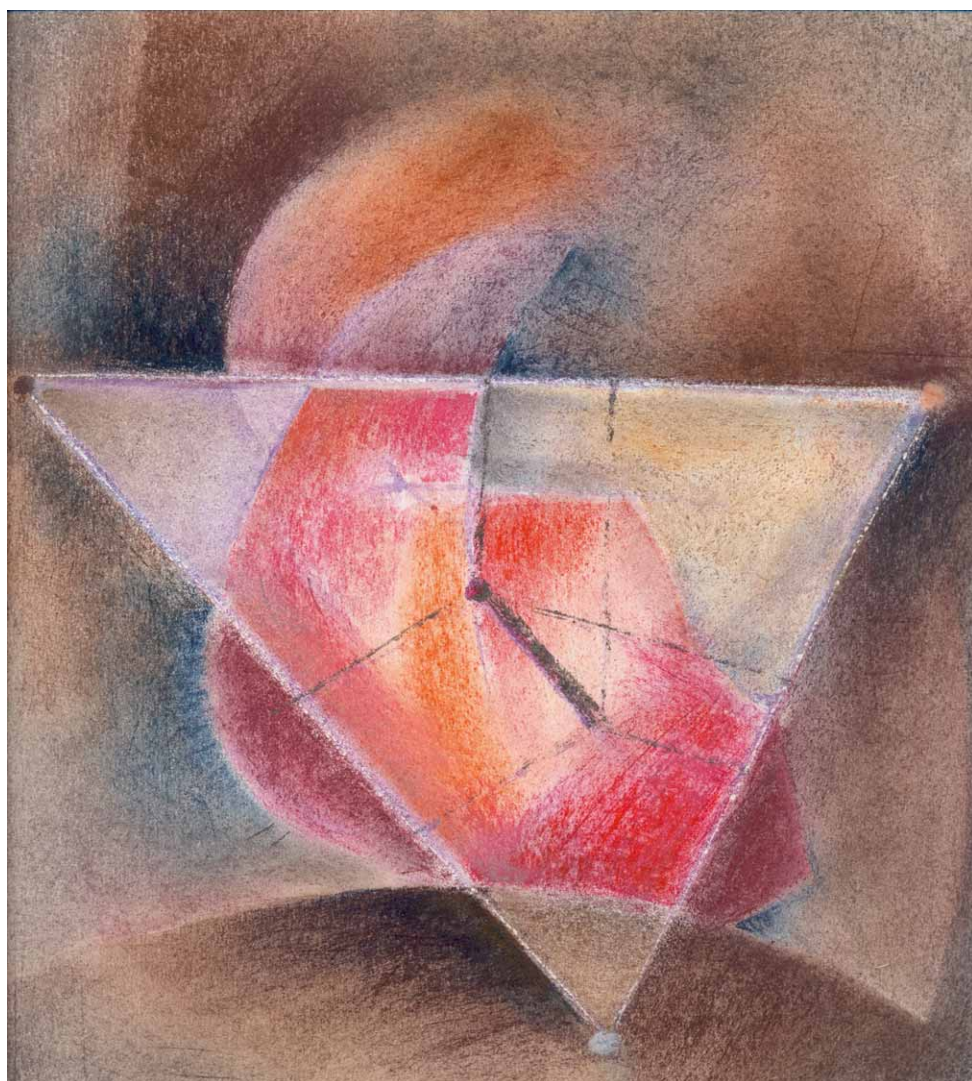


Petr Babula, Marie Nováková a kolektiv

---

# Vybrané kapitoly z fyziologie

---





Petr Babula, Marie Nováková a kolektiv

---

# Vybrané kapitoly z fyziologie

---

***Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy***

*Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude trestně stíháno.*

**Prof. PharmDr. Petr Babula, Ph.D., prof. MUDr. Marie Nováková, Ph.D.,  
a kolektiv**

## **VYBRANÉ KAPITOLY Z FYZIOLOGIE**

**Hlavní autoři a editoři:**

Prof. PharmDr. Petr Babula, Ph.D., Fyziologický ústav Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně

Prof. MUDr. Marie Nováková, Ph.D., Fyziologický ústav Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně

**Autoři:**

Doc. MUDr. Markéta Bébarová, Ph.D., Fyziologický ústav Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně

† Prof. MUDr. Pavel Bravený, CSc., Fyziologický ústav Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně

Ksenia Budinskaya, Ph.D., Fyziologický ústav Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně  
MUDr. Zuzana Nováková, Ph.D., Fyziologický ústav Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně

Doc. MUDr. Milena Šimurdová, CSc., Fyziologický ústav Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně

**Recenzenti:** prof. MUDr. Bohuslav Ošťádal, DrSc.; prof. MUDr. Anna Vašků, CSc.

Vydání odborné knihy schválila Vědecká redakce nakladatelství Grada Publishing, a.s.

© Grada Publishing, a.s., 2022

Cover Design © Grada Publishing, a.s., 2022

Ilustrace na obálce (Einthovenův trojúhelník) prof. MUDr. Pavel Bravený, CSc.

Obrázky 3.1, 3.3 a 3.4 nakreslil Mgr. Jan Kacvinský, obrázky 3.5 a 3.6 nakreslila Jana Nejtková.

Obrázek 6.1 pochází z fotobanky Depositphotos.com. Ostatní obrázky dodali autoři nebo je podle podkladů od autorů upravil a překreslil Jan Šístek.

