

Mezipředmětová integrace tělesná výchova – biologie – chemie

**Biochemie pro učitele tělesné výchovy II.: anaerobní metabolismus
(průvodce studiem)**

Filip Neuls, Ph.D.

Průvodce studiem

Pohyb je založen na svalových kontrakcích. Ať už je tím pohybem běžná chůze, cvičení v rámci školní tělesné výchovy nebo vysoce specializovaný sportovní výkon. Tyto svalové kontrakce však vyžadují energii. Způsob, jakým (svalová) buňka získává energii, je pak určujícím pro celkový průběh energetického metabolismu.

Cíl textu

Cílem tohoto metodického listu je vysvětlení pojmů a dějů souvisejících s anaerobním způsobem získávání energie a aplikace těchto poznatků na svalovou práci, resp. sportovní výkon.

Úvod

Organismy mají v zásadě dva způsoby, jak pro svou činnost (buněčný metabolismus) získávat energii: anaerobně (bez přítomnosti kyslíku) a aerobně (za přítomnosti kyslíku). Energie uvolněná při katabolických reakcích může být využita pro reakce anabolické. Nás v této souvislosti bude zajímat, jakým způsobem lze anaerobní cestou resyntetizovat (regenerovat, recyklovat) molekulu ATP, která je jediným přímým zdrojem energie pro svalovou kontrakci.

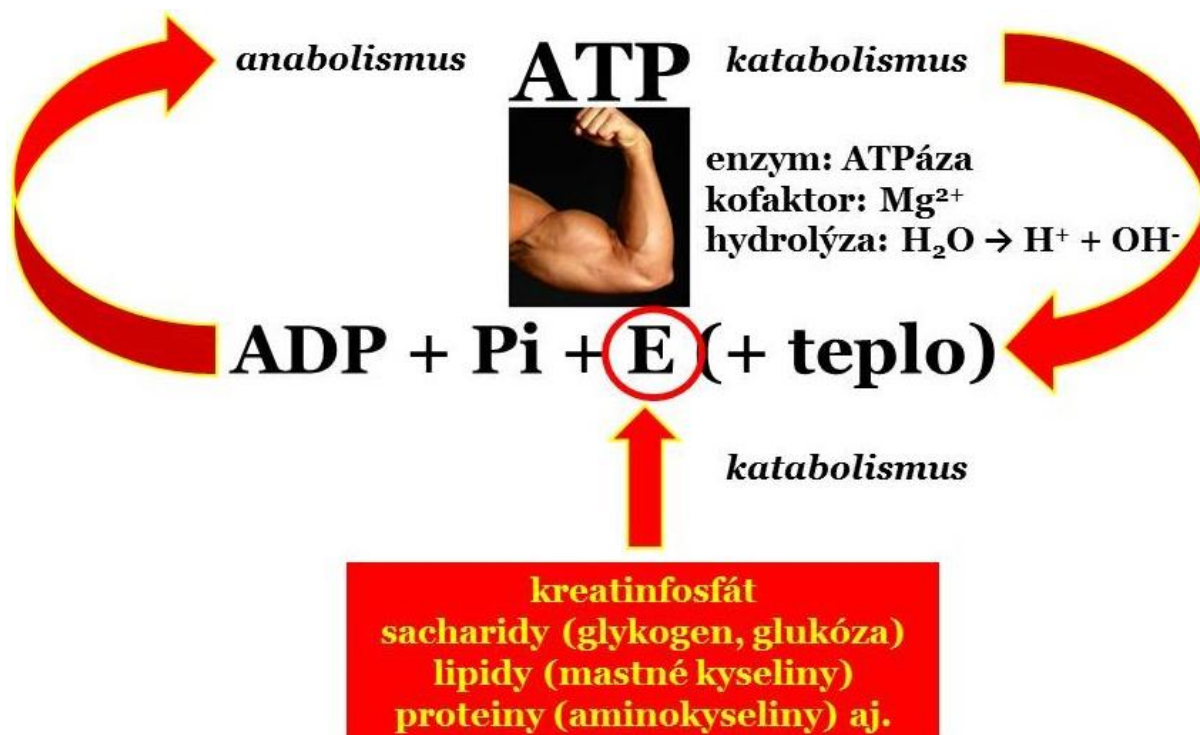
1 ATP jako zdroj energie pro svalovou kontrakci

