

UČEBNÍ TEXTY UNIVERZITY KARLOVY V PRAZE

VÝŽIVA SPORTOVců A SPORTOVNÍ VÝKON

**Zdeněk Vilikus
a kolektiv**

KAROLINUM

Výživa sportovců a sportovní výkon

Zdeněk Vilikus a kolektiv

Recenzovali:

doc. MUDr. Josef Chrástek, CSc.

RNDR. Petr Fořt, CSc.

Hlavní autor a pořadatel:

doc. MUDr. Zdeněk Vilikus, CSc.

Spoluautoři:

Ing. Ivan Mach, CSc.

doc. MUDr. Petr Brandejský, CSc.

Vydala Univerzita Karlova v Praze

Nakladatelství Karolinum

jako učební text pro 1. lékařskou fakultu UK

Sazba DTP Nakladatelství Karolinum

Druhé vydání

© Univerzita Karlova v Praze, 2015

© Zdeněk Vilikus, 2015

Text neprošel jazykovou ani redakční úpravou nakladatelství

ISBN 978-80-246-3152-3

ISBN 978-80-246-3168-4 (online : pdf)



Univerzita Karlova v Praze
Nakladatelství Karolinum 2015

www.karolinum.cz
ebooks@karolinum.cz

OBSAH

Předmluva	9
1. ÚVOD – Z HISTORIE SPORTOVNÍ VÝŽIVY (Z. Vilikus)	11
2. VÝŽIVA U RYCHLOSTNÍCH A VYTRVALOSTNÍCH SPORTOVČŮ (Z. Vilikus)	13
2.1 Energetické substráty při zátěži různé délky trvání	13
Rychlostní zátěž	14
Rychlostně-vytrvalostní zátěž	14
Krátkodobá vytrvalostní zátěž	16
Střednědobá vytrvalostní zátěž	16
Dlouhodobá vytrvalostní zátěž	18
Velmi dlouhá vytrvalostní zátěž	20
2.2 Nutriční podpora u vytrvalostních sportovců	22
2.3 Výživa před vytrvalostním výkonem	24
2.4 Sacharidová superkompenzace	25
2.5 Výživa během vytrvalostního výkonu	26
2.6 Výživa po vytrvalostním výkonu	27
2.7 Doplnky stravy u vytrvalostních sportovců	28
Karnitin	28
Kofein	31
Bikarbonát	32
Ketokyseliny	34
Větvené aminokyseliny	36
Mastné kyseliny se středně dlouhým řetězcem	36
2.8 Doplnky stravy u rychlostních sportovců	37
Karnosin	37
Koenzym Q ₁₀	38
3. VÝŽIVA U SILOVÝCH SPORTOVČŮ (Z. Vilikus)	40
3.1 Energetické substráty při silové zátěži	40

3.2	Doplňky stravy u silových sportovců	41
	Bílkoviny a aminokyseliny	41
	Kreatin	46
	Ketokyseliny	49
	Glutamin	50
	Arginin	51
	Větvené aminokyseliny	52
	Konjugovaná kyselina linolová	53
	Chrom	54
	Hydroxy-methylbutyrát	56
	Vitamin B ₁₂	57
	Kyselina listová	57
4.	VITAMINY (<i>Z. Vilikus</i>)	58
5.	MINERÁLY (<i>I. Mach, Z. Vilikus</i>)	62
	Železo	62
	Hořčík	63
	Zinek	63
6.	VÝŽIVA U PŘETĚŽOVANÝCH KLOUBŮ (<i>I. Mach, Z. Vilikus</i>)	65
6.1	Farmakoterapie	65
6.2	Suplementy podporující zdraví kloubů	65
6.3	Osteoartróza a suplementace SYSADOA	66
6.4	Nenasycené mastné kyseliny	69
6.5	Látky s antioxidačním účinkem	70
	Selen	71
	Wobenzym	71
7.	DOPING (<i>P. Brandejský</i>)	73
7.1	Skupiny zakázaných látek	74
	Stimulancia	74
	Narkotika	74
	Anabolické steroidy	75
	Diuretika	75
	Hormony	76
7.2	Zakázané metody	77
	Krevní doping	77
	Umělé nosiče kyslíku a plazmaexpandery	77
	Farmakologické, fyzikální a chemické manipulace	78
7.3	Skupiny látek podléhající určitým omezením	78
7.4	Antidopingová opatření	79