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

jako svou 8475. publikaci

Odpovědná redaktorka Mgr. Viola Těšínská

Sazba a zlom Jan Šístek

Počet stran 168

1. vydání, Praha 2022

Vytiskla tiskárna TNM PRINT s.r.o., Nové Město

*Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků, což není zvláštním způsobem vyznačeno.*

*Postupy a příklady v této knize, rovněž tak informace o lécích, jejich formách, dávkování a aplikaci jsou sestaveny s nejlepším vědomím autorů. Z jejich praktického uplatnění však pro autory ani pro nakladatelství nevyplývají žádné právní důsledky.*

ISBN 978-80-271-4836-3 (ePub)

ISBN 978-80-271-4835-6 (pdf)

ISBN 978-80-271-2010-9 (print)

# Obsah

Seznam zkratek použitých v knize .....	7
Předmluva .....	10
Pár slov úvodem .....	11
<b>Kapitola 1: REGULACE A ADAPTACE .....</b>	<b>15</b>
A říká jedna buňka druhé... ..	16
Proč o tom vlastně mluvit? .....	16
Systémové regulace .....	19
Integrace regulačních systémů na systémové úrovni .....	23
Lokální regulace .....	25
Autoregulace síly stahu srdečního svalu .....	26
Vápník a čas: spojenci, či konkurenti? .....	29
Nic není tak jednoduché... hormon putuje a hledá svůj cíl .....	31
Negativní vs. pozitivní zpětná vazba – konkurenti, či spolupracovníci? ...	32
Kdy, kde a proč regulujeme – nebo nejen to? .....	35
Co říci závěrem? .....	36
<b>Kapitola 2: KRITICKÉ VÝVOJOVÉ PERIODY: OD NAROZENÍ KE STÁŘÍ ..</b>	<b>39</b>
Historické okénko ... ..	40
A zrodil se člověk... ..	41
A člověk dospívá... ..	43
Dvě strany jedné mince aneb co máme společné a co jiné... ..	43
Puberta: muži vs. ženy? .....	47
Vše jednou končí... ..	50
Kolik času ještě zbývá? .....	54
Co říci závěrem? .....	58
<b>Kapitola 3: KRITICKÉ VÝVOJOVÉ PERIODY: PRVNÍCH 28 DNÍ ŽIVOTA ...</b>	<b>61</b>
Změny v nejdůležitějších orgánech a fyziologické zvláštnosti .....	62
Dýchací systém .....	66
Mechanika prvních dechů .....	67
„Hypoxie <i>in utero</i> “ versus „oxidační stres“ po narození .....	69
Úloha hemoglobinu .....	69
Kardiovaskulární systém .....	70
Trávicí systém .....	71
Ledviny .....	72
Imunitní systém .....	72
Termoregulace .....	73
Kůže .....	74
Hmotnost .....	74
Centrální nervový systém .....	75
APGAR skóre .....	76
Závěrem .....	77
<b>Kapitola 4: ÚLOHA VÁPNIKU V ORGANISMU .....</b>	<b>81</b>
Vápník a jeho význam v biologii .....	82
Vápník a jeho kompartmentalizace v lidském těle .....	83

Příjem vápníku .....	85
Extracelulární vápník .....	88
Vápník a kost .....	90
Remodelace kostní tkáň .....	92
Kalcemie a její regulace .....	94
Intracelulární vápník .....	97
Intracelulární vápník a mitochondrie .....	103
A co vápník a jádro? Nezapomněli jsme na ně? .....	107
Co říci závěrem? .....	108
<b>Kapitola 5: MEMBRÁNOVÉ TRANSPORTNÍ SYSTÉMY – STRUKTURÁLNÍ KOMPONENTY BUNĚČNÝCH MEMBRÁN S VÝZNAMNÝM DOPADEM NA FUNKCI BUNĚK .....</b>	<b>111</b>
Membránové iontové přenašeče: aktivním transportem iontů k udržování elektrochemických gradientů .....	112
Iontové kanály: pasivní cesty přenosu iontů vedoucí k elektrické aktivitě buněk .....	114
Struktura a základní funkční charakteristiky iontových kanálů .....	114
Jak lze iontové proudy měřit? .....	122
Kde se iontové kanály nacházejí a proč .....	125
Jedinečnost a souhra iontových kanálů v průběhu akčního napětí srdečních buněk .....	130
Závěrem – stručné shrnutí kapitoly .....	137
<b>Kapitola 6: FYZIOLOGIE KŮŽE .....</b>	<b>141</b>
pH kůže .....	142
Mikrobiom .....	143
Mechanická ochrana .....	145
Stratum corneum: hydratační a bariérová funkce .....	146
Zachování integrity pokožky a její hydratace .....	146
Úloha korneocytů a přírodního hydratačního faktoru .....	146
Úloha jiných přírodních hygroskopických látek .....	147
Úloha lipidů ve stratum corneum .....	147
Profil koncentrace vody v pokožce .....	148
Vliv vnější vlhkosti na bariérovou funkci .....	148
Kožní hydratace a pH .....	148
Imunitní bariéra .....	148
A jak to celé funguje dohromady? .....	149
Kůže a termoregulace .....	149
Adaptace na teplo .....	150
Adaptace na chlad .....	151
Fotoprotektivní funkce .....	151
Melatonin .....	153
Pár slov na závěr .....	153
<b>Rejstřík .....</b>	<b>157</b>
<b>Souhrn .....</b>	<b>165</b>
<b>Summary .....</b>	<b>167</b>

