

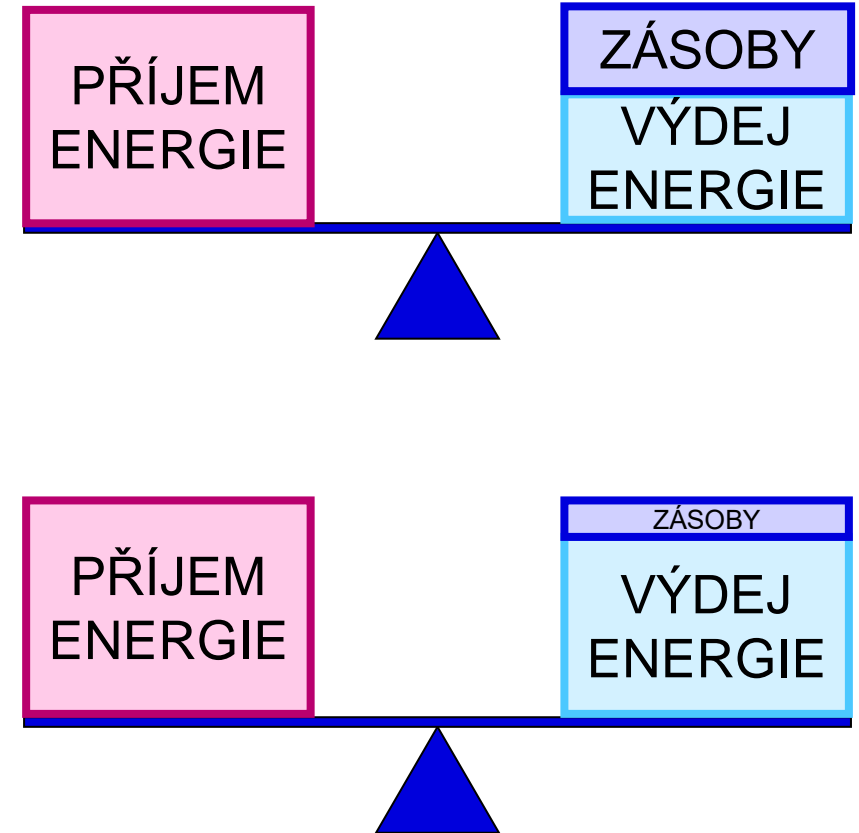
Energetický metabolismus

Fyziologie II přednáška (ZLFY0422p)

Tibor Stračina

Energetický metabolismus

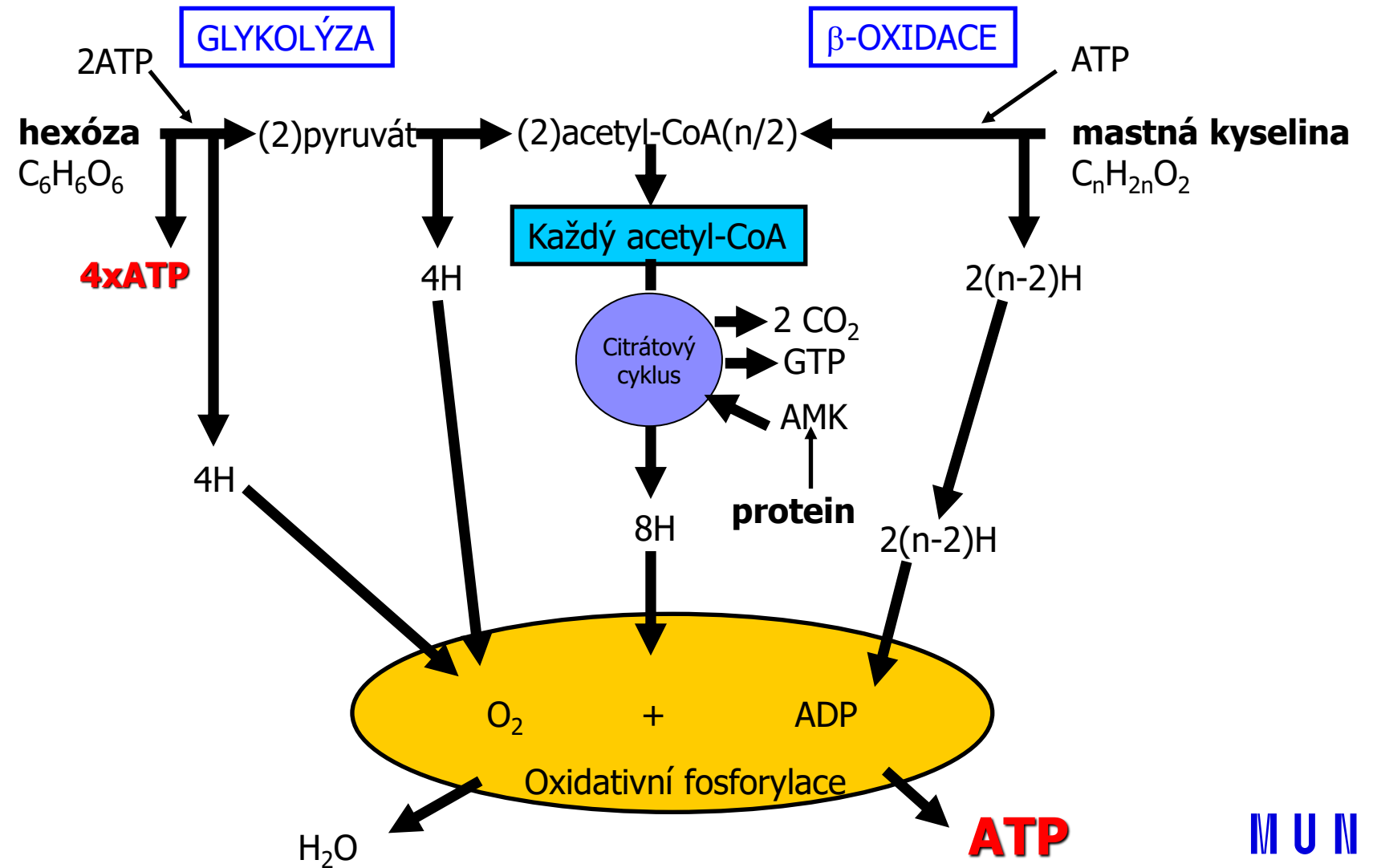
- Příjem energie (vnější i vnitřní zdroje)
- Výdej energie
- Tvorba energetických zásob
- $\text{PŘÍJEM} = \text{VÝDEJ} + \text{ZÁSoby}$



Příjem energie

- Základní substráty: **cukry, tuky a bílkoviny**
- Energie se získává spalováním (oxidací) substrátů
 - cukry 4,1 kcal/g
 - tuky 9,3 kcal/g
 - bílkoviny 5,3 kcal/g (v lidském organismu 4,1 kcal/g)
- Zdroj substrátů: **příjem potravy** nebo **mobilizace zásob**

Spalování živin



Výdej energie

- **Bazální metabolismus** – výdej energie na udržení homeostázy za bazálních podmínek (vitální funkce) – *~75% výdeje u sedícího člověka v klidu*
- **Specifický dynamický účinek jídla** – malé zvýšení energetického výdeje po najezení – *~7% výdeje u sedícího člověka v klidu*
- **Termoregulace**
- **Spontánní fyzická aktivita** (mimovolné pohyby) – *~18% výdeje u sedícího člověka v klidu*
- **Fyzická práce** – obvykle největší část energetického výdeje organismu

Uskladnění a přesuny energie

- Příjem a výdej energie nepravidelný – nutnost uskladnění energie
- Pohotová zásoba – makroergní sloučeniny
 - ATP
 - kreatinfosfát
 - GTP, CTP, UTP, ITP
- Dlouhodobé zásoby – zásobní substráty
 - Tuky, proteiny, cukry

Adenosin trisfosfát (ATP)

- univerzální makroergní sloučenina

Tvorba

- denně asi 63 kg (128 mol)
- oxidativní fosforylace
- glykolýza – jen krátkodobý zdroj, tvorba laktátu