Během rozkladu **ATP** (adenosintrifosfát) na **ADP** (adenosindifosfát) a **Pi** (anorganický fosfát) se uvolňuje energie, která může být využita např. pro svalovou kontrakci založenou na interakci molekul aktinu a myosinu. Na svalovou kontrakci se ovšem využije pouze část této uvolněné energie (cca 15–20 %); většina energie je uvolněna ve formě (odpadního) tepla. Poměr množství energie využitě pro kontrakci k celkovému množství uvolněné energie můžeme označovat jako efektivitu neboli účinnost.

Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

ATP je tedy jediným přímým zdrojem energie pro svalovou kontrakci. Molekuly ATP nelze importovat z jiných částí těla, sval využívá vlastní zásoby ATP. Již v prvních sekundách intenzivní svalové činnosti však koncentrace ATP výrazně klesá, vyvstává proto potřeba jeho resyntézy. ATP nelze za fyziologických podmínek vyčerpat, neboť pokles jeho koncentrace v buňce okamžitě vyvolává mechanismy jeho obnovy. Energetickými zdroji pro resyntézu ATP pak mohou být další energeticky bohaté látky jako kreatinfosfát, glukóza, glykogen, MK, AK a další. Přesněji řečeno, energie uvolněná při enzymatickém rozkladu těchto látek je využita pro resyntézu molekuly ATP z ADP a Pi.

Následující obrázek ilustruje, že na rozkladu (analýze) ATP se podílí enzym **ATPáza** a kofaktor tohoto enzymu **Mg²⁺**. Celá reakce je nazývána **hydrolýzou** ATP, neboť při ní dochází k disociaci vody na vodíkový kationt a hydroxidový aniont. Aby se molekula ATP opět resyntetizovala, je třeba katabolického rozkladu dalších molekul. A na tom, jakou rychlostí, v jaké míře a u jakých molekul k rozkladu dochází, závisí možnosti metabolického krytí obnovy energetického potenciálu pro svalovou práci.



Obrázek 1. Schématické znázornění analýzy a (re)syntézy ATP během svalové práce

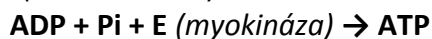
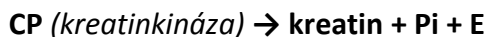
Tyto možnosti jsou při určitém zjednodušení tři. Diferencují se dle toho, zda probíhají bez kyslíku či za jeho přítomnosti a zda se při nich tvoří laktát či nikoliv. Můžeme je označit jako tři cesty resyntézy ATP:

- 1) **anaerobní-alaktátová** (ATP-CP systém),
- 2) **anaerobní-laktátová** (anaerobní glykogenolýza),
- 3) **aerobní-alaktátová** (oxidativní fosforylace).

Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

2 ATP-CP systém

Je označován též jako fosfagenový systém, neboť využívá tzv. **makroergní fosfáty**. ATP spotřebované při svalové kontrakci je bezprostředně resyntetizováno pomocí kreatinfosfátu (CP):



Kreatinfosfát se pomocí enzymu kreatinkinázy rozpadá na kreatin a fosfát a uvolněná energie pak poslouží k rychlé resyntéze ATP, kterou řídí enzym myokináza. Tato reakce je reversibilní (vratná), tj. pokud je ATP ve svalu dostatek, tvoří se z něj CP. Jinak je CP syntetizován v játrech a krví transportován do svalu.

ATP-CP systém dominuje cca v prvních 2 sekundách intenzivní svalové činnosti, pak jeho podíl významně klesá. Tento systém má tudíž význam při pohybových aktech a výkonech velmi krátkého trvání (výskoky, vrhy, hody atd.), popř. v určitých situacích v rámci intermitentního zatížení typického pro sportovní hry, pokud je zároveň v průběhu hry dostatek času na zotavení (výskok ve volejbale, basketbalový dvojtakt apod.).