Orgány dopingové kontroly	79
Předcházení dopingů	80
Postih za doping	80
Provádění dopingových kontrol	81
Oznámení výsledků a disciplinární řízení	82
Poznámky pro lékařskou praxi	82
8. ENERGETICKÝ METABOLISMUS (Z. Vilikus)	84
8.1 Složky energetického metabolismu	84
8.2 Trojpoměr živin	86
9. MĚŘENÍ ENERGETICKÉHO METABOLISMU (Z. Vilikus)	88
Přímá energometrie	88
Nepřímá energometrie	88
Výpočty jednotlivých složek metabolismu	90
Výpočet energetického výdeje při zátěži	90
10. PITNÝ REŽIM (Z. Vilikus)	92
Vodní bilance	92
Dehydratace	93
Hyponatremie vyvolaná sportem	93
Kontrola hydratace	94
Pot	94
Iontové nápoje	95
Vhodné složky nápoje pro pitný režim během výkonu	95
Nevhodné složky nápoje pro pitný režim během výkonu	96
Křeče a pitný režim	96
Pitný režim před výkonem	97
Pitný režim během výkonu	97
Pitný režim po výkonu	98
Teplota nápoje	98
11. VÝŽIVA PRO ZDRAVÍ (Z. Vilikus)	99
11.1 Tuhy, mastné kyseliny	99
11.2 Cholesterol	103
11.3 Trans-nenasycené mastné kyseliny	103
Vláknina	104
12. NUTRIČNÍ STAV SPORTOVCE A JEHO HODNOCENÍ (Z. Vilikus)	106
Programy k vyhodnocování nutriční hodnoty stravy	106
Metodika	107

Hodnocení – příklad	107
Vlastní softwarová aplikace	110
13. ZÁKLADY KLINICKÉ ANTROPOLOGIE (Z. Vilikus)	111
13.1 Somatometrie – metodika a hodnocení	111
Antropometrické ukazatele	111
13.2 Tělesné složení – metodika a hodnocení	115
13.3 Somatotyp – metodika a hodnocení	118
Metodika	119
Endomorfie	121
Mezomorfie	121
Ektomorfie	122
13.4 Význam určení somatotypu	123
14. PRESKRIPCE POHYBOVÝCH AKTIVIT (Z. Vilikus)	129
14.1 Metodika, výpočty, energetická bilance	129
14.2 Využití sport-testeru při preskripci pohybové aktivity	135
15. DOPLŇKY STRAVY PRO SPORTOVCE – KATEGORIZACE A PRINCIPY POUŽITÍ (I. Mach)	136
15.1 Doplnky stravy – legislativní minimum pro sportovního lékaře	136
Rozdělení doplňků stravy do skupin	140
Jak by měl sportovní lékař sportovci nabídnout doplněk stravy?	143
15.2 Komplexní potravinový koš	143
15.3 Jaký je smysl doplňování stravy sportovců?	144
15.4 Konsenzuální prohlášení MOV o sportovní výživě z roku 2010	146
Stručný komentář autorů k prohlášení MOV o sportovní výživě	149
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	151
SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ	171
SEZNAM ZKRATEK	173
REJSTŘÍK	176

PŘEDMLUVA

Milí studenti,

tato skripta vznikla na základě předmětu **Komplexní výživa u sportovců (i nesportovců) a sportovní výkon**, který jsme začali vyučovat na Ústavu tělovýchovného lékařství 1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy v Praze v roce 2007. Předmět měl u posluchačů velmi příznivý ohlas a byl mezi 241 volitelnými předměty vyhodnocen kolegiem děkana v roce 2010/2011 jako druhý nejžádanější. To nás pochopitelně velmi potěšilo, a tak jsme se rozhodli našim přednáškám dát i písemnou podobu ve formě těchto skript. Je pravda, že studentům, kteří projeví po přednášce zájem, jsme prezentaci ochotně zkopirovali na flash-kartu. Ale z vlastní zkušenosti víme, že text se nejlépe čte ve vytištěné podobě, nehledě na to, že prezentace má jen heslovitou formu a také se do ní nevejde tolik informací.

