

Hybnosť človeka, svalová kontrakcia

Ján Jakuš

VLASTNOSTI SVALU

- **Kontraktivita** – premena chemickej energie na mechanickú prácu - pohyb
 - odpoveď svalového tkaniva na stimuláciu je kontrakcia (skrútenie)
- **Excitabilita a schopnosť odpovedať**
 - svalové tkanivo môže byť stimulované elektricky, fyzikálnymi, alebo chemickými podnetmi
- **Elasticita alebo pružnosť**
 - svaly obsahujú elastické elementy, ktoré zabezpečujú ich pružnosť (návrat do pôvodnej dĺžky)
- **Roztiahnuteľnosť**
 - sval je možné natiahnuť na dlhší, než je jeho kľudová dĺžka
- **Svaly môžu len ťahať, nie tlačiť**

TYPY SVALU

- **Kostrový sval**

- priečne pruhované svalové tkanivo pod kontrolou somatického nervového systému (voluntárna kontrola)

- **Srdcový sval**

- špeciálne priečne pruhované svalové tkanivo pracujúce automaticky a pod moduláciou autonómny nervovým systémom

- **Hladký sval**

- tkanivo bez priečného pruhovania stimulované autonómny nervovým systémom, hormónálne, alebo jednoducho natiahnutím

Kostrový sval

- upevnený ku kostiam šľachami
- niekoľko **typov vlákien** (rýchlosť, výdrž, únava, sila, veľkosť motorickej jednotky, štruktúra...)
- bunky - dlhé **viacjadrové** cylindrické – dĺžka niekoľko mm (bunka ľudského kostrového svalu), priemer typicky 100 - 150 μm
- **cytoskeleton** – podporuje tvar bunky

Oproti sebe pôsobiace svaly sú **agonista** a **antagonista** (napr. flexia lakťa - biceps brachialis - agonista, triceps brachialis - antagonista).

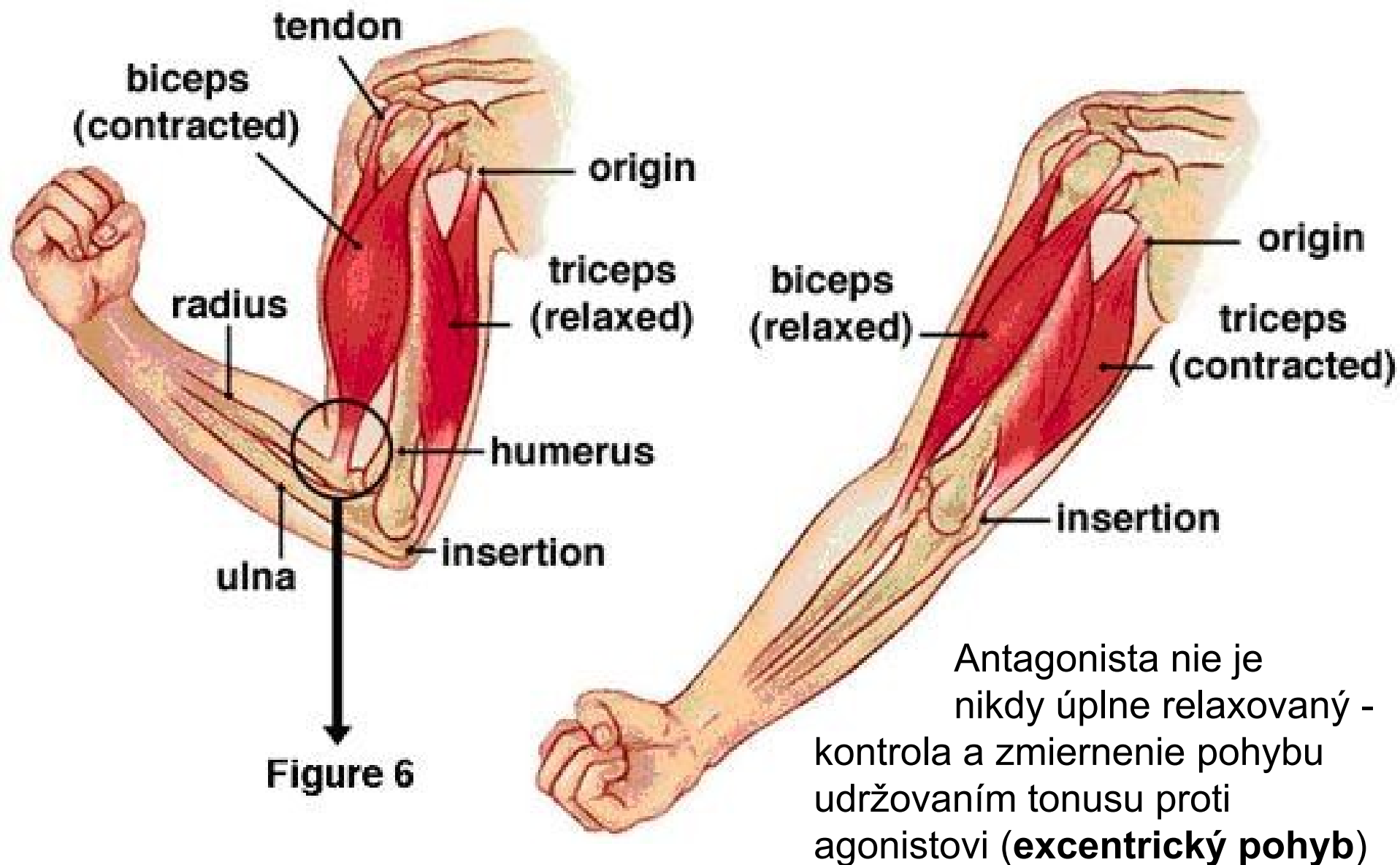
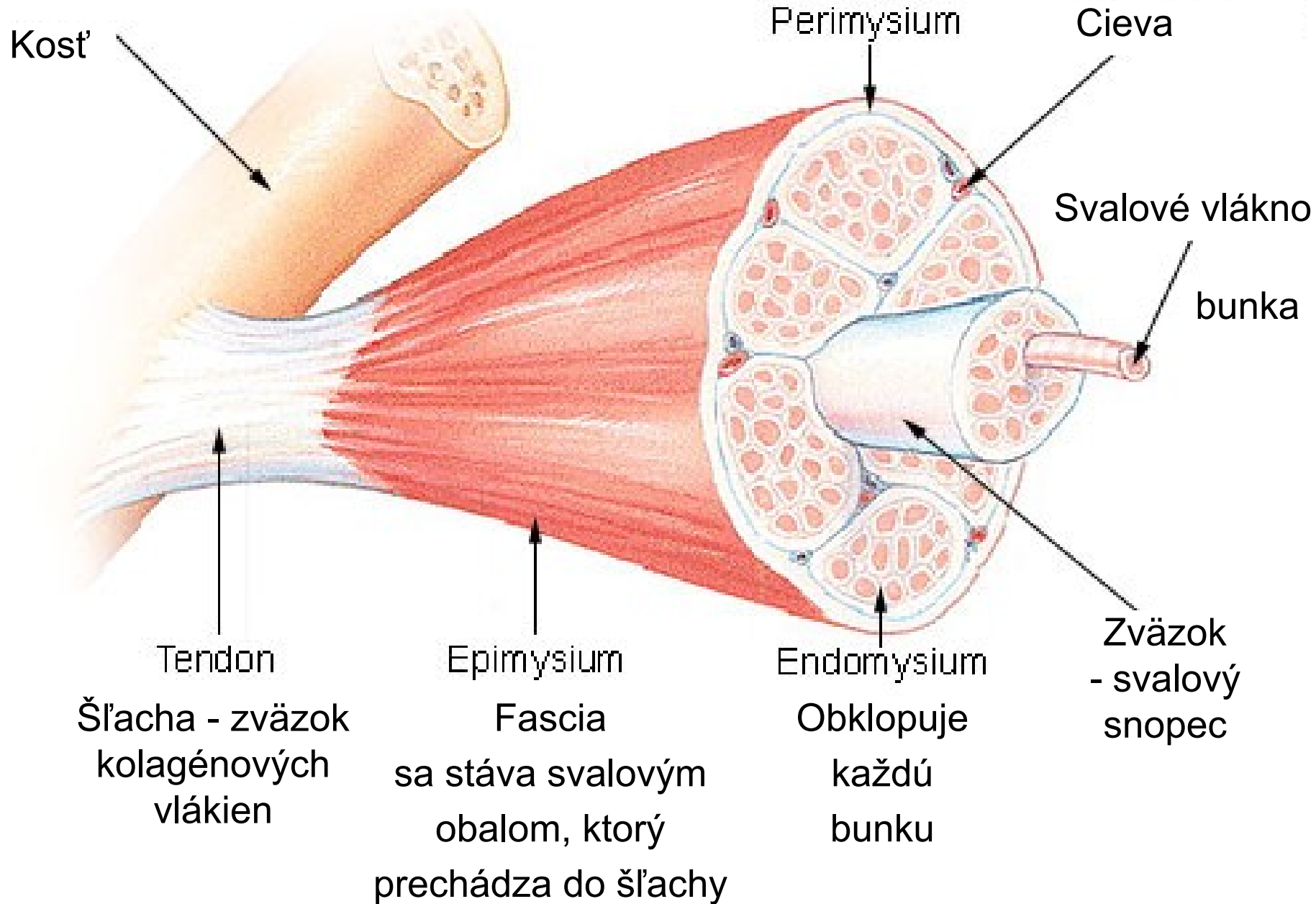
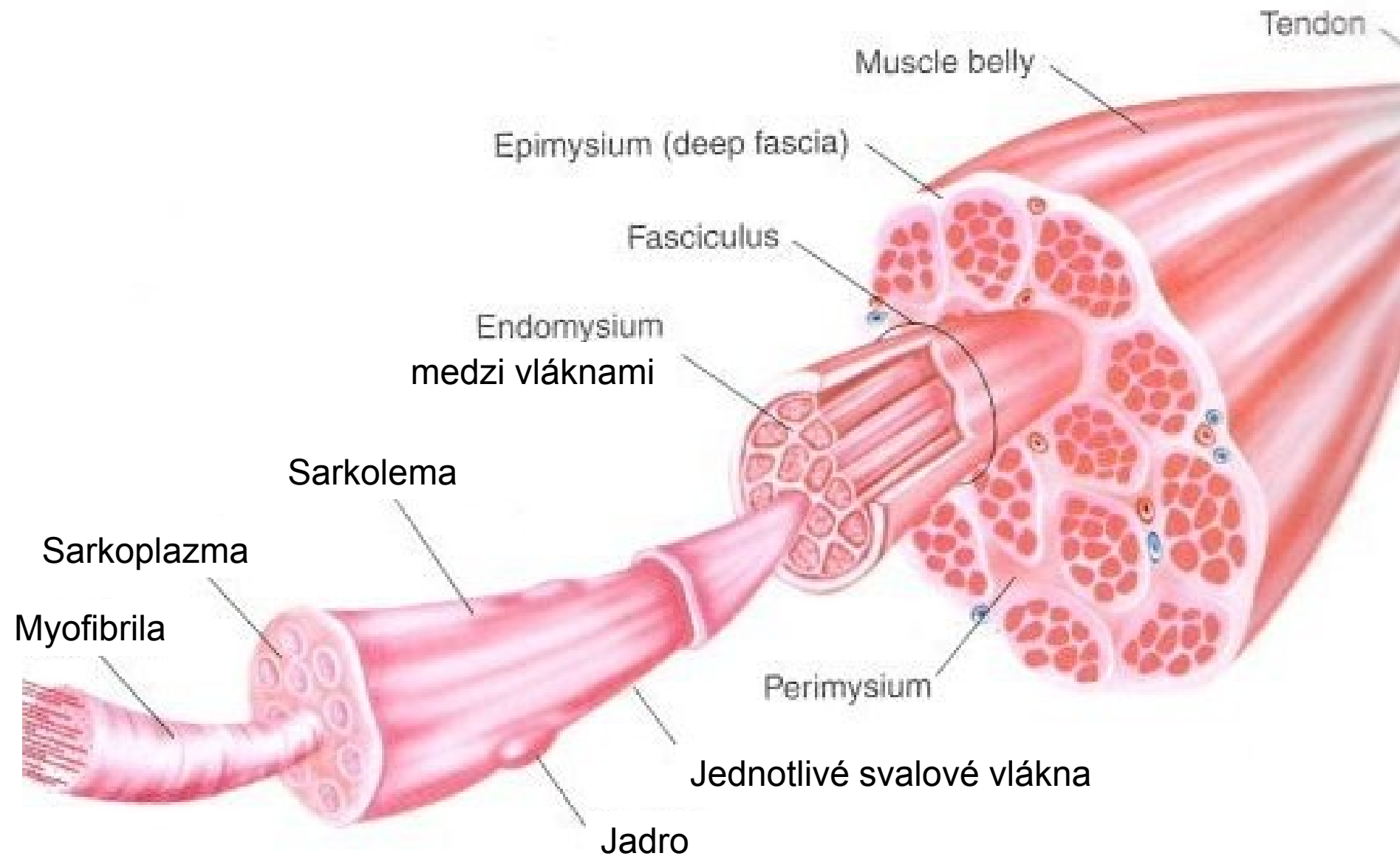


