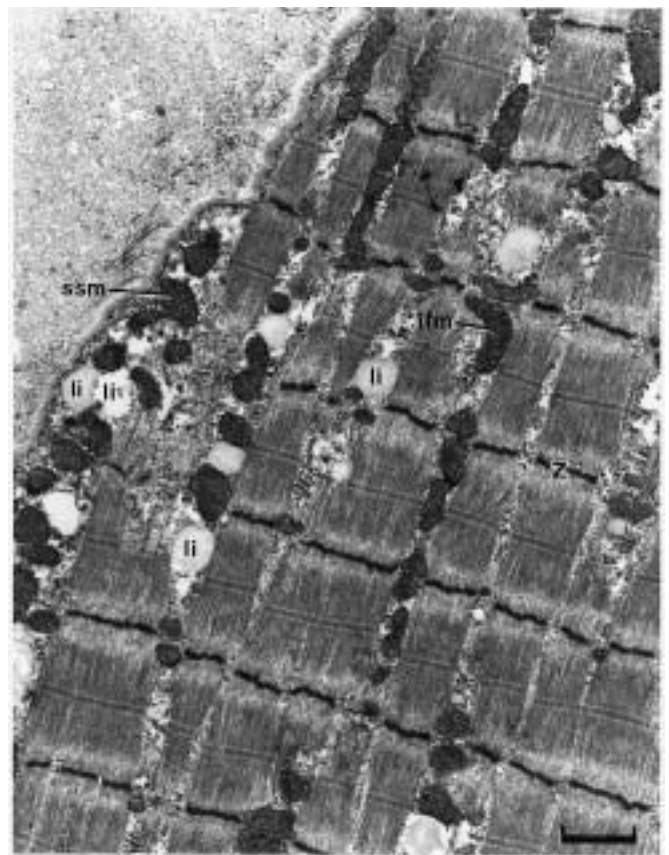
chenmasse und übriger Masse mittels Dual-Photon-Absorptiometrie (DXA) bestimmt (Hologic QDR 1000/W, Hologic Waltham, MA).

Der Körper wurde in die Regionen Kopf, Hals, Arme, Beine und Rumpf unterteilt. Die Software (Version 5.35) berechnet den prozentualen Anteil an Fett im Körper anhand einer Extrapolation des Anteils an Fett im Weichteilgewebe in den Pixeln, die kein Knochengewebe enthalten. Der Anteil wird für jedes Pixel bestimmt, das eine minimale Menge an Weichteilen ( $> 3 \text{ g/cm}^2$ ) ohne grösseren Knochenanteil ( $< 0.2 \text{ g/cm}^2$ ) enthält (Tab. 3).

**Muskelbiopsie:** Die Muskelbiopsien wurden aus dem rechten M. vastus lateralis 1 Tag vor dem Start des Wettkampfes (Abb. 4)



ssm = subsarkolemmale Mitochondrien,  
 ifm = interfibrilläre Mitochondrien,  
 li = intramuskuläre Triglyzeride,  
 Z = Z-Band Die Grössenangabe entspricht 1  $\mu\text{m} = \frac{1}{1000}$  mm



ssm = subsarkolemmale Mitochondrien,  
 ifm = interfibrilläre Mitochondrien,  
 li = intramuskuläre Triglyzeride,  
 Z = Z-Band Die Grössenangabe entspricht 1  $\mu\text{m} = \frac{1}{1000}$  mm

Abbildung 4: Elektronenoptische Aufnahme eines Längsschnitts durch eine Muskelfaser vor dem Wettkampf.

Abbildung 5: Elektronenoptische Aufnahme eines Längsschnitts durch eine Muskelfaser nach dem Wettkampf.

Körperregion	Magermasse ( $\Delta\%$ )	Fettmasse ( $\Delta\%$ )
Stamm	+ 5.5	+ 1.9
Arme	+ 1.5	+ 2.4
Beine	+ 11.3	- 5.3
Kopf	+ 1.3	+ 1.5
Total	+ 6.8	- 1.1

$\Delta\%$  = Differenz des prozentualen Anteils vor minus nach Belastung

Tabelle 3: Veränderung der Körperzusammensetzung gemessen mit DXA.

und unmittelbar vor Ende des Wettkampfs (Abb. 5) entnommen. Proben jeder Biopsie wurden für das Elektronenmikroskop vorbereitet (Tab. 4). Die Verarbeitung für die Elektronenmikroskopie sowie die stereologische Analyse des Bildes erfolgte wie früher im Detail beschrieben [30].