Ve skriptech najdete kapitoly o výživě u vytrvalostních a silových sportovců, o výživě u přetěžovaného pohybového aparátu, o pitném režimu, o měření energetického metabolismu, o hodnocení nutričního stavu sportovce, o preskripci pohybové aktivity, ale také třeba o dopingů a zdravotních rizicích při jeho aplikaci.

Naše skripta jsou určena především studentům medicíny, proto u čtenářů předpokládáme určitou znalost biochemie. Chemické vzorce některých látek, které jsou v textu uvedeny, by měly přispět k lepšímu pochopení toho, jak se daná látka zapojuje do metabolismu sportovce a jaký bude její účinek. Uvědomujeme si při tom, jak jen malý rozdíl v chemické struktuře znamená velmi rozdílný účinek na zdravotní stav či výkon lidského organismu.

Odborníci na výživu se často hlásí k jednomu ze dvou nesmiřitelných táborů. V jednom z nich se nacházejí zarytí odpůrci doplňků stravy, kteří tvrdí, že doplňky nemají žádný účinek na zdraví člověka, tím méně na jeho fyzickou zdatnost či sportovní výkonnost. Ve druhém z nich jsou zastánci

dalšího extrémů, kteří přisuzují doplňkům stravy mnohem větší význam a účinnost, než ve skutečnosti mohou mít. Když si však projdete současnou světovou odbornou literaturu, zjistíte, že chcete-li zůstat objektivní, nemůžete zastávat ani jedno extrémní stanovisko. Pravda je totiž někde uprostřed. V seznamu světové literatury najdete skoro u každého potravního doplňku studie, které prokázaly jeho účinnost, ale zrovna tak i studie, které ji popírají. Když však některá meta-analýza (review) hodnotí souhrnně výsledky různých studií a z celkového počtu např. 22 randomizovaných a placebem kontrolovaných prací jich 16 dojde k statisticky významnému zvýšení svalové síly a vzpěračského výkonu, pak takový doplněk stravy zřejmě účinný je, ať se nám to líbí, nebo ne. Právě z těchto důvodů uvádíme (možná až příliš) rozsáhlý seznam moderní odborné literatury. Studenti i ostatní čtenáři mají tak jednak možnost utvořit si vlastní názor a jednak jim tím poskytujeme studijní materiál, který si snadno najdou na internetu (pomocí Google Scholar) nebo v lékařské knihovně.

Doufáme, že se učební texty setkají se stejně příznivým ohlasem jako naše přednášky.

V Praze dne 9. 9. 2011

Autoři

1. ÚVOD – Z HISTORIE SPORTOVNÍ VÝŽIVY

Snahy o zvýšení fyzické síly, bojového ducha, sportovního výkonu prostřednictvím přijaté potravy provázejí člověka již od starověku. První zmínky o takových pokusech sahají do 5.–4. století př. n. l.^[252]. Válečníci, zápasníci, gladiátoři či starověcí atleti věřili například tomu, že když snědí jelení játra, budou rychlejší, snědí-li lví srdce, budou silnější, odvážnější a statečnější^[197]. Z dnešního pohledu jsou tyto představy jistě nevědecké a naivní. První zmínky o doplňcích stravy založené na vědeckých základech se objevují až v první polovině 20. století v souvislosti s novými poznatky o fyziologii svalové práce, o energetických zdrojích při zátěži a specifických rolích jednotlivých živin v souvislosti s fyzickou zátěží^[131].