Figure 6

Štruktúra kostrového svalu

Obklopuje každý zväzok



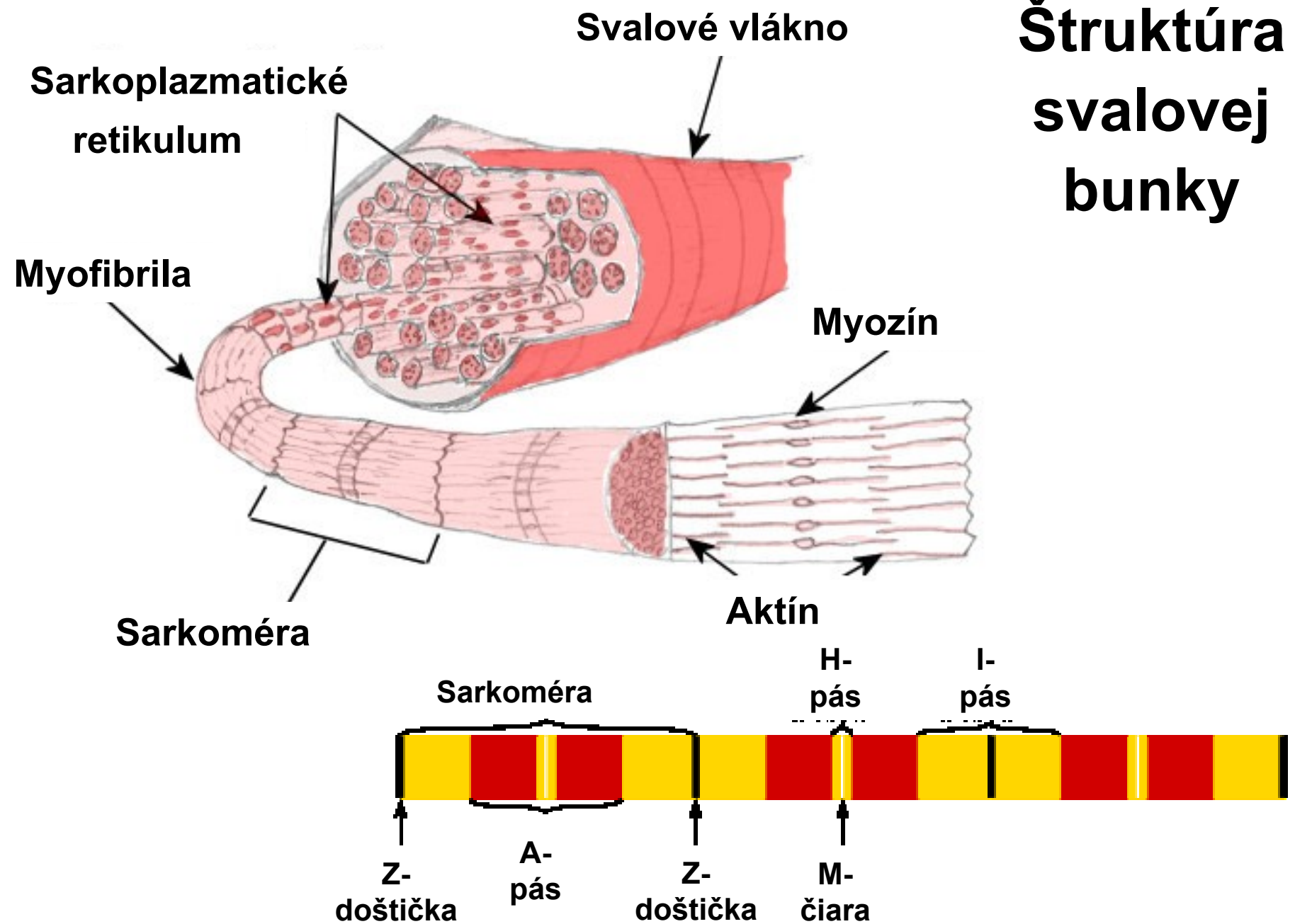


Hlboká štruktúra kostrového svalu

Svalové vlákno = svalová bunka

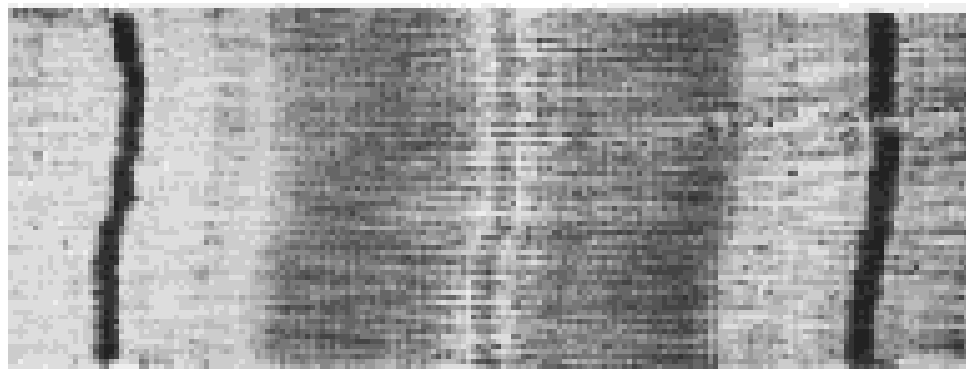
- **Sarkolema** – membrána svalovej bunky (kostrového, srdcového a hladkého svalu) – vedie signál
skutočná membrána (plazmatická membrána)
+ vonkajší obal (tenká vrstva polysacharidov s kolagénovými vláknami), ktorý prechádza do vlákien šľachy
- **Sarkoplazma** - cytoplazma s organelami
- **Myofibrily** - cylindrické organely – kontraktilné elementy (myofilamenty) **aktínové** a **myozínové** vlákna – špecifická a konštantná dĺžka (niekoľkých μm) - organizované do opakujúcich sa podjednotiek pozdĺž myofibrily – **sarkoméry**
- **Sarkoplazmatické retikulum s T- tubulárnym systémom** – vnútorný vodivý systém

Štruktúra svalovej bunky



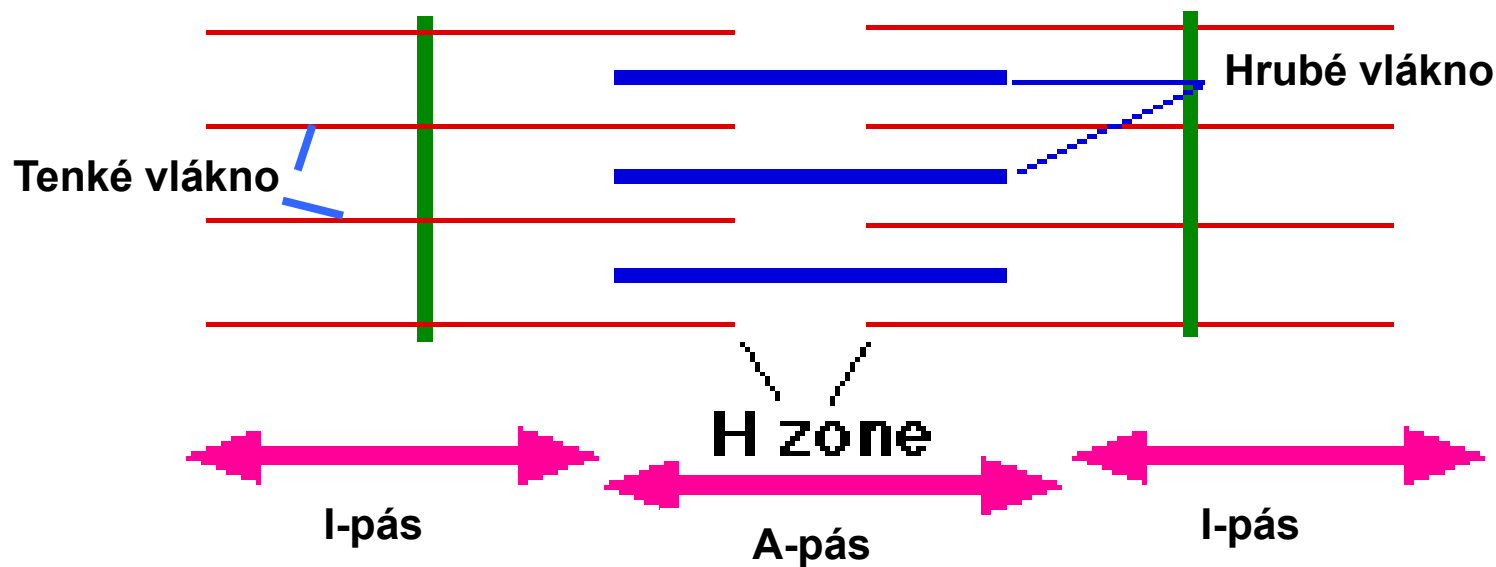
Mikroskopická fotografie a schéma sarkoméry

Sarcomere



Z-doštička

Z-doštička

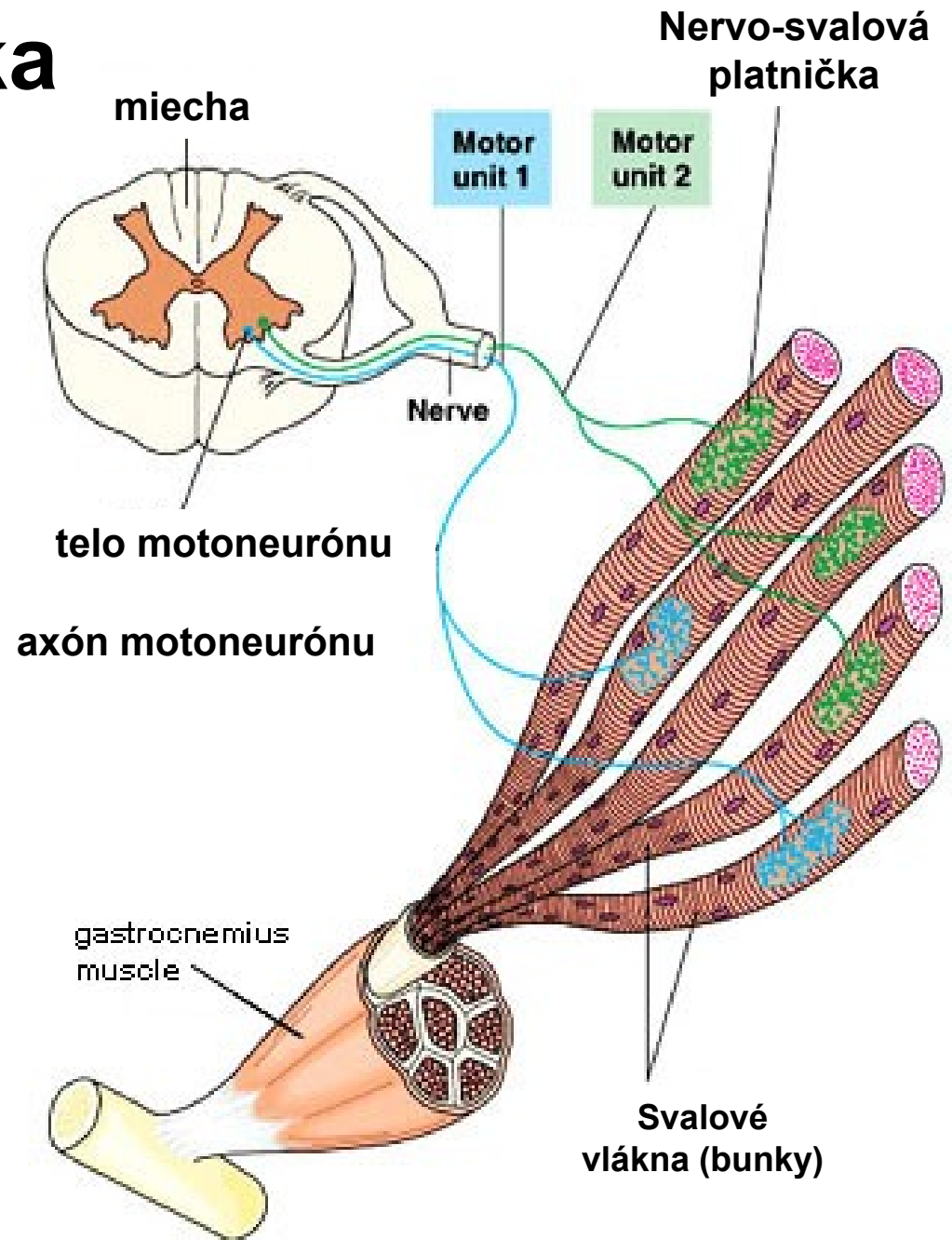


Motorická jednotka

- Svalové bunky sú izolované spojivovým tkanivom - každá musí byť stimulovaná axónom **motoneurónu**.
- **Motorická jednotka** - všetky svalové bunky inervované tým istým motoneurónom – kontrahujú sa naraz.
- Väčšinou je v svalu zmes motorických jednotiek rozličnej veľkosti.

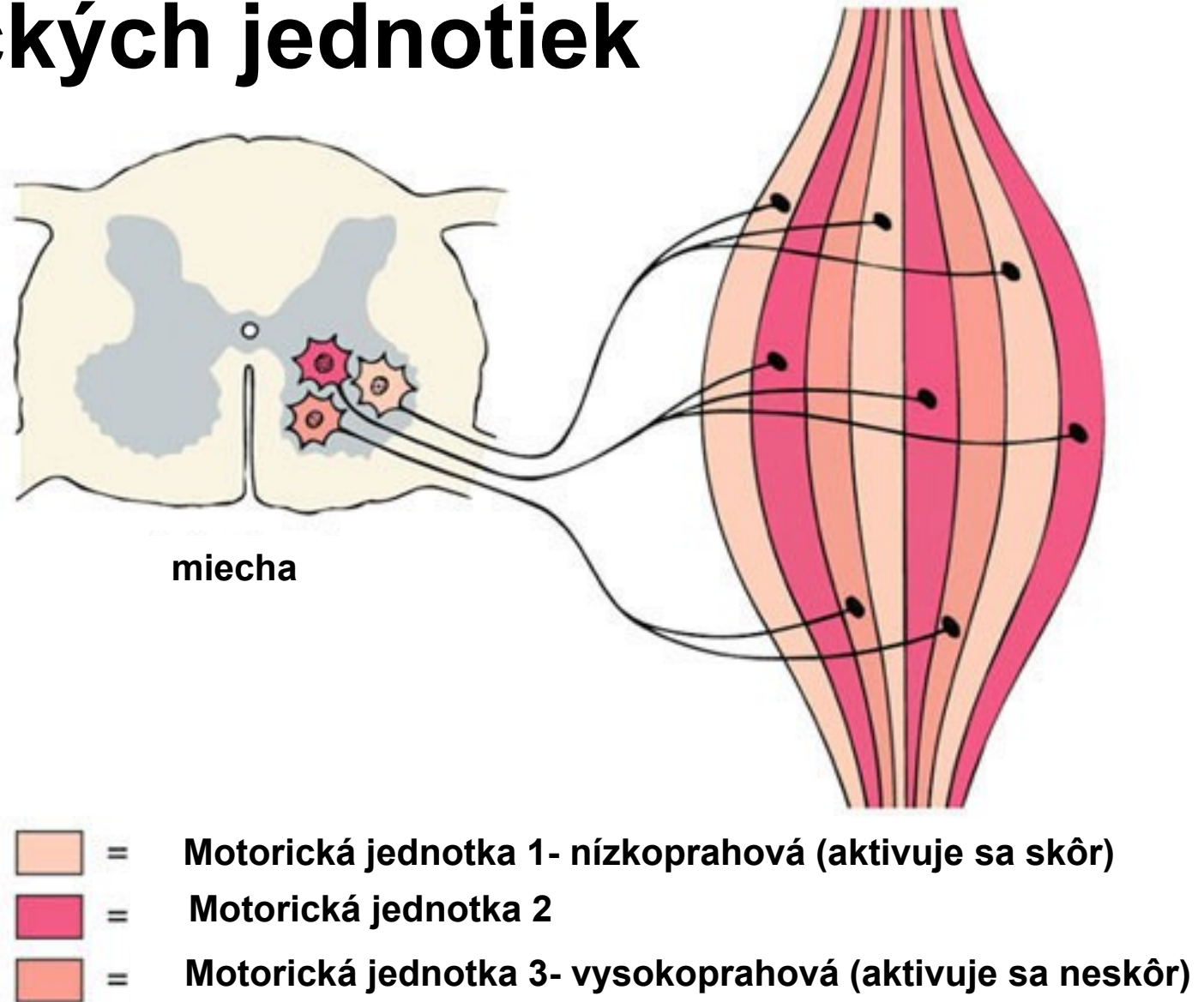
veľké jednotky >100 buniek (najmä pomalé posturálne svaly)

malé jednotky okolo 10 buniek (presná kontrola rýchlych svalov – napr. okohybných)

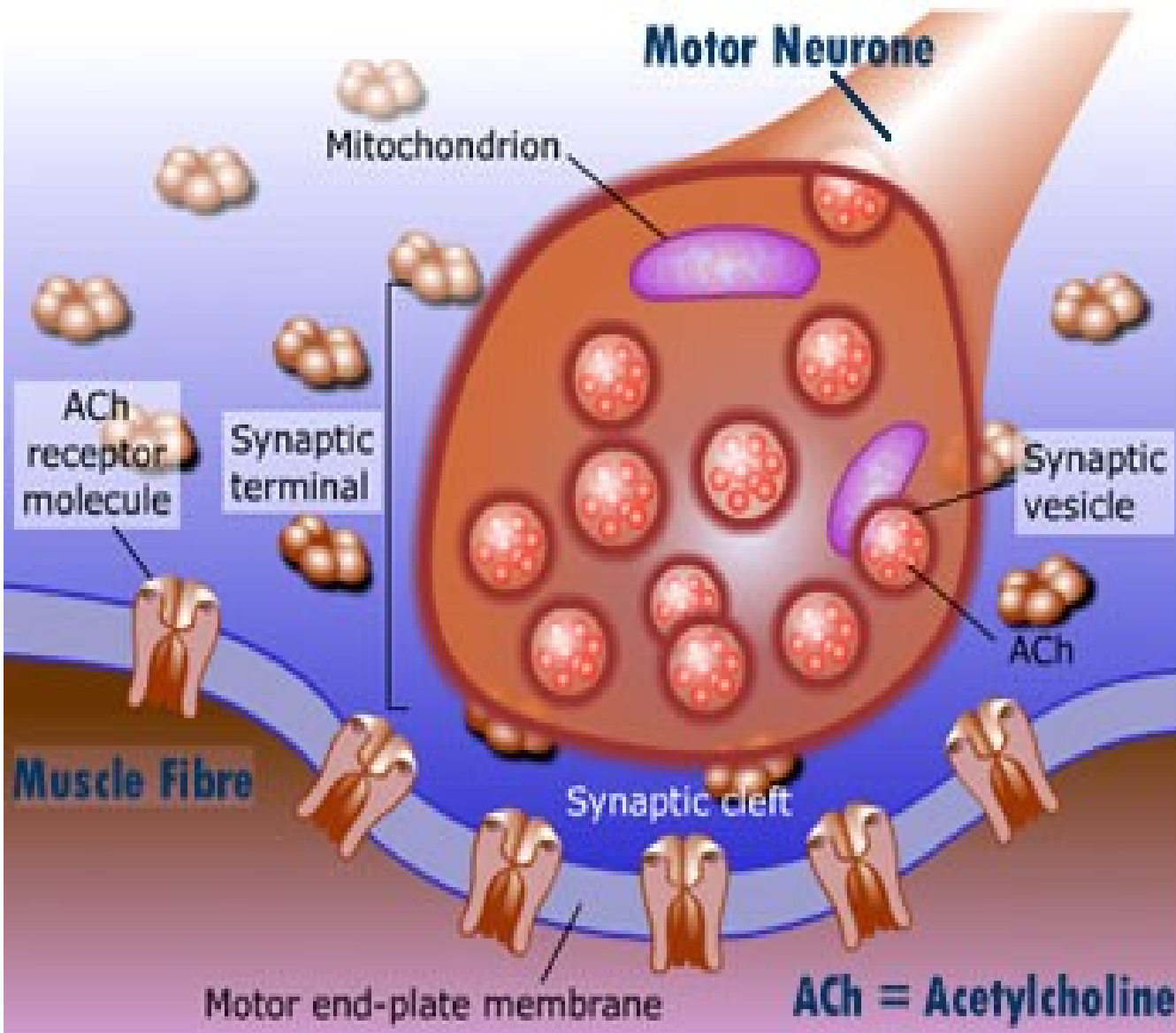


Rekrutment (nábor) motorických jednotiek

Zvyšujúca
sa centrálna
(moto-
neurónová)
aktivita –
postupná
aktivácia
motorických
jednotiek
s vyšším
prahom.