3 Anaerobní glyko(geno)lyza

Substrátem pro anaerobní **glykogenolýzu** je svalový **glykogen**, pokud je zdrojem krevní **glukóza** přestupující do svalu, hovoříme o **glykolýze**. Touto cestou tedy mohou být zpracovány pouze **sacharidy**. Děje probíhají v cytoplazmě buňky (resp. svalového vlákna). Jde o rychlou, ale nehospodárnou cestu uvolňování energie pro resyntézu ATP. Tato metabolická dráha dosahuje maxima své účinnosti již po 5 sekundách od zahájení výkonu, pak ale po 30–40 sekundách tuto účinnost ztrácí a při vysoce intenzivní činnosti je udržitelná pouze do cca 60 sekund. Nehospodárnost této cesty souvisí především s tvorbou kyselých metabolitů (H^+), resp. laktátu (La), a poklesem pH (acidózou, zakyslením) ve svalu.

Řetězec reakcí anaerobní glykogenolýzy, nazývaný dle svých objevitelů též **Embden-Mayerhofova dráha** (30.–40. léta 20. stol.), produkuje kromě energie pro anaerobní resyntézu ATP i látky, které mohou být dále metabolizovány během aerobního metabolismu za dalšího zisku energie (pyruvát, H^+). Zásadní reakce této dráhy by se daly popsat takto (blíže viz přílohu 1):

- fosforylace glukózy (6C) na **glukóza 6-fosfát** (fosfát se naváže na 6. uhlík glukózy),
- druhá fosforylace za vzniku **fruktóza 1,6-bifosfátu** (druhý fosfát se naváže na 1. uhlík),
- rozklad fruktóza 1,6-bifosfátu na dvě triózy (3C),
- redukce NAD (na NAD se naváže vodíkový iont),
- vznik **pyruvátu** jako konečného produktu dráhy.

Klíčovým enzymem celé dráhy je **fosfofruktokináza** (PFK). Její aktivita do vysoké míry rozhoduje o rychlosti tvorby ATP touto anaerobní cestou. Zároveň jde ale o enzym, jehož funkčnost je výrazně omezena až zastavena acidózou vznikající při intenzivní svalové činnosti (viz níže).

Z energetického hlediska buňka energii nejprve investuje ve formě rozkladu ATP kvůli fosforylaci glukózy. Molekula glukózy navázáním fosfátů získává větší energetický potenciál.

Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

Po rozštěpení 6C molekuly na dvě 3C molekuly již nastává fáze energetického zisku, který představuje 2–3 molekuly ATP na jednu původní molekulu glukózy. Přesněji řečeno při štěpení svalového glykogenu vznikají 3 molekuly ATP (ztráta 1 ATP a zisk 4 ATP), zatímco při štěpení glukózy, která přestoupila do svalu z krve, je třeba investovat 1 ATP navíc („platba“ za vstup glukózy do buňky a její následnou fosforylaci řízenou enzymem **hexokinázou**), tudíž čistý zisk představují 2 molekuly ATP. Dráhu anaerobního rozkladu glykogenu (glukózy) můžeme tedy ještě jednou zjednodušeně shrnout:

1) **fáze investice energie** (přípravná):

- fosforylace 6C molekuly (2x),
- spotřeba ATP (1–2 mol ATP),
- rozštěpení na 2 triózy (2× 3C);

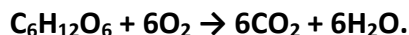
2) **fáze energetického zisku**:

- redukce NAD,
- vznik ATP (čistý zisk 2–3 mol ATP na 1 mol glukózy),
- vznik pyruvátu (konečný produkt anaerobní dráhy),
- při nedostatku O₂ z pyruvátu vzniká laktát.

Čím je tato anaerobní cesta zisku energie „nastartována“, resp., je zvýšena intenzita její činnosti? Intenzivní svalová činnost je spojena se zapojením stresové osy – zvýšením tonu sympatiku a vyplavením stresových hormonů (adrenalin). **Adrenalin** je hormonem, který aktivuje enzym **glykogenfosforylázu**. Ten zodpovídá za zahájení štěpení glykogenu na jednotlivé molekuly glukózy. Molekula glukózy je bezprostředně fosforylována na glukóza 6-P, čímž je nastartován anaerobní proces zisku energie z glykogenových zásob svalu.