V roce 1924 zjistil Levine^[176] u prvních dvaceti běžců Bostonského maratonu extrémní únavu, stupor a neschopnost koncentrace současně s velmi nízkou hladinou krevní glukózy. O rok později byly aplikovány vysoké dávky sacharidů týmž běžcům stejného maratonu a podařilo se tak ve většině případů předejít hypoglykémii a s ní spojeným nežádoucím příznakům^[100]. Výzkumy skandinávské školy zátěžové fyziologie ve 30. letech se staly základem pro vysokosacharidovou dietu u vytrvalců. Skandinávská škola prohloubila v 60. letech poznatky o svalovém glykogenu^[22], prokázala zlepšení vytrvalostního výkonu vlivem zvýšení zásob svalového glykogenu^[15] a položila tak základ dodnes používané sacharidové superkompenzace. Sacharidová superkompenzace později doznala různých modifikací: 1. v tom smyslu, aby příliš vysoký příjem sacharidů ve druhé fázi nevedl k nadváze^[261], 2. v tom smyslu, aby nehrozil opačný extrém přílišné únavy z hypoglykémie v první fázi: Applegate^[10] navrhl v roce 1988 sacharidovou „superkompenzaci“ bez sportovní aktivity. Vysokosacharidová dieta však u některých sportovců vedla k zažívacím obtížím vzhledem k nutnosti konzumovat velký objem zbytkové stravy. Tato skutečnost byla mj. impulsem k vývoji tzv. sacharidových energetických gelů obsahujících glukózové

a sacharóзовé polymery, jejichž cílem bylo dodání vysokého množství sacharidů před závodem formou bezsezbytkových potravních doplňků s vysokým obsahem rychle využitelné energie^[132]. Dalším doplňkem podobného složení se staly energetické tyčinky. Koncem 80. let se zaměřila pozornost na tzv. větvené aminokyseliny (branched-chain amino acids – BCAA) jako na možný energetický zdroj během vytrvalostního výkonu^[9, 11].

Teprve v roce 1944 zjistil Pitts^[242], že zvýšený příjem proteinů nevede ke zvýšení vytrvalostního výkonu. V 50. letech byl zjištěn pozitivní vliv vyššího příjmu bílkovin na rozvoj svalové hmoty u silových sportovců^[162]. V 50. a 60. letech sportovci zvyšovali příjem bílkovin konzumací libového hovězího masa a mléčných výrobků. V 70. a 80. letech již využívali přípravky s proteinovými koncentráty a aminokyselinami^[14]. V 80. a 90. letech se zaměřila pozornost na jednotlivé aminokyseliny (arginin, ornitin), které by teoreticky mohly zvyšovat produkci růstového hormonu^[109]. V 90. letech se dostal do popředí zájmu, mimo jiné, taurin a jeho anabolické účinky^[317]. V téže době sportovci začali užívat nápoje obsahující aminokyseliny již během posilování, tedy nejen 1–2 hodiny po skončení silového tréninku^[11].

V 90. letech se staly předmětem zájmu sportovní výživy triacylglyceroly o střední délce řetězců (medium-chain triglycerides – MCT), které jsou dosud zkoumány především jako potenciálně výhodný zdroj energie při vytrvalostních výkonech a jako potravní doplněk šetřící svalový glykogen^[32, 166].

Již koncem 30. let minulého století byly testovány vitaminy na Tour de France údajně s pozitivním účinkem na výkon^[131, 197]. Přestože se výsledky o účinnosti vitaminů na výkon ve 40. letech nepotvrdily, sportovci je hojně užívali a dosud užívají. Po éře aplikace megadávek multivitaminů^[68] však nastává spíše trend aplikovat vitaminy podle specifických požadavků na sportovní výkon^[318].

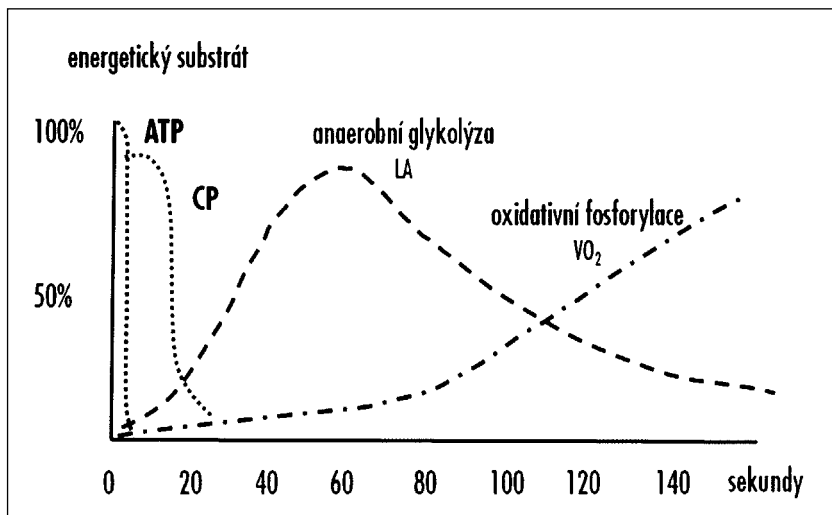
Nedávné studie v oblasti sportovní výživy poskytly vědecký podklad sportovcům pro užívání některých mikronutrientů, např. antioxidantů^[19, 54, 267].