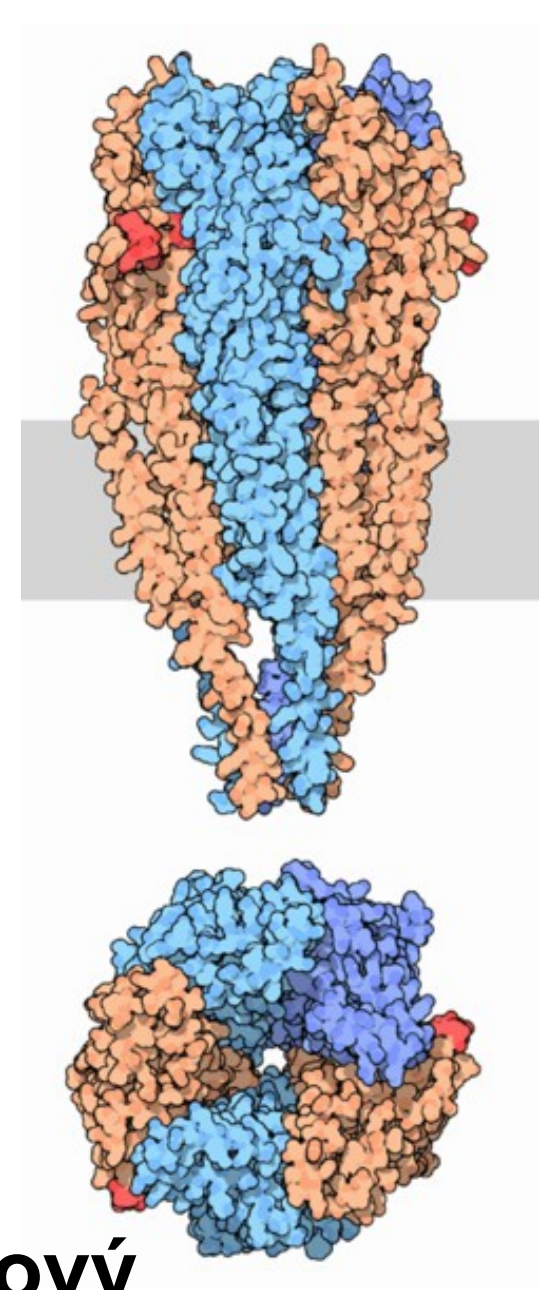
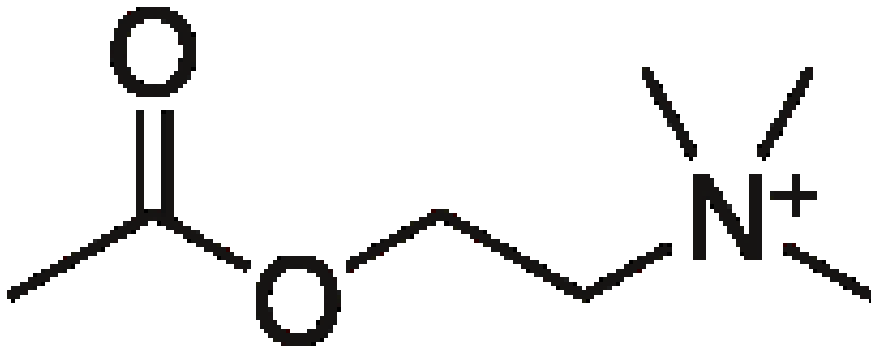
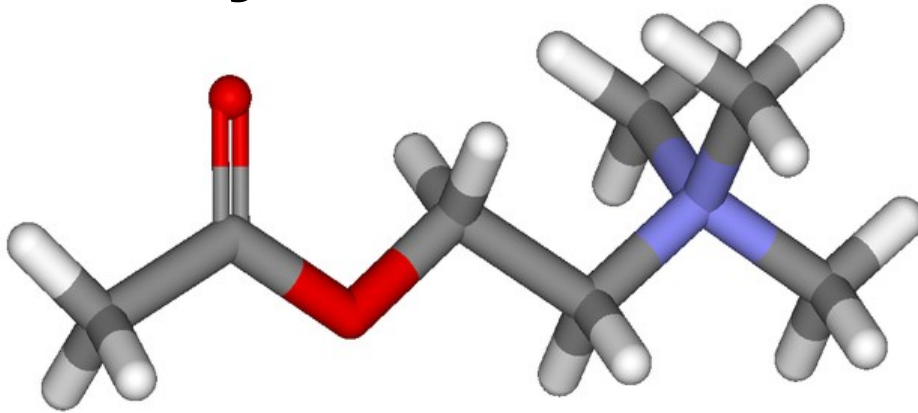
Motorické vlákna (axóny motoneurónov) v motorickom nerve vedú akčné potenciály do **nervo-svalovej platničky**.



Akčný potenciál na presynaptickej membráne aktivuje napätím riadené Ca kanály – **Ca²⁺ influx** – vezikuly s **neurotransmitterom - acetylcholín (ACh)** - výlučný transmitter nervo-svalovej platničky – uvolnia ACh do synaptickej štrbiny.

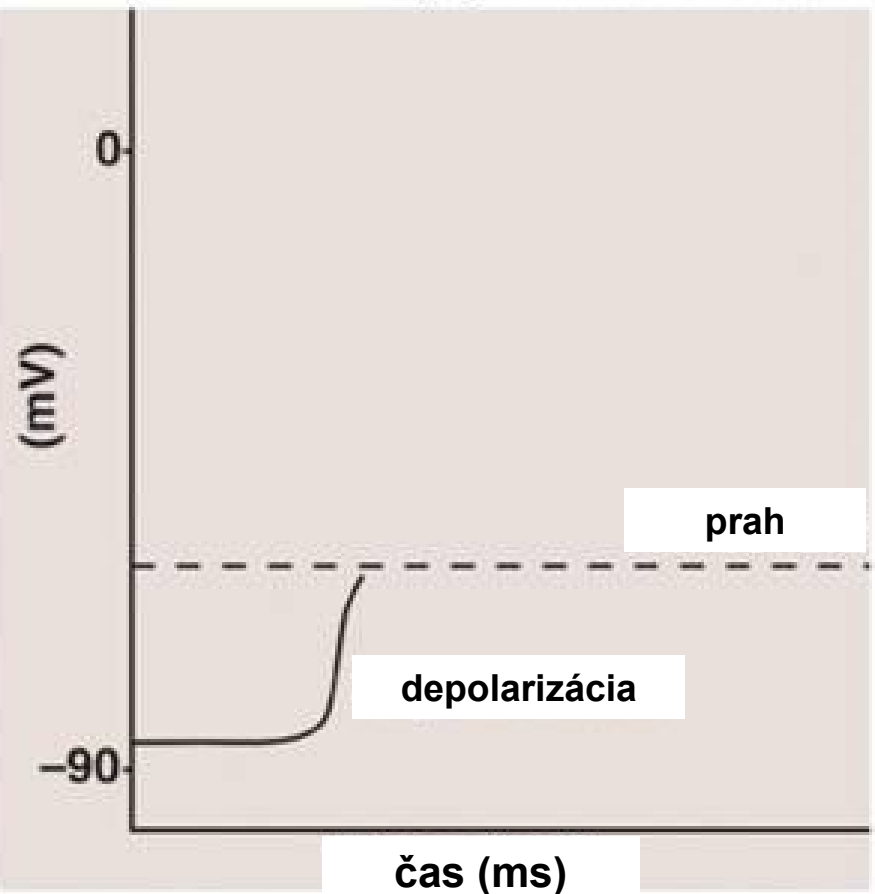
ACh sa viaže na nikotínové receptory postsynaptickej membrány (nervo-svalovej platničky) svalovej bunky – aktivácia Na kanálov – depolarizácia = jednotkový platničkový potenciál - PP

acetylcholín

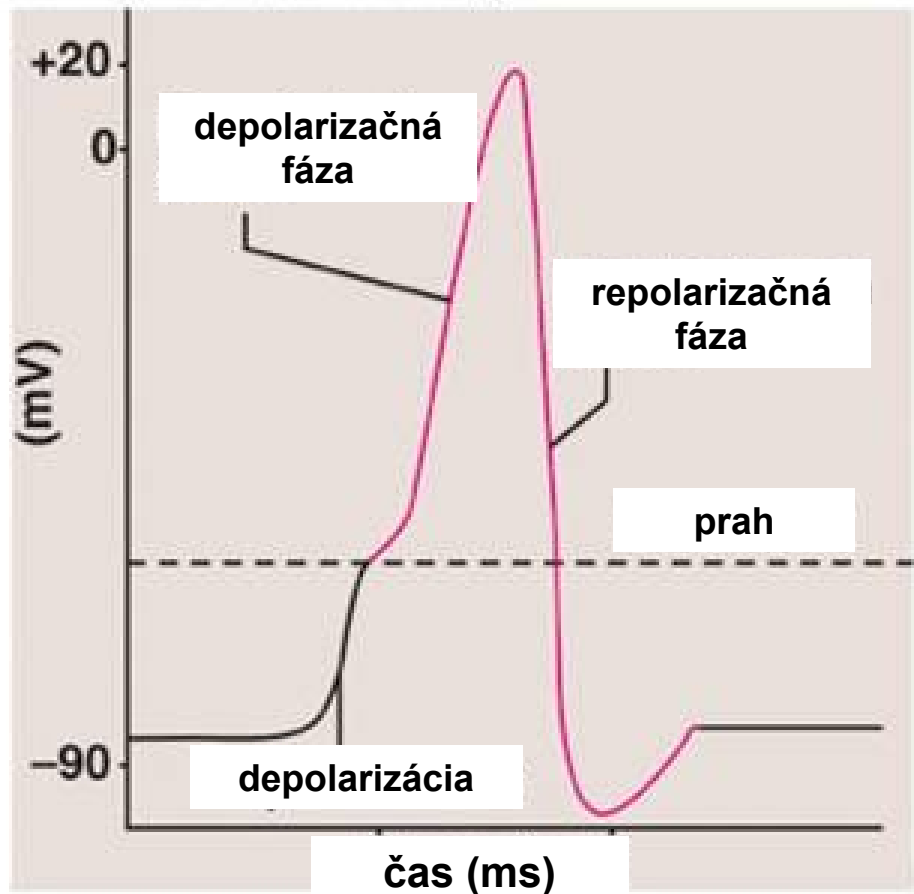


**nikotínový
ACh receptor**

- Aj bez stimulácie môže náhodne vezikulus uvoľniť ACh do synaptickej štrbiny, čo vyvolá miniatúrny EPSP (miniatúrny platničkový potenciál).
- Akčný potenciál na zakončení vyvolá úplný **platničkový potential (PP)**, ktorý vždy dosiahne firing level (prahovú úroveň) a vyvolá akčný potenciál na svalovej bunke.
- Akčný potenciál sa rozšíri pozdĺž **sarkolemy** a cez **T- tubulárny systém** svalovej bunky na **sarkoplazmatické retikulum**.
- Acetylcholín je eliminovaný (zo synaptickej štrbiny) rozkladom acetylcholín-esterázou.

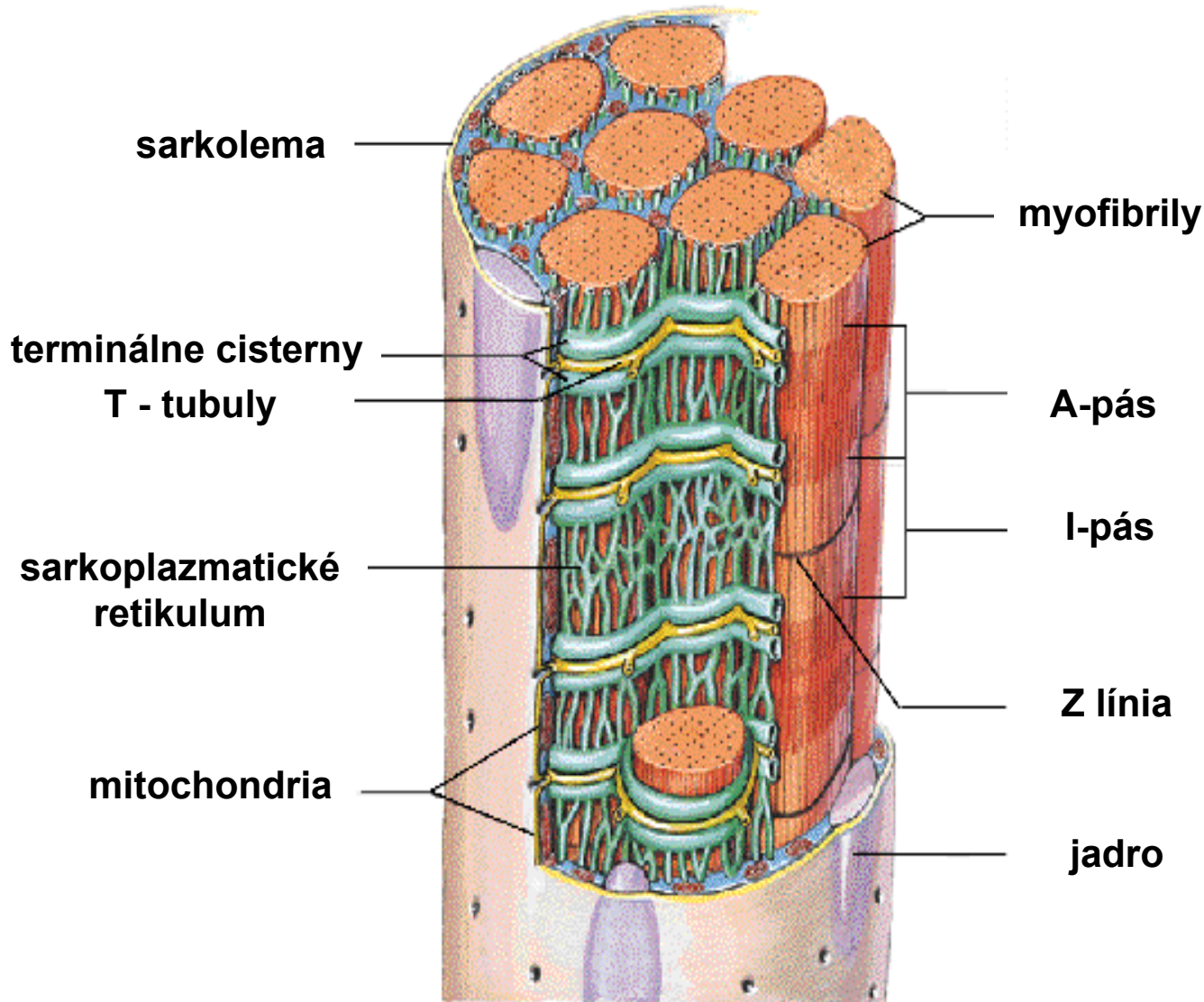


(a) Depolarizácia je zmena membránového potenciálu na plazmatickej membráne bunky, kedy sa stáva vnútro bunky menej negatívne (vonkajšok bunky menej pozitívne) nabité.