## Seznam zkratk použitých v knize

ACTH	adrenokortikotropní hormon
ADH	antidiuretický hormon
ADP	adenozindifosfát
Ach	acetylcholin
AMH	antimülleriánský hormon
AMP	adenozinmonofosfát
ANT	adeninnukleotidtranslokáza
ATP	adenozintrifosfát
AV	atrioventrikulární
BMP	kostní morfogenní protein (bone morphogenetic protein)
BPG	bisfosfoglycerát
cADPR	cyklická adenozindifosfátribóza
CAMK	kalmodulin-dependentní kináza
cAMP	cyklický adenozinmonofosfát
CaSR	receptor pro vápenaté ionty (calcium-sensing receptor)
CD	cluster of differentiation
Cer	ceramid
cGMP	cyklický guanozinmonofosfát
CNG	vrátkovaný cyklickým nukleotidem (cyclic nucleotide-gated)
CNS	centrální nervový systém
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
CREB	cAMP response element-binding protein
CRH	kortikoliberin, hormon uvolňující kortikotropin (corticotropin-releasing hormone)
DA	Botallova dučej (ductus arteriosus Botalli)
DAG	diacylglycerol
DHEA	dehydroepiandrosteron
DHPR	dihydropyridinový receptor
DNA	deoxyribonukleová kyselina
DV	ductus venosus
ECF	extracelulární tekutina (extracellular fluid)
EGF	epidermální růstový faktor (epidermal growth factor)
ELDIF	epidermální faktor diferenciacie lymfocytů
ER	endoplazmatické retikulum
ERF	efektivní refrakterní fáze
FGF	fibroblastový růstový faktor (fibroblast growth factor)
FO	foramen ovale
FSH	folikulostimulační hormon
GABA	kyselina gama-aminomáselná
GIT	gastrointestinální trakt
GnRH	gonadotropin (gonadotrophin-releasing hormone)
GSH	glutathion
GSSG	glutathiondisulfid

Hb	hemoglobin
HbA	hemoglobin dospělých
HbF	fetální hemoglobin
hCG	lidský choriový gonadotropin
hCS	lidský choriový somatomotropin
HIF	faktor indukovaný hypoxií
HLA	lidský leukocytární antigen (human leucocyte antigen)
H <sub>2</sub> S	sulfan (sirovodík)
I <sub>A</sub>	přechodný K <sup>+</sup> proud
I <sub>Ca-L</sub>	L-tyt (long-lasting) Ca <sup>2+</sup> proudu
I <sub>Ca-T</sub>	T-tyt (transient) Ca <sup>2+</sup> proudu
I <sub>f</sub>	nespecifický proud směřující do buňky, aktivovaný hyperpolarizací
I <sub>K1</sub>	K <sup>+</sup> proud pozadí
I <sub>K,Ach</sub>	K <sup>+</sup> proud citlivý vůči acetylcholinu
I <sub>K,ATP</sub>	K <sup>+</sup> proud citlivý vůči adenosin trifosfátu
I <sub>Kr</sub>	rychlá (rapid) složka opožděného K <sup>+</sup> proudu
I <sub>Ks</sub>	pomalá (slow) složka opožděného K <sup>+</sup> proudu
I <sub>Kur</sub>	velmi rychle se aktivující opožděný K <sup>+</sup> proud
I <sub>Na</sub>	Na <sup>+</sup> proud
I <sub>NaCa</sub>	proud doprovázející aktivitu Na <sup>+</sup> /Ca <sup>2+</sup> výměníku
I <sub>to</sub>	přechodný K <sup>+</sup> proud z buňky (transient outward)
ICF	intracelulární tekutina
IFN	interferon
Ig	imunoglobulin
IGF	inzulinu podobný růstový faktor (insulin-like growth factor)
IL	interleukin
IP <sub>3</sub>	inozitol trifosfát
IP <sub>3</sub> R	inozitol trifosfátový receptor
KH	kyselina hyaluronová
LH	luteinizační hormon
MAPK	mitogenem aktivovaná proteinkináza
M-CSF	makrofág faktoru stimulujícího kolonie
MCU	mitochondriální Ca <sup>2+</sup> uniporter
MDN	maximální diastolické napětí
MHC	hlavní histokompatibilní komplex
miRNA	mikroRNA (malá nekódující RNA)
MITF	transkripční faktor spojený s mikrooftalmií (microphthalmia-associated transcription factor)
mNCX	mitochondriální Na <sup>+</sup> /Ca <sup>2+</sup> výměník
mPTP	mitochondriální pór přechodné propustnosti
mRNA	mediátorová (informační) RNA
mRyR	mitochondriální ryanodinový receptor
MSH	hormon stimulující melanocyty
NAADP	adenindinukleotidfosfát kyseliny nikotinové
NAD	nikotinamidadenindinukleotid
NADPH	nikotinamidadenindinukleotidfosfát
NFAT	nukleární faktor aktivující buňky T



NMDA	N-metyl-D-aspartát
NMF	přírodní hydratační faktor (nature moisture factor)
NO	oxid dusnatý
OPG	osteoprotegerin
pCO <sub>2</sub>	parciální tlak oxidu uhličitého
PCOS	syndrom polycystických ovarii
PGE <sub>2</sub>	prostaglandin E <sub>2</sub>
PI <sub>3</sub> K	fosfatidylinozitol-3-kináza
PLC	fosfolipáza C
PMCA	plazmatická Ca <sup>2+</sup> -ATPáza
PNS	periferní nervový systém
pO <sub>2</sub>	parciální tlak kyslíku
POMC	proopiomelanokortin
PTH	parathormon
PTHrP	parathormonu podobný peptid
RANK	receptorový aktivátor nukleárního faktoru kapa-B (NF-κB)
RANKL	ligand receptorového aktivátoru nukleárního faktoru kapa-B
RDS	syndrom respirační tísně (respiratory distress syndrome)
RCH	dýchací řetězec
RNA	ribonukleová kyselina
RNS	reaktivní/volné dusíkaté radikály (reactive nitric species)
ROC	receptorem řízené vápníkové kanály
ROS	reaktivní/volné kyslíkové radikály (reactive oxygen species)
RyR	ryanodinový receptor
SA	sinoatriální
SALT	lymfoidní tkáň asociovaná s kůží (skin associated lymphoid tissue)
SC	stratum corneum
SERCA	Ca <sup>2+</sup> -ATPáza endo-/sarkoplazmatického retikula
SG	stratum granulosum
SOC	zásobami řízené vápníkové kanály
S <sub>1</sub> P	s핑ozin-1-fosfát
SR	sarkoplazmatické retikulum
T <sub>reg</sub>	pomocný regulační lymfocyt T
Tc	cytotoxický lymfocyt T
TEWL	transepidermální ztráta vody
TGF-β	transformující růstový faktor (transforming growth factor) beta
Th	pomocný (helper) lymfocyt T
TNF	tumor nekrotizující faktor (tumour necrosis factor)
TRP	přechodný receptorový potenciál (transient receptor potential)
TSPO	translokátorový protein
UV	ultrafialový
VDAC	aniontový kanál závislý na napětí
VDR	receptor vitamínu D
VOC	napětím řízené vápníkové kanály