2. VÝŽIVA U RYCHLOSTNÍCH A VYTRVALOSTNÍCH SPORTOVců

2.1 Energetické substráty při zátěži různé délky trvání

Při prodlužující se délce trvání sportovní zátěže se velmi podstatně mění zdroje, které jsou v organismu využívány ke krytí zvýšených energetických nároků. Velmi názorně tyto změny zobrazují grafy podle Keula (obr. 1 a 5).

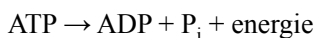
Nejlépe si můžeme ukázat různé druhy zátěže podle intenzity a délky trvání i podle převažujícího zdroje energie na běžecské zátěži, která má cyklický charakter (stále se opakující dynamický stereotyp) a která je všem dostatečně známá.



Obr. 1 Zdroje energie při zátěži různé délky trvání

Rychlostní zátěž

Jsou to např. sprinty na 100 a 200 m. Doba jejich trvání u špičkových atletů je cca 10 a 20 sekund. Jako zdroj energie jsou využívány makroergní fosfáty – adenosintrifosfát (ATP) a kreatinfosfát (CP). Dříve se považovaly tyto zátěže za tzv. **alaktátovou zónu**. (Dnes víme, že anaerobní glykolýza s tvorbou laktátu se zapojuje do metabolických procesů už během prvních sekund zátěže, ale nejde o proces dominantní.) Rychlostní zátěž lze opakovat téměř ve stejné kvalitě po krátké několikaminutové přestávce. Za tuto dobu se zásoby ATP a CP kompletně obnoví. ATP je jediný bezprostřední zdroj energie pro svalovou kontrakci a je ve svalu obsažen v koncentraci cca 5 mmol, tj. cca 3,5 g na 1 kg svalů. Při zhruba 20 kilogramech svalové tkáně u sportovce vážícího 70 kg je v organismu celkem asi 70 g ATP. Tyto zásoby vydrží jen na několik sekund intenzivní zátěže. **Hydrolyza ATP na adenosindifosfát (ADP)** poskytuje energii pro téměř všechny energetické procesy v těle:

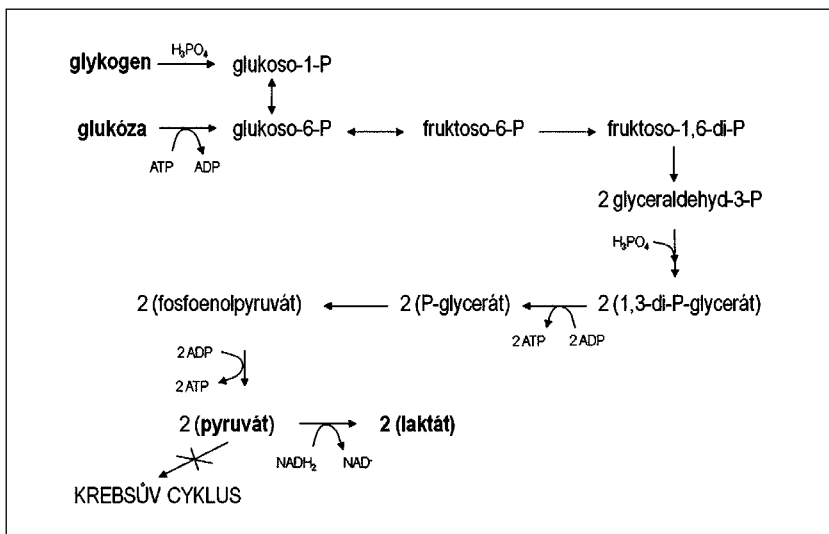


Obnova ATP z CP umožňuje velmi rychlou resyntézu ATP ($440 \mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ svalů), která probíhá ve svalech již v průběhu rychlostní zátěže. Při delším trvání zátěže se však musí zapojit do procesu získávání energie další energetické substráty a procesy.