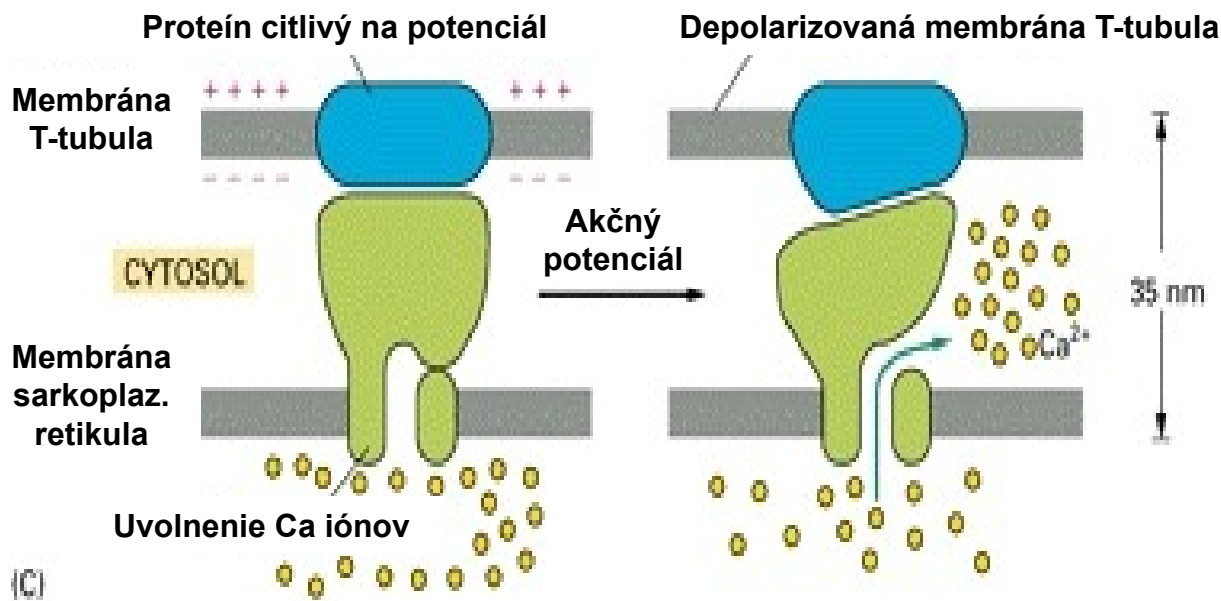
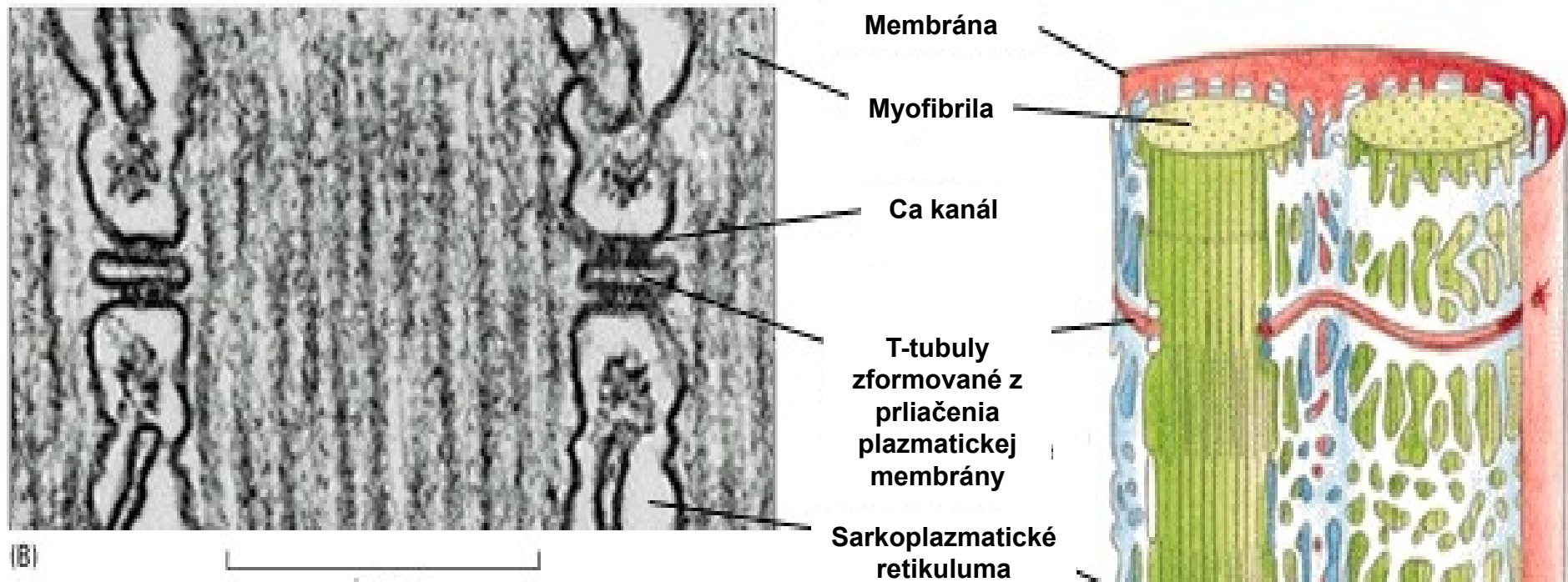
(b) Počas depolarizačnej fázy AP sa MP zmení z približne -85 mV na asi +20 mV. Počas fázy repolarizácie dochádza k postupnému návratu na hodnotu kľudového membránového potenciálu asi -85 mV.

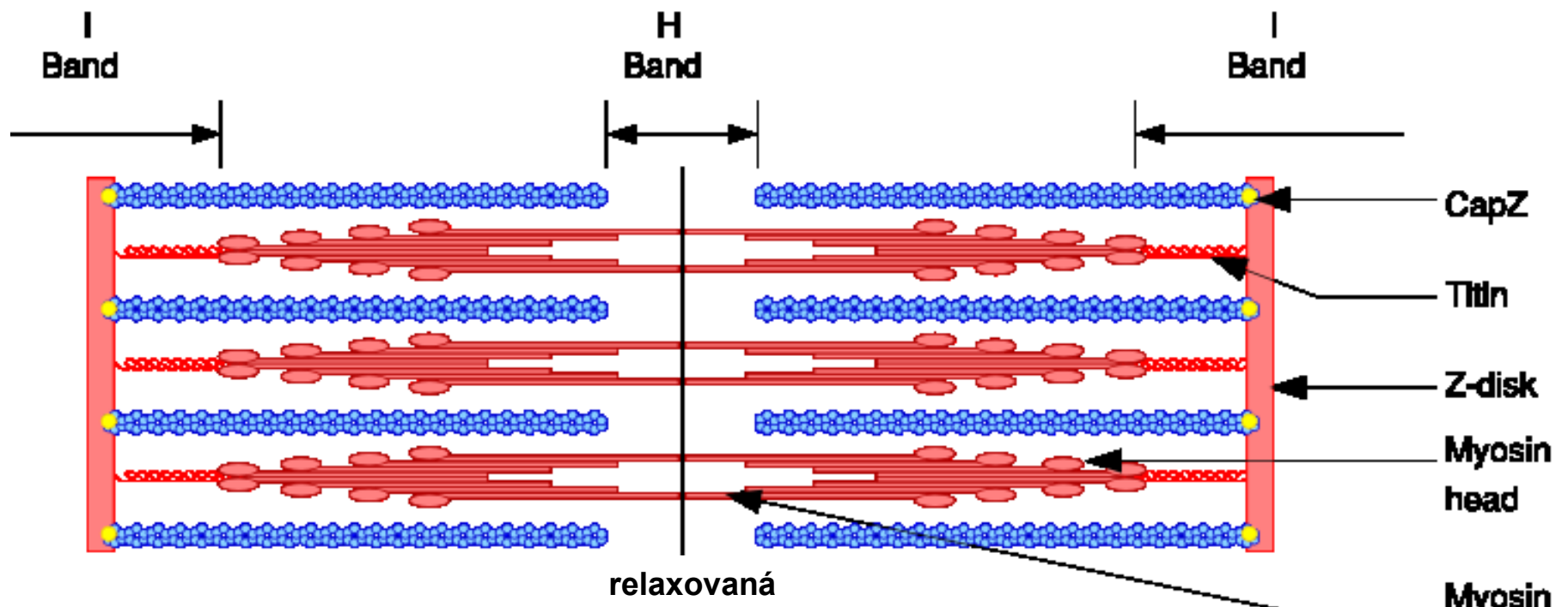
Sarkoplazmatické retikulum obklopuje myofibrily a obsahuje zásobu Ca^{2+} iónov. Priečný T – tubulárny systém je cestou pre akčný potenciál, aby sa tento dostal na sarkoplazmatické retikulum.



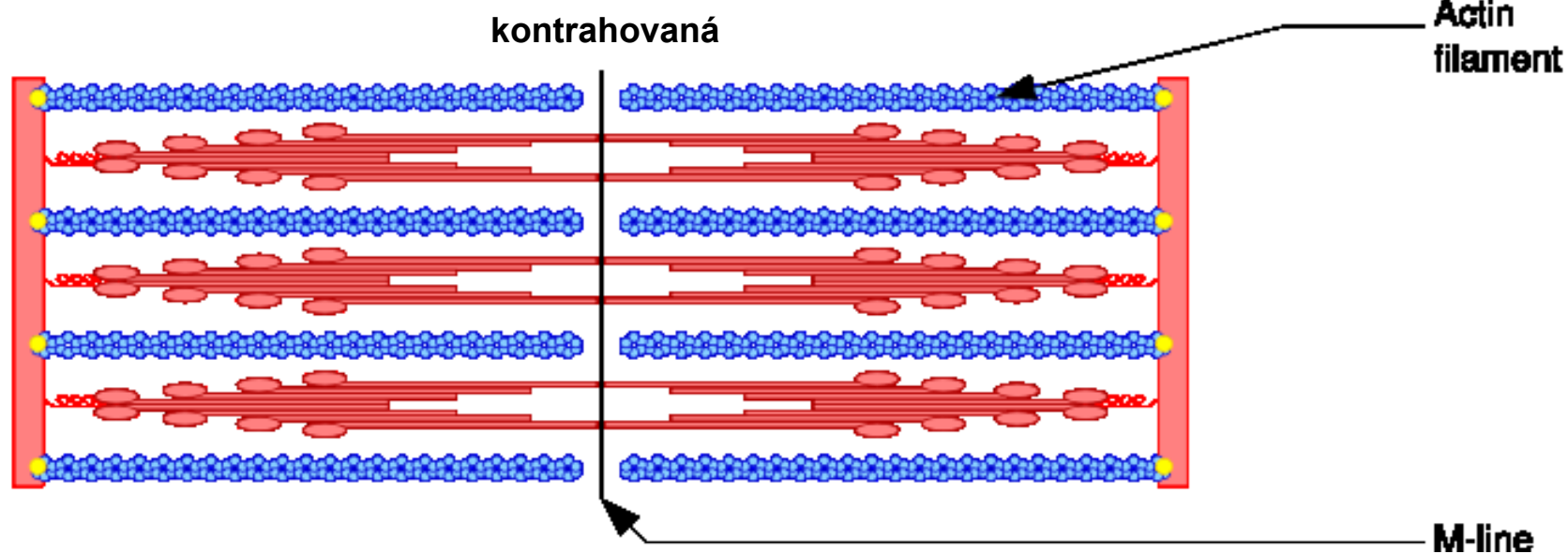
Akčný potenciál na T – tubuloch a sarkoplazmatickom retikule aktivuje napätím riadené Ca kanály na týchto štruktúrach – uvoľnenie (prienik) – influx Ca^{2+} do intracelulárneho priestoru svalového vlákna