Využití

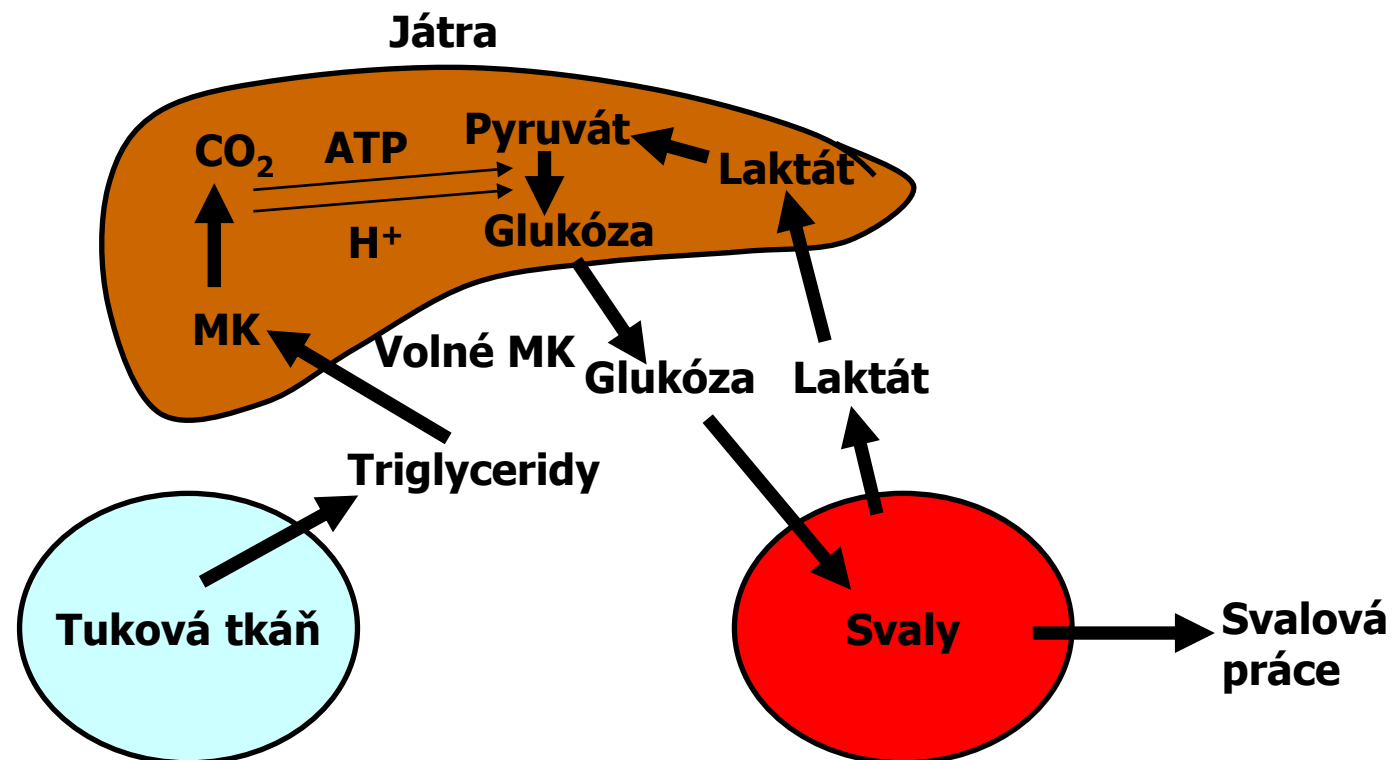
- štěpení makroergní vazby – účinnost není 100%, uvolňuje se teplo

Zásobní substráty

- Triglyceridy v tukové tkáni (75% zásob) – až na 2 měsíce
 - Zdroj: MK z potravy a esterifikace s α -glycerolfosfátem nebo syntéza MK z acetyl-CoA z glykolýzy (přeměna cukrů na efektivnější zásobu energie = tuk)
- Proteiny ve svalech a krevní plasmě (25% zásob)
 - Možná přeměna na cukry (glukoneogeneze; stimulováno glukokortikoidy)
 - Proteiny v krevní plasmě – rychle využitelné; vede k hypoproteinémii, snížení specifické látkové imunity
 - Mobilizace svalových proteinů vede k sarkopénii
- Cukry ve formě glykogenu (méně než 1% zásob)
 - Důležité pro CNS a pokrytí energetických nároků během krátkodobé fyzické práce
 - Glykogen uložen v játrech (asi 25%) a ve svalech (asi 75%)
 - Jaterní glykogen – glykogenolýza – uvolnění Glc do krve
 - Svalový glykogen – využití pouze ve svalech (chybí glukoso-6-fosfatáza)

Přesuny energie mezi orgány

- Pouze ve formě substrátů (glukóza, MK, AMK, laktát, ketolátky, ...)
- Na přesuny se spotřebovává energie (syntéza a štěpení zásobních substrátů, transporty, ...)



Měření energetického výdeje

– Kalorimetrie přímá

– Kalorimetrie nepřímá (*PRAKTIKA!!!*)

– Spotřeba O₂ – **energetický ekvivalent kyslíku** (množství energie uvolněné za spotřeby 1 litru O₂)

Cukry: 21,15 kJ/l

Tuky: 19,6 kJ/l

Proteiny: 19,65 kJ/l

Směsná dieta: 20,1 kJ/l

– Spotřeba O₂ + produkce CO₂ – **respirační kvocient** (poměr objemu vyprodukovaného CO₂ a spotřebovaného O₂;

$$RQ = V_{CO_2} / V_{O_2}$$

Cukry: RQ = 1

Tuky: RQ = 0,7

Proteiny: RQ = 0,8 – 0,9

Fyziologie práce

Fyziologie II přednáška (ZLFY0422p)

Tibor Stračina

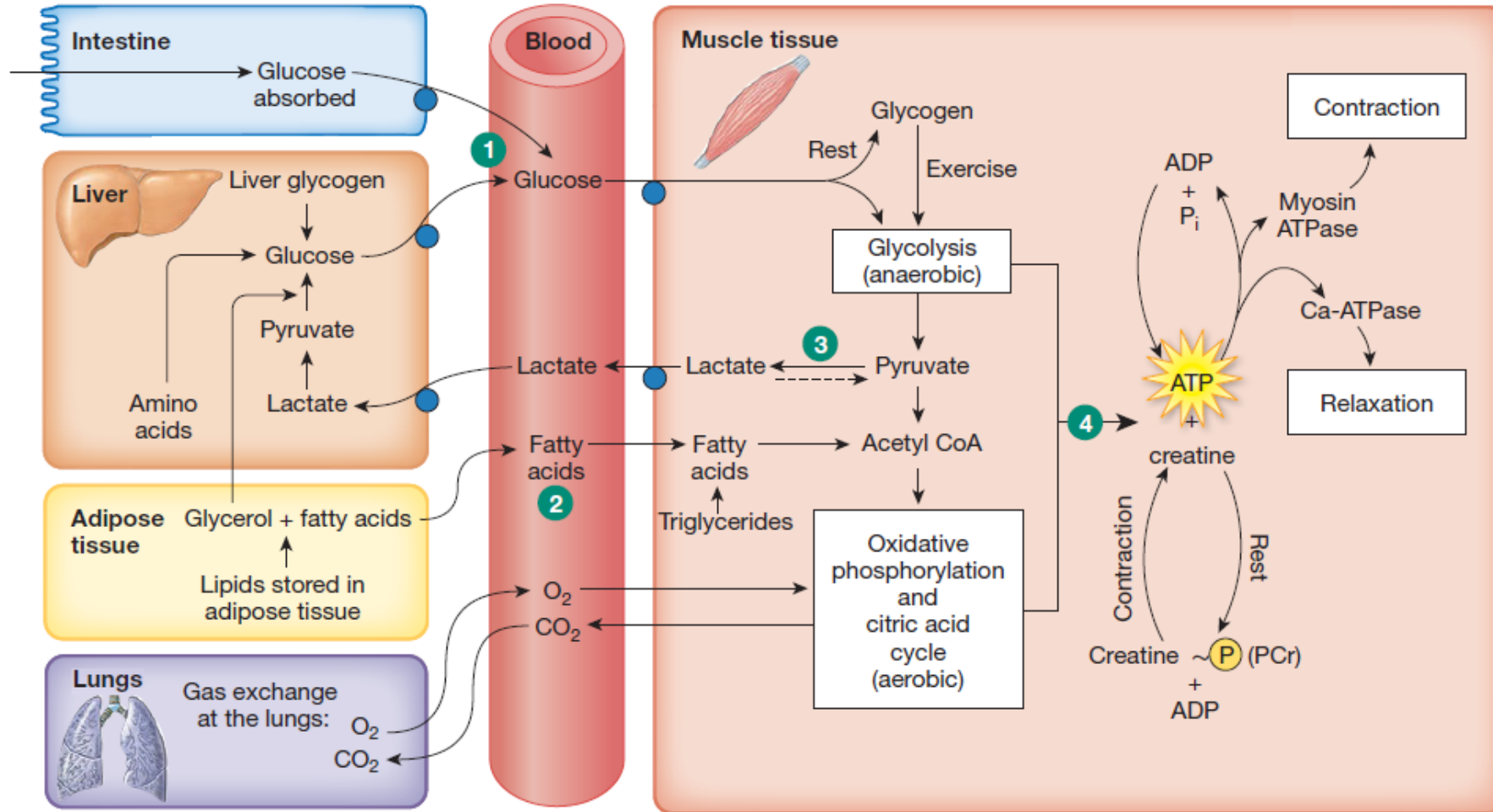
Práce (fyzická aktivita, cvičení)



Kosterní sval

- Kontrakce: isometrická (statická práce) vs. isotonická (dynamická práce)
- Metabolismus: aerobní vs. anaerobní
- Metabolická autoregulace krevního průtoku:
 - ↓pO₂; ↑pCO₂; ↓pH; ↑K⁺; ↑lokální teplota
- Krevní průtok závisí na svalovém napětí (vysoké napětí = snížený průtok)
- Svalová vřeténka – svalové napětí – aferentace – udržuje aktivaci SNS

Metabolismus kosterního svalu



Reakce organismu na zátěž (práci)

- Sympatický nervový systém (ergotropní systém)
- Kardiovaskulární změny
- Respirační změny
- Metabolické změny
- HOMEOSTÁZA