## Předmluva

Každý učitel časem zjistí, že v jeho oboru existují témata, která se studentům hůře učí (nebo možná obtížněji chápou). Veden zdravou sebekritikou začne přemýšlet, zda je to jeho chyba, zda to není způsobeno tím, že dané téma neumí dobře vysvětlit, nedokáže studenty zaujmout nebo není schopen zvolit vhodnou formu komunikace. Občas takové úvahy vyústí v pokus sepsat vlastní text, který by při studiu těchto témat pomohl. Také naše pohnutky k vytvoření souboru úvah na vybraná témata z lékařské fyziologie vycházely z požadavků studentů na straně jedné a z našeho pocitu, že při zkoušení narážíme u určitých témat na stále stejné problémy, na straně druhé. Nejde ani tak o neschopnost studentů naučit se detaily nebo naproti tomu i složité koncepty, spíše jde o nedostatek nadhledu a schopnosti hledat ve spleti informací sjednocující prvky, klíčové struktury a funkce a vzájemné vztahy.

Tato kniha je souborem textů, které sepsali učitelé Fyziologického ústavu Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně. Jednotlivé kapitoly se zabývají tématy, která jsou dle našeho názoru trochu opomíjena či nedostatečně zdůrazňována v klasických učebních textech. Snažíme se na tato témata dívat jiným způsobem, z jiného úhlu pohledu. Původním záměrem bylo ponouknout čtenáře k přemýšlení v širších souvislostech, některé texty ovšem nakonec vyznívají přece jen spíše „klasicky“ edukativně. Jednotlivé kapitoly tak odrážejí různorodost přístupů k výuce i k vytváření výukových pomůcek, která vždy charakterizuje vysokoškolské tvořivé prostředí.

Určitým sjednocujícím činitelem tohoto souboru textů měl být prof. MUDr. Pavel Bravený, CSc., dlouholetý vynikající fyziolog a skvělý učitel, jehož profesní kariéra byla s Fyziologickým ústavem LF MU spojena po více než půl století. Ti, kdo ho znali a měli možnost s ním pracovat, oceňovali jeho úžasnou schopnost postihnout v daném tématu to klíčové a vyjádřit to jak slovně, tak případně i grafickou či jinou názornou formou. Pan profesor nás bohužel opustil ve fázi diskuzí o této knížce, v době, kdy se jednotlivé texty této knihy teprve začínaly rodit. Ještě stihl sepsat krátký úvod, v kterém shrnul výsledky našich rozhovorů o tom, jak by tato knížka měla vypadat a k čemu by měla sloužit. Staršími texty a diskuzemi přispěl především k prvním dvěma kapitolám této knihy.

Nezbývá nám než doufat, že – jak bylo naším hlavním úmyslem – čtenáře tyto texty přimějí k zamyšlení nad smyslem popisovaných dějů a vzbudí jejich zvědavost do té míry, že si aktivně některé části fyziologie prostudují detailněji v klasických učebnicích, kterých je na trhu dostatek.

Za kolektiv autorů Marie Nováková a Petr Babula

## Pár slov úvodem

Když dychtivý student poprvé otevře učebnici fyziologie, je nejspíš ohromen rozsahem předkládaných vědomostí a představou, že by se to všechno měl naučit. Nejspíš se nenaučí. V záplavě údajů a dat je hlavní a podstatné porozumět principům, smyslu a významu fyziologie, oboru pro medicínu klíčového. Budoucí lékař s ním bude ve styku po celý život.

Lékařská fyziologie ve svém vývoji vycházela z anatomie, jíž dala nový rozměr: tvaru přidala funkce, tedy děj, pohyb, zkrátka život. Rozdíl mezi anatomii a fyziologií vypadá jako rozdíl mezi dokonalou sbírkou hudebních nástrojů a koncertem vyspělého orchestru.

Od počátku se fyziologie představovala jako obor experimentální, exaktní, opřený o fakta. Těžila z (bio)fyziiky, (bio)chemie, ze spřízněné biologie a v poslední době nadšeně srůstá i s genetikou. Fyziologie má normativní charakter. To znamená, že lékař vždy hodnotí funkční poruchu jako odchylku od zdraví, tedy od normy, kterou musí nejdřív poznat právě studiem fyziologie (stejně jako studiem anatomie).

Od „úsvitu“ fyziologie jsou jejím objektem funkce a poruchy různých orgánů; medicína se pak jimi začala jednotlivě zabývat. Časem se ukázalo, že každý orgán je složen z celé řady různých tkání s různou funkcí a tkáně jsou zase tvořeny velkým počtem buněk. Moderní ultramikroskopy dokázaly, že každá buňka je malý živý svět molekul. Fyziologie postupně objasňovala nejen funkce orgánů, nýbrž také jednotlivých tkání, buněk a jejich organel.