**Blutentnahmen:** Zum gleichen Zeitpunkt wie die Muskelbiopsien wurde eine venöse Blutentnahme zur Bestimmung von Hämoglobin, Hämatokrit, Leukozyten, Ferritin, Cholesterin und Triglyzeriden durchgeführt. Die Analyse dieser Routineparameter erfolgte im Kliniklabor des SPZ Nottwil.

**Hautfaltenmessung mit der Messzange:** Zur Messung des Körperfettanteiles wurde die Dicke der Hautfalte an 7 Stellen mit dem

Morphometrie (Rohdaten pro Volumeneinheit)	Einheit	M6/0 vor Wettkampf	M6/1 nach Wettkampf	% $\Delta$ M6/0 vs M6/1
Volumen totale Mitochondrien pro Faservolumen	%	7.85	9.68	23.42
Volumen intrazelluläres Lipid pro Faservolumen	%	2.82	1.14	-59.61
Volumen Myofibrillen pro Faservolumen	%	73.06	75.19	2.92
Volumen „Rest“ pro Faservolumen (Kerne etc)	%	16.27	13.98	-14.07
Anzahl Kapillaren pro Anzahl Fasern		2.78	2.98	7.16
Anzahl Kapillaren pro $\text{mm}^2$ Faserfläche	$\text{mm}^{-2}$	519.0	573.2	10.45
Kapillarlängendichte pro $\text{mm}^3$ Faservolumen	$\text{mm}/\text{mm}^3$	742.2	819.7	10.45
Mittlere Faserfläche	$\mu\text{m}^2$	5360	5200	-2.97

M6/0 = erste Biopsie aus dem m. vastus lateralis, M6/1 = zweite Biopsie aus dem m. vastus lateralis

Tabelle 4: Morphometriewerte der Muskelbiopsien.

GPM-Hautfaltenmessgerät [Siber Hegner, Zürich, Schweiz] gemessen. Es wurden die Stellen pektoral, axillär, suprailiakaal, Nabel, Triceps, subskapulär und Oberschenkel gemessen. Aus der Hautfaldendicke wurde der prozentuale Anteil an Körperfett berechnet [11].

## Resultate

### Messungen vor und nach dem Wettkampf

**Ernährung und Training vor dem Wettkampf:** In den 14 Tagen vor dem Wettkampf nahm der Proband täglich  $5054 \pm 1200$  kcal ein. Die absoluten täglichen Mengen der Nährstoffe waren  $361 \pm 100$  g Kohlenhydrate,  $319 \pm 85$  g Fett und  $176 \pm 45$  g Eiweiss, bzw. in Prozent der Gesamtenergieaufnahme ausgedrückt waren es  $29.7 \pm 5.8\%$  Kohlenhydrate,  $55.2 \pm 4.4\%$  Fett und  $14.7 \pm 2.8\%$  Eiweiss. Das Training in den Monaten vor dem Wettkampf umfasste etwa 30 km Schwimmen, 2500 km Rad und 250 km Laufen pro Monat. 3 Tage vor dem Wettkampf wurde das Training im Sinne eines Taperings zu Gunsten der Regeneration abgebrochen.

