

# BIOMECHANIKA

**Mgr. Veronika Málková**

**Mgr. Adam Vajčner**



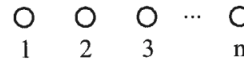
# BIOMECHANIKA

- **Mechanika aplikovaná v biologii**
- **Fyzika, matematika, fyziologie, aj.**
- **Struktura a chování pohybového systému – interní x externí interakce**
- **Systém:**
  - **množina předmětů, dějů, jevů spolu souvisejících přesně definovaným způsobem a vytvářejících jednotný celek.**
  - **systémové části s charakteristickými vlastnostmi → spojením do celku transformace kvality vlastností dle požadavků systému.**
- **Struktura systému:**
  - **účelné uspořádání prvků, částí nebo složek systému (vztah mezi prvky).**

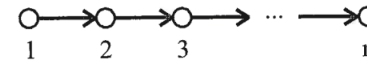
# BIOMECHANIKA

## ➤ Vztahy mezi prvky:

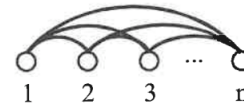
a) neuspořádaná síť



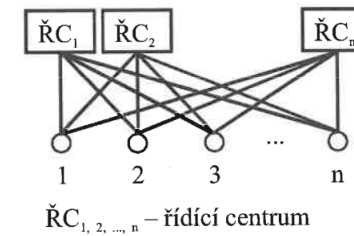
b) řetězová struktura



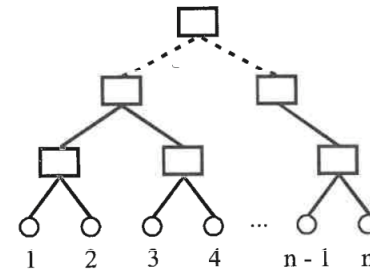
c) všeobecná vazba



d) polycentrální struktura



e) hierarchická struktura



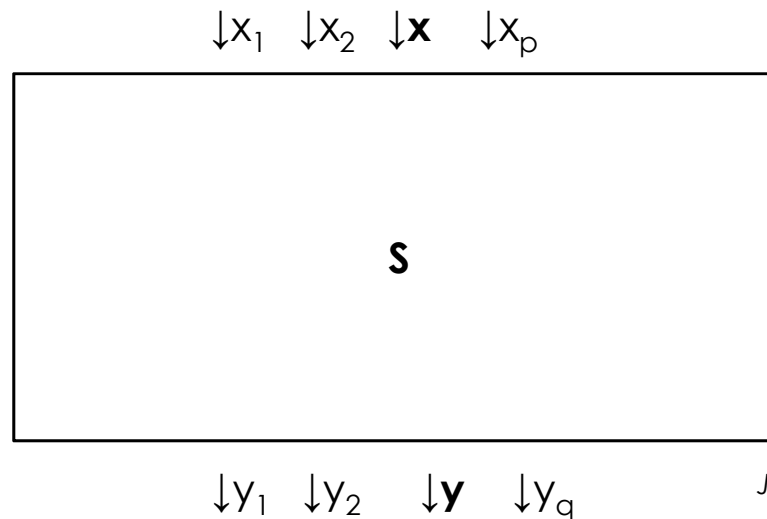
## ➤ Chování systému:

- souhrn funkcí výkonných orgánů (efektorů), kterými systém komunikuje s okolním prostředím (vztah systém – okolí).

# BIOMECHANIKA

Množina vstupů:  $X = \{X_1; X_2; \dots; X_p\}$

Množina výstupů:  $Y = \{Y_1; Y_2; \dots; Y_q\}$



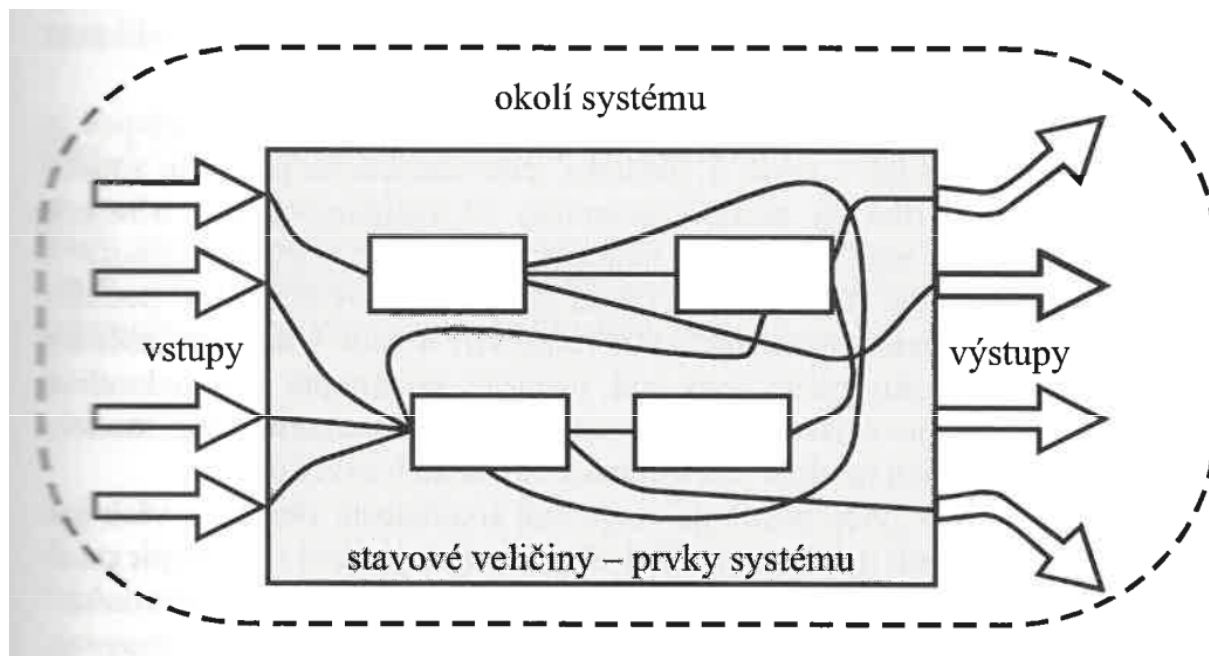
Např. vstupy (déšť, vítr, teplota) = nastartování termoregulačních mechanismů a chování, aj.

Zvedání břemene (info o m, T, povrchu → prostorová a časová sumace ke ↑ svalové síly → zvednutí břemene).



# BIOMECHANIKA

- Pohybový systém a okolí:
- Vstupy a výstupy ovlivňovány okolím a současně působí na okolí systému



Janura, 2003



# BIOMECHANIKA

- ▶ **Otevřený systém:**
  - ▶ výměna informací s okolím,
  - ▶ při pohybu mechanická interakce PS a okolí vykonávaná za určitým záměrem (vnější prostředí x vznik uvnitř systému).
- ▶ **Uzavřený systém.**
- ▶ **Dynamické chování pohybového systému:** určováno v závislosti na plynoucím čase.
- ▶ **Výstupní veličiny ovlivněny:** vstupními parametry, uspořádáním systému v daném momentě a funkcí prvků, tj. stavem systému.
- ▶ **Katastrofa:** výrazná negativní změna v chování pohybového systému vzniklá v důsledku různých vlivů, které se liší velikostí a intenzitou.

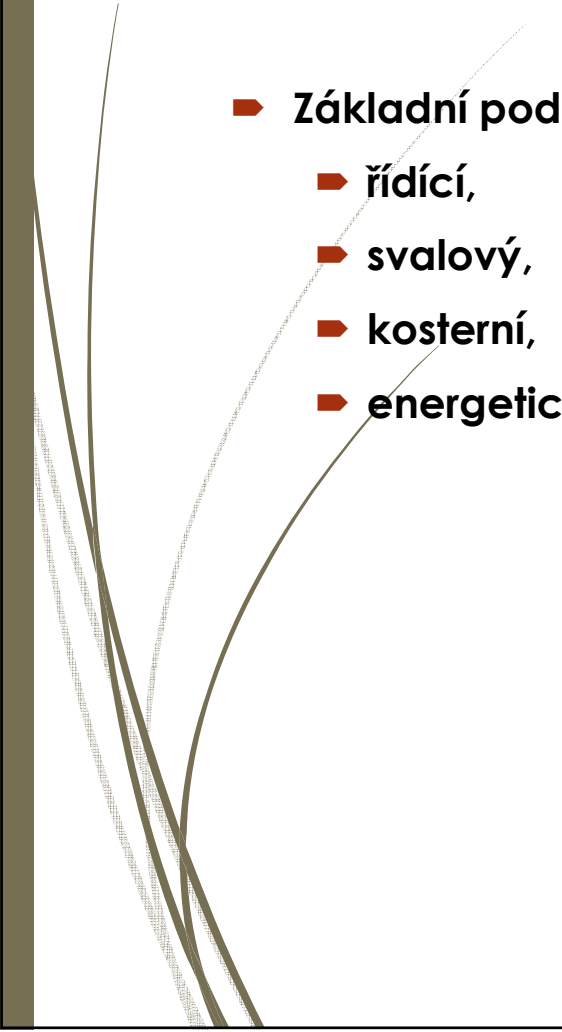


# BIOMECHANIKA

- ▶ **Teorie chaosu:**
  - ▶ **lidské tělo (orgány) nefunguje na podkladě lineárních vzorců klasické mechaniky (složitě věci jsou vytvořené z jednoduchých prvků, které lze získat zpětnou analýzou složitých věcí).**
  - ▶ **funkce na podkladě nelineární dynamiky = teorie chaosu (vlastnosti orgánu složeného z mnoha buněk nelze automaticky přebírat z vlastností daných buněk).**
  - ▶ **nelinearita obsahuje obrovské množství možných vztahů (variabilita) mezi jednoduchými jevy.**
  - ▶ **velmi malá změna na úrovni dílčího systému může výrazně ovlivnit celý systém.**

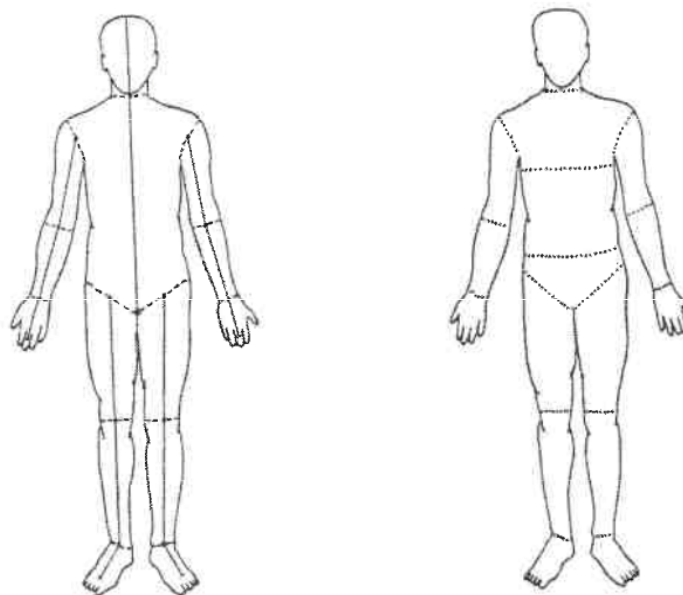


# BIOMECHANIKA

- **Základní podsystémy:**
    - řídicí,
    - svalový,
    - kosterní,
    - energetický subsystém.
- 

# BIOMECHANIKA

- ▶ **Tělní segmenty:**
  - ▶ rozčlenění těla v závislosti na typu úkonu,
  - ▶ nejčastěji 14: hlava a krk, trup (horní, střední a spodní), párové segmenty: paže, předloktí, ruka, stehno, bércec, noha.



