



Energetické systémy lidského těla

Svaly získávají ATP na pohyb příčných můstků prostřednictvím tří základních energetických reakcí:

1. **Regeneraci ATP z kreatinfosfátu („ATP-CP systém“)**
2. **Anaerobní glykolýzou („LA-systém“)**
3. **Aerobní oxidací glukózy a tuků („O₂ systém“)**

ATP+KREATINFOSFÁT („ATP-CP SYSTÉM“)

Krátkodobé intenzivní výkony (sprint, vzpírání těžkých vah) je možno po ome-

zenou dobu provádět anaerobně, tj. bez přístupu kyslíku. Během prvních sekund svalové práce je nejprve energie pro pohyb čerpána **rozkladem malých zásob ATP** uložených ve svalů. Když jsou tyto zásoby vyčerpány, je nový ATP regenerován **reakcí ADP s kreatinfosfátem (fosfokreatinem)**, uloženým ve svalech. Z kreatinfosfátu se uvolní molekula organického fosforu a spojením s ADP vznikne nová molekula ATP. Tyto reakce jsou dominantním zdrojem energie po dobu prvních cca 5–6 sekund a na rozdíl od anaerobní glykolýzy při nich nevzniká laktát. Během delšího cvičení se

kreatinfosfát nestačí regenerovat a jeho podíl na celkové energetické produkci prudce klesá (při 6s práci cca 50 %, ale při 30s už sotva 30 %; viz review Bangsbo 1998). Po skončení zátěže se jeho zásoby ve svalech opět rychle obnoví (75–80 % během cca 1 minuty, 100 % během cca 2–3 minut). Z uvedeného plyne, že čím vyšší budou zásoby kreatinfosfátu ve svalech, tím déle a s větší energií bude možno provádět krátkodobý, vysoce intenzivní anaerobní výkon. Protože kreatinfosfát vzniká sloučením organického fosforu s kreatinem, využívá se umělý příjím vysokých množství **kreatinu** pro zvýšení zásob kreatinfosfátu a tím i pro zlepšení výkonnosti v disciplínách jako sprint či vzpírání.

ANAEROBNÍ GLYKOLÝZA („LACTIC ACID/LA-SYSTÉM“)

čili **anaerobní rozklad glukózy** se rozjíždí pouze s malým zpožděním po ATP-CP systému a už po cca 6 sekundách se podíl obou systémů vyrovnává. Glukóza je nejprve rozkládána na pyruvát a ten je poté bez přístupu kyslíku odbourán na **kyselinu mléčnou**, resp. laktát (La^-) a ionty vodíku (H^+). Pokud je glukóza získávána ze svalového glykogenu, čistý zisk anaerobní glykolýzy představují 3 molekuly ATP na 1 molekulu glukózy. Pokud však výkon trvá déle a glukóza je do svalu přiváděna také krví z jater, čistý výtěžek se sníží na 2 molekuly ATP, protože 1 molekula ATP je použita na chemickou úpravu glukózy v játrech.

- Svalový glykogen je zásobní formou glukózy pro okamžitou potřebu při intenzivních výkonech a vydrží maximálně na cca 90 minut

nepřerušované svalové práce. Další zásoby glukózy jsou uloženy v jaterním glykogenu. Játra jsou schopna vytvářet glukózu také z proteinů, tuků, laktátu i jiných substancí v procesu zvaném **glukoneogeneze**. Glukóza z jater proudí do krve a při průtoku svaly je spotřebována k tvorbě energie. Jaterní glukóza však nepostačuje ke krytí intenzivního svalového výkonu; navíc určitá minimální úroveň glukózy v krvi musí být zachována, protože krevní glukóza je zdrojem energie pro mozek a další tkáně. Z toho důvodu je schopnost svalů přijímat glukózu z krve limitována.