Ca^{2+} – je iniciátor svalovej kontrakcie



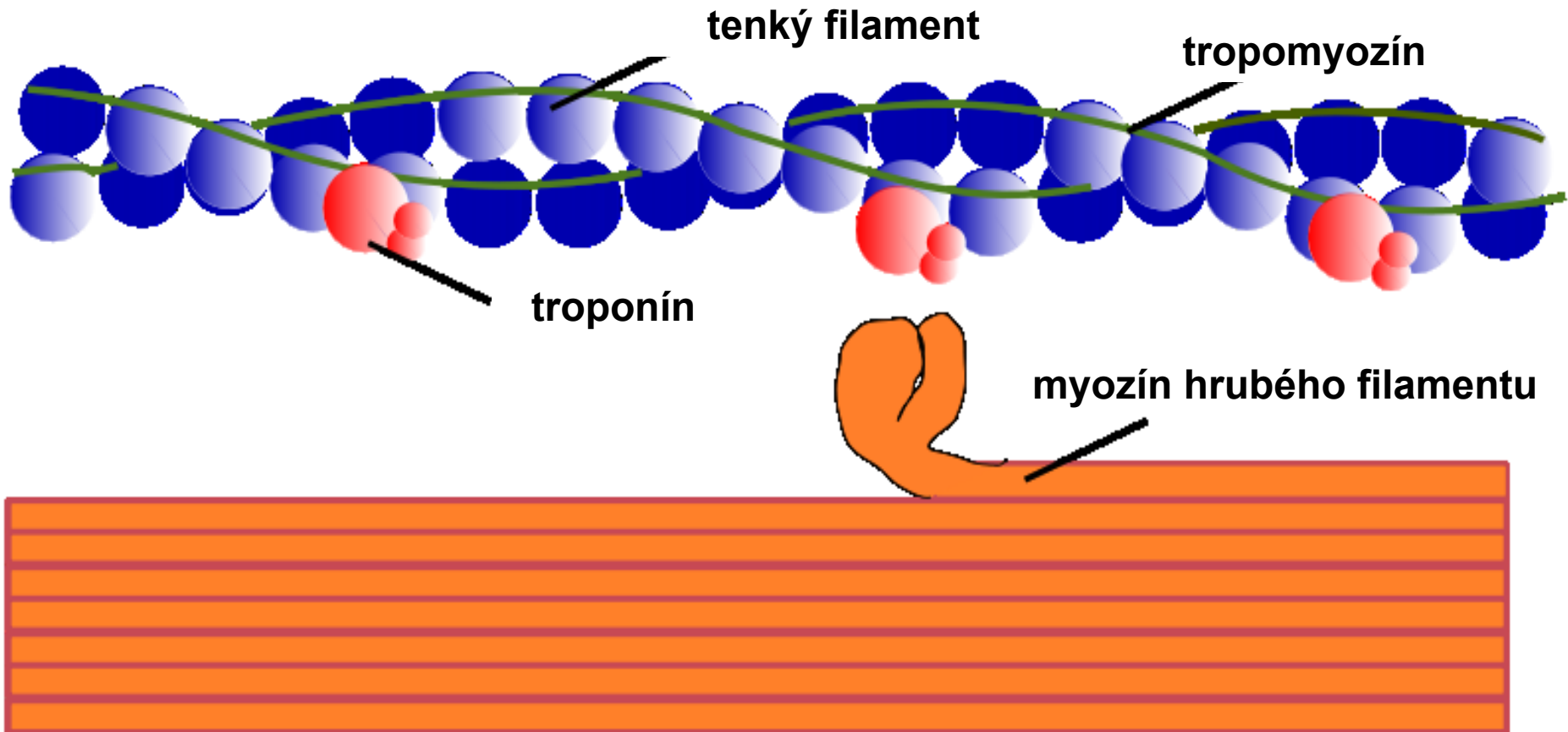


maximálna kontrakcia sarkoméry je okolo 30%



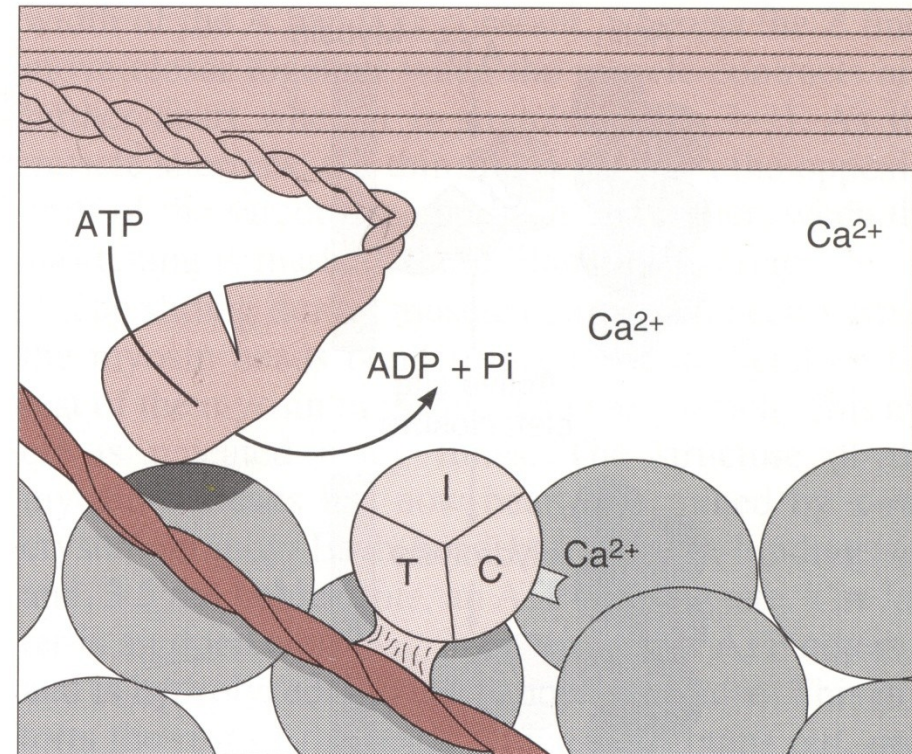
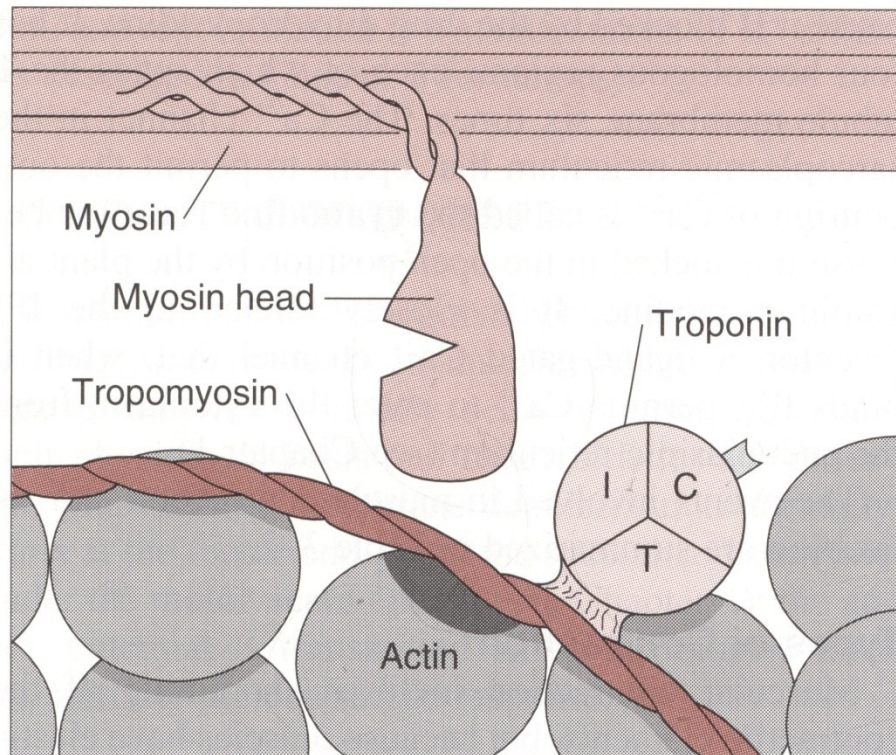
Svalová kontrakcia sa deje interakciou AKTÍN-ových (tenké) and MYOZÍN-ových (hrubé) vlákien.

Tropomyozín v kľude pokrýva väzobné miesta aktínu.

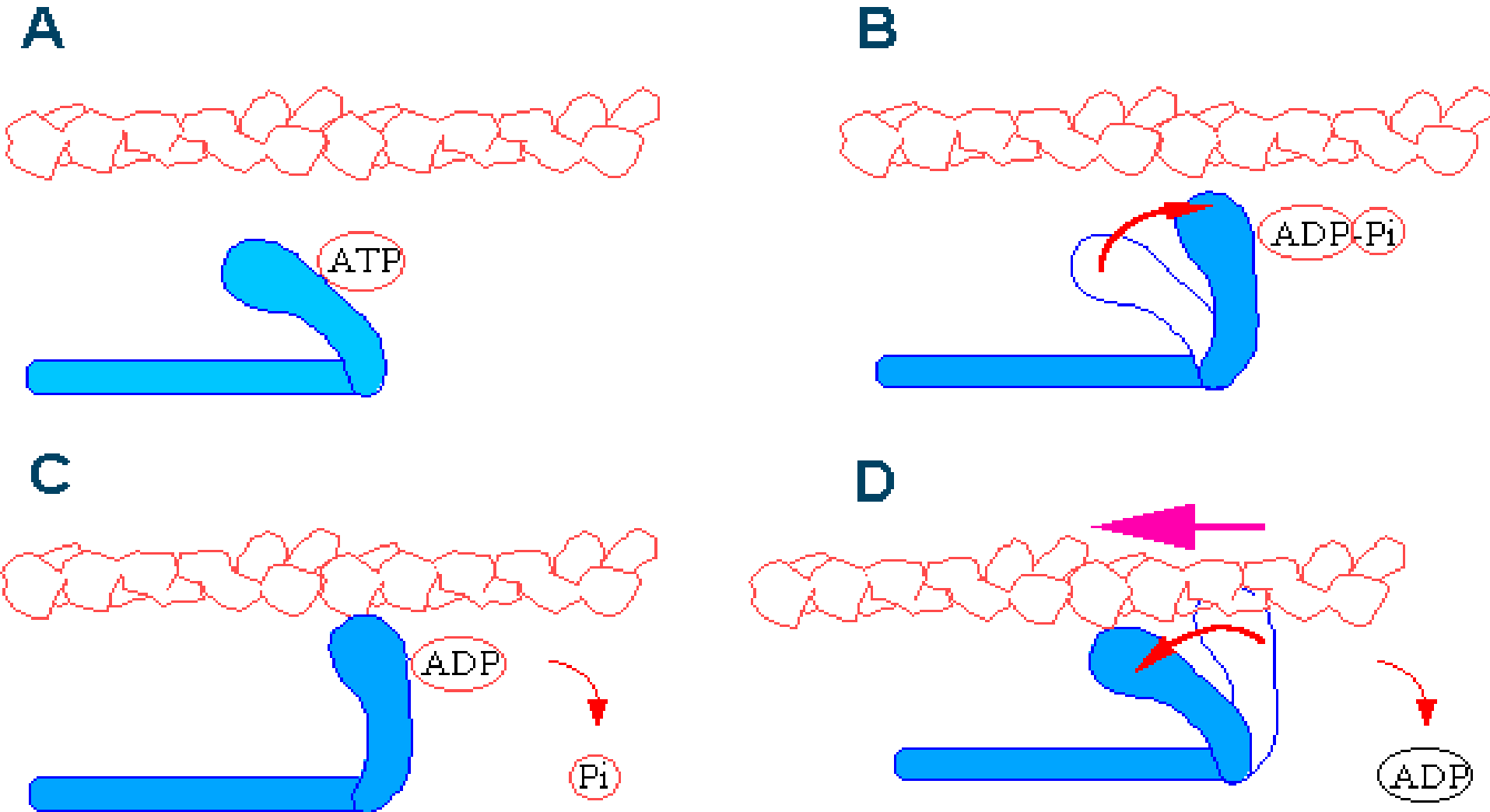


Ca²⁺ sa viaže na troponín, mení sa tvar (konformácia) tropomyozínu, ktorý odkryje väzobné miesta na aktíne aktínového vlákna.

Svalová kontrakcia vyžaduje aj ATP.



Na uvoľnenie ohnutých myozínových hláv z väzby k aktínu a na ich vyrovnanie je potrebné ATP. Myozín hydrolyzuje ATP (rozkladá ho na ADP a fosfát), čím získá energiu.



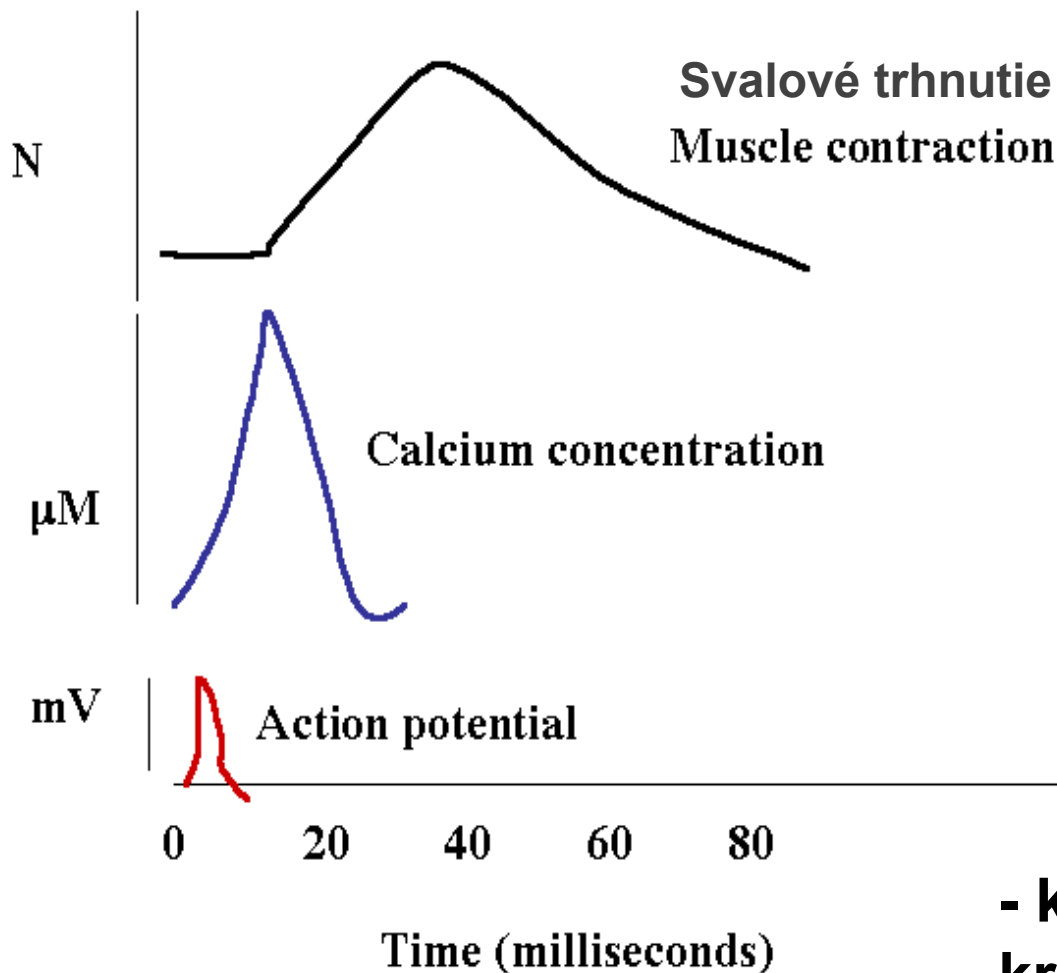
**Kým je Ca^{2+} a ATP prítomné (pri aktíne a myozíne),
cyklus : väzba s aktínom, ohnutie, uvoľnenie a
vyrovnanie myozínových hláv pokračuje (kontrakcia).**

**Ca^{2+} je neustále „pumpované“ (Ca pumpou – ATP-ázou)
nazad do sarkoplazmatického retikula (a T-tubulov).**

**Ca^{2+} koncentrácia sa udržiava vysoká jeho uvoľňovaním
zo sarkoplazmatického retikula ďalšími akčnými
potenciálmi.**

**Bez Ca^{2+} sa tropomyozín vráti do tvaru (konformácie),
ktorý blokuje väzbové miesta aktínového vlákna –
zastavenie kontrakcie**

**Keďže je ATP nevyhnutné na uvoľnenie väzby aktínu a
myozínu – bez ATP : RIGOR MORTIS**



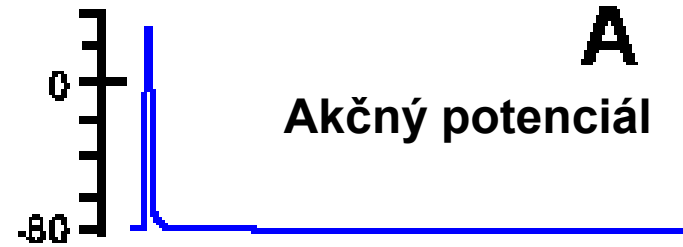
- **zvýšená intracelulárna koncentrácia Ca^{2+} (Ca uvoľnené zo sarkoplazmatického retikula a T – tubulov) trvá dlhšie než akčný potenciál**
- **ešte dlhšie trvá jednotkové svalové trhnutie**

- keďže má kostrový sval krátku refraktórnu periódu

(a akčný potenciál na sarkoleme sa rozšíri z 1 nervo-svalovej platničky pozdĺž celej membrány, T – tubulov a sarkoplazmatického retikula) **SUMÁCIA je ČASOVÁ** a to na úrovni uvoľňovania Ca^{2+} a superpozície svalových trnutí

Svalové trhnutie – vlnitý a úplný tetanus

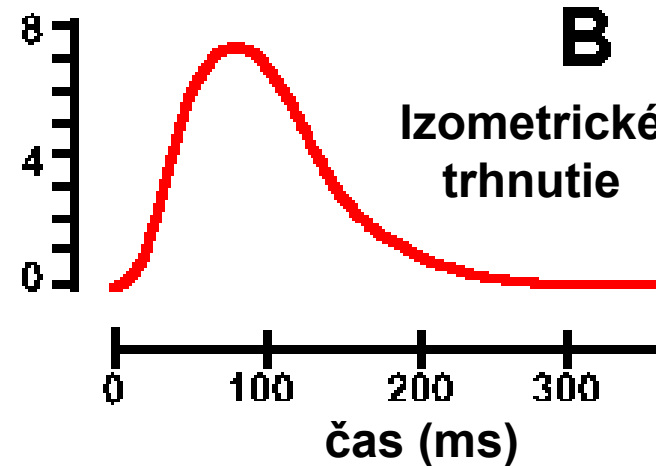
MP
(mV)



A

Akčný potenciál

F
(N)



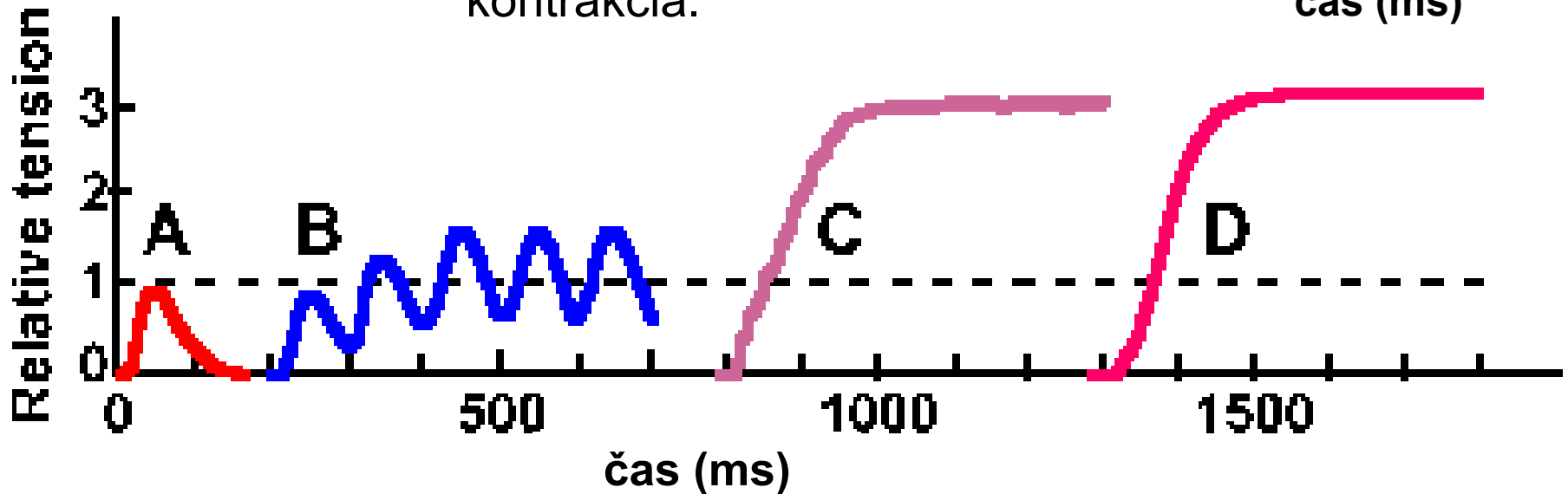
B

Izometrické trhnutie

čas (ms)

čas (ms)

kontrakcia.