Naproti analytickému postupu poznání od jednotlivých orgánů k buňkám se musel nezbytně objevit i postup syntetický. Vychází z poznatku, že jednotlivé orgány a jejich komponenty nejsou sobecké, ale spolupracují, podporují se a pomáhají si. Vytvářejí se tak funkční systémy, jako například kardiovaskulární (k němuž patří i plíce), gastrointestinální, urogenitální, endokrinní, motorický, systém tělesných tekutin atd. a nade všemi nekomplikovanější a nejdokonalejší systém nervový. A vždy ty systémy pracují pospolu a řízené (jako zmíněný orchestr), tvoříce organismus. Je to jeden ze zázraků přírody.

Bezprostřední podmínkou pro životní děje je nejen přiměřená dodávka energie, ale též trvalý objem a složení tělesných tekutin, obsah kyslíku v krvi a tělesná teplota. Stabilita těchto veličin – homeostáza – se udržuje celkem snadno v klidu, když se nic neděje. Ovšem každý tvor se kromě doby hlubokého spánku a odpočinku pohybuje, shání potravu, prchá před nepřítelem, bojuje a zuří (dnešní člověk ještě k tomu těžce pracuje a pěstuje nejrůznější sporty). Tehdy nároky na udržení životních podmínek mnohonásobně vzrostou. Musí to řešit celý roj regulačních mechanismů. K těm základním, automatickým regulacím buněčným, které udržují homeostázu v první linii, přibudou regulace mnohem náročnější, sofistikovanější – nervové a humorální (endokrinní). Až zvýšené nároky organismu pominou, regulační systémy se podle potřeby jednotlivých komponent postupně navracejí do klidového stavu. Takové řídicí systémy nejsou specifické jen pro tělesnou námahu a stres. Například potřebu probudit náročnou regulaci funkcí způsobí také vychýlení zaživačního traktu hladem nebo (častěji) přejedením. Je zřejmé, že fyziologické regulace a autoregulace mají při vší mnohotvárnosti společný cíl či smysl: vyhovět při zátěži nárokům organismu

jako celku ve všech složkách, ale udržet přitom rovnováhu vnitřního prostředí, a to s maximální úsporností. To, že celý systém dokonale pracuje, je výsledek evoluce od jednoduchých forem života k člověku.

Mezi integrovanými systémy nalezneme jeden poněkud opomíjený, ale stejně důležitý. Je to obrana organismu. Jednoduchým příkladem je obrana kůže proti přílišnému slunečnímu záření zvýšenou pigmentací. Obranou proti chladu (ale též proti ohrožení) je u člověka už jen rudimentární naježené ochlupení. Komplexní obrana je zřejmá na změně krevního toku v podkožních kapilárách. Obranu známe též v prostoru tracheálním a bronchiálním (který není ani vnější, ani vnitřní), kde řasy odstraňují drobné cizí částice. Ty větší odstraní reflexně kašel. Podobný je prostor trávicí trubice, chráněné na jedné straně zvracením a na druhé průjmem. Ovšem daleko významnější je obrana vnitřní, extracelulární, obsáhle studovaná a do hloubky již poznaná jako imunita. Je to – stručně řečeno – boj organismu s bakteriemi, viry a mutovanými buňkami, například nádorovými. V principu cizorodý, organický element – antigen – začne produkovat protilátky proti vetřelcům, a tak je likviduje. Bitva, zpravidla úspěšná, se odehrává na mezibuněčném poli. Zbraněmi jsou makrofágy a celá armáda lymfocytů. Existuje však také imunita vrozená, uskladená již v genomu. Imunita je stále ve střehu a plnou silou vyráží až při útoku antigenů. Těmito procesy se sice již zabývá samostatný, prudce se rozvíjející obor, imunologie, ale povstaly z fyziologie.

Základní veličina dějů je čas. V lidském organismu se všechny děje odehrávají od milisekundových elektrických signálů přes sekundové, jako je srdeční rytmus, a denní, cirkadiánní rytmy až po děje celoživotní. I ty patří do fyziologie. Lidský život má své vyhraněné etapy, kritické periody, zpravidla ohraničené vývojovými skoky. Nejnápadnější a nejdivočejší vývojový skok je narození. Během několika sekund se novorozenci rozeznou plíce, začne dýchat a úplně se přestaví krevní oběh. Během několika dnů se změně výživa dítěte, když matčinu krev nahradí její mléko. Další významný vývojový skok (i když poměrně pozvolný) představuje přechod z tekuté stravy na tuhou výživu zcela jiného složení. V druhém decenniu se probudí plejáda reprodukčních hormonů a rozpoutá se divoká puberta. Do té doby němé hormony přemění děti ve fyzicky dospělé lidi. Kdysi se mělo za to, že dítě je prostě zmenšený dospělý. Pochopení toho, že dítě je úplně jiný člověk než dospělý, dalo vzniknout před téměř sto lety pediatrii.

Pro velkou část dospělého života se kritické periody týkají především žen. Po všech stránkách je změně těhotenství, porod i laktace. Žena se dočasně změně nejen fyzicky, ale i psychicky tím, že se stává matkou. Všechno to má „na svědomí“ hormonální přestavba. Poslední vývojový skok je přechod, menopauza, opět podstatně významnější u žen, způsobená vyhasnutím tvorby reprodukčních hormonů (u mužů má změny v tomto věku „na svědomí“ spíš náhlý přechod do důchodu).