Anticipace fyzického výkonu

- Reakce organismu (zejména KVS) ještě před zahájením práce
- Připravuje organismus na zvýšené metabolické nároky pracujících kosterních svalů
- Změny stejné jako v časně fázy odpovědě na zátěž
- Podobnost s reakcí na stres (fight-or-flight)

Reakce kardiovaskulárního systému na práci

- Zvýšení srdečního výdeje
- Vazokonstrikce v nepracujících kosterních svalech, v GIT, kůži, (ledvinách)
- Vazodilatace v pracujících svalech
- Zvýšení žílného návratu
- Uvolnění histaminu
- Zvýšená produkce adrenalinu (dřeň nadledvin)
- Termoregulace

Zvýšení srdečního výdeje. Srdeční rezerva

– $CO = SV \times HR$

Sympatikus: (+) chronotropie, inotropie, dromotropie, batmotropie, lusitropie

– **Srdeční rezerva = maximální CO / klidový CO** (4 – 7)

– Koronární rezerva = maximální CF / klidový CF (~3.5)

– Chronotropní rezerva = maximální HR / klidová HR (3 – 5)

– Objemová rezerva = maximální SV / klidový SV (~1.5)

CO – srdeční výdej; CF – koronární průtok; HR – srdeční frekvence; SV – systolický objem

Změny arteriálního tlaku krvi

PARAMETR	V KLIDU	PŘI ZÁTĚŽI	NÁRŮST (x)
Srdeční výdej [l/min]	5 – 6	25 (35)	4 – 5 (7) <i>srdeční rezerva</i>
Srdeční frekvence [1/min]	(45) 60-90	190 – 200 (220) <i>závisí na věku</i>	3 – 5 <i>chronotropní rezerva</i>
Systolický objem [ml]	75	115	~1.5 <i>objemová rezerva</i>
Systolický TK [mmHg]	120	<i>statická práce</i> ↑ <i>dynamická práce</i> ↑↑	
Diastolický TK [mmHg]	70	<i>statická práce</i> ↑↑↑ <i>dynamická práce</i> – / ↓	
Střední arteriální tlak (MAP) [mmHg]	~90	<i>statická práce</i> ↑ <i>dynamická práce</i> – / ↑	
Perfuze kosterních svalů [mL/min/100g]	2 – 4	60 – 120 (180)	30 (10% CO _{max})

Reakce dýchacího systému na zátěž

- Dýchací centrum - \uparrow ventilace
 - chemoreceptory: \uparrow pCO₂ + \downarrow pH
 - proprioceptory v plicích
- Sympatický nervový systém (stres – anticipace)

Reakce dýchacího systému na zátěž

PARAMETR	V KLIDU	PŘI ZÁTĚŽI	NÁRŮST (x)
Ventilace [l/min]	6 – 12	90 – 120	15 – 20 <i>respirační rezerva</i>
Frekvence dýchání [1/min]	12 – 16	40 – 60	4 – 5
Dechový objem (V_T) [ml]	0.5 – 0.75	~2	3 – 4
Průtok plicnicí (perfuze plic) [ml/min]	5 – 6	25 – 35	4 – 6
Spotřeba O_2 (V_{O_2}) [ml/min]	250 – 300	~3000	10 – 12 (25)
Produkce CO_2 [ml/min]	~200	~8000	~40

Spotřeba kyslíku (\dot{V}_{O_2})

– Spiroergometrie

– Klidová \dot{V}_{O_2} : ~**3.6** mlO₂/(min.kg)

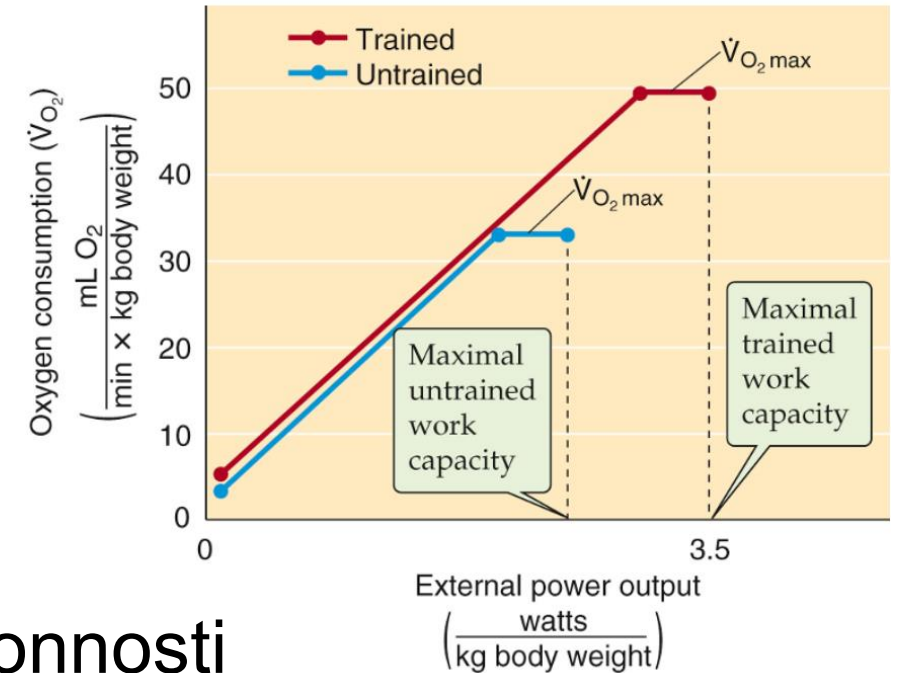
– $\dot{V}_{O_2 \max}$ – objektivní ukazatel aerobní výkonnosti

– netrénovaná osoba středního věku: **30 – 40** mlO₂/(min.kg)

– elitní vytrvalostní atlet: **80 – 90** mlO₂/(min.kg)

– pacient s těžkým srd. selháním /CHOPN : **10 – 20** mlO₂/(min.kg)

Adopted from:
<https://studentconsult.inkling.com/read/boron-medical-physiology-3e/chapter-60/figure-60-6>



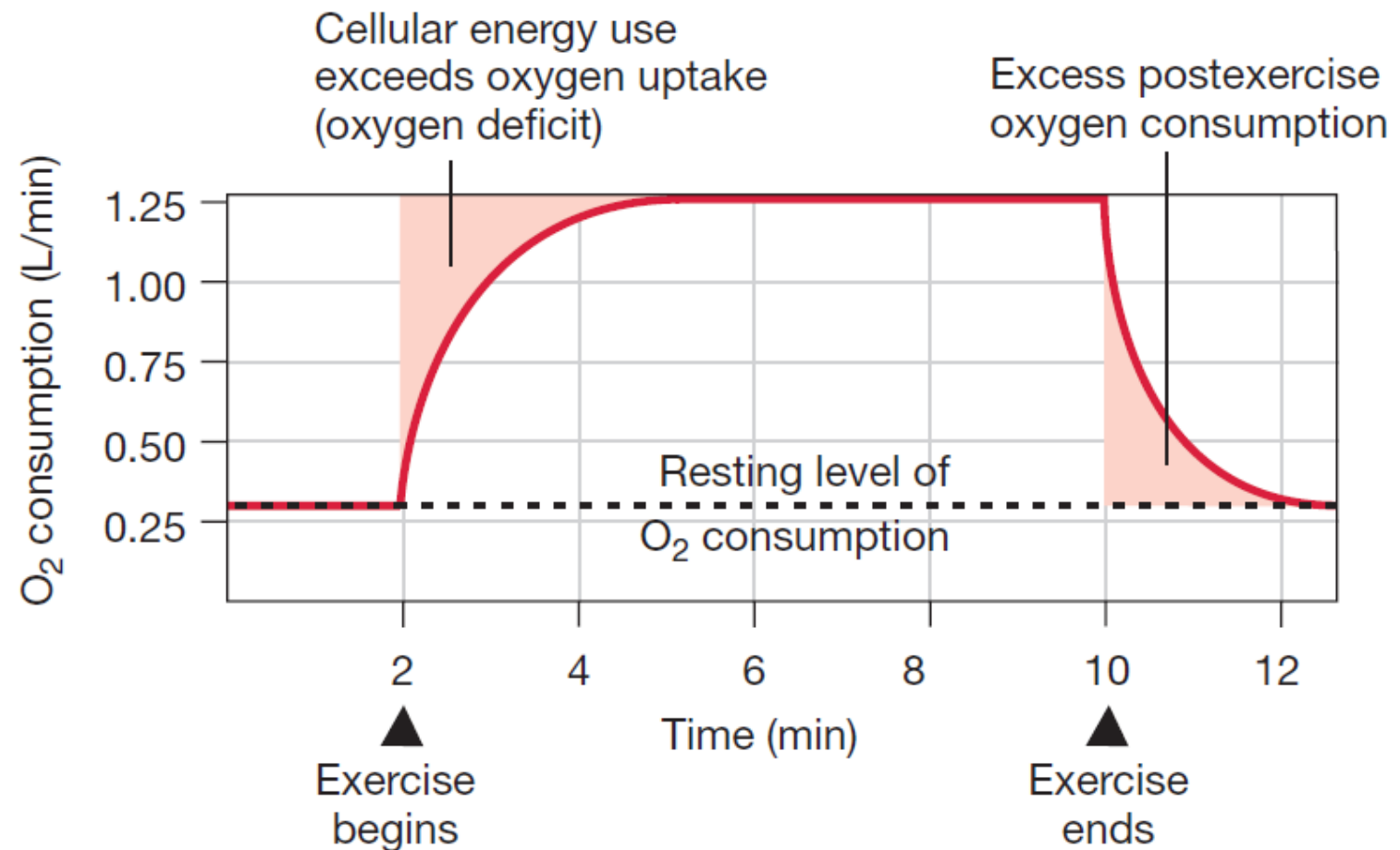
Determinanty $V_{O_2 \max}$

1. Příjem O_2 v plicích
 - ventilace plic, celková difuzní kapacita plic
2. Dodávka O_2 do svalů
 - průtok krve (tlakový gradient – srdeční výdej vs. odpor)
 - koncentrace hemoglobinu (kapacita krve pro O_2)
3. Extrakce O_2 z krve do svalů
 - pO_2 gradient: krev-mitochondrie