Janura, 2003

# BIOMECHANIKA

## ► Tělní segmenty:

- Relativní hmotnost segmentu: reálné naměřené údaje převedeny na procentuální vyjádření hmotnosti segmentu vzhledem k celkové hmotnosti těla.

Tab. 1 Relativní hmotnost segmentů (Karas et al., 1990)

Segment	Sušanka, 1980	Variační rozpětí u publikovaných údajů
Hlava	0,074	0,0568 – 0,0886
Trup	0,448	0,4028 – 0,5070
Stehno	0,124	0,0970 – 0,1473
Bérec	0,046	0,0399 – 0,0530
Noha	0,016	0,0114 – 0,0210
Nadloktí	0,029	0,0259 – 0,0336
Předloktí	0,017	0,0153 – 0,0228
Ruka	0,007	0,0054 – 0,0100

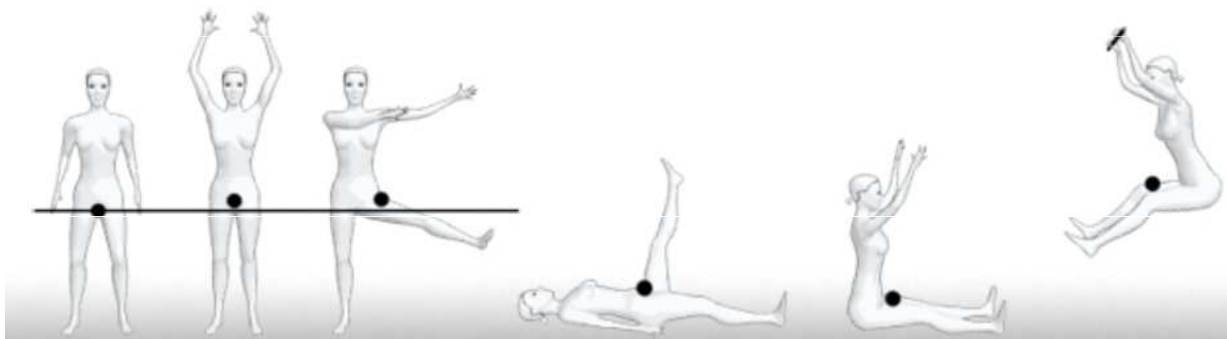
Janura, 2003

11

- Radioizotopická metoda: určení hmotnosti segmentů na základě měření velikosti úbytku záření nízké intenzity při jeho průchodu segmentem. Ze získaných hodnot vypočítány koeficienty umožňující výpočet hmotnosti segmentu dle rovnice  $m_i = B_0 + B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2$

# BIOMECHANIKA

- ▶ **COM (centre of mass, těžiště): bod, ze kterého působí výsledná tíhová síla, jenž vzniká součtem tíhových sil působících na jednotlivé tělní segmenty (analytická metoda)**
  - ▶ změna vzájemné polohy jednotlivých segmentů → změní se také umístění celkového těžiště těla (pro některé polohy leží celkové těžiště dokonce mimo lidské tělo), děje se tak i při chůzi
  - ▶ **těžiště = působiště gravitační síly tělesa, těžnice = přímka procházející těžištěm**



[https://is.muni.cz/do/1451/e-learning/kineziologie/elportal/pages/segmenty\\_teziste.html](https://is.muni.cz/do/1451/e-learning/kineziologie/elportal/pages/segmenty_teziste.html)

# BIOMECHANIKA

## ► Těžiště těla:

- v základní anatomické poloze těla = těžiště ve výši S2 – S3 cca 4 – 6 cm před přední plochou obratlových těl (ne obecné pravidlo, umístění se odvíjí od tělesných proporcí a ani v klidu není stálé = mění se působením životních pochodů v organismu),
- u mužů díky rozdílné anatomické ve srovnání se ženami zpravidla posunuto o 1 – 2 % výš,
- těžiště jednotlivých segmentů: segment nahrazován geometrickým modelem (komolý kužel, válec, koule) = homogenní rozložení hmoty,
- těžiště leží na ose daných modelů (úsečka s krajními body ve středech kloubů ohraničujících segment),
- bérce, noha a ruka: těžiště dělí segment v poměru 2:3 (menší část u proximálního konce), nadloktí, předloktí a stehno 4:5, segment nohy dán hlezenním kloubem, špičkou a patou = těžiště v těžišti trojúhelníku s vrcholy v daných bodech.



# BIOMECHANIKA

## ► Moment setrvačnosti:

- slouží k určení rozložení hmoty vzhledem k ose otáčení při rotaci těla nebo segmentů (osa otáčení prochází těžištěm segmentu),
- $J = m \cdot r^2$  ( $m$  – hmotnost těla,  $r$  – vzdálenost hmotného bodu od osy otáčení),
- lidské tělo: soustava hmotných bodů:  $J_o = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_{io}^2$  ( $m_i$  – hmotnost  $i$ -té části tvořící lidské tělo,  $r_{io}$  – vzdálenost  $i$ -té části od osy  $O$  (prochází těžištěm těla),
- $J$  ovlivňuje velikost svalové síly potřebné ke zrychlení nebo zpomalení pohybu,
- různý moment setrvačnosti podle polohy osy otáčení při stejném těžišti.

vertikální  
osa



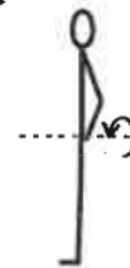
$$J \doteq 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

pravolevá  
osa



$$J \doteq 12 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

předožadní  
osa



$$J \doteq 13 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

**Obr. 2.6** Hodnota momentu setrvačnosti pro osy procházející těžištěm těla (upraveno podle Hochmuth in Karas et al., 1990)

Janura, 2003

# BIOMECHANIKA

- ▶ **Steinerova věta: osa neprochází těžištěm segmentu těla:**

$$J_p = J_o + m \cdot p^2$$

( $J_o$  – moment setrvačnosti vzhledem k ose o procházející těžištěm segmentu,  $m$  – hmotnost segmentu,  $p$  – vzdálenost od osy procházející těžištěm a osy k ní rovnoběžné, ke které vztahujeme moment setrvačnosti)

- ▶ **Kinematické řetězce: sledujeme pouze změny v poloze řetězců.**
- ▶ **Kinetické řetězce: sledujeme navíc i síly, které změny způsobují.**
- ▶ **Biokinematická dvojice: vazba mezi dvěma sousedními segmenty.**
- ▶ **Biokinematický řetězec: doplnění dvojice o další segment.**
- ▶ **Biokinematická smyčka: segmenty tvořící mnohoúhelník, jeho jsou vrcholy kinematické dvojice.**

# BIOMECHANIKA

## ► Biokinematický řetězec:

- **otevřený:** bez smyčky,
- **uzavřený:** alespoň jedna smyčka,
- **smíšený:** smyčka + otevřený řetězec,
- **jednoduchý:** na každém segmentu jedna nebo dvě biokinematické dvojice,
- **složený:** alespoň jeden segment tvořen více než dvěma biokinematickými dvojicemi.
- **biomechanismus:** UKŘ + k jednomu jeho členu se vztahuje pohyb těla nebo se kterým je tělo v kontaktu.

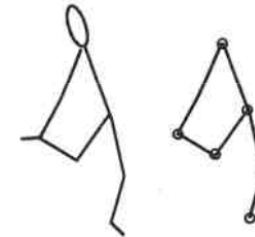
a) otevřený biokinematický řetězec



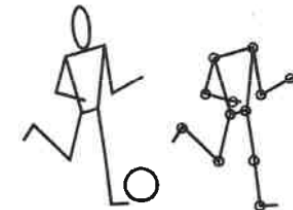
b) uzavřený biokinematický řetězec



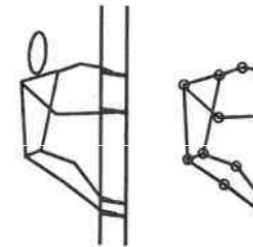
c) smíšený biokinematický řetězec (jednoduchý)



d) složený biokinematický řetězec



e) biomechanismus

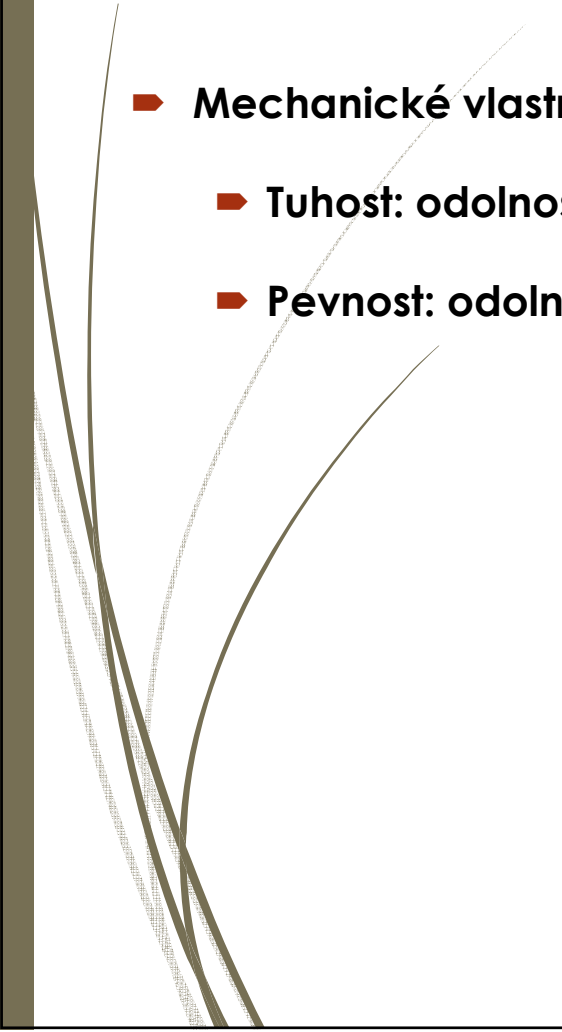


Obr. 2.8 Příklad biokinematických řetězců a biomechanismu

Janura, 2003



# BIOMECHANIKA

- ▶ **Mechanické vlastnosti tkání:**
    - ▶ **Tuhost:** odolnost proti zatížení,
    - ▶ **Pevnost:** odolnost proti porušení,
- 

# BIOMECHANIKA

## ► Mechanické vlastnosti tkání:

- viskoelasticita,
- nehomogenita,
- anizotropie (materiály vykazují v různém směru zatěžování různé chování),
- adaptabilita.

## ► Mechanická impedance: odolnost materiálů proti mechanickému silovému působení:

- hmotnost – energie se akumuluje,
- elasticita – energie se akumuluje,
- plasticita – disipace energie (přeměna mechanické energie na jiný druh energie),
- viskozita – disipace energie.