**$\dot{V}O_2$  max- und Stufentest vor dem Wettkampf:** Beim Maximaltest vor dem Wettkampf auf dem Fahrrad erreichte der Proband ein  $\dot{V}O_2$  max von  $64 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  mit einer maximalen Herzfrequenz von 190 Schlägen; auf dem Laufband von  $60 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  bei einer maximalen Herzfrequenz von 185 Schlägen. In den Stufentests zeigte sich auf dem Fahrradergometer bei 55%  $\dot{V}O_2$  max mit  $1,10 \text{ g/min}$  die höchste Fettoxidation und bei 65%  $\dot{V}O_2$  max die höchste Kohlenhydratoxidation mit  $1,54 \text{ g/min}$ . Auf dem Laufband lagen die höchste Fettoxidation ( $1,13 \text{ g/min}$ ) und die höchste Kohlenhydratoxidation ( $0,74 \text{ g/min}$ ) beide bei 65%  $\dot{V}O_2$  max (Tab. 1). Bei beiden Belastungsformen lag aber bei 25%  $\dot{V}O_2$  max der Anteil an Fett mit 87% an der gesamten Energielieferung am höchsten (Tab. 1). Mit der Überlegung, dass ein Muskelschaden zu einer Einbusse der oxidativen Kapazität führt [9], war eine Wiederholung des  $\dot{V}O_2$  max-Tests unmittelbar nach der Belastung geplant. Dies war unmittelbar nach dem Wettkampf wegen starken Muskelschmerzen in den Beinen nicht möglich. Deshalb wurde darauf verzichtet.

**Körpergewicht und Fettanteil vor und nach dem Wettkampf:** Das Körpergewicht lag vor dem Wettkampf bei 75,9 kg und stieg auf 78 kg unmittelbar nach Ende des Wettkampfs an.

Der mittels der Hautfaltenmessung bestimmte Körperfettanteil lag vor dem Wettkampf bei 8,3% und war mit 8,7% praktisch unverändert nach dem Wettkampf. Mit DXA wurde eine Zunahme der Magermasse um 4,4 kg nach dem Wettkampf gemessen, wobei die Fettmasse um 0,1 kg ausschliesslich an der unteren Extremität abnahm (Tab. 3).

**Blutparameter vor und nach dem Wettkampf:** Als Zeichen des Stresses stiegen die Leukozyten von  $5.8 \times 10^9/l$  auf  $9.9 \times 10^9/l$  und das Ferritin von 36 auf 55 mg/l. Hämoglobin und Hämatokrit fielen von 154 g/l auf 134 g/l bzw. von 0.44 auf 0.42. Das totale Cholesterin fiel von 5.5 auf 3.8 mmol/l, das LDL-Cholesterin von 2.0 auf 1.3 mmol/l und das HDL-Cholesterin von 2.5 auf 1.9 mmol/l. Die Triglyzeride stiegen als Zeichen der peripheren Lipolyse von 0.26 auf 0.37 mmol/l an. Als Zeichen einer myozellulären Schädigung stieg die Creatin-Kinase (CK) von 145 auf 3218 U/l an.

**Muskelbiopsie vor und nach dem Wettkampf:** Die Tabelle 3 zeigt die ultrastrukturelle Zusammensetzung der Skelettmuskulatur vor und nach dem Wettkampf. Vor dem Wettkampf wurden 2,8% intrazelluläres Lipid pro Faservolumen gemessen (Abb. 4). Während des Wettkampfs nahm der Gehalt an intrazellulärem Fett etwa um die Hälfte ab, auch nach dem Wettkampf war aber immer noch eine erhöhte Zahl an Lipidtröpfchen in der Faser nachweisbar (Abb. 5). Nach dem Wettkampf wurden keine ultrastrukturellen Schäden (z.B. z-band streaming) an den Muskelfasern nachgewiesen.

## Wettkampfparameter

### Wettkampf und Energieumsatz

**Dauer:** Der Athlet benötigte 2 h 56 min für die 11,4 km Schwimmen, 22 h 05 min für die 540 km Radfahren und 18 h 22 min für 115 km Laufen.

Er brach das Rennen 10 km vor dem Ziel auf dem siebten Zwischenrang liegend aus logistischen Gründen ab. Der Zeitpunkt der Biopsieentnahme ist aus Abbildung 3 ersichtlich. Er war total 43 h und 23 min unterwegs.