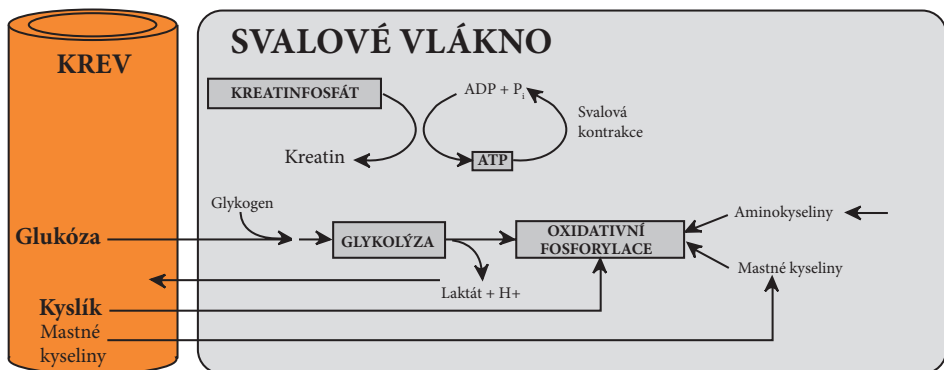
Při produkci energie anaerobní glykolýzou se ve svalu hromadí laktát, a to i přes jeho rychlé vyplavování do krve a další metabolizaci v játrech a ledvinách (tam je použit při syntéze glukózy), nepracujících svalech či v srdci (přeměněn na pyruvát). Když dosáhne hladina laktátu určité úrovně, disociované ionty vodíku (H^+) způsobí takový pokles pH, že dojde ke sníženému nasycení hemoglobinu kyslíkem a narušení svalových funkcí. Zvyšující se okyselování způsobuje dráždění nervových zakončení a známý pocit „pálení“. Detailní mechanismus vzniku svalové únavy nicméně stále není definitivně objasněn (viz review Cairns 2006). Rychlost poklesu pH závisí na **pufrovací kapacitě** krve a svalů, tj. na schopnosti neutralizovat volné vodíkové ionty a zpomalovat okyselování. Pufrovací kapacita má velký význam pro sportovní výkon a lze ji zvýšit tréninkem. Mezi hlavní pufry patří fosfáty, některé bílkoviny (hemoglobin, histidin) a zejména karboxylové kyseliny a jejich soli (HCO_3^- , NaHCO_3^-).

- V posledních letech se objevují názory, že klasické představy o produkci a roli laktátu v pracujícím svalstvu je nutné korigovat. Někteří fyziologové razí tezi, že během tvorby pyruvátu jsou produkovány ionty H^+ , ovšem ty jsou během následného vzniku laktátu obratem zase spotřebovávány a konečným produktem glykolýzy je pouze laktát, nikoli laktát a H^+ (kyselina mléčná). **Produkce laktátu tedy de facto snižuje buněčnou acidózu.** Ionty H^+ se ve skutečnosti kumulují

následkem štěpení (hydrolýzy) vznikajícího ATP. Pokud toto štěpení probíhá v mitochondriích, volné ionty H^+ se nehromadí, protože jsou použity v cyklu oxidativní fosforylace (Roberts a kol. 2004). Jiní sice s tímto vysvětlením souhlasí, nicméně argumentují, že tento model neplatí při nízkých hodnotách pH (Kemp 2004). Výsledky této odborné diskuse však nic nezmění na tom, že produkce pyruvátu/laktátu má velmi úzkou souvislost s poklesem pH.

Množství svalového glykogenu a kreatinu ve svalovině různých typů běžců (podle Neumanna)			
	Kreatin (mmol/kg)	Glykogen (g/100 g)	Rychlá vlákna (%)
Sprinteři	132,2	1,43	60
Středotraťáři	117,0	1,68	30
Vytrvalci	110,9	2,16	20