# BIOMECHANIKA

- ▶ **Mechanické vlastnosti tkání:**
- ▶ **Kvantitativní vyjádření:**
  - ▶ **Elasticity: tuhost (Youngův modul pružnosti) [E] = MPa**
    - ▶  $E = \sigma / \varepsilon$ ,  $\sigma$  – napětí ( $\sigma = F/S$ ),  $\varepsilon$  – relativní deformace materiálu ( $\varepsilon = l - l_0 / l_0$ )
  - ▶ **Čím větší modul pružnosti, tím menší deformace**
  - ▶ **Viskozita: součinitel kinematické vazkosti**
  - ▶ **Plasticita: součinitel tření**

# BIOMECHANIKA

- **Struktura kosti:**
- **Základní kostní hmota a kostní buňky**
  - organická složka matrix – 35% (kolagen, nekolagenní proteiny, kostní buňky), dodává kosti pružnost
  - anorganická složka matrix – 65% (minerální soli), dodává kosti tvrdost
- **Periost:**
  - kryje povrch kosti (výjimkou kloubní plochy pokryté chrupavkou a nebo místa úponu svalu či kloubního pouzdra)
  - 2 vrstvy:
    - zevní fibrózní (longitudinálně uspořádané svazky vaziva)
    - vnitřní kambiová (vazivové buňky, nepravidelná vazivová vlákna – část do kosti ve formě Sharpeyových vláken; cévy – do kosti Volkmannovými kanálky, tam anastomózují, dále se větví na systém jemných cév a probíhají v Haversových kanálcích; nervová vlákna – z periostu do kosti Haversovými kanálky)



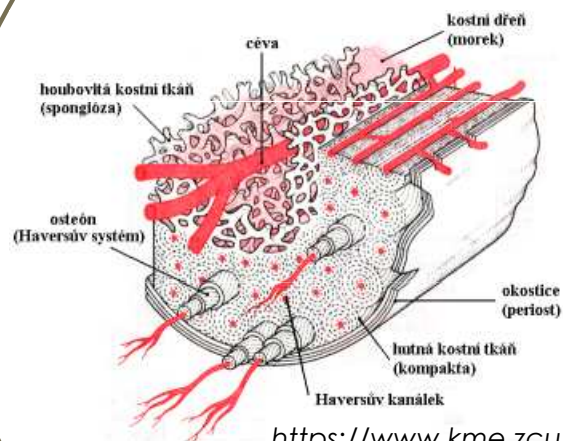
# BIOMECHANIKA

- ▶ **Endost:** tenká vnitřní vrstva preosteoblastů + malé množství vazivové tkáně.
- ▶ **Kostní tkáň:**
- ▶ **Vláknitá** – vzájemně propojené trámce, mezi nimi kostní buňky
  - ▶ tvorba ve vývojovém období, nachází se v oblasti úponů vazů a šlach, v lebečních švech, v pouzdře nitroušního labyrintu
  - ▶ v prvním roce života nahrazována postupně lamelózní kostí
- ▶ **Lamelózní:**
  - ▶ Haversovy lamely – tvoří koncentrické vrstvy, v jejich středu longitudinálně probíhají Haversovy kanálky s cévami a nervy = Haversův systém = osteon (základní strukturální stavební jednotka kompaktní kosti), mezi sousedními systémy malé lakuny s osteocyty
  - ▶ intersticiální lamely – zbytky Haversových systémů, kolem kterých se vytvořily nové Haversovy lamely, vyplňují prostor mezi osteony

# BIOMECHANIKA

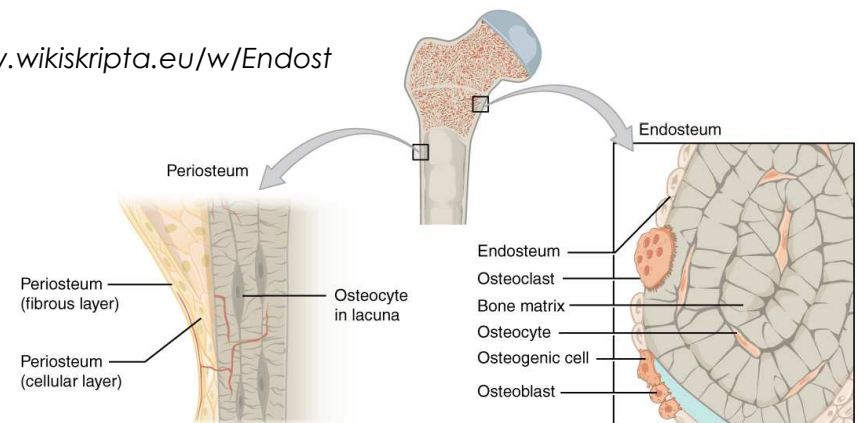
## ► Lamelózní:

- **substantia spongiosa:** z trámců (trabekul) uspořádaných do prostorové struktury tvarem odpovídající působení mechanických sil na kost
  - v koncové části dlouhých kostí, diploe kostí klenby lební, krátké kosti
- **substantia compacta:** kalcifikovaná z celých 80%, fce mechanická a ochranná
  - těla dlouhých kostí, povrch koncových částí dlouhých kostí, povrch krátkých kostí, lamina externa et interna kostí klenby lební

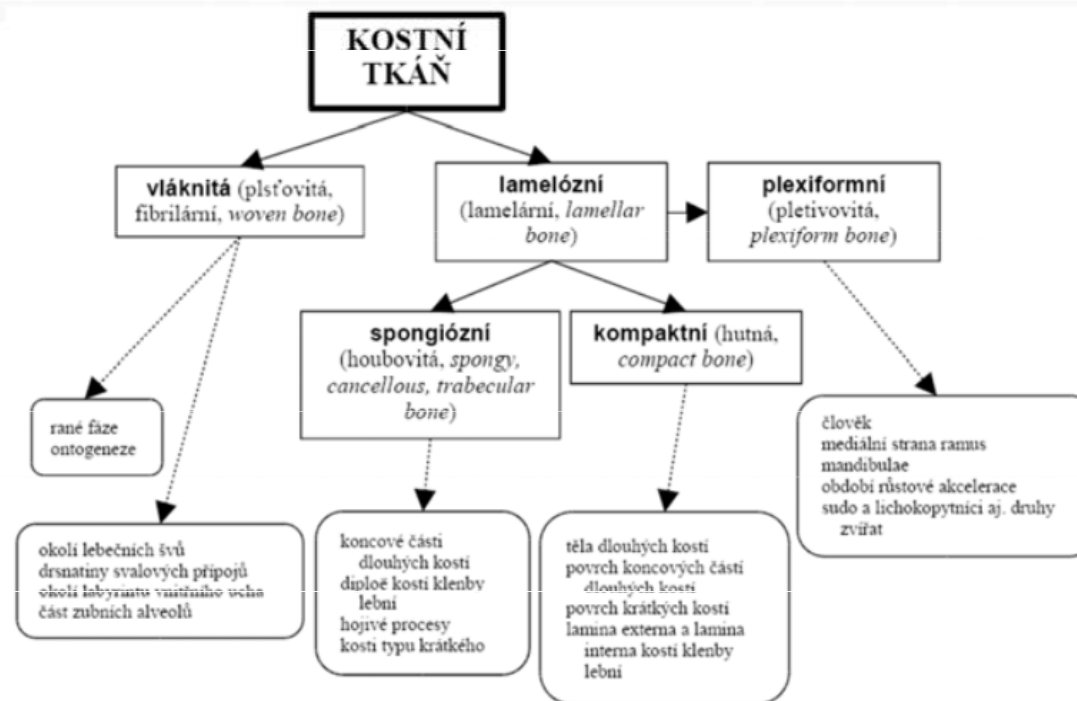


<https://www.kme.zcu.cz/kmet/bio/ksstavba.php>

<https://www.wikiskripta.eu/w/Endost>



## Základní typy kostní tkáně





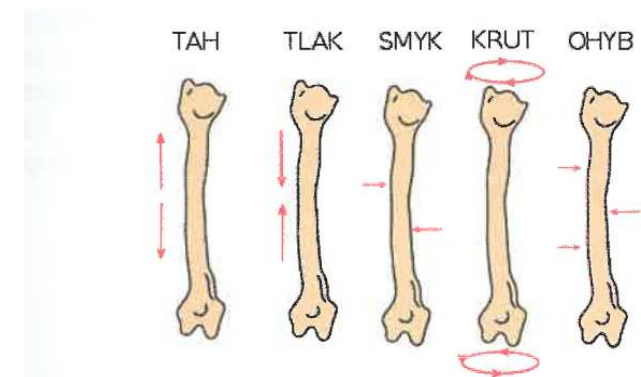
# BIOMECHANIKA

## ► Kostní buňky:

- **osteoblasty (nevyvinuté kostní buňky):** jednojaderné buňky vzniklé z mezenchymálních kmenových buněk; syntéza a mineralizace mezibuněčné hmoty
- **osteocyty (vyvinuté kostní buňky):** osteoblasty začleněné do nově vytvořené mezibuněčné hmoty a později uzavřeny mineralizovanou kostí; syntéza a obnova mezibuněčné hmoty, mechanoreceptory (čidla tlaku a tahu)
- **osteoklasty:** velké mnohoaderné buňky; hlavní funkce je resorpce kostní hmoty

# BIOMECHANIKA

- **Kostní architektonika: uspořádání průběhu trámců spongiózy v kosti**
  - **uspořádání trámců odpovídá působení silokřivek, v jejichž směrech je kost namáhána; systémy trámců probíhajících v určitých směrem se nazývají kostní trajektorie**
  - **vnitřní síly (svalová kontrakce) x vnější síly (tíhová síla)**
  - **mechanická zátěž → mohutnější trámce; nezátížené trámce → ztenčování a odbourávání**
  - **namáhání kosti: tah, tlak, ohyb, smyk, krut, kombinované, cyklické**