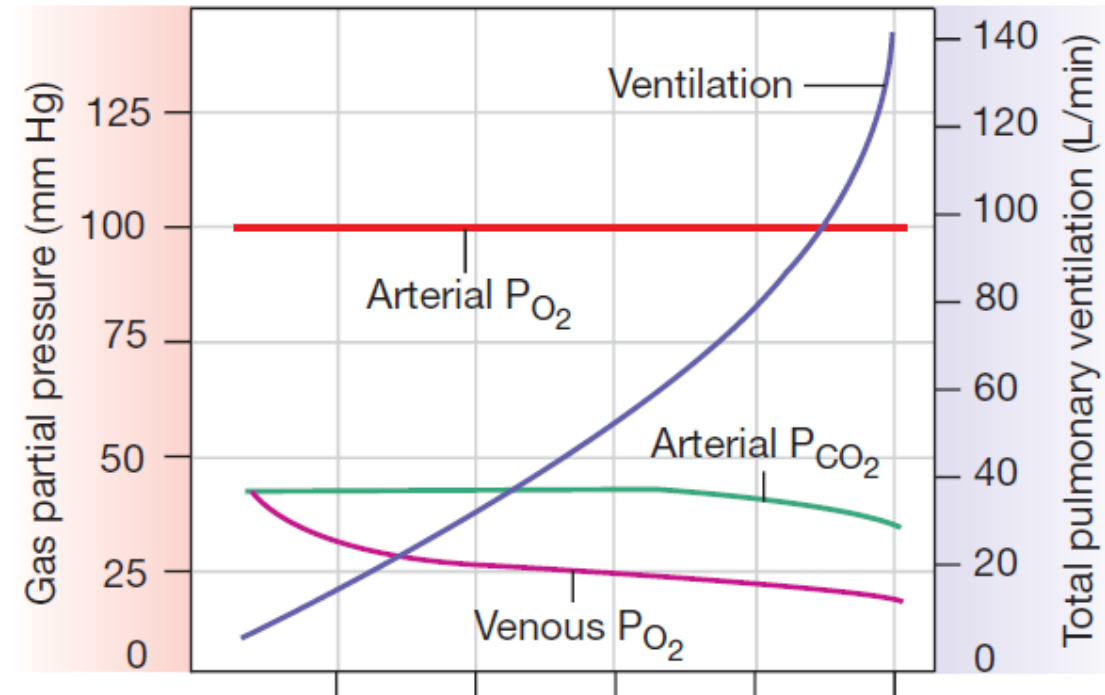
Spotřeba kyslíku během zátěže

Adopted from: D.U.Silverthorn:
Human Physiology (An Integrated
Approach)

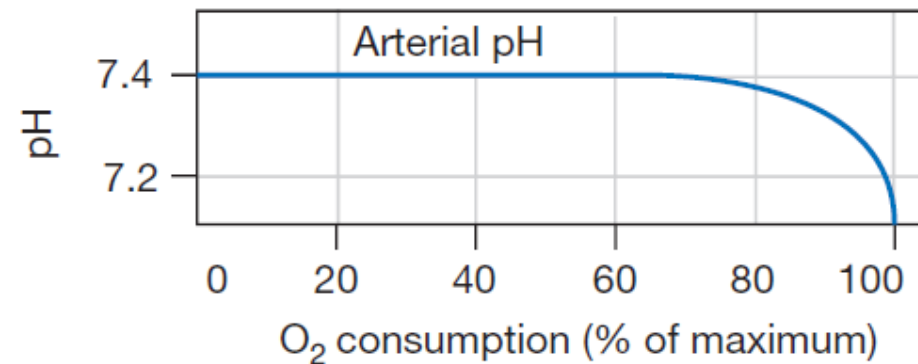
– Kyslíkový dluh



Krevní plyny (v závislosti na spotřebě O₂)

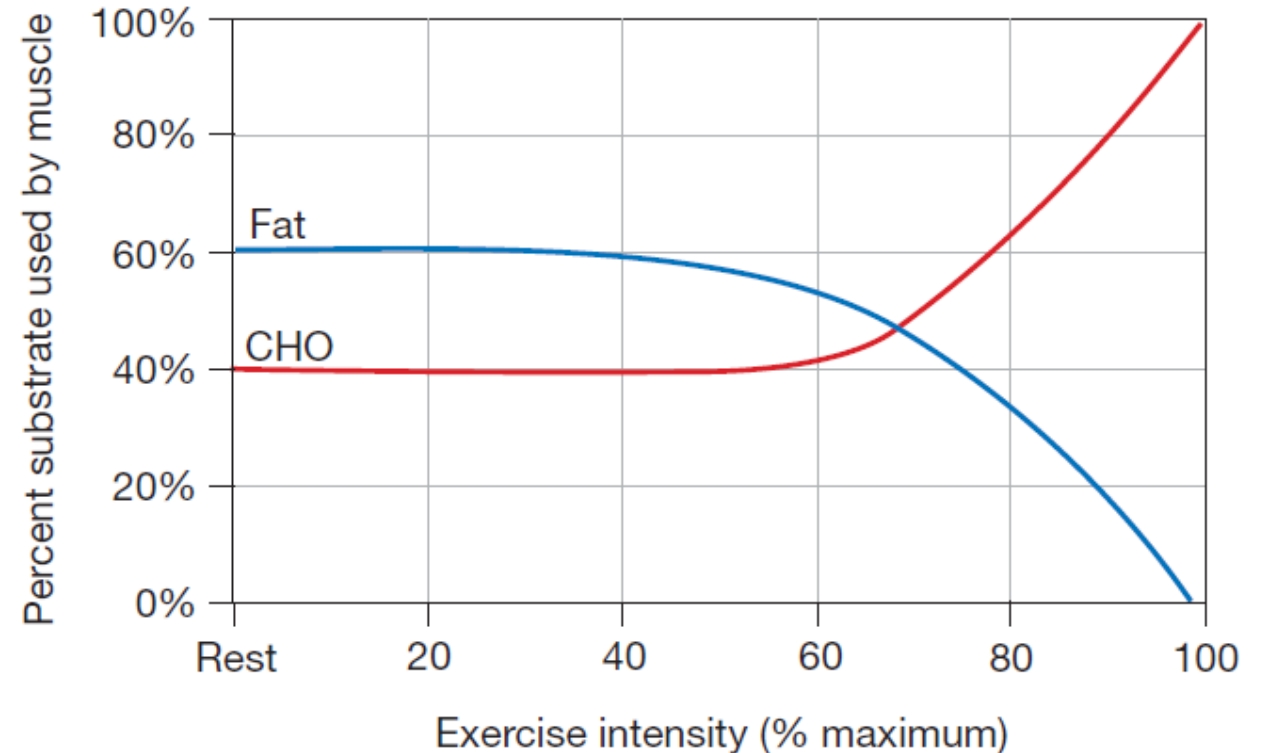


Adopted from: D.U.Silverthorn:
Human Physiology (An Integrated
Approach)



Substráty využívané kosterním svalem během zátěže

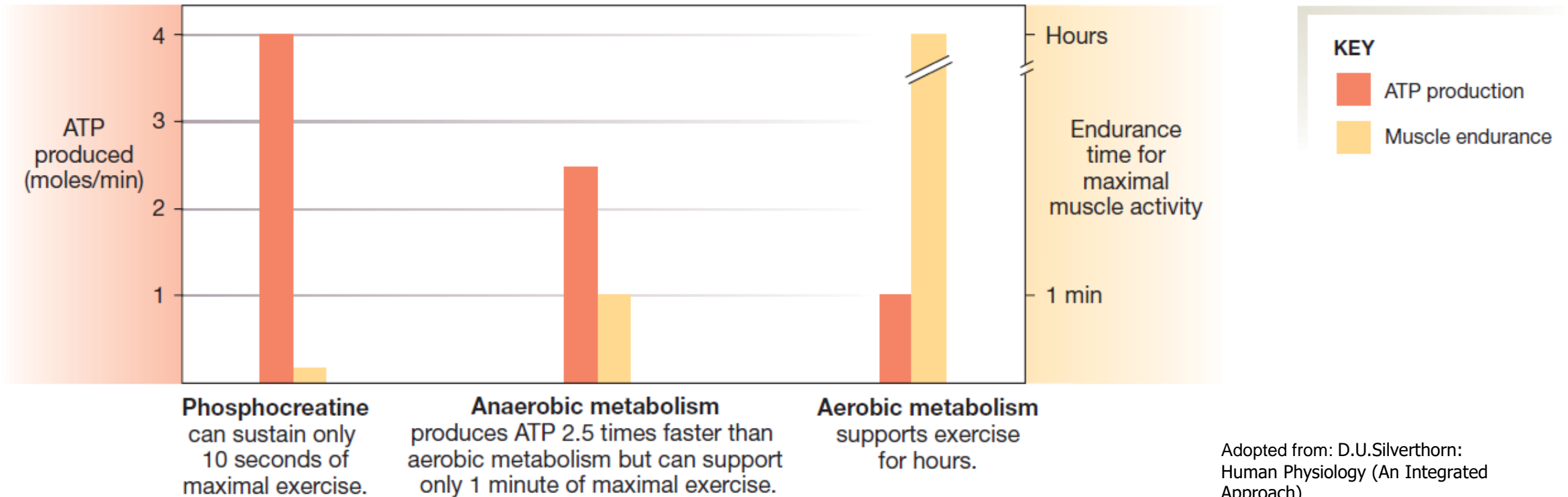
- Nízká intenzita: tuky (MK)
- Vysoká intenzita: glukóza