3. 1 Metabolismus sacharidů

Sacharidy představují rychlý zdroj energie pro resyntézu ATP. Pokud vyjádříme aerobní rozklad glukózy jednoduchou chemickou reakcí, její zápis bude vypadat takto:



Jelikož jde o reakci katabolickou (ze složitější látky vznikají látky jednodušší), uvolňuje se během ní množství energie, díky které dochází k resyntéze ATP. Ve skutečnosti ale uvedená reakce vůbec neprobíhá jednoduše. Naopak, je při ní zapojena anaerobní (v cytoplasmě) i aerobní (v mitochondriích) dráha zpracování sacharidů při součinnosti a návaznosti desítek dílčích reakcí, meziproductů a enzymů, které celé toto biochemické „soukolí“ řídí.

Pro zopakování – ve svalové tkáni a v játrech se ukládá zásobní **glykogen** (polysacharid), v krvi se nachází **glukóza** (monosacharid), která určuje tzv. glykémii. Udržování glykémie ve fyziologických mezích je důležité zejména pro energetické zásobení mozku, který není schopen glukózu skladovat a je tak závislý na jejím kontinuálním přísunu.

Glukóza se do svalové buňky dostává na základě tzv. usnadněné difúze. Během zotavení tomuto vstupu napomáhá hormon **inzulín**, který se naváže na **inzulínový receptor** na povrchu svalové buňky. Tato reakce (hormon + receptor) vyvolá řetězec dalších reakcí, na jehož konci se do buněčné membrány zabudovávají transportní proteiny zvané **GLUT4**. Pomocí nich pak glukóza proudí do cytoplazmy svalové buňky (sarkoplazmy), kde se jednotlivé glukózové jednotky spojují do makromolekuly glykogenu. Během zatížení však inzulín tuto úlohu neplní, neboť se v zásadě nevyklučuje. Je ovšem popsán tzv. **insulin-like** (inzulínu podobný) efekt svalové kontrakce (součinnosti aktinu a myosinu), který má za následek přestup glukózy přes GLUT4 i bez potřeby inzulínu. Proto je možné zejména během dlouhodobého vytrvalostního zatížení přijímat sacharidy v potravě či nápojích a tím částečně

Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

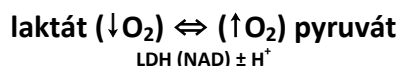
kompensovat výrazný pokles množství svalového glykogenu. Tento mechanismus dále může do určité míry působit jako prevence diabetes mellitus II. typu.

4 Metabolická acidóza

Množství dostupného kyslíku do vysoké míry rozhoduje o tom, jakým způsobem bude dále probíhat metabolizace pyruvátu (resp. kyseliny pyrohroznové) jakožto konečného produktu anaerobní dráhy. Při nedostatku kyslíku (během svalové práce s vysokou intenzitou) z pyruvátu vzniká **kyselina mléčná** (KM). Ta je pro organismus toxická a je okamžitě enzymaticky přeměněna na netoxický **laktát**, což je sodná či draselná sůl kyseliny mléčné (KM se tudíž fyziologicky v těle vlastně nevyskytuje). Enzymem zodpovědným za tuto reakci je **laktátdehydrogenáza** (LDH):



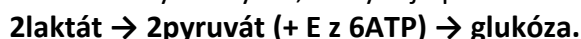
Podle množství dostupného kyslíku (v závislosti na intenzitě zatížení – čím vyšší intenzita, tím méně dostupného O₂) se reakce mezi laktátem a pyruvátem překlápí na jednu nebo druhou stranu:



Malé množství La se tvoří i v klidu (v krvi 1–2 mmol/l, ve svalu 1–2 mmol/kg). Při maximální zátěži trvající alespoň 1 minutu toto množství ale velmi výrazně vzroste na 25–30 mmol/kg ve svalu, resp. 10–20 mmol/l v krvi. Aktuální množství La v těle je dáno rychlostí tvorby a odbourávání, což závisí na intenzitě zatížení a jejím trvání. K lepšímu pochopení této problematiky pomůže koncept tzv. anaerobního prahu (ANP):

- pod ANP převažuje odbourávání (oxidace),
- na úrovni ANP rovnováha tvorby a odbourávání,
- nad ANP převažuje tvorba (vedoucí k acidóze).