Obr. 3 Základní druhy namáhání v biomechanice

Hájek a kol., 2018

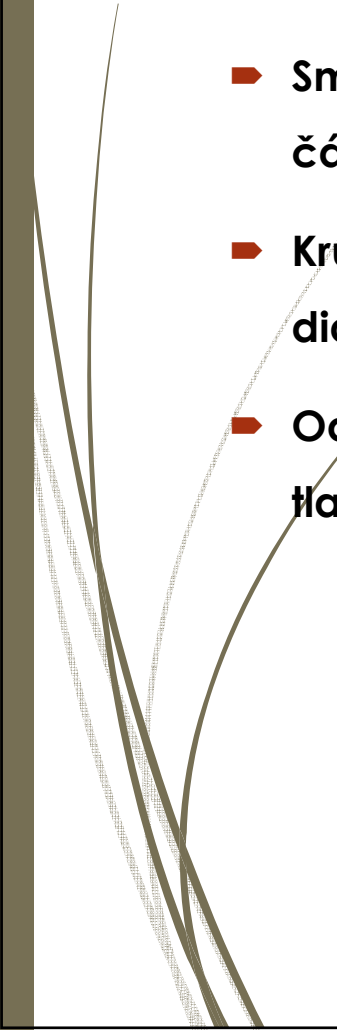


# BIOMECHANIKA

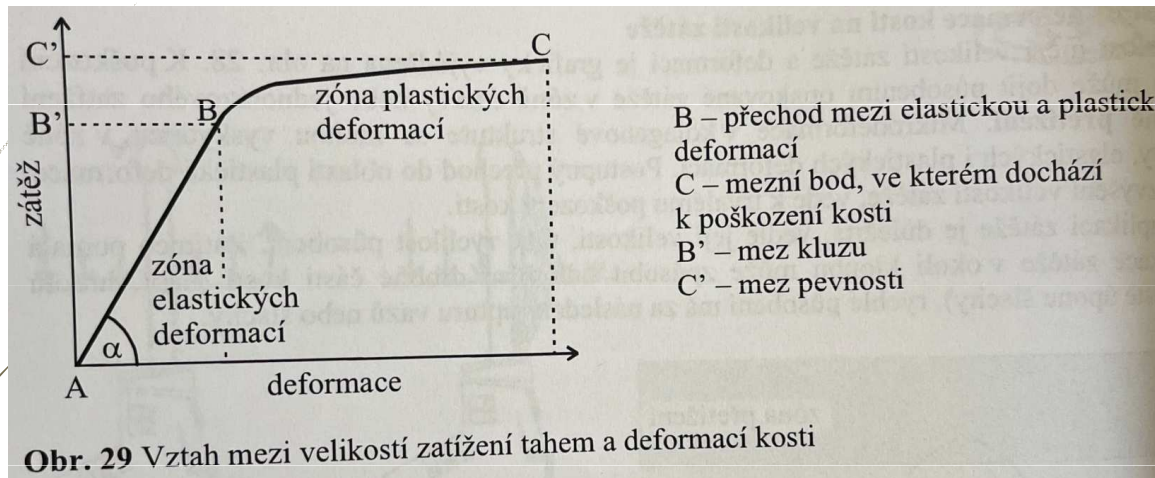
- ▶ **Tah:** zúžení a prodloužení kosti, max. účinek v rovině kolmé na směr působení síly
- ▶ **Tlak:** zkrácení a rozšíření kosti, max. účinek v rovině kolmé na směr působení síly
- ▶ **Ohyb:** kombinace tahu a tlaku působících na různých stranách kosti:
  - ▶ 2 mechanismy:
    - ▶ 3-bodový ohyb
    - ▶ 4-bodový ohyb



# BIOMECHANIKA

- ▶ **Smyk:** síla působí kolmo na povrch kosti, posun částí proti sobě při poranění
  - ▶ **Krut:** rotační pohyb kolem podélné osy, diagonální zlomenina pod úhlem 45 st.
  - ▶ **Odolnost zatížení větší při působení tahu a tlaku!**
- 

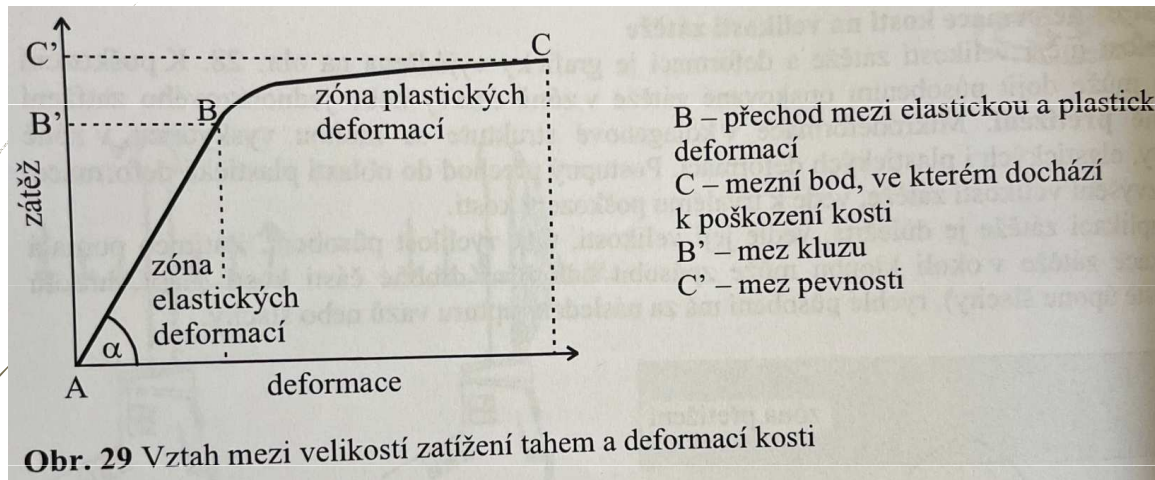
# BIOMECHANIKA



- B – mez trvalé deformace, umístěná na přechodu elastických (vratné změny) a plastických (zachování deformace) deformací.
- B' – velikost zátěže na jednotku plochy způsobující nevratné deformace kosti.
- C – mezní bod, ve kterém dochází k poškození kosti.
- C' – mez pevnosti.
- Obsah plochy pod křivkou (míra zátěže, velikost deformace, velikost uložené energie) = pevnost materiálu.



# BIOMECHANIKA



- Sklon křivky v elastické oblasti = hodnota tuhosti (míra schopnosti odolávat deformaci).
- $Tg\alpha$  - modul pružnosti
- Hookovo rozpětí – oblast křivky s lineárním vztahem mezi zátěží a deformací.
- Hookův zákon:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  ( $\sigma$  normálové napětí, E modul pružnosti,  $\varepsilon$  relativní deformace) = pružná deformace materiálu působením zevní síly.



# BIOMECHANIKA

- ▶ **Wolffův zákon:** zevní tvar, vnitřní struktura i funkční zatížení kosti jsou ve vzájemné harmonii. Při jakékoliv změně dochází k přestavbě kosti, jejímž cílem je dosažení původního stavu rovnováhy.
- ▶ **Osteogenní stimul:** dynamická intermitentní zátěž generovaná tahem svalů, gravitace.
- ▶ **Úroveň pohybové aktivity, věk, zdravotní stav, výživa.**
- ▶ **Osteoporóza.**

# BIOMECHANIKA

- ▶ Šlachy: přenos svalové síly na kost/chrupavku.
- ▶ Vazy: stabilizace kloubu, v krajních situacích vymezují pohyblivost kloubního spojení.
- ▶ 70% voda, 30% pevná složka (z toho  $\frac{3}{4}$  kolagen),
- ▶ 1. elastinová vlákna: pružná deformace až 150%, menší mez pevnosti (3 MPa).  
Překročení protažení nad danou mez: nevratná deformace a ztráta pružnosti.
- ▶ 2. kolagenní vlákna: základní stavební jednotka, větší pevnost a tuhost (zatížení 150 MPa), protažení pouze 10%.
- ▶ Ne vždy výše dané zastoupení (vazivo spojující meziobratlové oblouky větší množství elastické složky – skoro  $\frac{3}{4}$ ).



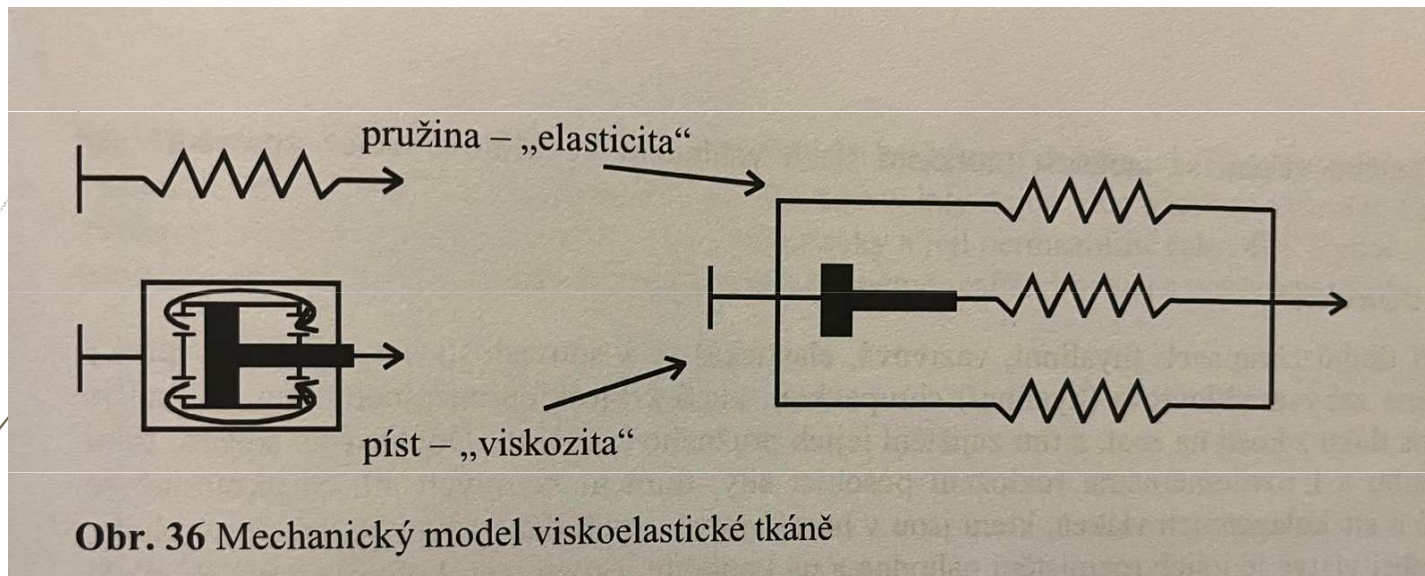
# BIOMECHANIKA

- ▶ **Uspořádání kolagenních vláken:**
  - ▶ **Šlachy:** kolagenní vlákna paralelně.
  - ▶ **Vazy:** neuspořádaná struktura (závisí na fci vazy).
- ▶ **Odolnost v tahu, menší odolnost v tlaku a smyku.**
- ▶ **Větší obsah elastinu + rozdíl v uspořádání vláken kolagenu: menší pevnost, větší křehkost vazy.**
- ▶ **Šlachy: jeden směr dominantní, který určuje působení tahové síly svalu.**
- ▶ **Pevnost šlachy v tahu 2x větší než daného svalu.**



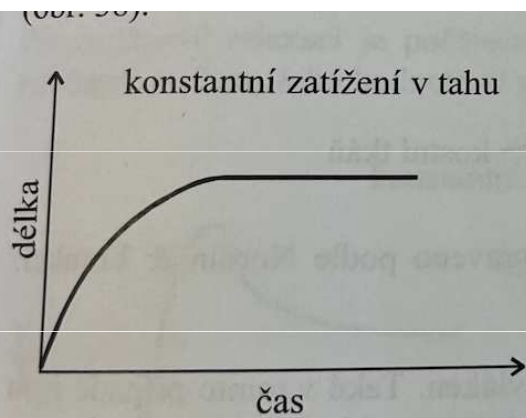
# BIOMECHANIKA

- ▶ **Viskoelasticita – základní vlastnost šlach a vazů.**
  - ▶ **Viskózní tekutina: zabraňuje okamžité deformaci (narozdíl od pouze elastických látek).**
  - ▶ **Creep (tečení): pozvolné protahování materiálu v čase při konstantní zátěži → asymptomatická deformace materiálu až do okamžiku zastavení deformace (pozn. efektivnější pomalejší provedení pohybu do konečné polohy a následná výdrž při konstantním napětí v rámci progresu flexibility)**
  - ▶ **Napěťová relaxace: pokles napětí po jeho počátečním nárůstu při konstantní délce.**