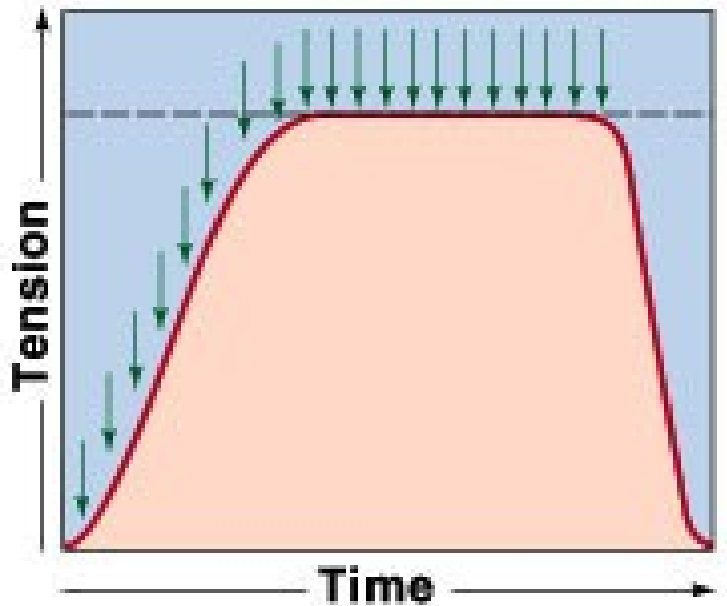
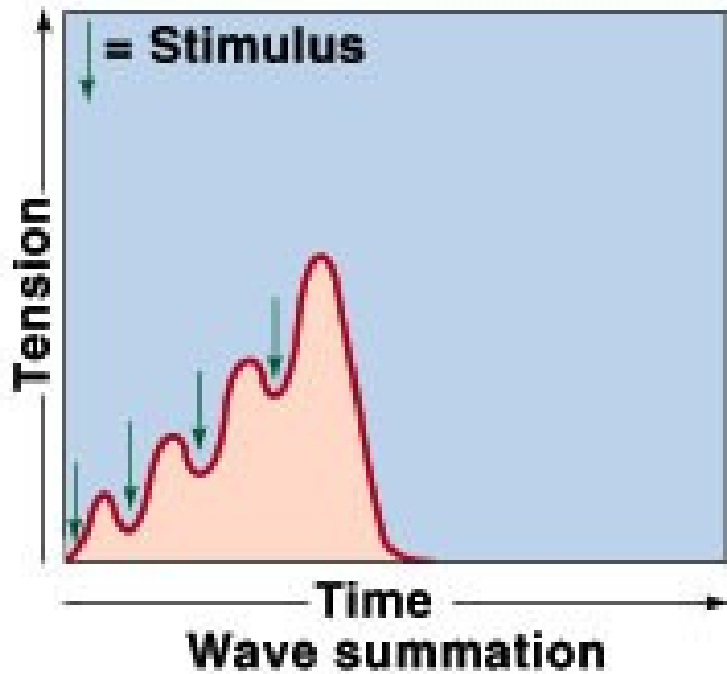
A

B

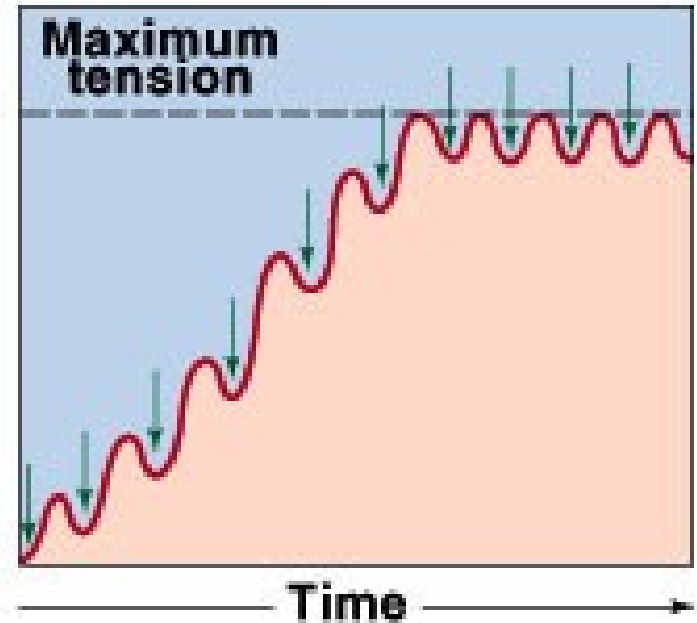
C

D

čas (ms)



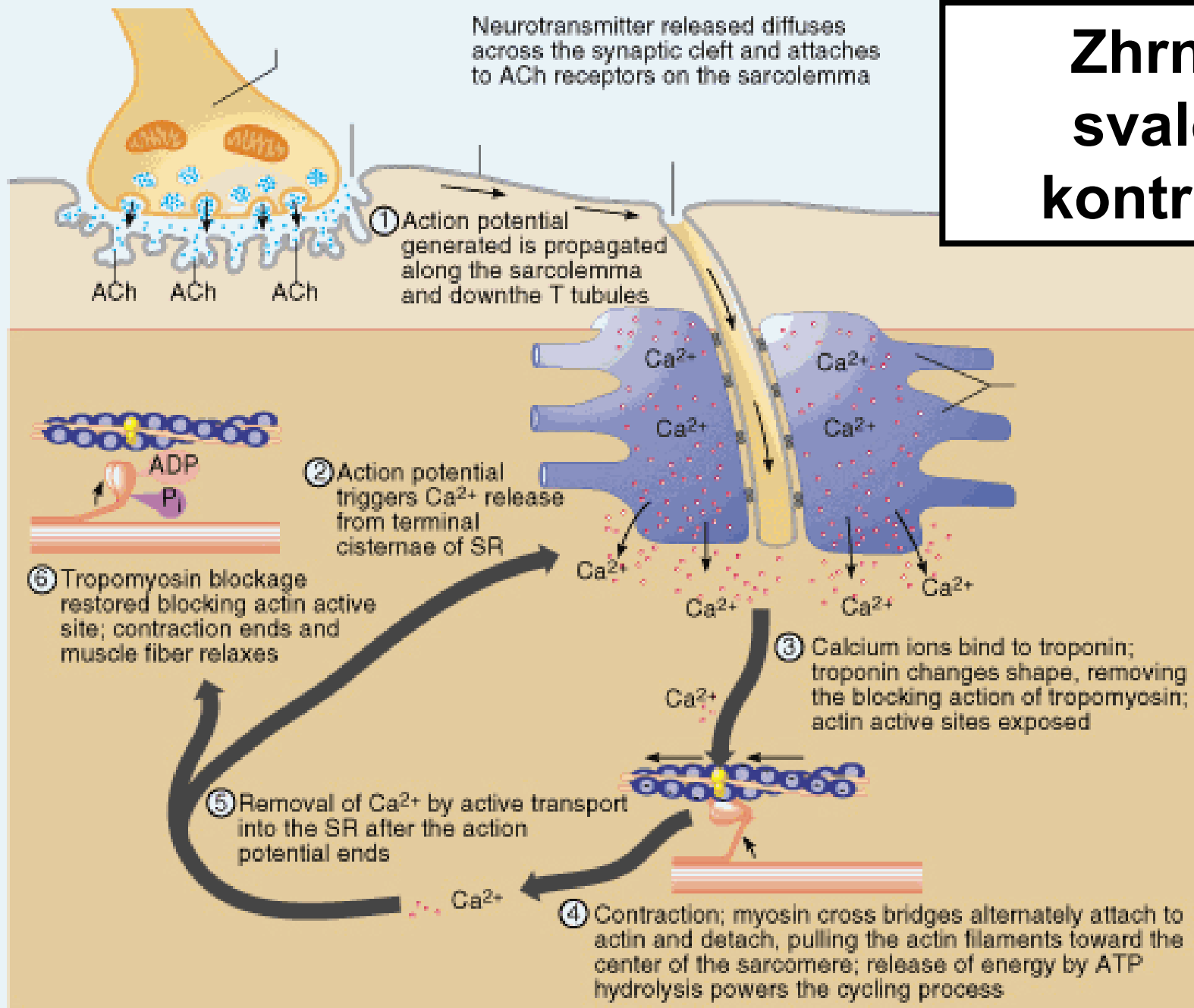
Vysokofrekvenčné stimuly (akčné potenciály) vyvolajú **superpozíciu** svalových trnutí a (časovú) **sumáciu** kontrakcie



Nekompletný (vlnitý) tetanus

Kompletný (hladký) tetanus

Zhrnutie svalovej kontrakcie



Porovnanie vlastností kostrového, srdcového a hladkého svalu

Vlastnosť	Kostrový sval	Srdcový sval	Hladký sval
Priečna pruhovanosť?	áno	áno	nie
Relatívna rýchlosť kontrakcia	rýchly	stredná rýchlosť	pomalý
Voluntárna kontrola?	áno	nie	nie
Refraktórna perióda membrány	krátka	dlhá	
jadier v bunke	veľa	jedno	jedno
kontrola kontrakcie	nervy	spontánna, nervovo modulovaná	nervy hormóny natiahnutie
Bunky prepojené interkalárnymi diskami alebo Gap Junctions?	nie	áno	áno

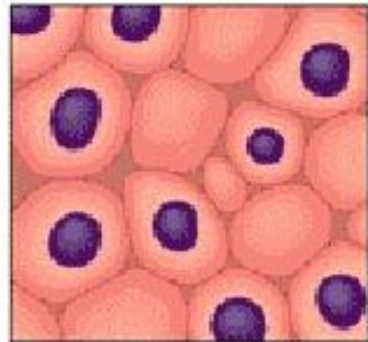
Hladký sval

- **Hladký sval (viscerálny)**
 - vo vnútorných orgánoch a cievach
 - žiadne priečne pruhovanie
 - vrstvy pod sliznicami v respiračnom a tráviacom systéme, kruhové vrstvy v stenách ciev, sfinktery (zvieracie)
- **Svalové vlákna hladkých svalov – vretenovitý tvar (fuziformný - širší v strede a tenší na koncoch) - 20-500 μm dĺžka**
- Pomer aktínu a myozínu $\sim 6 : 1$ v kostrovom svale, $\sim 4 : 1$ v srdcovom svale a $\sim 16.5 : 1$ v hladkom svale
- Vyššia elasticita a schopnosť sa natiahnuť pričom si stále zachovať kontraktilitu v porovnaní s priečne pruhovanými svalmi

Hladký sval čreva

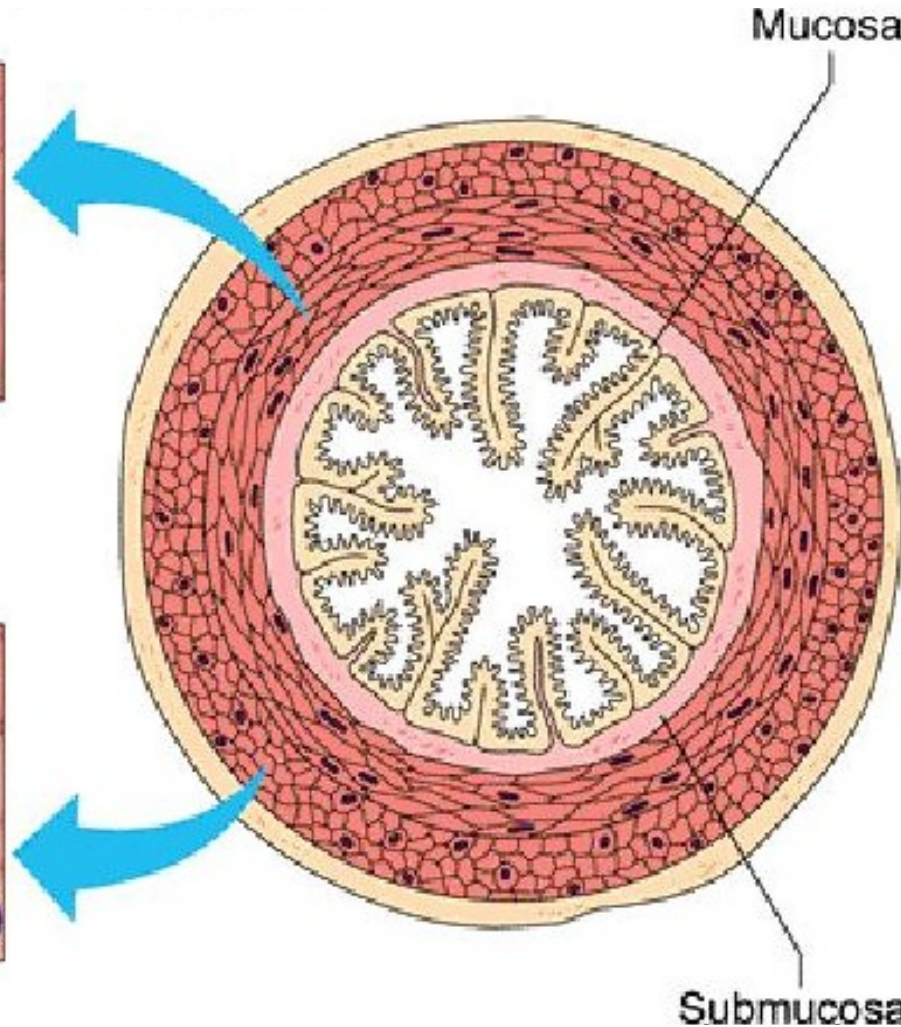
Kruhové vrstvy okolo čreva vykonávajú kontrakciu segmentáciu

Circular layer of smooth muscle



Longitudinal layer of smooth muscle

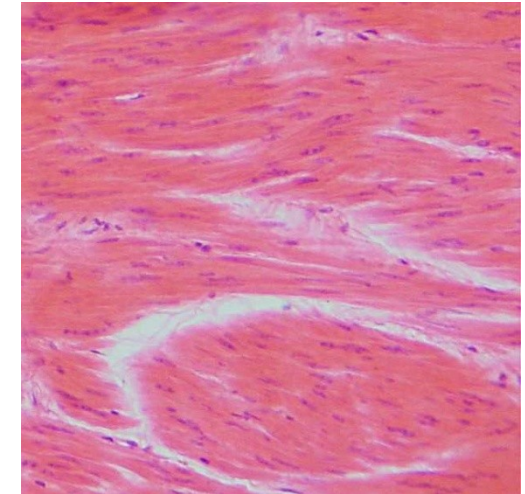
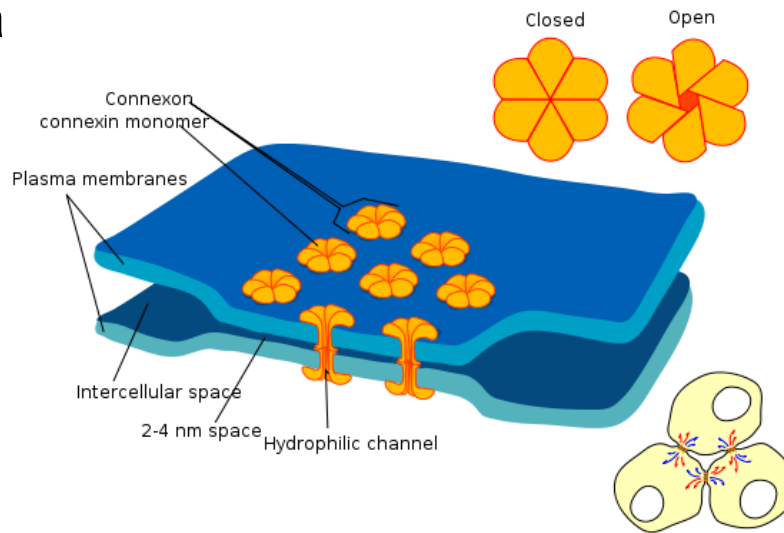
© BENJAMIN/CUMMINGS



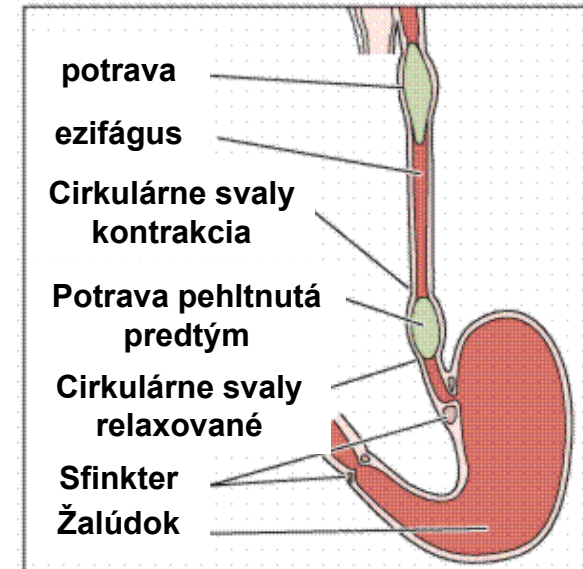
Longitudinálne vrstvy pozdĺž čreva vykonávajú vlnité kontrakcie

Kontrakcia hladkého svalu

- Kontrakcia a relaxácia - posun **myozínových a aktínových filamentov** - hormóny, neurotransmitery, lieky
- **Jednotkový hladký sval** – tkanivo je spojené do **syncytia** - autonómny nervový systém inervuje jednu bunku vo vrstve či zväzku
 - akčný potenciál sa šíri cez spojenia typu „gap junctions“ na susedné bunky (a všetky sa kontrahujú spoločne).