**Energieverbrauch:** Die Abbildungen 1–3 zeigen die Herzfrequenz unterteilt nach Disziplin. Anhand der Softwareauswertung POLAR S610 verbrauchte der Athlet 3550 kcal auf der Schwimmstrecke, 13 820 kcal auf der Radstrecke und 11 235 kcal auf der Laufstrecke. Durch die Aufteilung der Herzfrequenz in Intensitätsbereiche verbrauchte er auf der Radstrecke 807 kcal/h und auf der Laufstrecke 742 kcal/h. Bezogen auf die Energieträger hat er auf der Radstrecke 63,2 g/h Fett und 49,0 g/h Kohlenhydrate verbraucht, auf der Laufstrecke waren es 62,5 g/h Fett und 32,7 g/h Kohlenhydrate (Tab. 2).

**Energiezufuhr:** Während der gesamten Wettkampfdauer nahm der Athlet die Energiemenge von 22 447 kcal ein. Diese Energiemenge verteilte sich wie folgt: 422 g Eiweiss (8 Energieprozent), 507 g Fett (20 Energieprozent) und 4018 g Kohlenhydrate (72 Energieprozent).

**Energiebilanz:** Einer Energiezufuhr von rund 22 500 kcal über die gesamte Dauer steht ein Energieverbrauch von rund 28 600 kcal gegenüber. Daraus resultiert ein Defizit von rund 6100 kcal in rund 43 h Dauerbelastung.

## Diskussion

### Fetteiche Ernährung und ihr Einfluss auf die Leistungsfähigkeit

In der neueren Literatur ist beschrieben, dass eine fettreiche Ernährung den Gehalt an intramuskulären Triglyzeriden erhöhen kann [5, 10]. In der vorliegenden Fallstudie wurde dieser Befund bestätigt. Die fettreiche Ernährung kann auch die Leistungsfähigkeit verbessern: Eine zweiwöchige Diät mit 67% Fett in der Nahrung führte bei ausdauertrainierten Radfahrern bei einer Belastung im mittleren Intensitätsbereich von 50%  $\dot{V}O_2$  max zu einer signifikant besseren Ausdauerleistung [14]. Auch bei Läufern wurde nach einer Fettdiät über eine Woche eine Verbesserung der Ausdauerleistung nachgewiesen [18]. Die Resultate dieser Studien sind aber umstritten [12]. Unser Proband hat mehrmals vor den Extremausdauerwettkämpfen eine fettreiche Diät eingesetzt und betrachtet diese Art der Vorbereitung als erfolgreich für Belastungen im Ultra-Triathlon. Ob die Leistungsfähigkeit verbessert wird, kann in einem Einzelfall nicht bewertet werden.

### Energiebilanz und Energiedefizit

Das Energiedefizit von rund 6100 kcal in 43 h scheint beträchtlich, liegt aber noch unter dem Defizit von rund 10 000 kcal nach einem 24-Stunden-Radrennen [34]. Der Athlet in jener Fallstudie hat rund 54% des Energieverbrauches über die Nahrungsaufnahme unter Belastung und rund 46% über den Verbrauch an im Körper gespeicherter Energie gedeckt. Die Energiezufuhr lag in jener Fallstudie bei rund 10 000 kcal in 24 Stunden. Dies deckt sich mit der Tatsache, dass gut trainierte Ausdauerathleten maximal rund das Fünffache des Grundumsatzes an Energie in 24 h umsetzen können [33].

### Messung des Energieverbrauchs und der Substratselektion

Die erhobenen Herzfrequenzprofile (Abb. 1–3) zeigen, dass über die gesamte Wettkampfdauer ein Belastungssteadystate um etwa 50 bis 55% von  $\dot{V}O_2$  max eingehalten wurde (Tab. 2).