Data from G. A. Brooks and J. Mercier, *J App Physiol* 76: 2253–2261, 1994

Adopted from: D.U.Silverthorn:
Human Physiology (An Integrated
Approach)

Produkce ATP a svalová výdrž při aerobním a anaerobním metabolismu



Testování fyzické zdatnosti (kondice)

- (Spiro)ergometrie
- Standardizovaná zátěž
 - exaktně: W/kg
 - poměrově: MET – metabolický ekvivalent
 - poměr mezi aktuálním metabolickým obratem a metabolickým obratem v klidu v sedě
 - 1 MET = spotřeba 3,5 ml O₂/kg.min ≈ 4,31 kJ/kg.h
 - spánek ≈ 0,9 MET; pomalá chůze ≈ 3-4 MET; sprint, rychlý běh ≈ 16 MET
 - (+) jednoduchost; (-) nutno vyjadřovat individuálně!!!

Ukazatele zdatnosti (fitness)

- W_{170} [W/kg]
- $V_{O_2 \max}$ [ml O_2 / (min.kg)]
- Aerobní / anaerobní práh

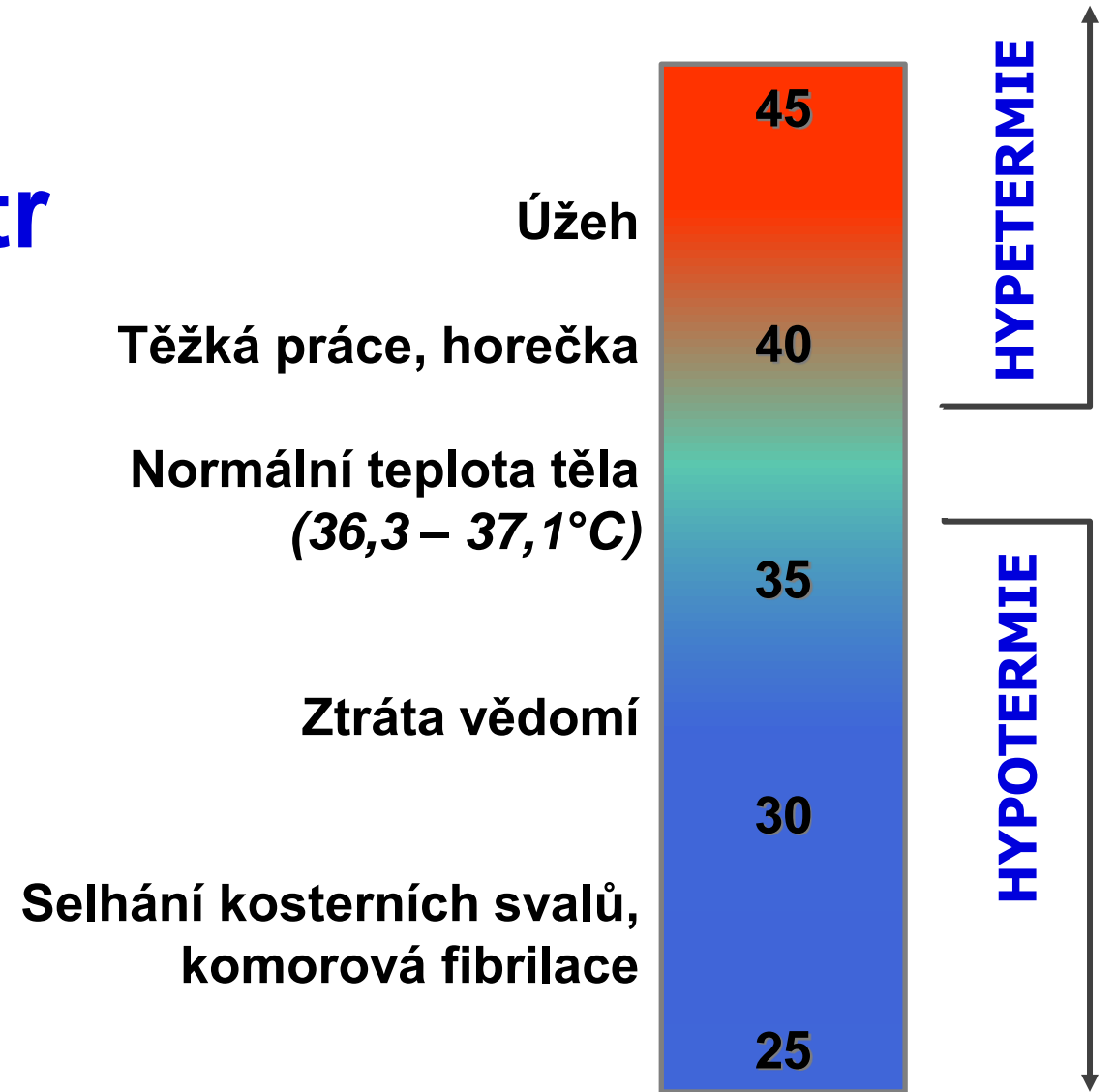
- Únava, selhání
- Tréning
- Adaptace

Termoregulace

Fyziologie II přednáška (ZLFY0422p)