PRODUKCE ATP

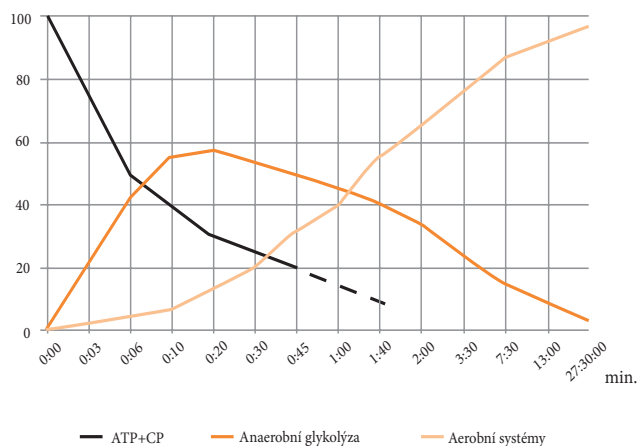


Anaerobní glykolýza je sice dosti neefektivní způsob získávání energie a asi dvakrát pomalejší než regenerace ATP z kreatinfosfátu, nicméně stále je výrazně rychlejší než oxidace glukózy. Po cca 30 sekundách intenzivní

práce jsou zásoby kreatinfosfátu prakticky vyčerpány a náhlé „najetí“ na pomalejší anaerobní glykolýzu zapříčiňuje známou „čtvrťkařskou krizi“ z důvodu snížené rychlosti produkce ATP a hromadění laktátu a H⁺.

Zásoby energie u průměrného člověka vážícího 65 kg s 12 % tělesného tuku

Zdroj energie	Zásobní forma	Množství	Energetický zisk na 1 gram	Celkem energie v kJ
Sacharidy (cukry)	Jaterní glykogen	110 g	17 kJ	1 870 kJ
	Svalový glykogen	250 g	17 kJ	4 250 kJ
	Krevní glukóza	15 g	17 kJ	255 kJ
Celkem sacharidů		375 g		6 375 kJ
Lipidy (tuky)	Podkožní tuk	7 800 g	39 kJ	304 200 kJ
	Vnitrosvalový tuk	161 g	39 kJ	6 279 kJ
Celkem tuku		7 961 g		310 479 kJ



Přibližný poměr energetických systémů v závislosti na trvání výkonu (běh, popřípadě cyklistika). Podle matematických modelů založených na výkonech elitních atletů dochází k vyrovnání aerobního a anaerobního metabolismu po cca 55–72 sekundách (Ward-Smith 1999). V praktických studiích se objevují výsledky od 50 až do 100 sekund. Některé novější výzkumy (např. Spencer, Gastin 2001, Duffield a kol. 2004) se kloní spíše k rychlejšímu nástupu aerobního

metabolismu, jiné naopak zdůrazňují anaerobní podíl (těch se obvykle drží naše sportovní literatura). Rozdíly v měření vyplývají z dosavadní nedokonalosti laboratorních metod a individuálních rozdílů v podílu rychlých a pomalých vláken (sprinter vytváří energii více anaerobně nežli vytrvalec).

AEROBNÍ OXIDACE GLUKÓZY A TUKŮ („O₂ SYSTÉM“)

Při výkonech trvajících déle než cca 60–70 sekund dominuje jako zdroj svalové energie **oxidace glukózy** (tj. štěpení glukózy za přítomnosti kyslíku). V cytoplazmě svalové buňky je nejprve glukóza rozkládána na pyruvát, jenž je následně metabolizován v mitochondriích v tzv. Krebsově cyklu (cyklu kyseliny citronové). Tato závěrečná reakce (**oxidativní fosforylace**) vede ke vzniku vody (H₂O), oxidu uhličitého (CO₂) a velkého množství energie (38 ATP).

Když se výkon stupňuje, množství mitochondrií, oxidativních enzymů a přijímaného kyslíku nestačí odbourávat pyruvát a dochází k jeho přeměně na laktát v procesu anaerobní glykolýzy.