Wir hatten vor dem Wettkampf und nach dem Maximaltest eine stufenförmige Belastung durchgeführt, um während des Wettkampfs anhand der Herzfrequenzmessungen Energieverbrauch und Substratselektion ermitteln zu können [13]. Die Bestimmung des Energieverbrauchs über die Herzfrequenz ist mit gewissen Fehlermöglichkeiten behaftet. Insbesondere ist es möglich, dass die Substratverteilung nicht korrekt erfasst wird. Anhand der Angaben in der Literatur [24] müssen wir davon ausgehen, dass der Fettverbrauch mit der Dauer der Wettkampfbelastung über die im Stufentest ermittelten Werte zunehmen wird. Damit sind die in *Tabelle 2* angegebenen Werte für den Fettverbrauch als «Minimalangaben» zu betrachten. Tatsächlich dürfte der Fettverbrauch im Wettkampf deutlich höher gewesen sein. Zusätzlich wäre es interessant gewesen, den gesamten Energieverbrauch zusätzlich mit einer unabhängigen Methode zu validieren. Dies wäre im Prinzip mit der Technik des «doubly-labelled-water» [33] möglich. Der Vorteil der einfachen Methode mit der Messung des Energieverbrauches über die Herzfrequenz ist die individuelle Bestimmung bei jeder Art von körperlicher Belastung sowie die rasche und unmittelbare Verfügbarkeit von Daten [8], um zu versuchen, über die Nahrungszufuhr das Energiedefizit möglichst rasch und möglichst adäquat decken zu können.

Anhand der Werte von Körpergewicht, Hautfaltendicke und DXA-Messung vermuten wir, dass es während des Wettkampfs zu einer Wassereinlagerung in die arbeitende Skelettmuskulatur und allenfalls in kleinerem Ausmass auch ins Fettgewebe kam. Es zeigte sich, dass kein Subkutanfett abgebaut wurde und dass auch die intramyozellulären Fettreserven nicht vollständig abgebaut wurden, wie das zum Beispiel nach dem 100-km-Lauf von Biel nachgewiesen wurde [20]. Diese Befunde weisen auf die Bedeutung des Kohlenhydratstoffwechsels bei extremen Dauerbelastungen hin. Aus dem Stufentest (*Tab. 1*) ist ersichtlich, dass bei 55%  $\dot{V}O_2\text{max}$  für beide Belastungsformen der Kohlenhydratverbrauch noch unter 1 g pro Minute liegt und erst bei 65% auf über 1 g pro Minute ansteigt.

Es ist bekannt, dass von den mit der Nahrung aufgenommenen Kohlenhydraten maximal etwa 1 g pro Minute unter Belastung in die arbeitende Muskulatur gelangen und oxidiert werden kann [32]. Übersteigt also die Belastungsintensität den Kohlenhydratverbrauch von 1 g pro Minute, so können unter Belastung nicht mehr genügend Kohlenhydrate nachgeführt werden. Eine Intensität von rund 55%  $\dot{V}O_2\text{max}$  scheint damit für lange Distanzen günstig zu sein. *Myles* [19] zeigte, dass ein Lauf über 80 km bei einer Intensität von 58%  $\dot{V}O_2\text{max}$  durchgehalten wird, während bei einer Intensität von 74%  $\dot{V}O_2\text{max}$  der Lauf nach 55 km abgebrochen werden muss. Für den Fettverbrauch ist die Beurteilung schwieriger, da wenig gesicherte Literaturdaten bestehen. Rückgänge im muskulären Lipidgehalt während langdauernder Arbeit sind in vielen, nicht aber in allen Studien nachgewiesen worden. Beispielsweise wurden nach einem 85 km langen Skilanglauf [15] und nach einem Marathon [29] nur geringe Abnahmen der muskulären Triglyzeridgehalte beobachtet. Da im vorliegenden Fall auch bei Belastungsende noch beträchtliche Lipidreserven in der Muskulatur bestanden, müssen wir davon ausgehen, dass auch Lipide während der Belastung in grösserem Umfang in die Zelle transportiert wurden.

#### *Muskelödem durch Störung im Wasser-Elektrolyt-Haushalt?*

Die Zunahme des Körpergewichts ist, wie bereits erwähnt, am ehesten durch Ödeme zu erklären. In der DXA-Messung zeigte sich eine Zunahme der Magermasse in allen Körperpartien, wobei in den Beinen die höchste Zunahme zu messen war. Als naheliegende Erklärung gehen wir davon aus, dass es zu einer Wassereinlagerung in der Beinmuskulatur kam. In diesem Zusammenhang gilt auch zu erwähnen, dass die Serumkonzentration an Natrium nach dem Wettkampf mit 147 mmol/l bei einer Norm von 135–145 mmol/l deutlich höher lag als mit 139 mmol/l vor dem Wettkampf. Der Athlet hat sich mit natriumhaltigen Getränken wie Suppe ernährt, um eine hypotone Dehydratation mit Hyponatriämie zu verhindern. Dieser relativ hohe Natrium-

wert könnte auch in Zusammenhang mit dem Ödem gesehen werden.