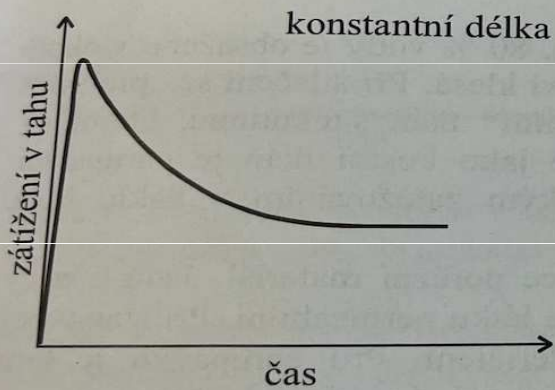


**Obr. 36** Mechanický model viskoelastické tkáně

Janura, 2003



**Obr. 37** Creep – závislost délky na čase při konstantní zátěži v tahu (podle Nordin & Frankel, 1989)

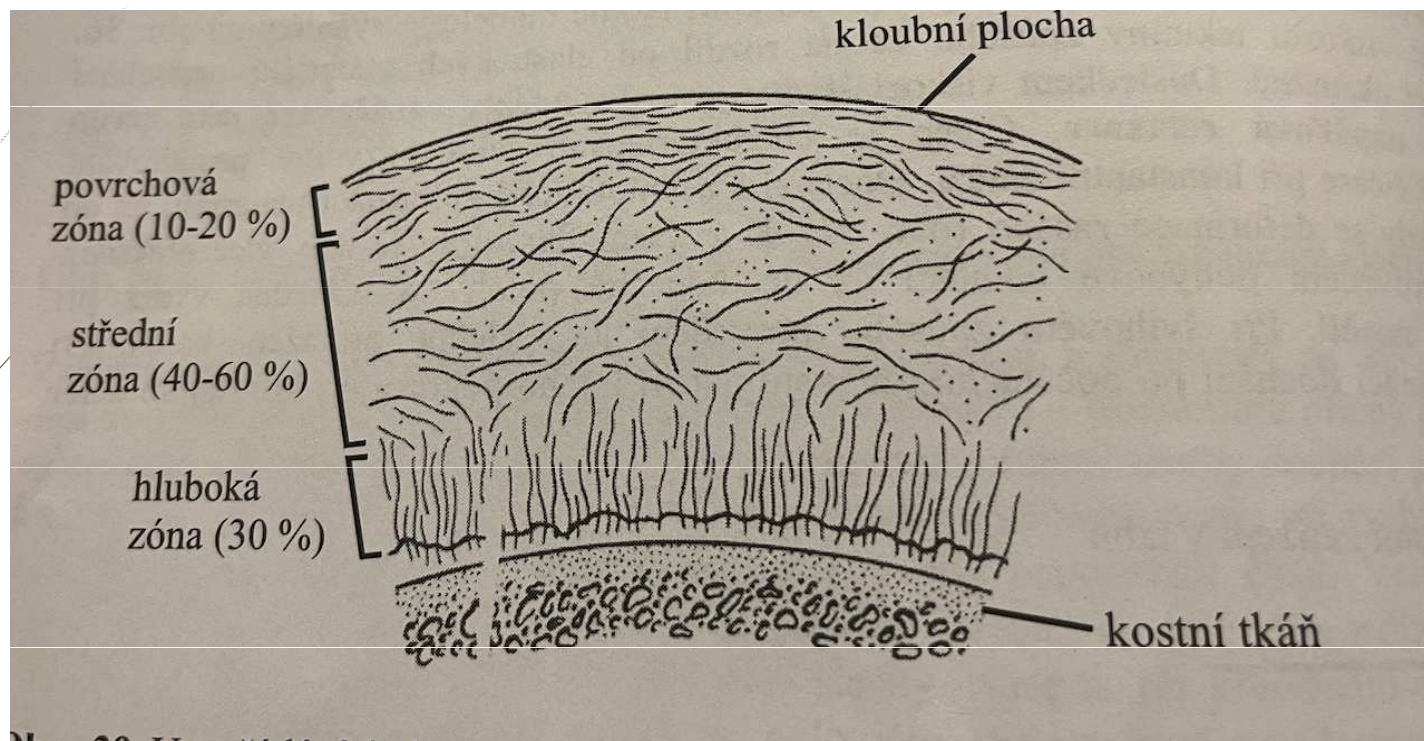


**Obr. 38** Napěťová relaxace – závislost zátížení v tahu na čase při konstantní délce

# BIOMECHANIKA

- Chrupavka: pojivová tkáň složená z chondrocytů + základní hmoty (vláknitá složka = pružnost a pevnost, proteoglykany)
- bezcévná, nemá inervaci;
- perichondrium: vazivový obal tvořící pouzdro chrupavky (obsahuje cévy a drobné nervy), zpevňuje chrupavku,
- typy: hyalinní (krytí kloubních ploch), vazivová, elastická
- hyalinní: přenos tlaku z kosti na kost = zajištění pružného kontaktu (snížen tření, rovnoměrné rozložení působící síly, tlumení nárazů).
  - síť kolagenních vláken (několik vrstev):
    - povrchová (rovnoběžně s povrchem),
    - hlubší (náhodné uspořádání),





Janura, 2003

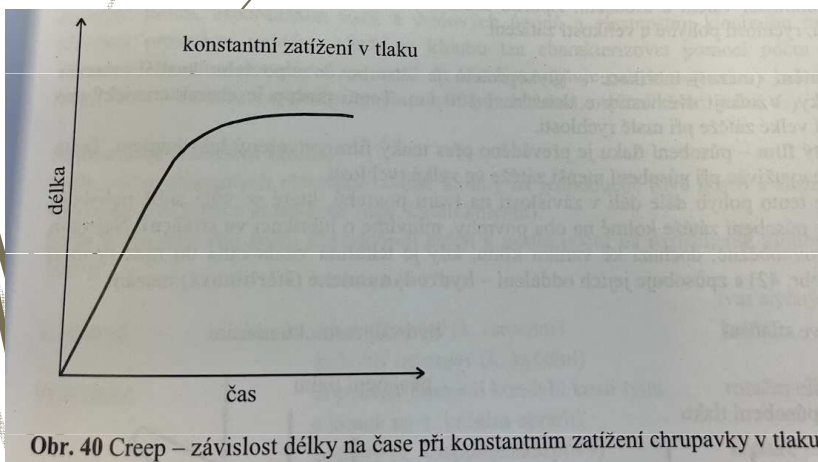


# BIOMECHANIKA

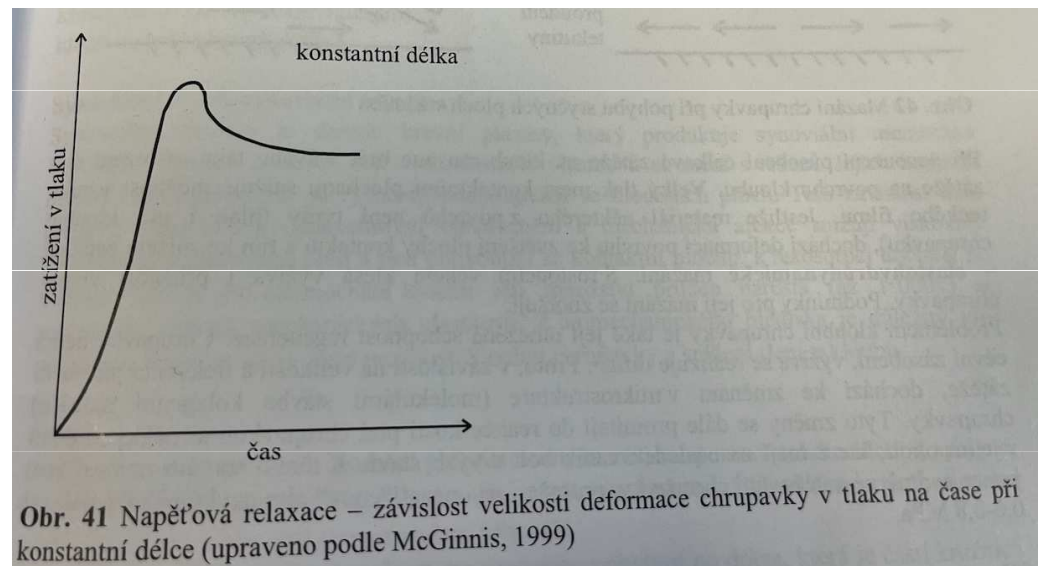
- ▶ vrstva různě široká,
- ▶ síť vláken tenčí než u vazivových vláken, architektonika odpovídá zatížení chrupavky,
- ▶ 60% voda, 80% v okolí povrchu chrupavky (směrem do hloubky klesá),
- ▶ porézní, permeabilní tkáň,
- ▶ anizotropní, nehomogenní, fyziologické zatížení v tlaku,
- ▶ mez pevnosti v tahu cca 5% pevnosti kosti,
- ▶ pružnost závislá na obsahu vody, permeabilitě a tloušťce vrstvy chrupavky,
- ▶ při zatížení kloubu dochází k pružné deformaci chrupavky a vytlačení tekutiny do kloubní štěrbiny; při odlehčení proudí tekutina zpět do chrupavky.

# BIOMECHANIKA

- ▶ **Konstantní zátěž (tlak) neznamena konstantní deformaci, deformace zvyšována v čase s postupným vytlačováním tekutiny do okamžiku jejího úplného vytlačení.**
- ▶ **Napěťová relaxace: tlak na počátku způsobí náhlý nárůst zatížení chrupavky, postupem času zatížení konstantní díky zvětšení plochy (deformace).**



Janura, 2003



# BIOMECHANIKA

- ▶ **velmi nízká úroveň látkové výměny a anaerobní typ metabolismu → poraněná chrupavka v kloubní dutině poměrně dlouho přežívá (zvláště v mladším věku) a může i pomalu růst, zároveň důvody špatného hojení chrupavky (větší defekty nereparabilní)**
- ▶ **v dětství: opotřebení chrupavky kompenzováno mírným růstem**
- ▶ **dospělosti:**
  - **chrupavka neroste, buněk ubývá → opotřebení částečné, kompenzováno po určitou dobu zmnožením amorfní mezibuněčné hmoty**
  - **změna složení amorfní hmoty → u starších osob ztráta viskozity mezibuněčné hmoty + snížení schopnosti chrupavky vázat vodu → snížení chrupavky, obnažení vazivových vláken povrchových vrstev a jejich vystavení přímému mechanickému tlaku kloubních ploch → iniciální proces artrózy**



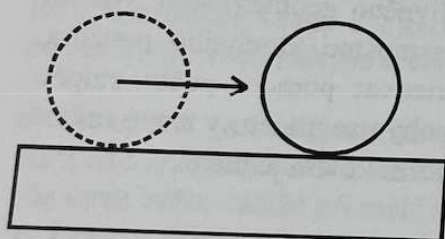
# BIOMECHANIKA

- Kloubní spojení:
- Typy:
  - víceosé: kulový volný/omezený
  - dvouosé: elipsovitý, sedlový
  - jednoosé: válcový, kladkový
  - plochý
  - tuhý