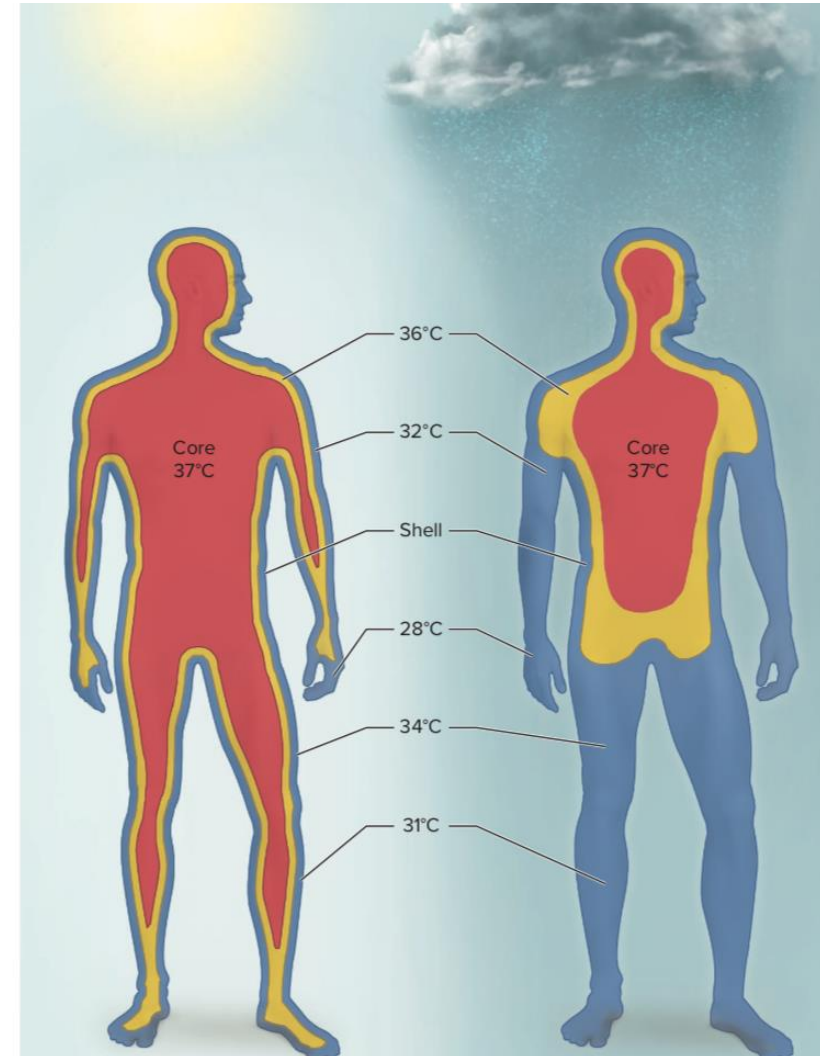
Tibor Stračina

Teplota – homeostatický parametr



Tělesné jádro vs. obal

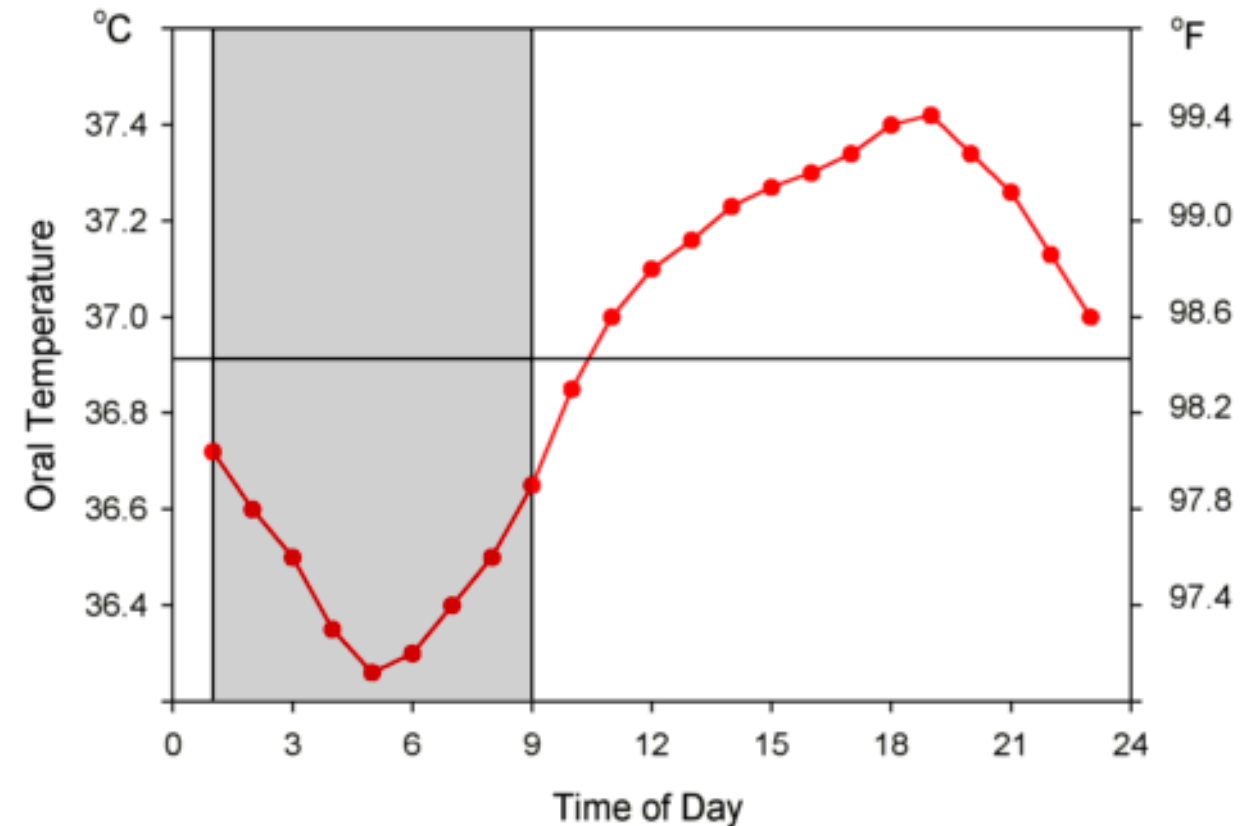
- homeotermní vs. poikilotermní
- Teplota tělesného jádra – udržována v (úzkém) rozmezí
- Kožní teplota (obal) – proměnlivá (teplota jádra, okolní prostředí)



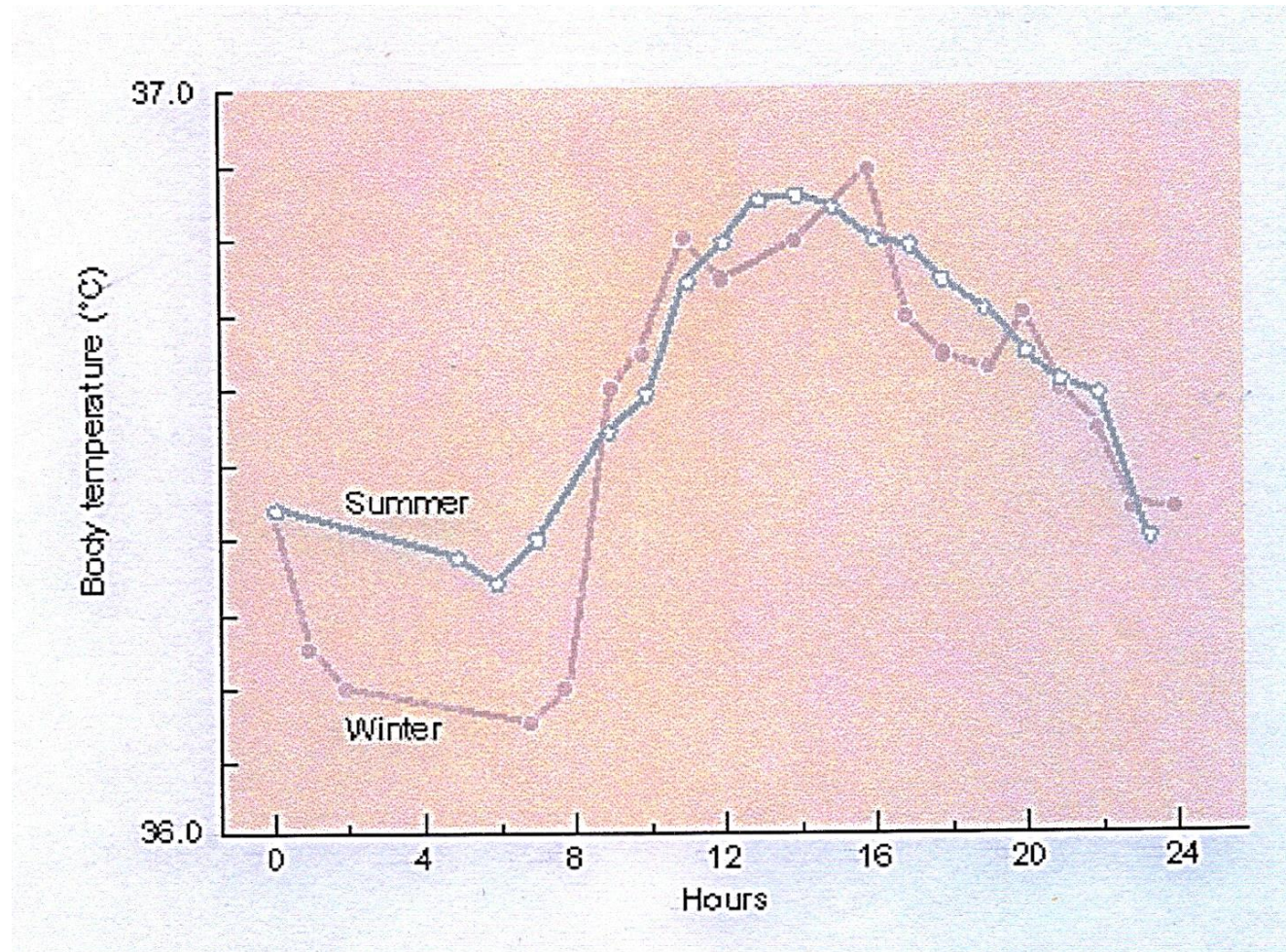
Adopted from: K.S. Saladin, *Anatomy & Physiology—The Unity of Form and Function*, 8th ed. (McGraw-Hill, 2018)