Eine längere Marschbelastung über Tage führt trotz Flüssigkeitsverlust zu einer konstanten Natriumkonzentration im Sinne einer Retention, einer Expansion des Extrazellulärvolumens mit Übertritt des Volumens in das Gefässsystem und einer Zunahme des Volumens der Unterschenkel im Sinne einer Ödembildung [16, 35].

#### *Muskelbiopsie und Laborwerte*

Der hohe Gehalt an Mitochondrien von 8–9 Volumenprozent spricht für den guten Dauerleistungs-Trainingszustand des Athleten. In den Fasern konnte der sehr hohe Gehalt von 2,8 Volumenprozent intrafibrillärer Triglyzeride gemessen werden. Im Vergleich dazu kommen trainierten Duathleten, die eine fünfwöchige fettreiche Diät durchgeführt haben, nur auf einen Prozentsatz von  $1,46 \pm 0,26$  Volumenprozent [31]. Möglicherweise liegt eine konstitutionelle Veranlagung zur Einlagerung von Fettsäuren in die Muskelzellen vor.

Es ist bekannt, dass Laufen zu teils sehr ausgeprägten Muskelzellschäden bis hin zur Nekrose führt [6]. Auffallend an dieser Einzelfallbeschreibung einer Ausdauerleistung ist der Umstand, dass eine Belastung über 43 h zu keinen muskelbiologisch nachweisbaren muskelzellulären Schäden führt. Die starke Erhöhung der CK muss allerdings als ein Indikator für einen Muskelzellschaden gewertet werden. Das Fehlen von ultrastrukturellen Veränderungen zeigt somit eine Limitierung dieser Methode auf, welche nur eine punktuelle Beurteilung der Muskelstruktur am Biopsieort zulässt. Muskelzellschäden würden eher im Ursprung und Ansatzbereich der Muskeln erwartet, weil dort die mechanischen Belastungen höher sind. Diese Bereiche eignen sich weniger für die Biopsie. Ein weiterer Hinweis auf den körperlichen Stress ist das erhöhte Ferritin nach Abbruch des Belastung. Nachweislich steigt Ferritin nach intensiver physischer Aktivität an [17, 27, 28].

#### **Schlussfolgerungen**

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein sehr gut trainierter Extremausdauerathlet eine Nonstop-Ausdauerbelastung im Bereich von 2 Tagen bei einer Intensität von rund 55%  $\dot{V}O_2\text{max}$  durchführen kann. Bei dieser Intensität ist der Kohlenhydratverbrauch der Muskulatur so tief, dass die Muskelzellen in der Lage sind, ihren Kohlenhydratbedarf aus dem Gefässbett und damit über die Nahrungsaufnahme zu decken. Das Persistieren der intramyozellulären Lipidspeicher könnte darauf hinweisen, dass auch Lipide in grösserem Umfang während der Belastung in die Muskelzellen gelangen. Bemerkenswert ist die Zunahme des Körpergewichts, die wir auf intramuskuläre Ödeme der belasteten Muskeln zurückführen. Aufgrund erhöhter CK-Werte muss von Muskelzellschäden ausgegangen werden; diese konnten aber ultrastrukturell nicht nachgewiesen werden.

#### **Verdankung**

Wir danken Raija Laukkannen, Polar Electro, Finnland, für die Mithilfe bei der Energieberechnung mit der Pulsuhr POLAR S610 und Franziska Graber, Anatomisches Institut, Universität Bern, für die Aufbereitung und Analyse der Muskelbiopsien. Nicht vergessen möchten wir die grosse Crew, die den Athleten durch den Wettkampf begleitet hat.