Rychlostně-vytrvalostní zátěž

Je to např. běh na 400 m. Doba trvání je cca 45–60 sekund. Jako zdroj k obnově ATP je vedle CP využívána především glukóza. Vzhledem k vyšší intenzitě zátěže a krátké době trvání se ještě nestačí rozvinout spalování glukózy s plným využíváním molekulárního kyslíku. Glukóza se spaluje formou anaerobní glykolýzy za vzniku kyseliny mléčné. **Anaerobní glykolýza** (obr. 2) má sice mnohem menší energetickou výtěžnost než oxidativní fosforylace (jen 2 mmol ATP z 1 mmol glukózy), ale nastupuje rychleji. Při této stále ještě velmi intenzivní zátěži již není možné běžet po celou dobu zcela na maximum, neboť rychlost resyntézy ATP ze sacharidových zdrojů je výrazně, tj. asi 10krát pomalejší ($40 \mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ svalů) než z CP.

Anaerobní glykolýza je reakce, při které dochází ke štěpení glykogenu, resp. glukózy na kyselinu mléčnou – laktát. Ke štěpení glukózy je třeba její molekuly aktivovat fosforylací (spotřebují se 2 molekuly ATP). Při přeměně difosfoglycerátu (di-P-glycerát) na fosfoglycerát (P-glycerát) a fos-



Obr. 2 Anaerobní glykolýza

fosfoenolpyruvátu na pyruvát se uvolní energie odpovídající 4 ATP. Čistý výtěžek je tedy jen 2 ATP. Nevýhodou anaerobní glykolýzy je malá efektivita a vznik kyseliny mléčné, která brání dalšímu pokračování sportovního výkonu. Její výhodou je naopak to, že je velmi pohotová a že ji může organismus využít v situaci, kdy se oxidativní fosforylace ještě nestačila uplatnit (začátek sportovního výkonu, sprinty), ale také v situaci, kdy intenzita oxidativní fosforylace již dosáhla maxima a organismus sportovce již není schopen ji zvýšit (intenzita zátěže je nad úroveň anaerobního prahu, závěrečný finiš apod.).

Energetickým substrátem pro anaerobní glykolýzu je zásobní polysacharid glykogen. Ten se nachází jednak v samotných kosterních svalech (celkem cca 250–350 g) a jednak v játrech (cca 80 g). Makromolekula glykogenu je tvořena dlouhými rozvětvenými polysacharidovými řetězci 200–600 molekul glukózy a není tedy transportabilní přes buněčné membrány. Z molekuly glykogenu jsou proto postupně odštěpovány jednotlivé molekuly glukózy za spotřeby jedné molekuly ATP (tzv. debranching enzymy a fosforylázou) ve formě glukoso-6-fosfátu. Ten se mění na fruktoso-6-fosfát a ten za spotřeby jedné molekuly ATP na fruktoso-1,6-difosfát.

Labilní fruktoso-1,6-difosfát se snadno rozpadá na dvě molekuly 1,3-difosfoglycerátu. Při jeho oxidaci na dvě molekuly 3-fosfoglycerátu (a následné konverzi na 2-fosfoglycerát) se získají dvě molekuly ATP. Postupnou přeměnou dvou molekul 2-fosfoglycerátu na dvě molekuly pyruvátu se získají další dvě molekuly ATP. Kyselina pyrohroznová se poté bez přístupu molekulárního kyslíku mění na kyselinu mléčnou (laktát nevstupuje do Krebsova cyklu). Když dosáhne anaerobní glykolýza vysokého stupně intenzity, přechází většina vytvořeného laktátu do krve.