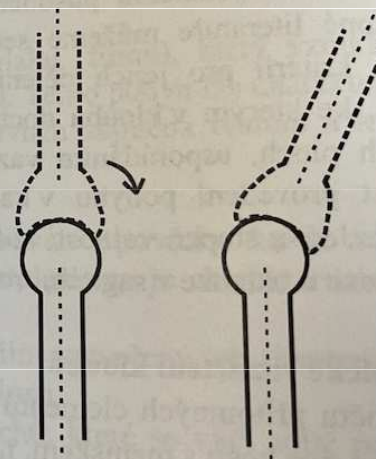
# BIOMECHANIKA

- **Kloubní spojení:**
- **Pohyby v kloubu:**
  - kombinace lineárního a úhlového pohybu, úhlový je dominantnější.
  - úhlový pohyb: všechny body na segmentu se pohybují po dráze, která je součástí kružnice (velikost dráhy vyjádřena velikostí úhlu)
  - translační pohyb: všechny body pohybujícího se segmentu urazí stejnou dráhu
  - hlavní pohyby v kulovitém kloubu: FLX/EXT, ADBK/ADDK, ROT
  - cirkumdukce: FLX/EXT+ABDK/ADDK

lineární pohyb (translace)



úhlový pohyb (rotace)



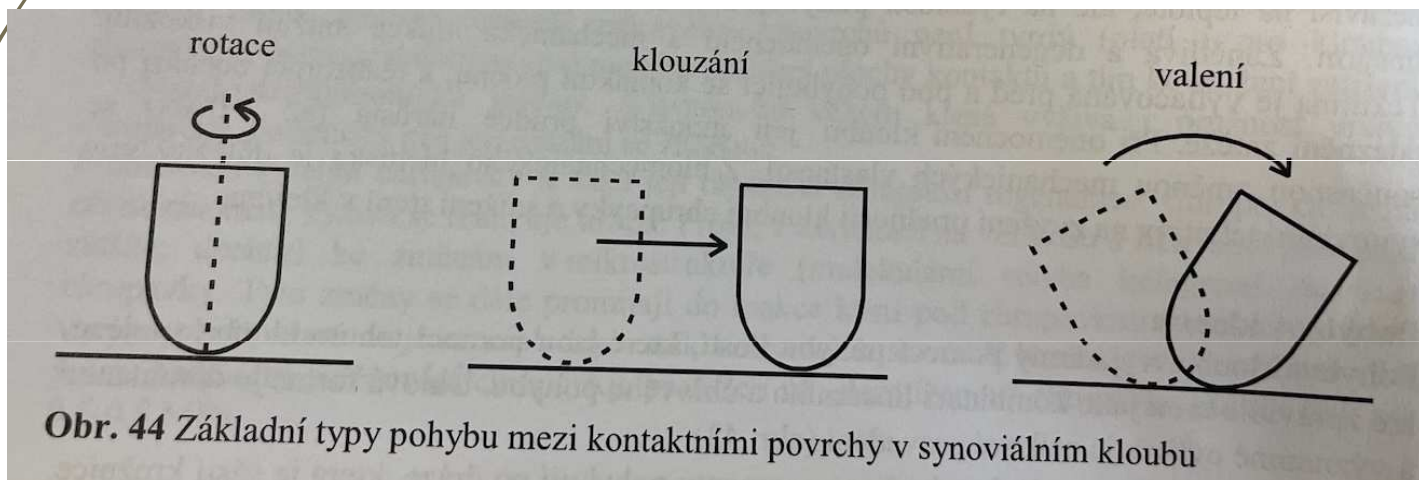
**Obr. 43** Lineární a úhlový pohyb v synoviálním kloubu

Janura, 2003



# BIOMECHANIKA

- Kloubní spojení:
- Pohyby v synoviálním kloubu:
  - rotace: nemění se místo kontaktu
  - klouzání: pohyb kloubních povrchů proti sobě
  - valení: osa otáčení v místě kontaktu ploch



Janura, 2003



# BIOMECHANIKA

## ■ Discus et meniscus articularis:

- útvary z vazivové chrupavky mezi kloubními konci kostí, které na své periferii přechází do vaziva kloubního pouzdra
- discus: plná stejně tlustá destička rozdělující vnitřní prostor kloubu na 2 štěrbiny
- meniscus: tvar srpů, na okrajích vysoký a směrem ke středu kloubní plochy se snižuje, neodděluje artikulující kloubní plochy úplně

## • Fce:

1. vyrovnávají inkongruenci kloubních ploch (femur – tibie)
2. zvyšují pohybové možnosti kloubu
3. shock absorber (pružná deformace při zatížení kloubu a pohlcení části energie)
4. zabránění turbulence

# BIOMECHANIKA

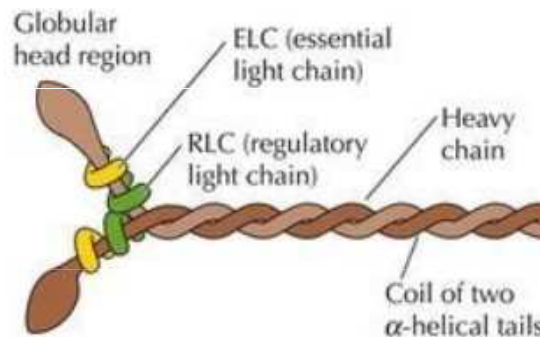
- Svalový systém:
- 40 – 45% hmotnosti těla (55% DKK a 30% HKK)
- Produkce síly při zkrácení svalu
- Vlastnosti:
  - iritabilita,
  - konduktivita,
  - kontraktibilita,
  - adaptabilita.
- Redundance: větší počet svalů pro provedení pohybu než by bylo z mechanického hlediska nutné (počet stupňů volnosti) – stabilita, koordinace, substituce fce poškozeného svalu, aj.
- Agonista, antagonist, synergista, stabilizační svaly, neutralizační svaly

# BIOMECHANIKA

## ► Kosterní svaly:

- svalové vlákno: mnohojaderná cylindrická buňka

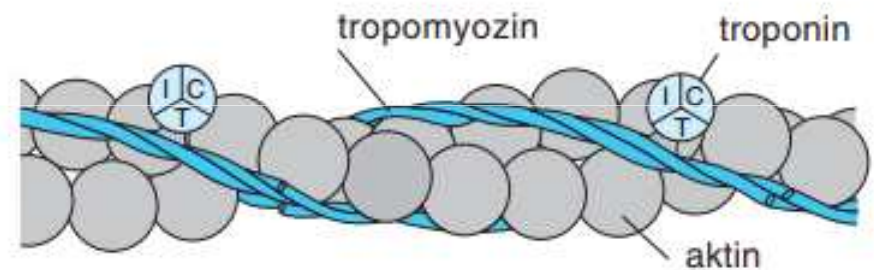
- Vlákna dlouhá 1 – 40 mm
- Buňka obklopena sarkolemou (T-tubuly pro rychlejší přenos AP dovnitř buněk)
- Sarkoplazmatické retikulum (skladování  $\text{Ca}^{2+}$  iontů)
- Kontraktilní aparát: myofibrily v sarkoplazmě tvořené aktinem a myosinem
- Myosin II: dvě kulovité hlavy + dlouhý ocas; těžké a lehké řetězce



<https://docplayer.cz/8770680-Premena-chemicke-energie-v-mechanickou.html>

# BIOMECHANIKA

- **Myosin II:**
  - hlavy – oblast vázající aktin + oblast katalyzující hydrolýzu ATP
- **Aktinové vlákno:**
  - 2 řetězce aktinu, troponin, tropomyosin
  - Tropomyosin – kryje aktivní místa na aktinu
  - Troponin: T – váže se na tropomyosin,  
I – vázán na aktin,  
C – vazebná místa pro  $\text{Ca}^{2+}$

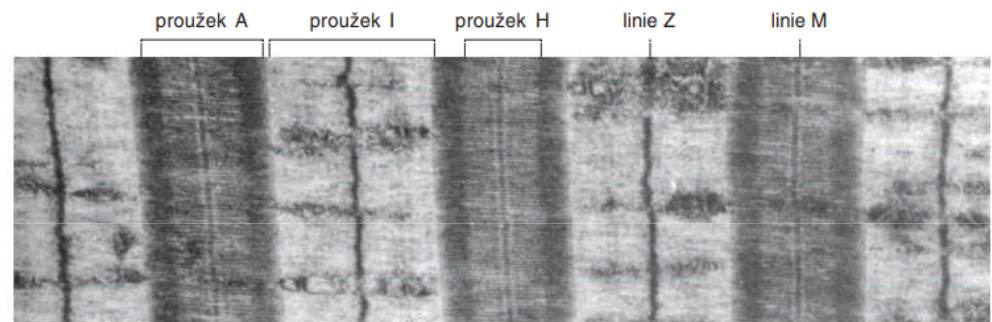


Ganong, 2005

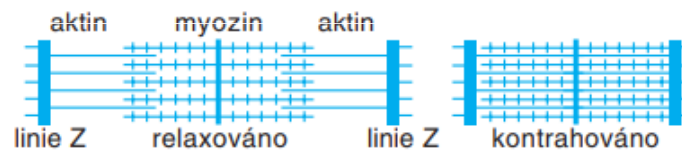
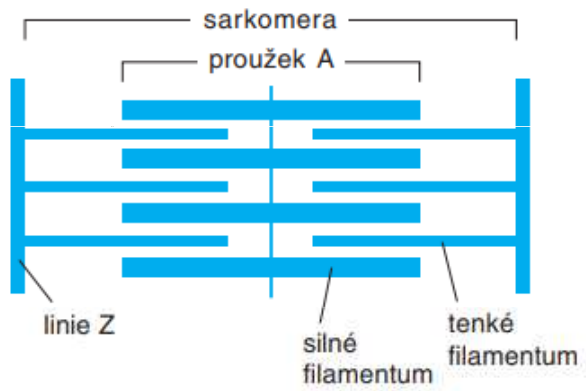
# BIOMECHANIKA

## ► Pruhování:

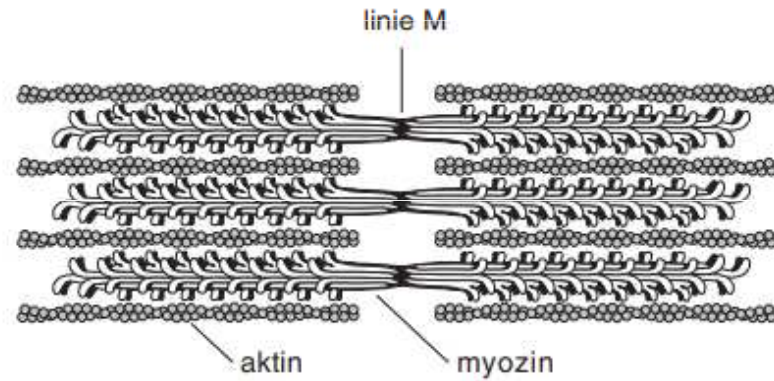
- **A – proužek (anizotropní):** překrývají se myozinová a aktinová vlákna
- **I – proužek (izotropní):** pouze aktinová vlákna
- **H – zóna:** místo, kde jsou přítomna pouze myozinová vlákna (součástí A – proužku a rozdělena M – linií )
- **M – linie:** ukotvují myozinová filamenta v jejich středu
- **Z – linie:** ukotvena aktinová filamenta, rozděluje I – proužek
- **Sarkomera:** funkční jednotka svalu, úsek mezi 2 Z – liniemi