#### Korrespondenzadresse:

Dr. med. Beat Knechtle, Facharzt FMH für Allgemeinmedizin, Institut für Sportmedizin, Schweizer Paraplegiker-Zentrum, CH-6207 Nottwil, Tel. ++41 41 939 56 93.  
E-Mail: beat.knechtle@paranet.ch

## Literaturverzeichnis

- 1 Frayn K.N.: Calculation of substrate oxidation rates in vivo from gaseous exchange. *J. Appl. Physiol.* 55: 628–634, 1983.
- 2 Fridén J.: Changes in human skeletal muscle induced by long-term eccentric exercise. *Cell Tissue Res.* 236: 365–372, 1984.
- 3 Fridén J., Lieber R.L., Thornell L.E.: Subtle indications of muscle damage following eccentric contractions. *Acta Physiol. Scand.* 142: 523–524, 1991.
- 4 Gibson A.S.C., Lambert M.I., Weston A.R., Myburgh K.H., Emms M., Kirby P., Marinaki A.M., Owen P.E., Derman W., Noakes T.D.: Exercise-induced mitochondrial dysfunction in an elite athlete. *Clin. J. Sport Med.* 8: 52–55, 1998.
- 5 Helge J.W., Wulff B., Kiens B.: Impact of a fat-rich diet on endurance in man: role of the dietary period. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30: 456–461, 1998.
- 6 Hikida R.S., Staron R.S., Hagerman F.C.: Muscle fibre necrosis associated with human marathon runners. *J. Neurol. Sci.* 59: 185–203, 1983.
- 7 Hiilloskorpi H., Fogelholm M., Laukkanen R., Pasanen M., Oja P., Manttari A., Natri A.: Factors affecting the relation between heart rate and energy expenditure during exercise. *Int. J. Sports Med.* 20: 438–443, 1999.
- 8 Hiilloskorpi H.K., Pasanen M.E., Fogelholm M.G., Laukkanen R.M., Manttari A.T.: Use of heart rate to predict energy expenditure from low to high activity levels. *Int. J. Sports Med.* 24: 332–336, 2003.
- 9 Höchli D., Schneider T., Ferretti G., Howald H., Claassen H., Moia C., Atchou G., Belleri M., Veicsteinas A., Hoppeler H.: Loss of muscle oxidative capacity after an extreme endurance run: The Paris–Dakar Foot-Race. *Int. J. Sports Med.* 16: 343–346, 1995.
- 10 Hoppeler H., Billeter R., Horvath P.J., Leddy J.J., Pendergast D.R.: Muscle structure with low- and high-fat diets in well-trained male runners. *Int. J. Sports Med.* 20: 522–526, 1999.
- 11 Jackson A.S., Pollock M.L.: Practical assessment of body composition. *Phys. Sports Med.* 13: 76–90, 1985.
- 12 Jeukendrup A.E., Saris W.H.M., Wagenmakers A.J.M.: Fat metabolism during exercise: A review. Part III: Effects of nutritional interventions. *Int. J. Sports Med.* 19: 1–9, 1998.
- 13 Kinnunen H., Nissilä S.: Estimation of exercise energy expenditure from heart rate and aerobic capacity. Presented in ECSS 5<sup>th</sup> Annual Meeting, Jyväskylä 19–23 July, 2000.
- 14 Lambert E.V., Speechly D.P., Dennis S.D., Noakes T.D.: Enhanced endurance in trained cyclists during moderate intensity exercise following 2 weeks adaptation to a high fat diet. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69: 287–293, 1994.
- 15 Lithell H., Orlander J., Schéle R., Sjödin B., Karlsson J.: Changes in lipoproteinlipase activity and lipid stores in human muscle with prolonged heavy exercise. *Acta Physiol. Scand.* 107: 257–261, 1979.
- 16 Milledge J.S., Bryson E.I., Catley D.M., Hesp R., Luff N., Minty B.D., Older M.W., Payne N.N., Ward M.P., Withey W.R.: Sodium balance, fluid homeostasis and the rennin-aldosterone-system during the prolonged exercise of hill walking. *Clin. Sci.* 62: 595–604, 1982.
- 17 Moore R.J., Friedl K.E., Tulley R.T., Askew E.W.: Maintenance of iron status in healthy men during an extended period of stress and physical activity. *Am. J. Clin. Nutr.* 58: 923–927, 1993.