Pokud jsou po cca 90 minutách intenzivního výkonu zcela vyčerpány zásoby glykogenů a krevní glukóza nepostačuje, svaly začnou využívat energii převážně **oxidací tuků** (resp. volných mastných kyselin ze zásobního triacylglycerolu) v Krebsově cyklu na

H₂O a CO₂. Tento způsob produkce energie (**lipolýza**) nevytváří laktát, ale je méně ekonomický nežli rozklad glukózy, neboť na stejné množství energie vyžaduje asi o 7 % více kyslíku. To nevyhnutelně vyvolává vyšší požadavky na dodávku kyslíku (zvýšení ventilace) a protékání krve (vyšší srdeční výkon). Při produkci energie z tuků již nelze udržet vysoké pracovní tempo. Vyčerpání glykogenových zásob a „najetí“ na pomalejší oxidaci tuků se projevuje notoricky známou krizí po 30 kilometrech maratonského závodu (tzv. hypoglykemie). Vzhledem k obrovskému množství energie uloženému v tucích by teoreticky bylo možné vykonávat svalovou práci na oxidaci tuků téměř do nekonečna; prakticky to však není reálné vlivem dehydratace, narušení osmotické rovnováhy v tělesných tekutinách, přehřátí apod. Jako zdroj energie slouží v případě extrémní dlouhodobé zátěže i **proteiny**, a to hlavně tzv. **větvené aminokyseliny (BCAA)**.

Po skončení výkonu je pomocí zvýšené ventilace zoxidován nahromaděný laktát a jsou doplněny energetické rezervy (ATP, kreatin-

Reakce produkující energii pro svalový pohyb	
HYDROLÝZA ATP (první sekundy)	$ATP + H_2O > ADP + H_3PO_4 + 31 \text{ kJ na 1 mol ATP}$
REGENERACE ATP z KREATINFOSFÁTU (dominuje v prvních cca 6 sekundách a výrazně klesá po cca 30 sekundách)	$\text{kreatinfosfát (PCr)} + ADP > ATP + \text{kreatin} + 43 \text{ kJ na 1 mol PCr}$
ANAEROBNÍ GLYKOLÝZA – Anaerobní rozklad glukózy (dominuje od cca 6 s až do cca 60–70 s)	$\text{glukóza (C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) + 2 \text{ ATP (nebo glykogen} + 1 \text{ ATP)} > 4 \text{ ATP} + 2 \text{ kyselina mléčná} (> 2 \text{ laktát} + 2 \text{ H}^+)$
OXIDACE GLUKÓZY – Aerobní rozklad glukózy (dominuje po cca 60–70 sekundách)	$\text{glukóza (C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) + 2 \text{ ATP (nebo glykogen} + 1 \text{ ATP)} + 6 \text{ O}_2 > 6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} + 38 \text{ ATP}$
OXIDACE TUKŮ (LIPOLÝZA) – Aerobní rozklad tuků (volných mastných kyselin) (dominuje po vyčerpání glykogenů po cca 90 minutách)	$\text{mastné kyseliny (C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2) + 23 \text{ O}_2 > 16 \text{ CO}_2 + 16 \text{ H}_2\text{O} + 130 \text{ ATP}$

fosfát). Tato zvýšená spotřeba kyslíku se běžně označuje jako „**kyslíkový dluh**“. Při výkonech delších než cca 30 sekund se laktát nahromadí takovým způsobem, že se prudce zvyšuje čas na zotavení. Běžci na 400 metrů proto potřebují k zopakování kvalitního výkonu mnohem delší odpočinek než sprinteři na 100 m.

- Při chemických reakcích ve svalové buňce hraje důležitou roli celá řada enzymů. Měření jejich aktivity umožňuje pochopit fyziologické procesy. Pokud se účastní energetických procesů v mitochondriích (Krebsův cyklus) za přítomnosti kyslíku, označujeme je jako **enzy-**

my oxidativní. Enzymy rozkládající glukózu v cytoplazmě nazýváme **enzymy glykolytické**. S ATP-CP systémem jsou např. spjaty enzymy kreatin(fosfo)kináza (CK, CFK) a myokináza (MK), při rozkladu glukózy a produkci laktátu „asistují“ glykolytické enzymy glykogen-fosforyláza (PHOS), fosfofruktokináza (PFK; indikuje intenzitu glykolýzy), hexokináza (HK) a laktát-dehydrogenáza (LDH; indikuje produkci laktátu). V mitochondriích jsou to oxidativní enzymy citrát-syntáza (CS), pyruvát-dehydrogenáza (PDH), malát-dehydrogenáza (MDH) nebo 3-hydroxyacyl-CoA dehydrogenáza (HAD).