*Ganong, 2005*



Ganong, 2005



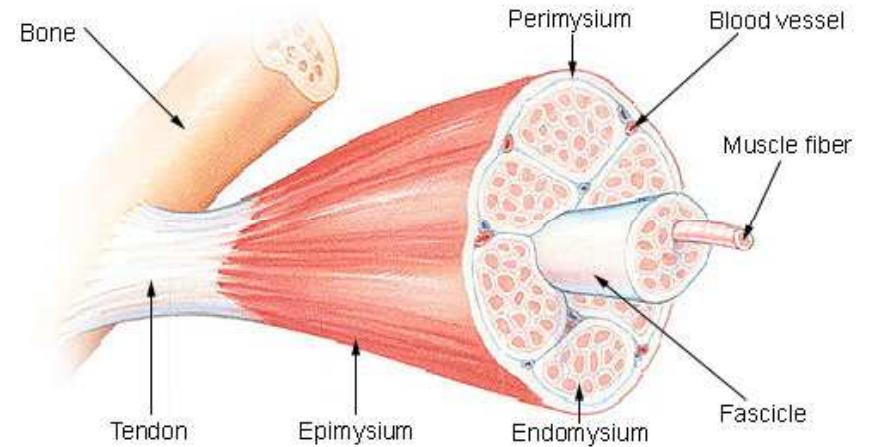
Ganong, 2005

# BIOMECHANIKA

## ► Vazivo ve svalu:

- Endomyzium: obaluje jednotlivá svalová vlákna,
- Perimysium: obklopuje svazky svalových vláken,
- Epimysium: vazivový obal na povrchu svalu, zpevňuje sval a vymezuje rozsah jeho pohyblivosti,
- pružnost vaziva udržována rytmickým protahováním; inaktivace → zkrácení (omezení síly svalu a zhoršení cirkulace).

Structure of a Skeletal Muscle

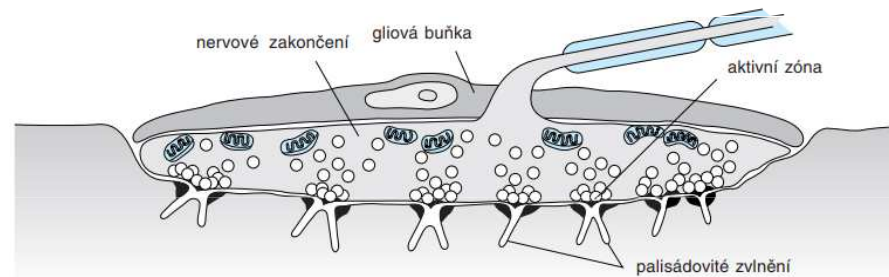


<https://cs.wikipedia.org/wiki/Perimysium>

# BIOMECHANIKA

## ► Nervosvalový přenos na kosterním svalu:

- Spojení mezi nervovým vláknem a svalovou buňkou kosterního svalu tvoří modifikovaná synapse, tzv. nervosvalová ploténka.
- Distální část axonu ztrácí myelinovou pochvu (kryta jen Schwannovými bb.) a dochází k tzv. terminálnímu větvení (počet tenkých vláken dán velikostí motorické jednotky) s acetylcholinem (mediátor). Každá konečná větévka vytváří kontakt s jedním sv. vláknem.
- Zakončení se zanoří do membrány svalové buňky; pod zakončením membrána svalové buňky zvlňněna a tvoří tzv. palisády.
- Prostor mezi nervem a zesílenou membránou svalové buňky srovnatelný se synaptickou štěrbinou.



Ganong, 2005

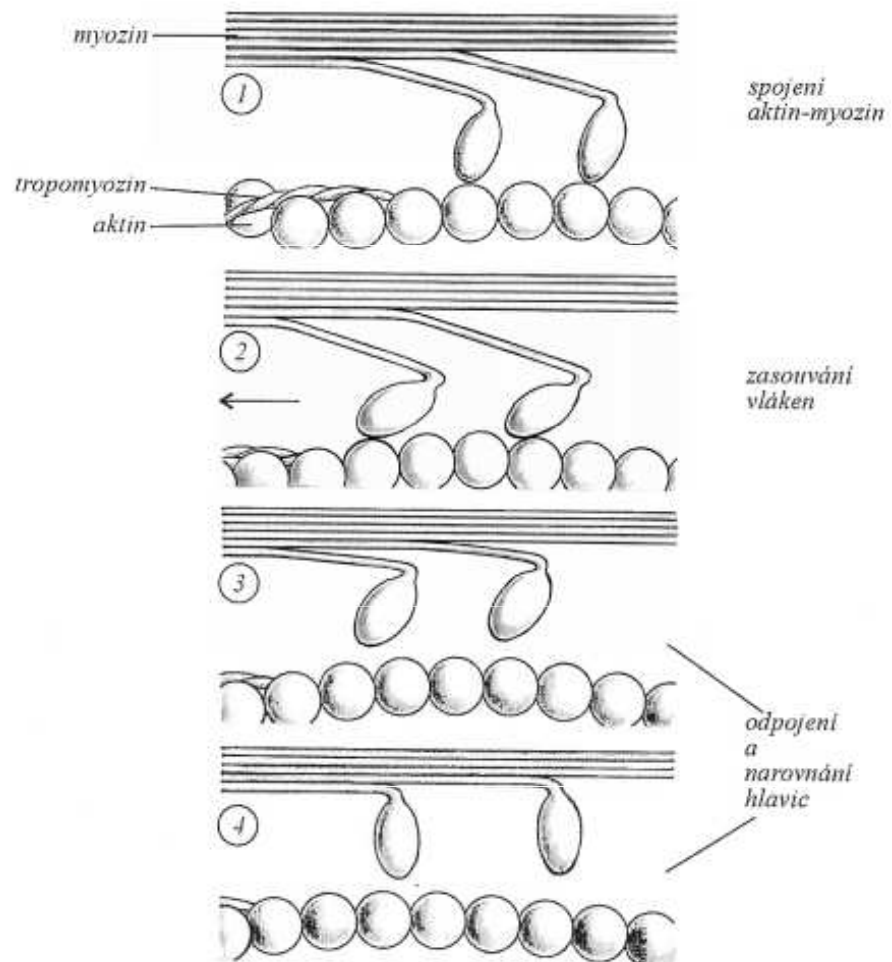


# BIOMECHANIKA

- **Svalová kontrakce:**
- **Při průchodu vzruchu dojde k vyplavení acetylcholinu z váčků v presynaptické membráně do synaptické štěrbiny → vazba na nikotinové acetylcholinové receptory na vrcholech palisád postsynaptické membrány → zvýšení vodivosti membrány pro  $\text{Na}^+$  ionty a vtékání  $\text{Na}^+$  iontů dovnitř buňky → depolarizace membrány na spouštěcí úroveň a vznik AP svalové buňky.**
- **AP se šíří po celé buňce a T-tubuly je odváděn k hlubším strukturám → aktivace sarkoplazmatického retikula → vylití  $\text{Ca}^{2+}$  iontů do sarkoplazmy a jejich navázání na troponin C → změna konfigurace troponinového komplexu → zanoření tropomyosinu mezi vlákna aktinu a odkrytí vazebných míst pro myosinové hlavy.**

# BIOMECHANIKA

- Po navázání hlavy myosinu na aktin → vznik příčných můstků mezi aktinem a myosinem + hydrolýza ATP navázaném na myosinové hlavě → ohnutí myozinového krku a umožnění klouzání tenkých vláken po silných (myosinové vlákno aktivně přitahuje dvě aktinová vlákna) → přiblížení Z-liní, zkrácení sarkomery = svalový stah.
- Po cca 1 sekundě  $\text{Ca}^{2+}$  ionty pumpovány zpět do sarkoplazmatického retikula pomocí  $\text{Ca}^{2+}$  -  $\text{Mg}^{2+}$  ATPázy → uvolnění vazby mezi  $\text{Ca}^{2+}$  a troponinem C + navázání nové molekuly ATP na hlavu mosinu → přerušení vazby mezi aktinem a myosinem → svalová relaxace.
- Inhibice přenosu  $\text{Ca}^{2+}$  do retikula → svalová kontraktura



Rokyta, 2008



# BIOMECHANIKA

- **Motorická jednotka (MJ) – základní funkční a strukturální prvek motoriky**
  - motoneuron + jím inervovaná svalová vlákna
  - pracovní cyklus motorické jednotky („vše nebo nic“):
    1. aktivní stav (vše) – zkrácení svalu
    2. klidový stav (nic) – normální délka svalu
- **Typy vláken kosterního svalu (Dylevský, 2021): motoneuron určuje typ svalového vlákna:**
  1. **Vlákna I. typu (SO – slow oxidative, slow-twitch fibres)**
    - Tenká, méně myofibril, hodně mitochondrií, oxidační enzymy, velké množství myoglobinu.
    - Bohatě kapilarizovaná.
    - Enzymaticky vybavená k pomalejší, tonické kontrakci.
    - Vhodná pro vytrvalostní, protražovanou činnost.

# BIOMECHANIKA

## 2. Vlákna II. typu (FOG - fast oxidative IIA & glycolytic IIB, IIX, fast-twitch fibres)

- Objemnější, více myofibril, méně mitochondrií, střední až malé množství kapilár.
- Podskupina IIA – rychlá oxidativní vlákna: zátěž střední intenzity.
- Podskupina IIB – rychlá glykolytické vlákna: zátěž maximální intenzity.
- Vhodná pro rychlé kontrakce prováděné velkou silou po krátkou dobu.