Všem funkčním systémům je nadřazena soustava nervová, jmenovitě mozek. Je to orgán tvořený miliardami buněk (neuronů), houští přejemných sítí a množstvím gliových buněk. Fylogeneze mozku ukazuje vývoj od primitivních oblastí, které od úsvitu historie ovládají vegetativní (autonomní) nervový systém. Mnohem rozsáhlejší jsou mozkové oblasti motorické, které řídí pohyby kosterních svalů, od siláckých po ty nejjemnější na prstech klavíristovy ruky. Nejvyšší etáž mozkových struktur, fylogeneticky nejmladší, je v mozkové kůře. Zde se zpracovávají signály a informace všeho druhu, jak ty vnější smyslové (zrakové, sluchové, čichové), tak ze všech oblastí těla (bolest, teplota, hmat, pohyby svalů), a vysílají se do cílových efektorů. Lidský mozek pracuje

velmi podobně jako nejvýkonnější počítače, ale nesrovnatelně dokonaleji. Příslušná centra mozkové kůry již byla obrovským úsilím vědců v podstatě zmapována, a to včetně oblastí, kde se rodí komunikace, učení, paměť, kde se formují myšlenky, city, odpovědnost, přátelství, pravda (a bohužel i lež). Zatím jen víme, že tyto mozkové oblasti existují a věda má ještě mnoho co zkoumat.

Lékařská fyziologie je věda o dění ve zdravém, tedy normálním organismu. Má jasný, důležitý smysl a poslání. Musí neustále přihlížet k tomu, že je východiskem k pochopení nemoci. Nemůže být proto samolibá, uspokojená jen úžasnými vědeckými objevy. Fyziologie, obor zdánlivě čistě teoretický, má i druhou, velmi zřetelnou lidskou stránku.

Pavel Bravený



Kapitola 1

---

# REGULACE A ADAPTACE

*Marie Nováková*

## A říká jedna buňka druhé...

Lidský organismus je mnohobuněčný, vysoce organizovaný systém. Jednotlivé parametry charakterizující jeho funkce musí být neustále korigovány, respektive jejich hodnoty udržovány v rámci určitého rozmezí. K tomu slouží poměrně složitý komplex fyziologických regulací. Ještě než se ale budeme věnovat možnostem regulace v živých systémech, je nutné trochu se zaměřit na terminologii.

Pojem regulace bývá totiž často zaměňován za pojem řízení. Je to ale velmi nesprávné. V případě regulace je známa žádoucí hodnota regulovaného parametru a aktuální hodnota je s touto hodnotou neustále porovnávána. Následná regulace je reakcí na aktuální situaci s cílem přiblížit hodnotu parametru zpět k žádoucí hodnotě. V případě řízení je vyslán signál ke změně určitého parametru bez ohledu na to, jaká je jeho aktuální hodnota.

Rozdíl mezi řízením a regulací si můžeme vysvětlit na konkrétním příkladu – na změnách srdeční frekvence. Na začátku fyzické aktivity (či dokonce ještě před jejím započítáním v rámci tzv. **anticipační reakce**) sympatický nervový systém uplatní svůj pozitivně chronotropní (frekvenci zvyšující) vliv bez ohledu na to, jaká je aktuální hodnota srdeční frekvence. Jde tedy o typický příklad řízení. Na druhou stranu zvýšení srdeční frekvence při ortostatické reakci, kdy při změně polohy těla z lehu nebo sedu do stoje náhle poklesne krevní tlak, je ilustrativním příkladem regulační odezvy parametru (srdeční frekvence) na změnu jiného parametru (krevního tlaku). Regulačním okruhem je v tomto případě baroreflex.

## Proč o tom vlastně mluvit?

Souhrnnou kapitolu o regulacích všech fyziologických funkcí v učebnicích fyziologie v podstatě nelze nalézt. Neznamená to ovšem, že by to byla kapitola málo významná či dokonce zcela nevýznamná. Právě naopak. Regulace rozmanitých funkcí od molekulární úrovně až po úroveň celého organismu hrají zásadní úlohu ve fyziologii a v medicíně představují klíčové téma pro pochopení dějů v lidském organismu. Selhání těchto principů totiž vede k tzv. **dysregulaci**, která má za následek dysbalanci v daném parametru či funkci a často vede až k onemocnění. Celá patologická fyziologie je v podstatě založená na studiu a vysvětlení dysregulací, přičemž jejich důkladné pochopení nám otevírá nové diagnostické možnosti a popřípadě umožňuje vhodně terapeuticky zasáhnout. V této kapitole v krátkém přehledu shrneme obecné principy fyziologických regulací a pozastavíme se u některých jejich zajímavých aspektů.

Především je třeba zdůraznit, že principy regulací v živých systémech (vše, o čem zde hovoříme, platí pro celou živočišnou říši, na jejímž pomyslném vrcholu stojí člověk) jsou v podstatě stejné jako regulace v technických oborech. Předmět, který se zabývá regulacemi obecně, se nazývá **kybernetika** a zjednodušeně lze říct, že studuje automatické řídicí systémy. **Biokybernetika** pak studuje tuto problematiku v živých systémech, zabývá se především srovnáním nervového systému s mechanicko-elektronickými komunikačními systémy. Vlastnosti regulačních a jiných biokybernetických systémů představují funkční rezervy organismu ve vztahu k proměnlivým podmínkám jeho existence. Výstupy z biokybernetických studií a modelování slouží především



v intenzivní medicíně, při tvorbě reanimačních programů a v „zátěžové“ medicíně (například kosmická medicína, vysokohorská adaptace, potápění).

I když by se mohlo zdát, že studium regulací je záležitost relativně recentní – vždyť kybernetika jako věda se etablovala až v polovině dvacátého století –, opak je pravdou. První fyziologická regulace na základě negativní zpětné vazby byla studována již před více než půldruhým stoletím – v roce 1868 Hering a Breuer popsali reflexně podmíněnou ochranu plic před nadměrnou inspirací, když zjistili, že naplnění plic inhibuje neurony n. phrenicus.