Variabilita teploty tělesného jádra

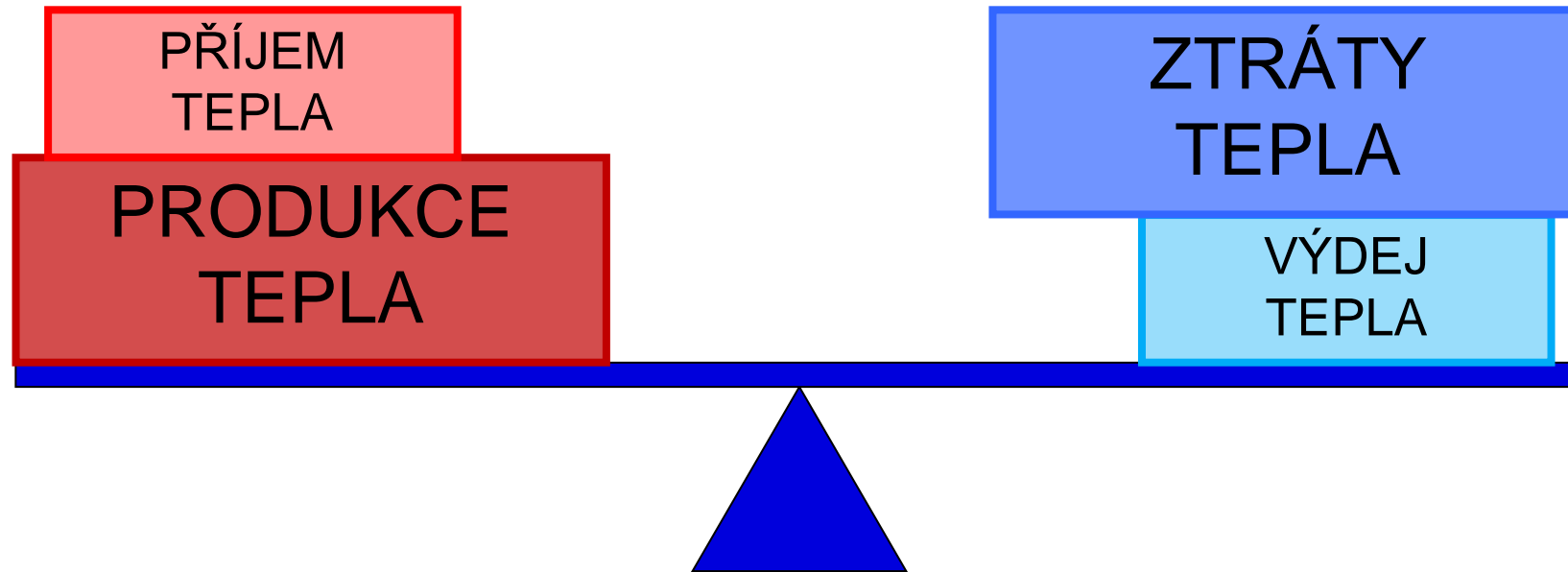
- Cirkadiální kolísání
- Cirkamensální rytmus (u žen od puberty do menopausy)
- Sezónní variabilita (cirkanuální rytmus)
- Stárnutí



Variabilita teploty tělesného jádra



Jemná rovnováha teploty jádra



Teplo vs. teplota

- **Teplo [J]** – (tepelná) energie přenášená mezi tělesy (odevzdávána nebo přijímána)
- **Teplota [K, °C, °F]** – míra obsahu tepelné energie; střední kinetická energie částic (molekul, iontů)

Přenos tepla uvnitř organismu

- primárně **KONVEKCE**
- médium = krev

- v menší míře **KONDUKCE**

Produkce tepla

- Metabolismu: metabolický obrat ~ produkce tepla
- Fyzická aktivita (svalová kontrakce) – klid vs. práce
- Postprandiální termogeneze (příjem potravy)
- Třesová termogeneze
- Netřesová termogeneze (hnědá tuková tkáň)

Příjem a ztráty tepla

- „pasivní“ procesy
- RADIACE
- KONVEKCE
- KONDUKCE
- Závisí na teplotním gradient povrch těla (kůže) – okolní prostředí

Výdej tepla (aktivní ztráty)

- EVAPORACE

- perspiratio sensibilis = produkce potu (1 l odpařeného potu = - 2 428 kJ)

- perspiratio insensibilis = difuze vody přes kůži a sliznice

- (RADIACE)

- (KONDUKCE)

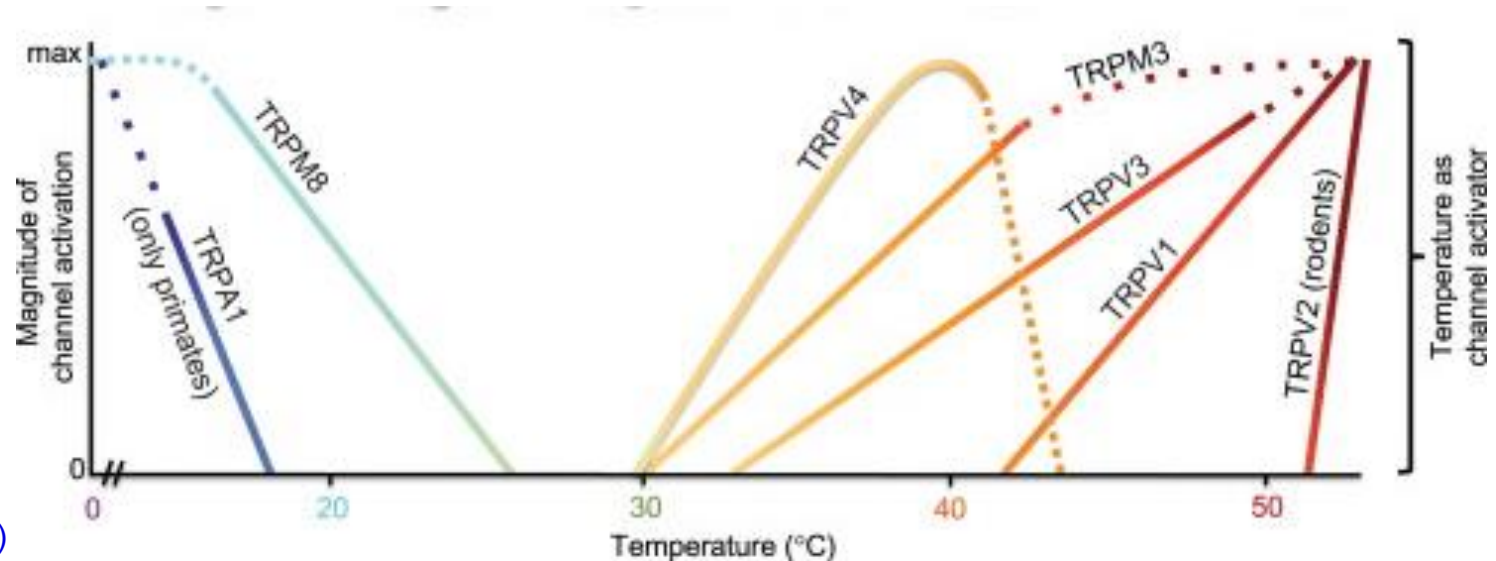
- (KONVEKCE)

Termoregulace

- Všechny procesy směřující k udržení teploty jádra v požadovaném rozmezí
- Termoregulační chování
- Sociální termoregulace

Aferentace

- Centrální termoreceptory – teplota mozku
- Teplotně citlivé neurony v předním hypotalamu (area preoptica)
- Periferní termoreceptory – kožní teplota
- TRP kanály



Termoregulační centrum

- Přední HYPOTALAMUS (area preoptica)
- Integrace aferentních informací
- Modifikace eferentních drah (vegetativní, somatické) – ovlivnění efektorů
- „set-point“ vs. prahová teplota pro efektorové systémy

Efektorové systémy termoregulace

- Chování
- Kožní cirkulace
- Potní žlázy
- Kosterní svaly (volné pohyby, třesová termogeneze)
- Horipilace (piloerekce)
- Hnědá tuková tkáň (netřesová termogeneze)

Chladem indukované mechanismy

- Strategie: snížit ztráty tepla
 - Chování: snížit tělesný povrch, tepleji se obléct
 - Vazokonstrikce v kůži. Horipilace
 - Inhibice pocení
- Strategie: zvýšit produkci tepla
 - Kosterní sval: častější volné pohyby (chování). Třes
 - Netřesová termogeneze (hnědá tuková tkáň, NA, β 3R, UCP1)
 - Hlad (zvýšení příjmu potravy)

Teplem indukované mechanismy

- Strategie: zvýšit ztráty/výdej tepla
 - Kožní vazodilatace
 - Zvýšené pocení (evaporace)
 - Zvýšená ventilace
- Strategie: snížit produkci tepla
 - Chování: Vyhledání stínu, lehké oblečení
 - Neaktivita, apatie
 - Ztráta chuti k jídlu (snížený apetit)

Adaptace

Fyziologie II přednáška (ZLFY0422p)

Tibor Stračina

Adaptace = přizpůsobení se

- Dlouhodobá strukturální a/nebo funkční přestavba
- Vede k poklesu energetických nároků na udržení homeostázy za změněných podmínek

- Funkční / Evoluční výhoda (geneticky fixované adaptace)

Spuštění adaptace

- Nadprahová změna vnějšího a/nebo vnitřního prostředí
- Působí dlouhodobě nebo opakovaně

Adaptace na fyzickou zátěž: Silové vs. vytrvalostní zatížení



Source: www.freepik.com - photo created by gpointstudio



Source: www.freepik.com - photo created by alexeyzhilkin

Adaptace na fyzickou zátěž

– Kosterní sval

- Hypertrofie, neovaskularizace

– Kardiovaskulární systém

- Adaptace srdce (koncentrická hypertrofie vs. atletické srdce)
- Zvýšení počtu erytrocytů resp. koncentrace hemoglobinu
- Adaptace regulací krevního tlaku a perfuze (kosterní sval, srdce, ledviny)