Jakým způsobem se vlastně La spotřebovává? Odpověď dává tzv. hypotéza **laktátového člunku** (*lactate shuttle*), která předpokládá, že La přestupuje z místa své tvorby do jiných míst, kde je nějakým způsobem spotřebován. La tak může přestupovat z bílých svalových vláken, kde se více tvoří, do červených svalových vláken, která jsou lépe uzpůsobena oxidacím. Dále je La velice účinně oxidován v myokardu. Zdravý myokard prakticky nelze zakyselit ani při vysoké intenzitě činnosti (vysoké srdeční frekvenci). Problém nastává při nedokrevnosti srdečního svalu (ischemické chorobě srdeční), která je doprovázena jeho bolestí. Další cestou využití La je **glukoneogeneze**, tedy novotvorba glukózy z nesacharidových tříuhlíkatých zbytků, kterým je právě i La:



Tato metabolická dráha se nazývá **Coriho cyklus**. Probíhá v játrech, slouží mj. i k udržování glykémie a kromě La může pro tvorbu glukózy využít např. i pyruvát, glycerol nebo glukoplastické AK (zejména alanin a glutamin).

4. 1 Úloha vodíkových iontů

La jako takový acidózu nezpůsobuje, „na vině“ jsou vodíkové ionty (protony H⁺). Hypotéz vzniku H⁺ je několik: při tvorbě laktátu, při hydrolýze ATP, během glykogenolýzy, při dekarboxylaci pyruvátu, během Krebsova cyklu apod.

Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

I vodíkové ionty představují potenciál pro energetický zisk buňky ve formě ATP. Pokud se H^+ pojí s koenzymy NAD a FAD (tedy redukuje je), pak tyto koenzymy přenášejí H^+ a e^- uvolněné předchozími katabolickými reakcemi do dýchacího řetězce, kde jsou oxidovány kyslíkem. V průběhu tohoto řetězce aerobních reakcí dojde k tvorbě ATP a spojení vodíku s kyslíkem za vzniku vody (blíže viz další metodický list k aerobnímu metabolismu). Podmínkou pro větší uplatnění těchto reakcí je samozřejmě dostatečné množství O_2 .

Při anaerobní práci a relativním nedostatku O_2 tedy vzniká velké množství H^+ , které vede k acidóze ve svalu, tedy k poklesu pH. Zkratka **pH** znamená tzv. vodíkový potenciál. Dle definice jde o záporný dekadický logaritmus číselné hodnoty koncentrace vodíkových iontů (H^+). Zjednodušeně – čím vyšší je koncentrace vodíkových iontů, tím nižší je pH a naopak. Lze pak číselně vyjádřit kyselost či zásaditost prostředí (acidóza vs. alkalóza):

- pH < 7 kyselé,
- pH = 7 neutrální (destilovaná voda),
- pH > 7 zásadité.

Jakým způsobem se vlastně organismus vypořádá se zakyslením? Funkcí tzv. pufrčních systémů, které dokážou vyrovnávat výkyvy v pH a patří tak k důležitým mechanismům udržování homeostázy (stálosti vnitřního prostředí). **Pufry** (angl. *buffer*, nárazník) jsou nárazníkové systémy udržování acidobazické rovnováhy tvořené směsí slabých kyselin a jejich solí (zásad). Pufrčních systémů existuje několik, zde si uvedeme jako příklad činnost pufru bikarbonátového (hydrogenuhličitanového):



Při výrazném zakyslení přechází La^- a H^+ difúzí ze svalu do krve. La^- je dále metabolizován výše uvedenými cestami, H^+ je pufrován za vzniku vody a CO_2 . Přesněji řečeno zásaditý bikarbonátový aniont se pojí s kyselým kationtem vodíku za vzniku slabé kyseliny uhličitě. Ta v plicích disociuje na vodu a oxid uhličitý, který je vydychán. Tento způsob vzniku CO_2 má za následek nárůst hodnoty RQ nad 1,00 (blíže viz interpretace respiračního kvocientu) a je i jednou z příčin hyperventilace (zrychleného a prohloubeného dýchání) během intenzivního zatížení a po něm, neboť větší množství CO_2 v krvi dráždí dýchací centrum v prodloužené míše mozku.