Celkově se tedy vytvořily čtyři molekuly ATP. Avšak při aktivaci glukózy na glukoso-6-fosfát a fruktoso-6-fosfátu na fruktoso-1,6-difosfát se spotřebovalo po jedné molekule ATP. Celková bilance je tedy 2 mmol ATP z 1 mmol glukózy. Tato energie je ve svalu poskytnuta k přeměně aktinu a myozinu na vytvoření aktomyozinového komplexu, tedy ke svalové kontrakci. Výhradně glykolytickým odbouráním 1 molekuly glukózy vzniknou dvě molekuly laktátu. Energetická výtěžnost tohoto procesu je jen $52 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$ glukózy.

Při rychlostně-vytrvalostní zátěži se velmi intenzivně tvoří kyselina mléčná. Rychlostně-vytrvalostní zátěž lze opakovat ve stejné kvalitě nejdříve po jednom dni odpočinku. Za tuto dobu se kompletně obnoví zásoby makroergních fosfátů a ze svalů se odstraní všechny laktát.

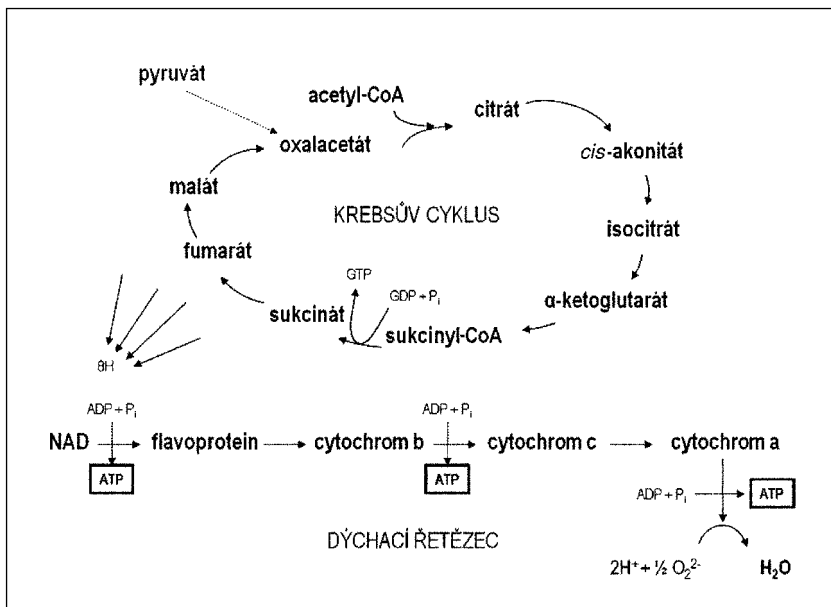
Krátkodobá vytrvalostní zátěž

Je to např. běh na 800 m. Doba trvání je 105–120 sekund. Jako zdroj k obnově ATP je využívána především glukóza. Glukóza se spaluje formou anaerobní glykolýzy za vzniku kyseliny mléčné, ale začíná se již uplatňovat účinnější forma spalování glukózy, tzv. oxidativní fosforylace. Asi po dvou minutách zátěže již oxidativní způsob spalování glukózy přesáhne přibližně 50 % a začne převažovat nad anaerobní glykolýzou.

Při krátkodobé vytrvalostní zátěži se stále ještě intenzivně tvoří kyselina mléčná. Krátkodobou vytrvalostní zátěž lze opakovat ve stejné kvalitě nejdříve cca po 1–2 dnech odpočinku. Za tuto dobu se kompletně obnoví zásoby makroergních fosfátů a ze svalů se odstraní všechny laktát.

Střednědobá vytrvalostní zátěž

Jsou to běhy na 1500 m až 5000 m. Doba trvání je 3:30 až 13 min. Jako zdroj k obnově ATP je využívána především glukóza metabolizovaná oxidativní cestou, tedy za využití molekulárního kyslíku. **Oxida-**