Peristaltika



- Hladký sval sa môže kontrahovať **spontánne**
 - je myogénny (vďaka dynamike iónových kanálov alebo pacemakrovým bunkám – napr. intersticiálne Cajal-ove bunky gastrointestinálneho traktu).

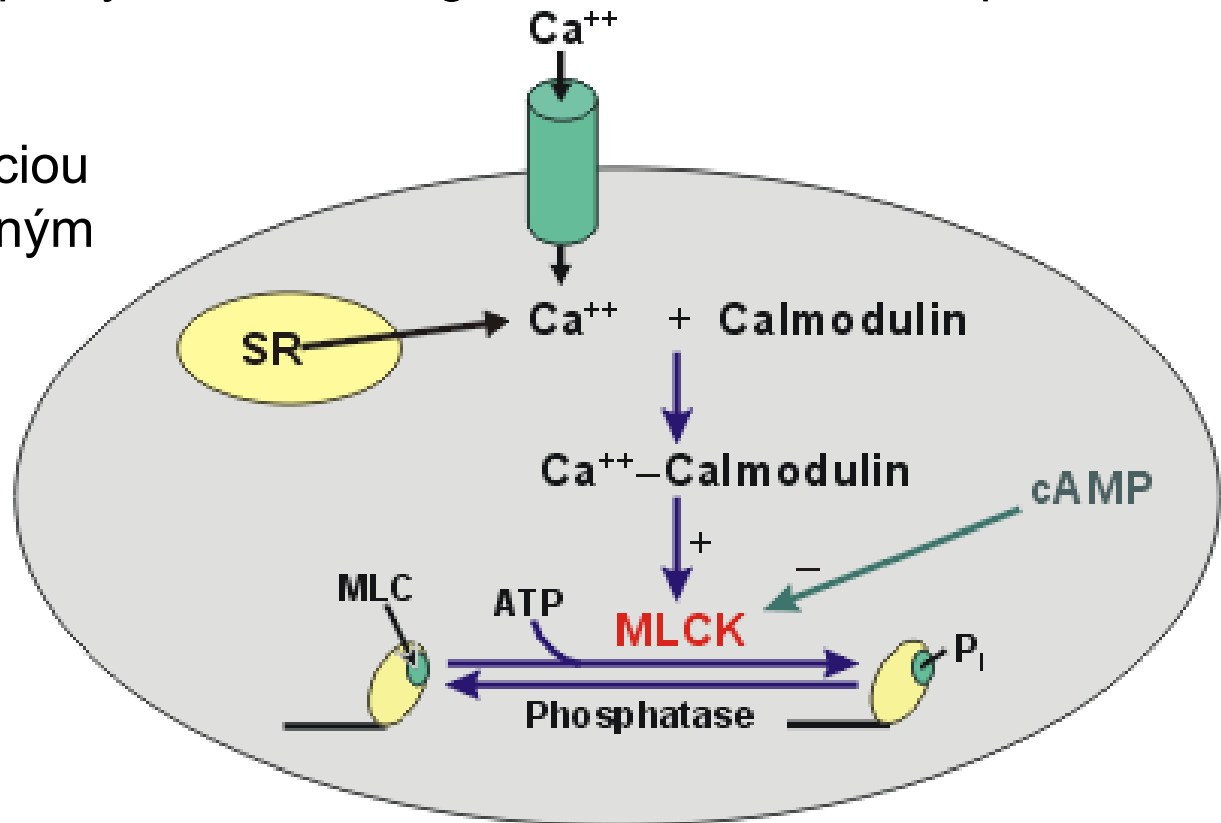
Kontrakcia hladkého svalu

Viacjednotkový hladký sval – autonómny nervový systém sú inervované jednotlivé bunky (jemná kontrola a graduovaná odpoveď podobne ako pri skeletálnom svale) - trachea, elastické artérie, iris oka).

Žiadny troponín, ale namiesto neho je **Kalmodulín** regulačným proteínom v hladkom svale, taktiež tropomyozín nemá regulačnú funkciu, ako v priečne pruhovaných svaloch.

Kontrakcia sa začína Ca-regulovanou fosforyláciou myozínu, nie Ca-aktivovaným troponínovým systémom.

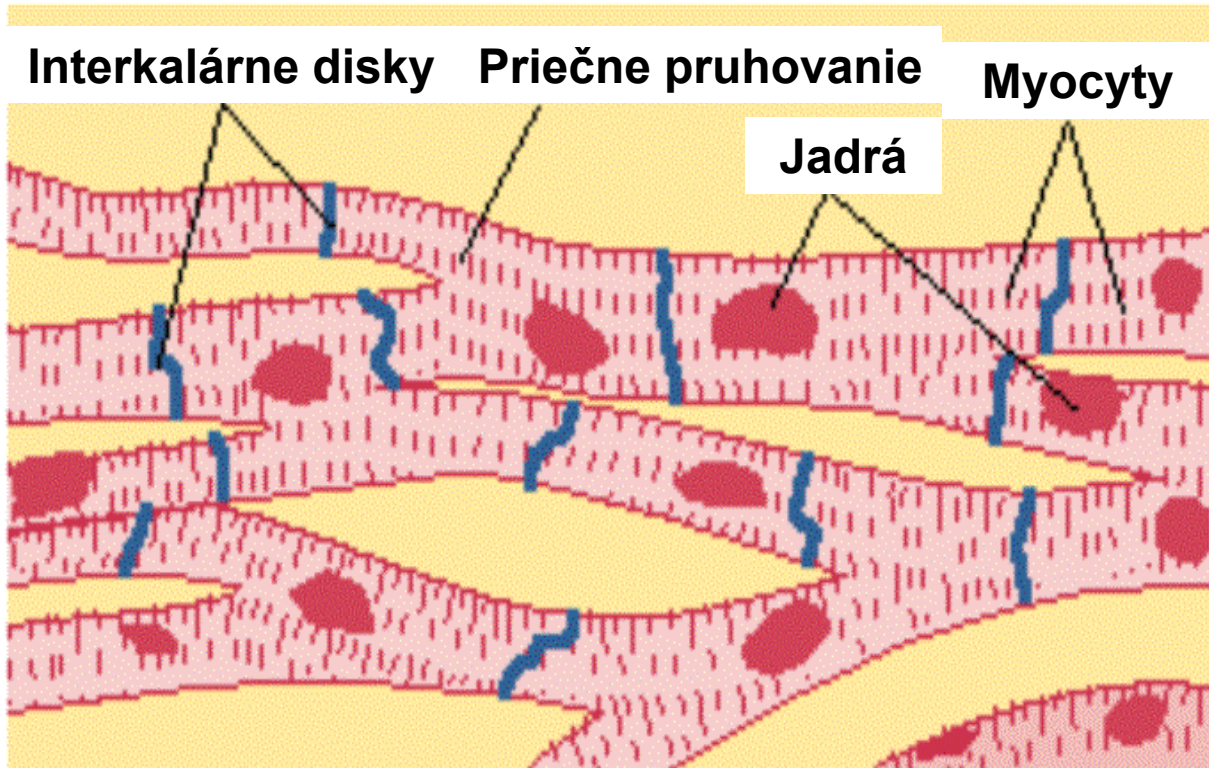
Tenké filamenty hladkého svalu obsahujú najmä aktín, tropomyozín, a kaldesmon.



Srdcový sval

- **Srdcový sval**

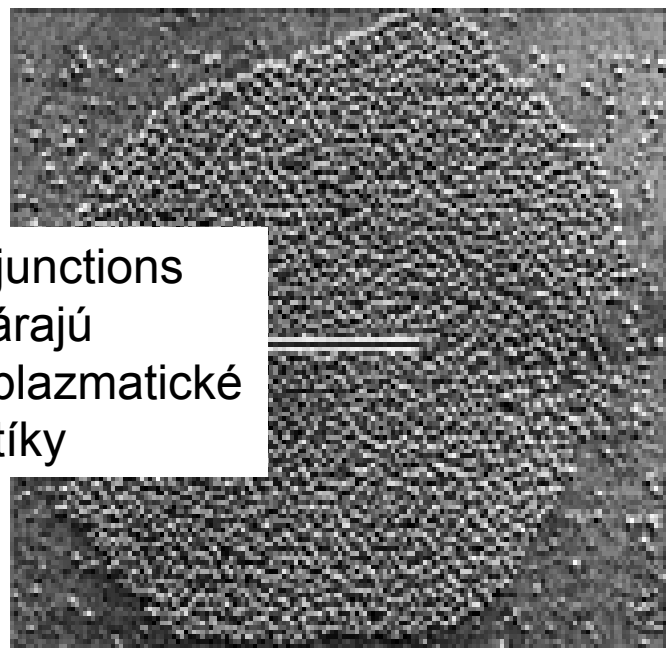
- oveľa kratšie bunky než kostrový sval
- bunky srdcového svalu sa vetvia a spájajú spojeniami gap junctions - **interkalárnymi diskami** - elektrochemické impulzy prechádzajú na všetky prepojené bunky – funkčná sieť **syncytium** (bunka pracujú ako celok).



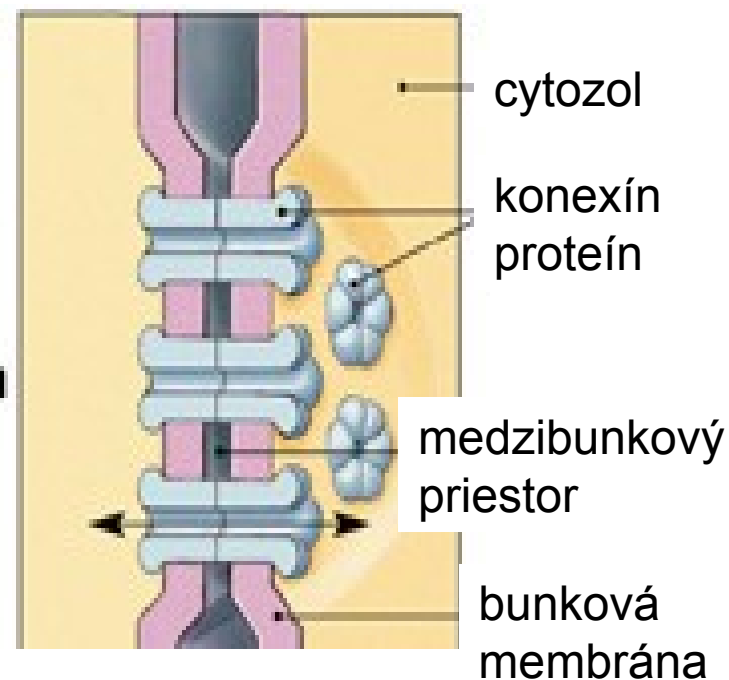
Mierne **priečne pruhovanie** - podobné, ale nie totožné usporiadanie myofilamentov, ako má kostrový sval.

Mnohé bunky srdcového svalu sú **myogénne** - impulzy vznikajú vo svale, neprichádzajú z nervového systému – srdcový rytmus.