Vraťme se nyní na začátek našich úvah, do úvodu této kapitoly, a uvědomme si, proč jsou vlastně regulace v našem organismu nezbytné. Je tomu tak proto, že živé systémy, člověka nevyjímaje, jsou systémy otevřené. Čile si s okolím vyměňují látky, energie (třeba teplo) a informace. Jedná se o kontinuální, obousměrný tok, který má za následek neustálé vychylování vnitřního prostředí živého systému z rovnováhy, tzv. homeostázy.

**Homeostáza**, nebo též stálost vnitřního prostředí, je udržována jak pasivními, tak aktivními procesy. Obvykle máme na mysli stálost určitých parametrů v tělesných tekutinách, přesněji řečeno v extracelulárním kompartmentu. V užším slova smyslu lze homeostatické principy vysledovat i v dalších kompartmentech, tedy kromě extracelulárního prostoru také v prostoru intracelulárním, v kompartmentech představovaných jednotlivými organelami apod. Neustálé změny vnitřního prostředí jsou způsobeny interakcí s vnějšími vlivy (např. změny tělesné teploty v prostředí s vyšší či nižší teplotou, příjem potravy apod.), vlivy vnitřními (např. metabolické děje) nebo kombinací obojího (např. fyzická aktivita).

Obecně lze tedy shrnout, že systém fyziologických regulací slouží k zajištění homeostázy, tedy k udržení regulované proměnné ve vnitřním prostředí v rozmezí kompatibilním se životem. Druhým – neméně významným – úkolem fyziologických regulací je redukce šumu během přenosu informací ve fyziologických systémech (a šum vzniká vždy, to je třeba mít na paměti – zde opět vidíme obdobu s technickými obory, kde problematika odstranění šumu ze signálu patří k často diskutovaným tématům).

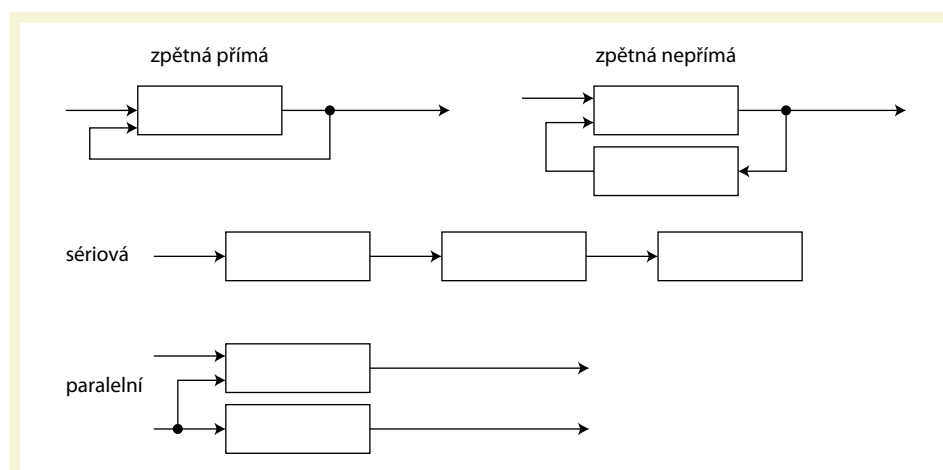
Každou veličinu, která je v živém systému regulována, lze charakterizovat několika parametry: **žádoucí hodnota**, **minimální a maximální fyziologická hodnota**, **minimální a maximální neletální hodnota** a **minimální a maximální letální hodnota**. I když některé z nich jsou uváděny v současných doporučeních odborných společností a s odkazem na ně léčíme pacienty (například „normální“ hodnoty glykemie), jedná se o hodnoty spíše orientační. Nelze totiž pominout **interindividuální variabilitu**, která vysvětluje, proč je například pro některého jedince určitá hodnota daného parametru již letální a pro jiného ještě ne.

Aby mohla být veličina regulována, musí být v regulačním okruhu umístěný **senzor**, který detekuje aktuální hodnotu proměnné. Ta je pak porovnávána s tzv. **set-pointem**, tedy žádanou hodnotou, které by mělo být regulací dosaženo. Takto je v živých systémech regulována řada veličin klíčových pro udržení homeostázy – z „jednoduchých“ veličin je to například tělesná teplota (senzorem jsou zde centrální a periferní termoreceptory), z veličin komplexnějších například krevní tlak (senzorem jsou zde baroreceptory ve stěně elastických arterií). Do regulačních okruhů ovšem často vstupují také informace z dalších systémů (například detekce bolesti při dotyku s horkým či velmi studeným povrchem) a tyto informace celý systém modulují. A rozhodně platí, že žádný reálný regulační okruh nereguluje ideálně. Je nutné, aby

si čtenář uvědomil, že živý organismus je mnohem komplexnější než nejdokonalejší kybernetické modely a že algoritmy, využívané biokybernetikou k popisu regulačních okruhů v živých systémech, nemohou nikdy dokonale a beze zbytku postihnout realitu. Jinak řečeno – sebelepší matematický model nikdy stoprocentně neodpovídá reálné situaci v živém organismu.