Obr. 3 **Oxidativní fosforylace**

Oxidativní fosforylace je reakce, při které dochází k přeměně produktu glykolýzy – kyseliny pyrohroznové – na oxalacetát. Oxalacetát kondenzuje s acetyl-CoA na kyselinu citronovou. Nastává první část oxidativní fosforylace, tzv. Krebsův cyklus neboli cyklus kyseliny citronové. Během cyklu je trikarbonovým kyselinám odňato celkem osm atomů vodíku, které jsou použity k redukci koenzymů (NAD, FAD) dýchacího řetězce. V další nezbytně následující části oxidativní fosforylace, tzv. dýchacím řetězci, dochází postupně k oxidaci redukovaných koenzymů (NADH, FADH), při níž je uvolňována převážná část energie oxidativní fosforylace a nastává fosforylace formou nově vzniklých molekul ATP. Výhodou oxidativní fosforylace je vysoká efektivita získávání chemické energie, a také to, že se při ní netvoří kyselina mléčná. Její nevýhodou je naopak skutečnost, že nastupuje pomaleji a že je limitována přísunem kyslíku do tkání, který však dosáhne určitého maxima a sportovní výkon se pak již nedá zvýšit

ivní fosforylace (obr. 3) již zcela dominuje nad anaerobní glykolýzou, tvorba laktátu již není tak intenzivní a během zátěže se stačí kyselina mléčná průběžně odbourávat (pokud intenzita zátěže nepřesáhne tzv. anaerobní práh).

Při oxidativní fosforylaci jedné molekuly glukózy vzniknou dvě molekuly kyseliny pyrohroznové (pyruvátu), která vstupuje do Krebsova cyklu (tj. cyklu trikarbonových kyselin) jako oxalacetát. Na počátku cyklu kondenzuje acetyl-CoA s oxalacetátem na kyselinu citronovou, ta je postupně dehydrogenována za uvolnění osmi atomů vodíku, které jsou poté využity k redukci koenzymů dýchacího řetězce (3 NAD, 1 FAD). Energetická bilance samotného Krebsova cyklu je poměrně malá (uvolní se jen 25 kcal při rozštěpení makroergické vazby succinyl-CoA za vzniku 1 GTP). Krebsův cyklus však probíhá vždy s návazností na dýchací řetězec, v němž dojde oxidací redukováných koenzymů k uvolnění 191 kcal, tedy převážně části energie. Spojením reakcí cyklu trikarbonových kyselin s dýchacím řetězcem se celkem uvolní 216 kcal. Část této energie se využije na tvorbu tepla, část se uskladní ve formě chemické energie jako ATP. Celkem se z 1 mmol glukózy vytvoří 38 mmol ATP.

Při střednědobé vytrvalostní zátěži se tvoří kyselina mléčná zejména při překročení anaerobního prahu a při zrychlení ve finiši, jinak je její tvorba poměrně malá. Střednědobou vytrvalostní zátěž lze opakovat ve stejné kvalitě nejdříve cca po 2–3 dnech odpočinku. Stále se ještě nevyužívají jako energetické zdroje lipidy.

Dlouhodobá vytrvalostní zátěž

Jako příklad dlouhodobé vytrvalostní zátěže nám poslouží běhy na 5000 m až půlmaratón (21 km). Doba trvání je přibližně 13 až 60 min (viz obr. 3). Jako zdroj k obnově ATP je zpočátku využívána glukóza metabolizovaná oxidativní cestou. Zhruba po 20–30 minutách se paralelně s oxidativní fosforylací začíná uplatňovat lipolýza, která využívá jako energetické substráty tuky (převážně triacylglyceroly), které se štěpí na glycerol a mastné kyseliny. Oxidativní fosforylace zůstává dominantním procesem získávání energie, ale podíl lipolýzy se s prodlužující se zátěží stále zvyšuje.

Mastné kyseliny se naváží na koenzym A a jsou přeneseny do mitochondrií (koenzym A – CoA – je v mitochondriální matrix přítomen ve vysoké koncentraci). Tento komplex pak vstupuje do procesu zvaného **β -oxidace** (obr. 4), při níž se z řetězce mastné kyseliny postupně odštěpují dvouuhlíkaté zbytky za vzniku acetyl-CoA. Z mastné kyseliny s 16 atomy uhlíku tak postupně vznikne celkem osm molekul acetyl-CoA, který se pak dále odbourává v Krebsově cyklu a v dýchacím řetězci. Energetický výtěžek jednoho cyklu β -oxidace, tedy zkrácení řetězce molekuly mastné kyseliny