- 18 Muoio D.M., Leddy J.J., Horvath P.J., Awad A.B., Pendergast D.R.: Effect of dietary fat on metabolic adjustments to maximal  $\dot{V}O_2$  and endurance in runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26: 81–88, 1994.
- 19 Myles W.S.: The energy cost of an 80 km run. *Br. J. Sports Med.* 13: 12–14, 1979.
- 20 Oberholzer F., Claassen H., Moesch H., Howald H.: Ultrastrukturelle, biochemische und energetische Analyse einer extremen Dauerleistung (100-km-Lauf). *Schweiz Z. Sportmed.* 24: 71–78, 1976.
- 21 Okano G., Sato Y., Takumi Y., Sugawara M.: Effect of 4 h preexercise high carbohydrate and high fat meal ingestion on endurance performance and metabolism. *Int. J. Sports Med.* 17: 530–534, 1996.
- 22 Okano G., Sato Y., Murata Y.: Effect of elevated blood FFA levels on endurance performance after a single fat meal ingestion. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30: 763–768, 1998.
- 23 Raschka C., Plath M., Cerull R., Bernhard W., Jung K., Leitzmann C.: Das Körpermuskelkompartiment und seine Beziehungen zu Nahrungsaufnahme und Blutchemie unter einer extremen Ausdauerbelastung. *Z. Ernährungswiss.* 30: 276–288, 1991.
- 24 Romijn J.A., Coyle E.F., Sidossis L.S., Gastaldelli A., Horowitz J.F., Endert E., Wolfe R.R.: Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *Am. J. Physiol.* 265: E380–E391, 1993.
- 25 Romijn J.A., Coyle E.F., Sidossis L.S., Rosenblatt J., Wolfe R.R.: Substrate metabolism during different exercise intensities in endurance-trained women. *J. Appl. Physiol.* 88: 1707–1714, 2000.
- 26 Sichert W., Oltersdorf U., Winzen U., Leitzmann C.: Ernährungserhebungsmethoden. Methoden zur Charakterisierung der Nahrungsaufnahme des Menschen. Frankfurt, 1984.
- 27 Singh A., Smoak B.L., Patterson K.Y., LeMay L.G., Veillon C., Deuster P.: Biochemical indices of selected trace minerals in men: effect of stress. *Am. J. Clin. Nutr.* 53: 126–131, 1991.
- 28 Smith D.J., Roberts D.: Effects of high volume and/or intense exercise on selected blood chemistry parameters. *Clin. Biochem.* 27: 435–440, 1994.
- 29 Staron R.S., Hikida R.S., Murray T.F., Hagerman F.C., Hagerman M.T.: Lipid depletion and repletion in skeletal muscle following a marathon. *J. Neurol. Sci.* 94: 29–40, 1989.
- 30 Suter E., Hoppeler H., Claassen H., Billeter R., Aebi U., Horber F., Jaeger P., Marti B.: Ultrastructural modification of human skeletal muscle tissue with 6-month moderate-intensity exercise training. *Int. J. Sports Med.* 16: 160–166, 1995.
- 31 Vogt M., Puntschart A., Howald H., Mueller B., Mannhart Ch., Gfeller-Tuescher L., Mullis P., Hoppeler H.: Effects of dietary fat on muscle substrates, metabolism, and performance in athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 35: 952–960, 2003.
- 32 Wagenmakers A.J.M., Brouns F., Saris W.H.M., Halliday D.: Oxidation rates of orally ingested carbohydrates during prolonged exercise in man. *J. Appl. Physiol.* 75: 2774–2780, 1993.
- 33 Westerterp K.R.: Limits to sustainable human metabolic rate. *J. Experiment. Biol.* 204: 3183–3187, 2001.
- 34 White J.A., Ward C., Nelson H.: Ergogenic demands of a 24 hour cycling event. *Br. J. Sports Med.* 18: 165–171, 1984.
- 35 Williams E.S., Ward M.P., Milledge J.S., Withey W.R., Older M.W., Forsling M.L.: Effect of the exercise of seven consecutive days hill-walking on fluid homeostasis. *Clin. Sci.* 56: 305–316, 1979.