4. 2 Metabolická acidóza a výkon

Několik desítek sekund trvajících zatížení s vysokou (až maximální) intenzitou vede k acidóze v pracujících svalectech. Typickým příkladem dynamické činnosti je běh s maximální intenzitou o trvání alespoň jedné minuty. Ačkoliv část H^+ difunduje ze svalu do krve, krev potenciálně zakyslení velmi dobře kompenzuje pomocí svých četných pufrčních systémů (bikarbonátový, hemoglobinový, fosfátový a pufr krevních bílkovin), které udržují pH krve na velmi stabilní úrovni mírné zásaditosti (7,3–7,4). I sval má své pufry, bez nichž by hrozilo výrazné zakyslení a poškození svalu, nicméně acidóza je přítomna a negativně ovlivňuje výkon:

- anaerobní metabolismus se kompletně zastavuje při pH pod 6,4 kvůli redukci aktivity PFK, čímž dochází k energetickému deficitu (nedostatku ATP), ačkoliv jinak energetické zdroje (např. svalový glykogen) vůbec deficitní nejsou;
- acidóza dráždí nervová zakončení vnímající bolest, což vede k ostré až pálivé bolesti ve svalu;
- H^+ vytěsňuje Ca^{2+} z vazby na troponin a narušuje tak mechanismus svalové kontrakce;

Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

- svalstvo „tuhne“, což souvisí s pohybovou diskoordinací (se zhoršením techniky pohybu);
- stimulovány jsou též receptory bolesti v mozku, čímž může být vyvolána nauzea a dezorientace.

Výkon je tímto narušen s následkem zpomalení až zastavení. Hlavní příčinou únavy je tedy v tomto případě acidóza, nikoliv vyčerpání energetických zdrojů. Jako příklad statické činnosti se stejným výsledkem můžeme uvést výdrž ve shybu. Isometrickou kontrakcí svalu dojde k tomu, že svalové kapiláry jsou mechanicky stlačeny kontrahovanými svalovými vlákny, tudíž je omezen krevní průtok svalem. Tomu se pak nedostává dostatečné množství O_2 a tudíž v něm převládá anaerobní metabolismus s výsledkem acidózy a následné neschopnosti v takovéto výdrži pokračovat.

Použitá a doporučená literatura

Koolman, J., & Röhm, K.-H. (2012). *Barevný atlas biochemie*. Praha: Grada.

Lehnert, M., Botek, M., Sigmund, M., Smékal, D., Šťastný, P., Malý, T., Háp, P., Bělka, J., & Neuls, F. (2014). *Kondiční trénink*. Olomouc: Univerzita Palackého. (<https://publi.cz/books/149/Cover.html>).

Vacík, J. (1999). *Přehled středoškolské chemie* (4th ed.). Praha: SPN.

Podrobněji k anaerobní glykogenolýze zde:

<http://laboratoryinfo.com/glycolysis-steps-diagram-energy-yield-and-significance/>

Kontrolní otázky

Co je to ATP-CP systém? Kdy se využívá?

Co je biochemickou podstatou anaerobního metabolismu?

Dovedli byste uvést příklady sportovních výkonů podmíněných efektivitou anaerobního metabolismu?

Jak se projevuje acidóza ve svalu?

Samostudium

Vyzkoušejte si sami na sobě, jak vypadá zakyselení organismu při maximální intenzitě zatížení trvající alespoň jednu minutu. Můžete si zaběhnout rychlých 400 metrů na atletickém ovále nebo třeba provádět jednu minutu dřepy s vysokou frekvencí (u kliků bude stačit 30 sekund i méně). Měli byste být schopni vnímat své pocity a popsat, co se ve vašich svalech odehrává.

Příloha 1. Schéma anaerobní glykolýzy (laboratoryinfo.com)

Efektivní adaptace začínajících učitelů na požadavky školské praxe