Základem většiny regulací je **negativní zpětná vazba**: změna na výstupu regulované veličiny ovlivní její vstup v opačném smyslu (tedy zvýšení na výstupu bude mít za následek snížení na vstupu a naopak). Výsledkem regulace daného parametru tedy je, že odchylka tohoto parametru od žádané hodnoty detekovaná jako přebytek se utlumí a nedostatek se naopak doplní. Negativní zpětná vazba tedy v podstatě kompenzuje odchylku regulované veličiny od žádané hodnoty, jinými slovy minimalizuje rozdíl mezi skutečnými hodnotami regulované veličiny a hodnotou žádanou. Základní vlastností všech negativních zpětných vazeb je, že indukují oscilace regulovaného parametru. Vysvětlení tohoto jevu je jednoduché – nějakou dobu trvá, než systém detekuje aktuální hodnotu parametru a následně zareaguje. V důsledku tohoto malého zpoždění aktuální hodnota regulovaného parametru lehce překročí set-point, čímž se aktivuje opačný děj, vedoucí k menší výchylce opačným směrem, a tak to jde až do okamžiku, kdy se aktuální hodnota regulovaného parametru dostane do jeho fyziologického rozmezí (jinak řečeno co nejbližší k set-pointu). Oscilace hodnoty regulovaného parametru obvykle nejsou pozorovatelné, alespoň ne běžnými přístupy, používanými například v klinické praxi. Pokročilé metody analýzy průběhu různých funkcí (EKG, kontinuální záznam krevního tlaku apod.) ovšem odhalí i jemné oscilace v hodnotě regulovaného parametru či funkce. Neobvykle dlouhé zpoždění v regulačním okruhu může vést až k extrémním oscilacím daného parametru či funkce. Je jasné, že v takové situaci hrozí ztráta regulační schopnosti.

Zpětná vazba může existovat ve dvou podobách – jednoduché (té se také někdy říká přímá) a složité (nepřímé). Zpětná vazba nemusí stát osamoceně, naopak může být a často také bývá více zpětných vazeb spojeno dohromady, a to buď v sérii, nebo paralelně (**obr. 1.1**).



**Obr. 1.1** Typy zpětných vazeb a způsoby jejich zapojení

Typickým příkladem **jednoduché zpětné vazby** je regulace produkce hormonu podle změny v chemickém složení krve, vyvolané hormonem – regulace kalcemie kalcitoninem, regulace glykemie hormony endokrinního pankreatu nebo regulace osmolality plazmy antidiuretickým hormonem. Zjednodušeně lze říci, že v těchto regulačních okruzích jsou zapojeny ty žlázy s vnitřní sekrecí, které nepodléhají hypofyzární regulaci.

**Složité zpětné vazby** se naopak uplatňují u žláz s hypofyzární regulací, přičemž regulačním faktorem je buď samotná plazmatická koncentrace hormonu vylučovaného danou žlázou, nebo koncentrace hormonu vylučovaného hypofýzou. Jako příklad složité zpětné vazby můžeme uvést regulaci vyplavování glukokortikoidu kortizolu: ten negativní zpětnou vazbou tlumí sekreci jak hypofyzárního adrenokortikotropního hormonu (ACTH), tak hypotalamického kortikoliberinu (CRH). Zde se jedná o dvě jednoduché zpětné vazby zapojené paralelně. Navíc se k nim druží ještě jedna jednoduchá negativní zpětná vazba, a to mezi adenohipofýzou a hypotalamem – ACTH tlumí vyplavování CRH.

Obdobné schéma složitých negativních zpětných vazeb vidíme také u gonadálních steroidů u mužů (testosteron, inhibiny, aktiviny), které tlumí obě gonádám nadřazené struktury, tedy hypotalamus a adenohipofýzu. U žen je situace komplikovanější: negativní zpětnovazebné tlumení produkce řídicích hormonů v ose hypotalamus-adenohipofýza-vaječníky se děje na několika úrovních. Zatímco aktiviny a inhibiny uplatňují svůj tlumivý efekt pouze na adenohipofýzu (tedy jednoduchá negativní zpětná vazba), estrogeny a progestiny působí jak na adenohipofýzu, tak na hypotalamus. A aby to bylo ještě komplikovanější, jejich efekt může být i pozitivní – ale o tom až později.

Jak již bylo řečeno, fyziologické regulace se odehrávají na všech úrovních organismu a mají pestrý obraz. V zásadě je lze rozdělit na regulace systémové a regulace lokální.

## Systémové regulace

Komplexní děje probíhající v živém systému jsou zajištěny **regulacemi systémovými**. Jedná se například o zabezpečení funkce orgánových systémů (gastrointestinálního traktu, kardiovaskulárního systému apod.) nebo o udržování tělesné teploty (ta sama o sobě představuje jednoduchý parametr, jehož změna je relativně jednoduše detekována, ale je neustále vychylována celou škálou procesů a odpověď organismu na toto vychýlení je velmi různorodá, zahrnující řadu efektorových systémů). Tyto „velké“, „celotělové“ regulace mohou být realizovány dvěma způsoby – regulací nervovou a regulací endokrinní (pomocí hormonů).

**Nervová regulace** je uskutečňována především **vegetativním (autonomním) nervovým systémem**. Zvýšené nároky na řadu funkcí organismu při zátěži různého typu (například fyzická aktivita, stres) zohledňuje aktivační **sympatický systém** (systém **adrenergní**). Často bývá také nazýván systémem *ergotropním* (tedy „ten, kdo se stará o organismus v době, kdy pracuje“). **Systém parasympatický, cholinergní** (někdy označovaný jako systém *trofotropní*, s nadsázkou řečeno „ten, kdo se stará o organismus v době, kdy tráví“) má funkci opačnou, tlumivou, tedy zklidnění a návrat k výchozímu stavu. Oba systémy fungují v určité rovnováze – pokud jeden zvýší svůj tonus, druhý je utlumen, a naopak. Velmi dobře je tato situace patrná například při regulaci mechanické aktivity gastrointestinálního traktu. Porušení této rovnováhy vede