Schéma interkalárneho disku srdcového svalu

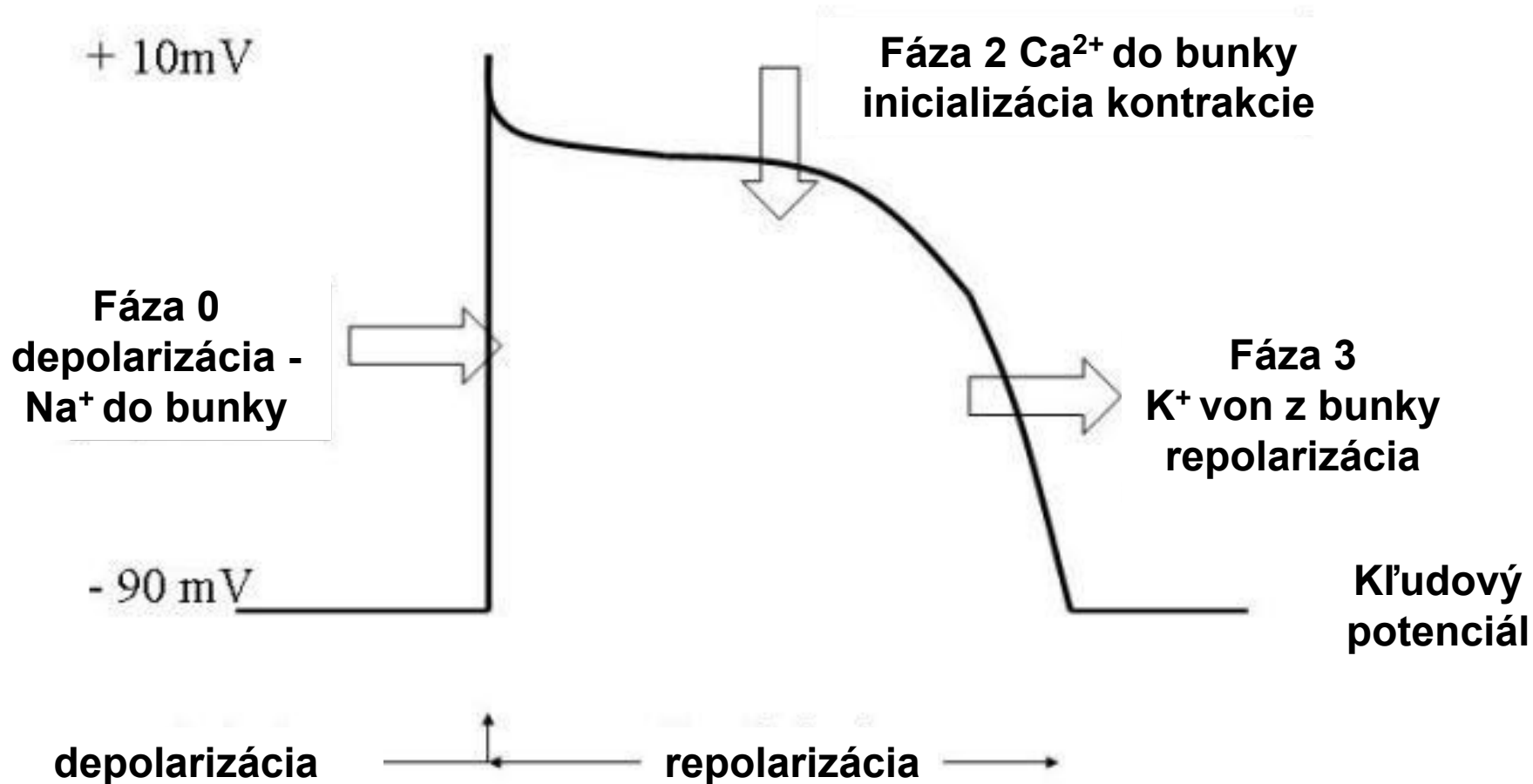


Gap junction

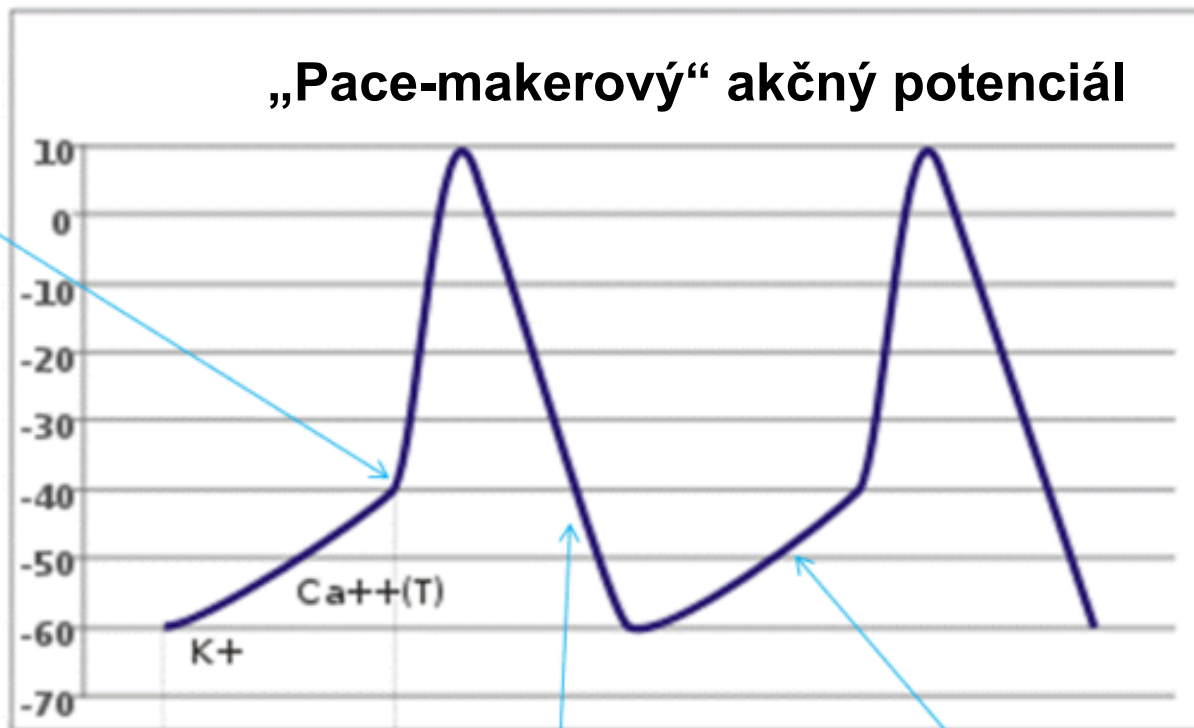


- V myocytoch srdcového svalu, influx Na spustí **Ca-indukované Ca uvoľnenie** - Ca^{2+} influx cez **napätím-riadené Ca kanály** v sarkoleme, čo vedie k uvoľneniu Ca^{2+} zo sarkoplazmatického retikula.

Monofázický akčný potenciál (srdcový sval)



„Pace-makerový“ akčný potenciál



Fáza 0

- Ca^{2+} (in)
- $I_{\text{Ca-L}}$ (Ca long)

Prepotenciál

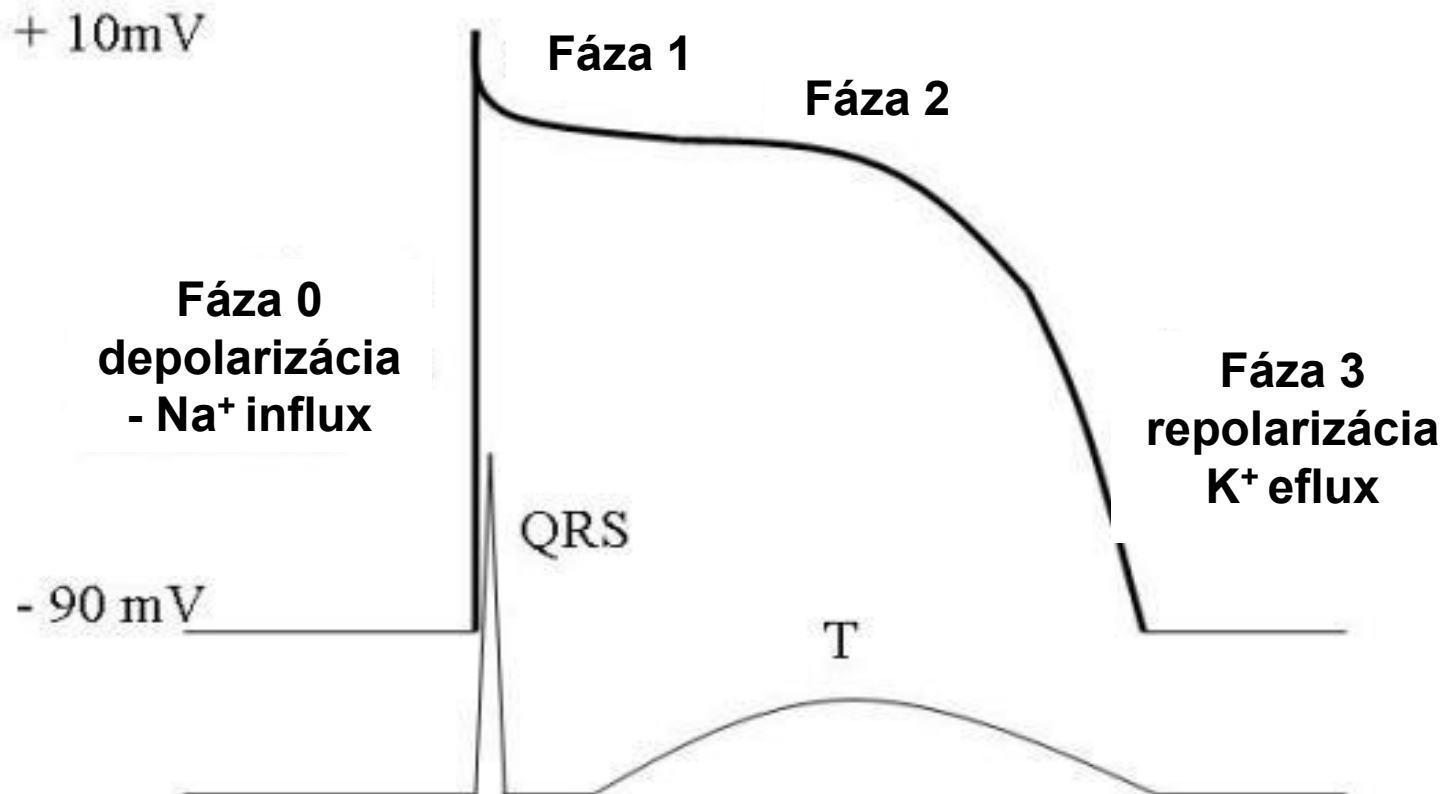
Fáza 3

- K^+ (out)
- I_{KS} (K slow delayed rect.)
- I_{KR} (K rapid delayed rect.)

Fáza 4

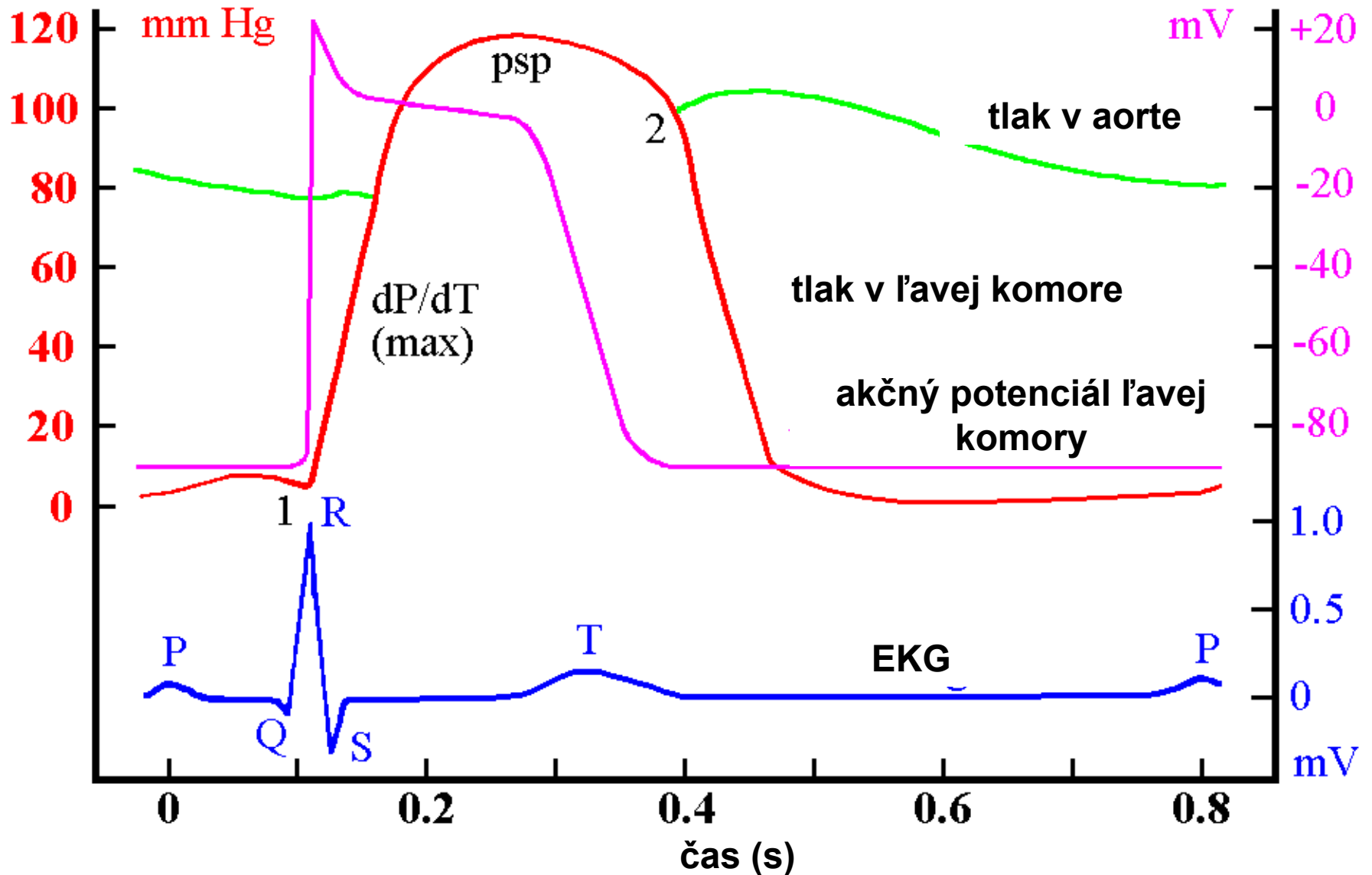
- 1° - Na^+ (in): I_f
- 2° - Ca^{2+} (in):
 - $I_{\text{Ca-T}}$ (Ca transient)
 - $I_{\text{Ca-L}}$ (Ca long)

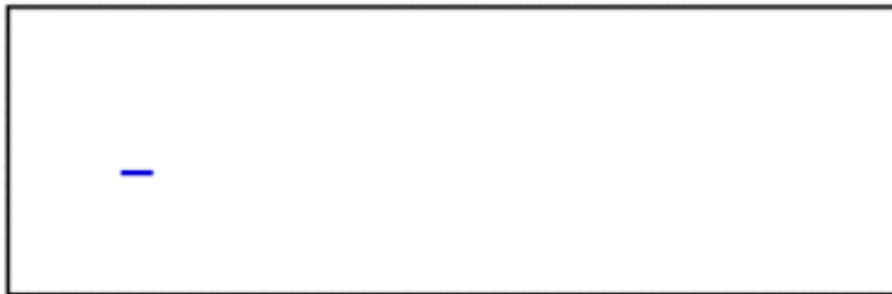
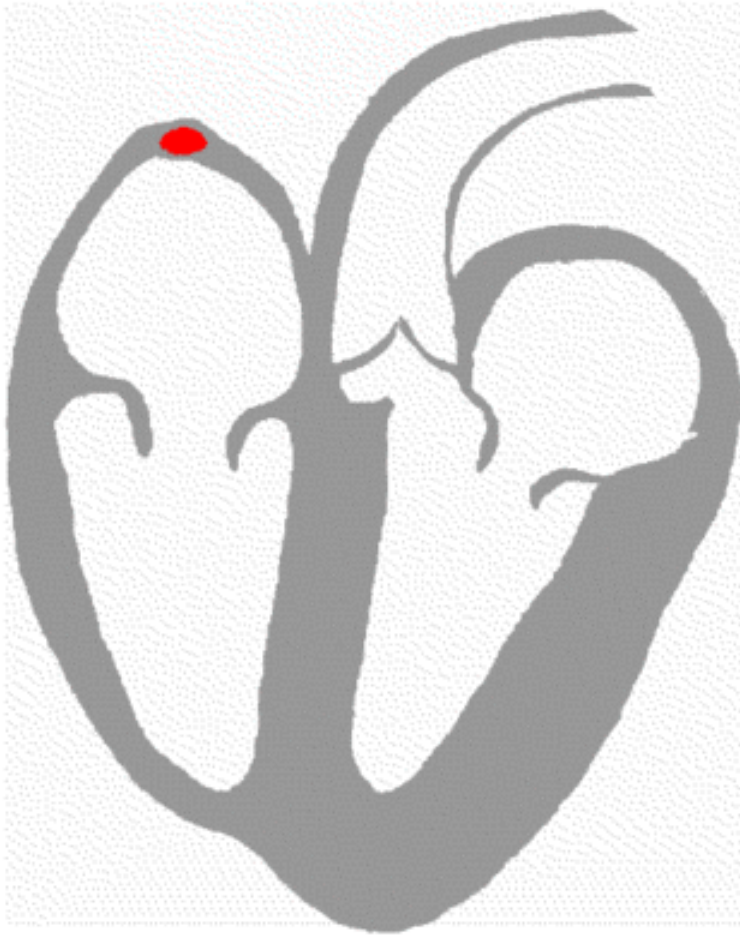
Monofázický akčný potenciál (srdcový sval) a jeho vzťah k EKG krivke



**Dlhotrvajúci akčný potenciál – dlhá refraktórna perióda
– žiadna časová sumácia - žiadna tetanická kontrakcia**

Vzťah elektrických a mechanických charakteristík srdcovej akcie





Šírenie sa elektrickej aktivity (akčného potenciálu) zo sinoatriálneho uzla do tkaniva srdcových predsiení a atrioventrikulárneho uzla a potom do tkaniva srdcových komôr so záznamom príslušného EKG.

ZHRNUTIE

- **Základné vlastnosti svalov a svalového tkaniva**
- **Kostrový, srdcový, hladký sval a rozdiely medzi nimi**
- **Štruktúra svalu a svalovej bunky (myofibrila, sarkomera, aktín, myozín, ...)**
- **Motorická jednotka, nervo-svalová platnička, acetylcholín, platničkový potenciál**
- **T - tubuly, sarkoplazmatické retikulum, akčný potenciál svalového vlákna**
- **Kontrakcia svalu, jej kontrola (tropomyozín), úloha Ca^{2+} iónov a ATP**
- **Svalové trhnutie, superpozícia, sumácia, tetanus (vlnitý, hladký), rigor mortis**
- **Jednotkový a viacjednotkový hladký sval, spojenie „gap junction“, syncytium**
- **Štruktúra tkaniva srdcového svalu, interkalárne disky, Ca vyvolané uvoľnenie Ca**
- **Akčný potenciál srdcového svalu, jeho trvanie, sumácia kontrakcie**