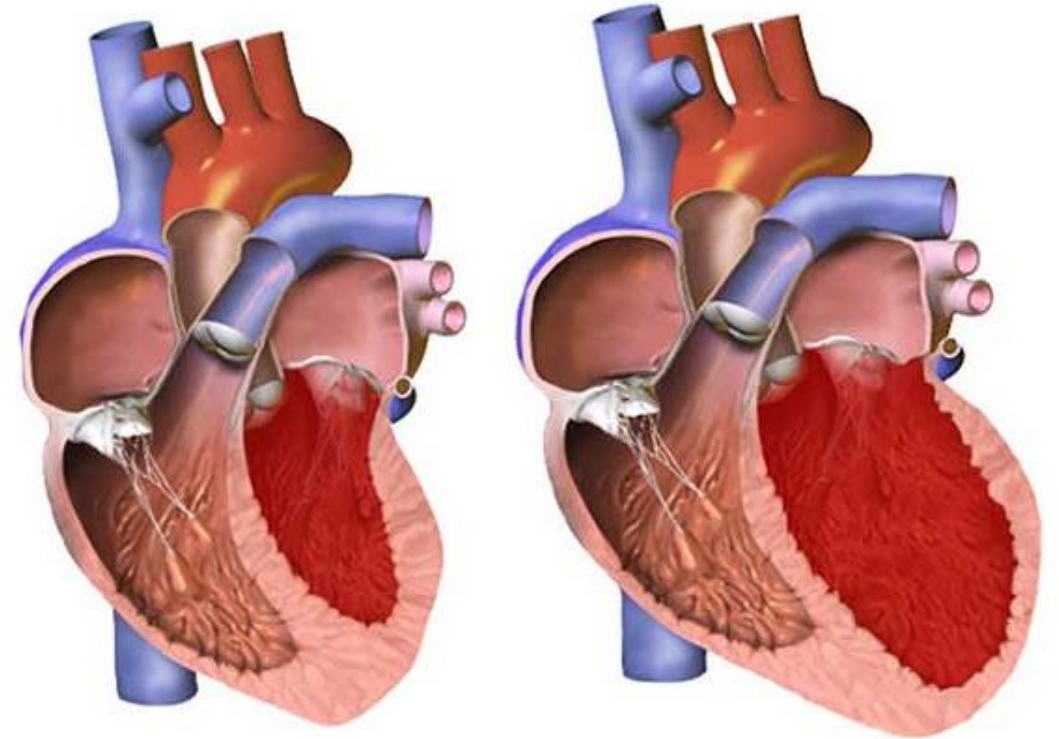
– Dýchací systém

- Rozvoj plic (pokud je možné i hrudního koše), zlepšení difuze plynů přes a-k membránu

– Metabolismus

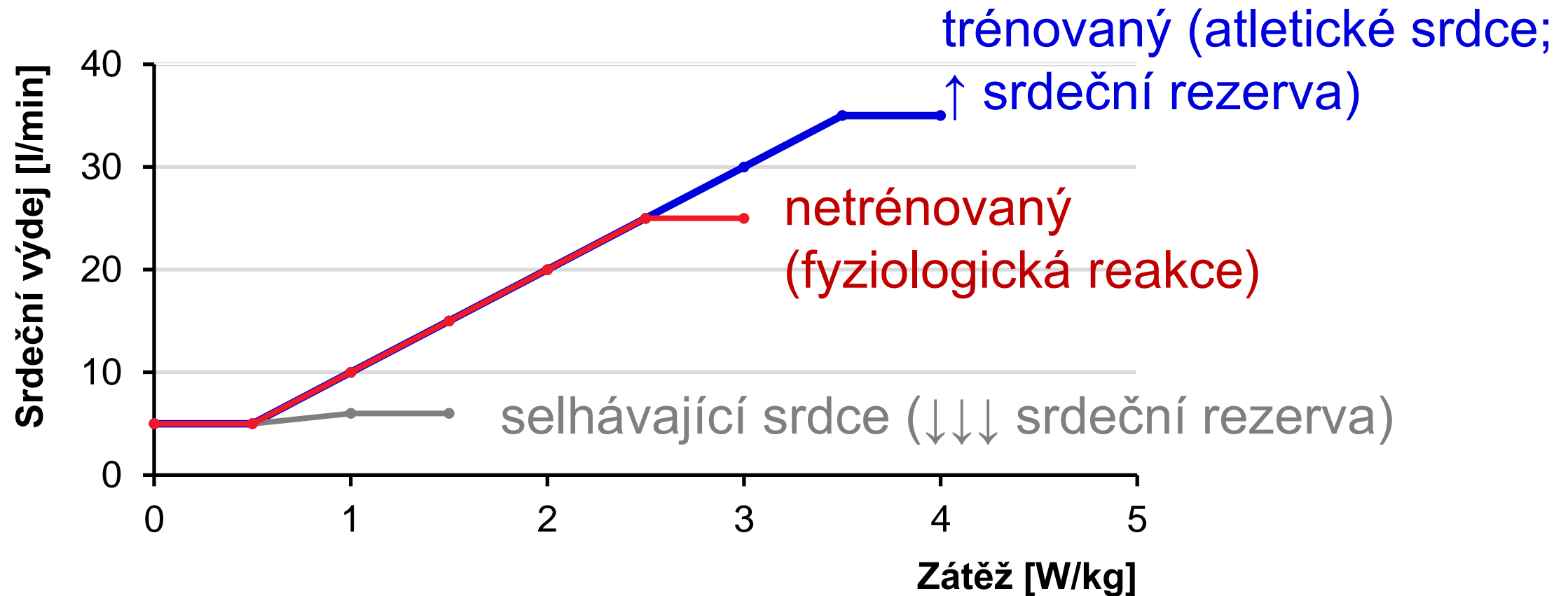
Atletické srdce

- Adaptace srdce na vytrvalostní zátěž
- \uparrow LVEDV - \uparrow SV - (baroreflex) \downarrow HR
- \sim CO
- \uparrow srdeční rezerva



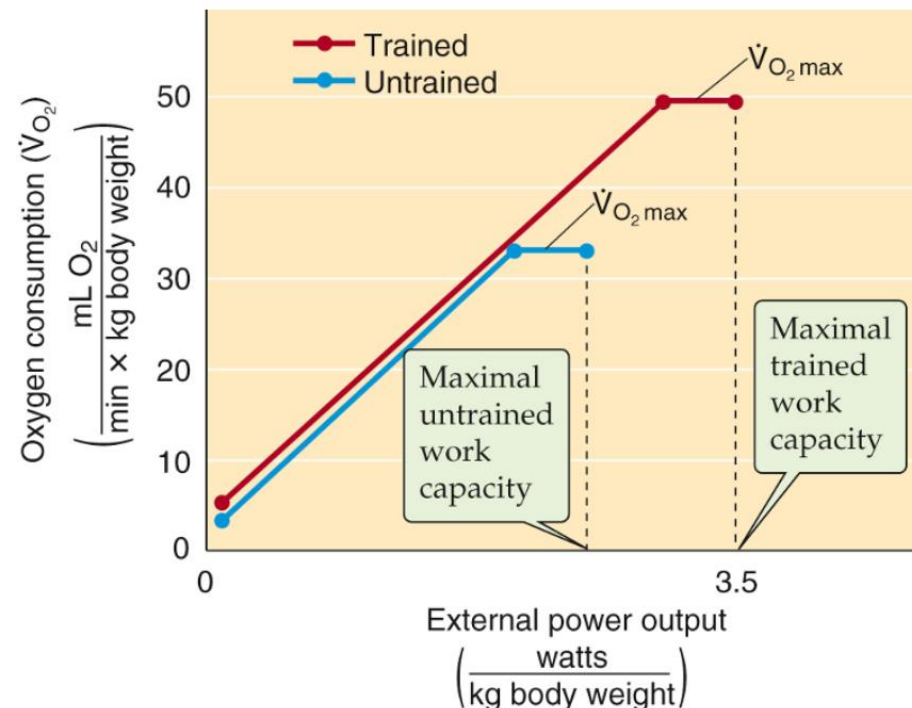
Source: <https://assets.beta.meta.org/discover/thematic-feed/83-athletic-heart-syndrome.jpg>

Srdeční rezerva u atletického srdce



Maximální spotřeba kyslíku ($\dot{V}_{O_2\max}$)

- netrénovaná osoba středního věku: **30 – 40** mlO₂/(min.kg)
- elitní vytrvalostní atlet: **80 – 90** mlO₂/(min.kg)
- pacient s těžkým srd. selháním /CHOPN : **10 – 20** mlO₂/(min.kg)



Determinanty $V_{O_2 \max}$

1. Příjem O_2 v plicích
 - ventilace plic, celková difuzní kapacita plic
2. Dodávka O_2 do svalů
 - průtok krve (tlakový gradient – srdeční výdej vs. odpor)
 - koncentrace hemoglobinu (kapacita krve pro O_2)
3. Extrakce O_2 z krve do svalů
 - pO_2 gradient: krev-mitochondrie

Adaptace na extrémní teploty



Source: www.freepik.com

Adaptace na chlad

- Strategie: snížení tepelných ztrát (+ zvýšení produkce tepla)
- Zvýšení chuti k jídlu (apetit)
- Nárůst podkožní tukové vrstvy
- Přestavění termoregulačního centra
 - Snížení teploty pro aktivaci třesové termogeneze

Adaptace na teplo

- Strategie: zvýšení tepelných ztrát + snížení produkce tepla
- Snížení chuti k jídlu (apetit)
- Adaptace pocení
 - Závislé na vlhkosti prostředí; snížení produkce potu, snížení koncentrace iontů
- Přestavění termoregulačního centra
 - Zvýšení teploty pro aktivaci pocení

Obsah prezentovaný během přednášky je autorským dílem vytvořeným zaměstnanci Masarykovy univerzity. Jakékoliv další šíření tohoto obsahu nebo jeho části bez svolení Masarykovy univerzity je v rozporu se zákonem.