## 3. Přejídná vlákna, nediferencovaná (typ III)

- Potenciální zdroj předchozích typů vláken

**Maximální svalová kontrakce: zapojení rychlých i pomalých vláken, rychlá poskytují více kontraktilní síly.**

# BIOMECHANIKA

- ▶ **Velikost motorické jednotky: velikost motoneuronu + počet svalových vláken jím inervovaných**
  - každý sval obsahuje určitý počet MJ.
- ▶ **Dle kontraktilní schopnosti:**
  - 1. rychlé, unavitelné (FF, fast fatiguable),
  - 2. rychlé, únavě odolné (FT, fast resistant),
  - 3. odolné proti únavě (S, slow) – menší motoneurony, méně svalových vláken, silnější axony, které vedou vzruchy pomaleji než ty FF.
- ▶ **Většina svalů obsahuje všechny typy MJ, ale v různém poměrovém zastoupení.**

# BIOMECHANIKA

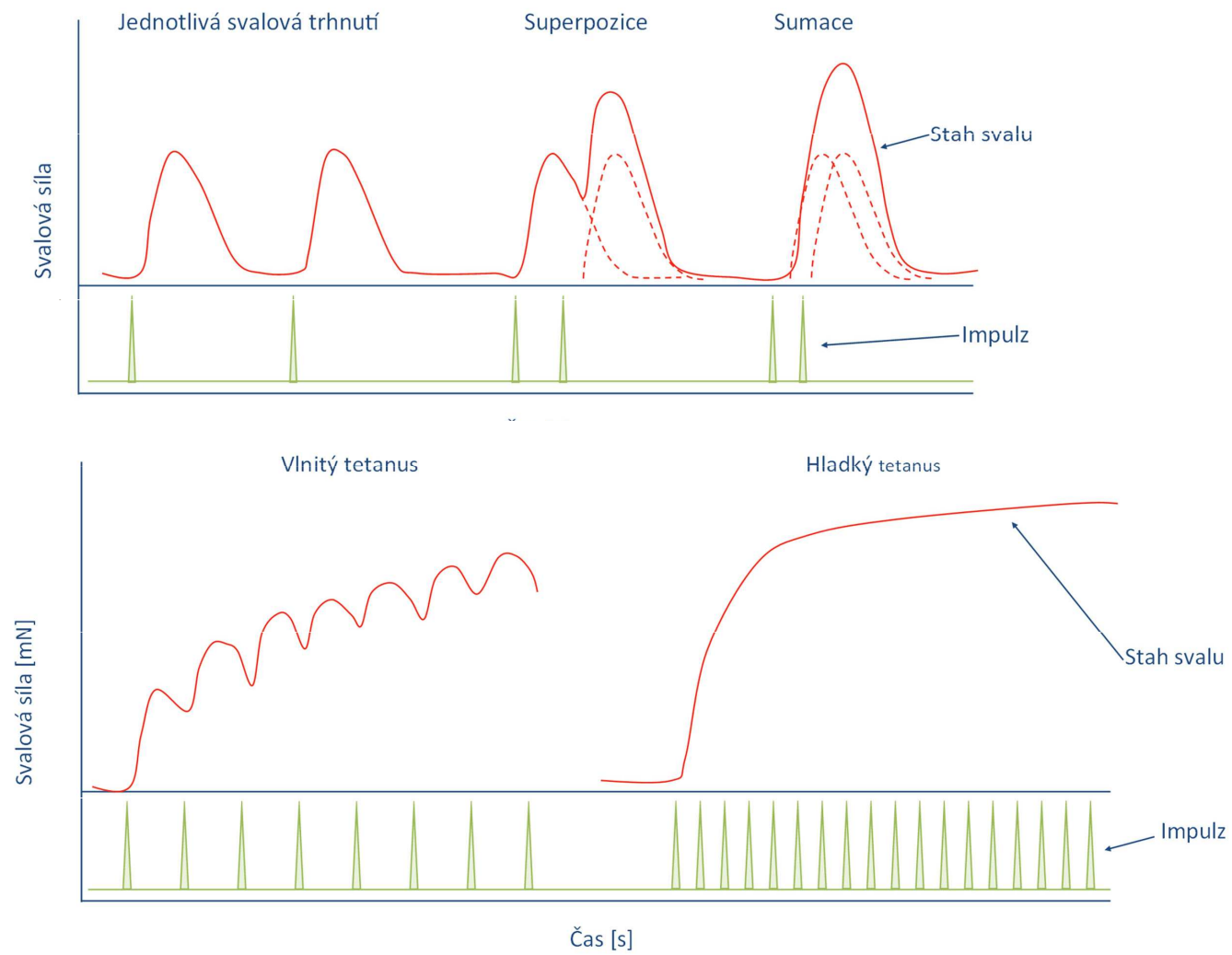
## ➤ Nábor MJ:

### • prostorová sumace:

- postupné zapojování motorických jednotek dle požadavků na velikost svalové síly (Adrian-Bronckův zákon) = asynchronní aktivace → plynulý nárůst svalové síly!!!
- Hennemanovo pravidlo: zapojení MJ dle velikosti od nejmenších po největší
- nově napojená MJ zůstává aktivní do doby poklesu svalové síly. Inaktivace probíhá v opačném pořadí než nábor. Nelze tímto dosáhnout maximálního momentu síly (k tomu nutná časová sumace).

### • časová sumace:

- zvýšení frekvence vzruchů směrem k aktivovaným MJ (synchronní aktivace) → krátkodobé zvýšení síly na úroveň maxima za cenu rychlého nástupu únavy. Stoupne velikost okamžitého silového momentu; současně klesá plynulost kontrakce (možný až sakadovaný pohyb).
- zvyšování frekvence podnětů → častější vyplavování vápníku do cytoplazmy, vázne rychlost jeho čerpání zpět do sarkoplazmatického retikula → vysoká koncentrace v plazmě → vazba vápníku na troponin C → zvětšení počtu odhalených vazebných míst na aktinu pro myozin → vznik více vazeb mezi vlákny → síla stahu roste.



[https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js21/fyziologie/web/pages/28\\_sumace\\_kosterniho\\_svalu.html](https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js21/fyziologie/web/pages/28_sumace_kosterniho_svalu.html)





# BIOMECHANIKA

Úroveň svalového napětí	Způsob gradace
10– 30%	Nárůst frekvence vzruchů 2– 30Hz u malého počtu MJ.
30 – 70%	Nárůst počtu zapojených MJ.
70 – 100%	Zvýšení frekvence vzruchů u zapojených MJ.

*Janura, 2003*



# BIOMECHANIKA

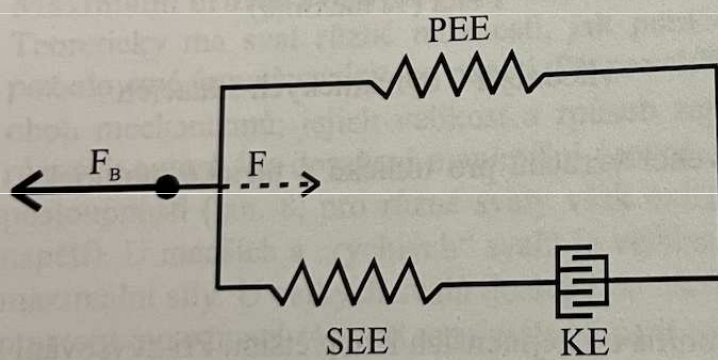
► **Aktivace svalu (svalová kontrakce) dle Véleho (2006):**

- **Anizometrická – délka svalu se mění, ale vnitřní napětí zůstává zachované.**
  - **Koncentrická aktivace: zkrácení svalu a zvětšení objemu svalového břicha → pohyb prováděný stálou rychlostí i akcelerace pohybu = pozitivní práce**
  - **Excentrická aktivace: sval se prodlužuje (protahuje), svalové úpony se vzdalují → pohyb decelerační (brzdící) (negativní práce)**
- **Izometrická aktivace – není generován pohyb a délka svalu se nemění (vzdálenost začátku a úponu se nemění).**

# BIOMECHANIKA

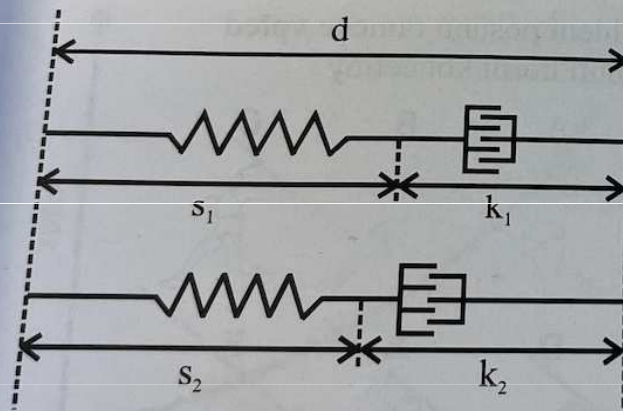
## ► Hillův tříprvkový model:

- k vyjádření činnosti svalu při různých typech kontrakce
- KE (kontraktilní element = aktin a myosin): udává silově-rychlostní možnosti svalu
- SEE (sériový elastický element = šlacha): fce pružiny, přenos mechanické energie produkované KE na okolní prvky, při pohybech s rychlým střídáním kontrakce rozhodujícím činitelem ukládání E.
- PEE (paralelní elastický element = vazivové struktury svalu – epimysium, perimysium, sarkolema....): jeho vliv na velikost síly narůstá při zvětšení délky svalu, zdrojem sil působících proti protažení pasivního svalu → zabránění přetržení svalu při nedostatečné aktivitě KE v rámci nadměrného působení zevních sil.
- Izometrická kontrakce: prodloužení SEE a zkrácení KE = zachování konstantní délky svalu.



KE – kontraktilní element  
 SEE – sériový elastický element  
 PEE – paralelní elastický element  
 F – tahová síla svalu  
 $F_B$  – síla břemene, působení vnějšího prostředí

Obr. 59 Hillův tříprvkový model svalu



d – délka svalu  
 $s_1, s_2$  – délka SEE  
 $k_1, k_2$  – délka KE

Obr. 60 Změna v délce KE a SEE při izometrické svalové kontrakci

# BIOMECHANIKA

## ► Protahovací – zkracovací cyklus svalu (SSC)

- zevní energie způsobující protažení elastických elementů uložena ve svalech ve formě deformační energie → lze ji využít při následném zkrácení svalu.
- při střídání excentrie/koncentrie slouží ke zrychlení pohybu části těla, která se využívá v odrazových a odhodových fázích pohybu.

## ► plyometrická cvičení

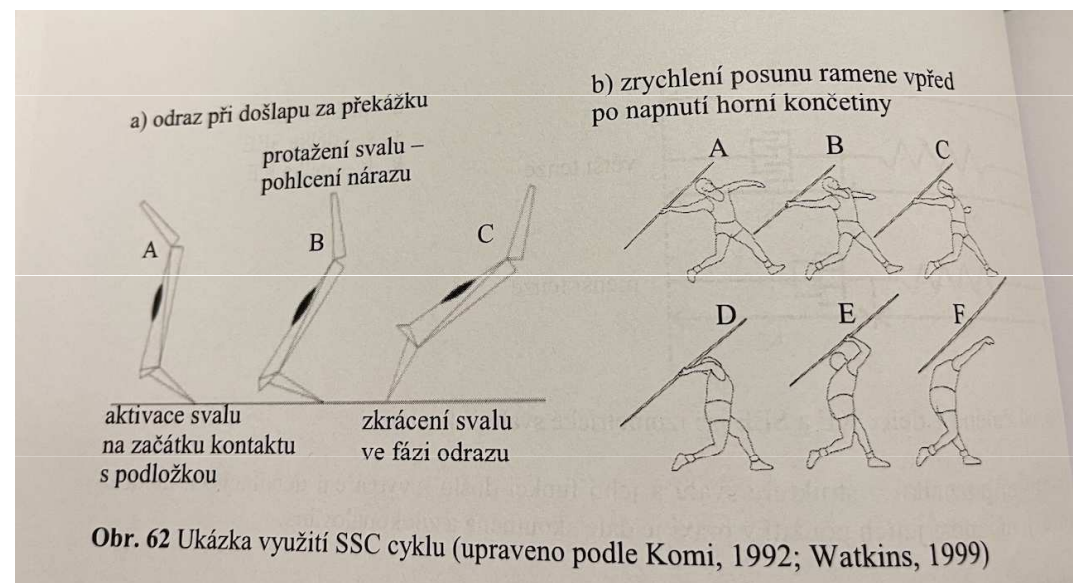
$$W = \int F dl$$

**W** – práce nutná na protažení svalu

**F** – síla natahující šlachy

**dl** – změna délky šlachy

Janura, 2003

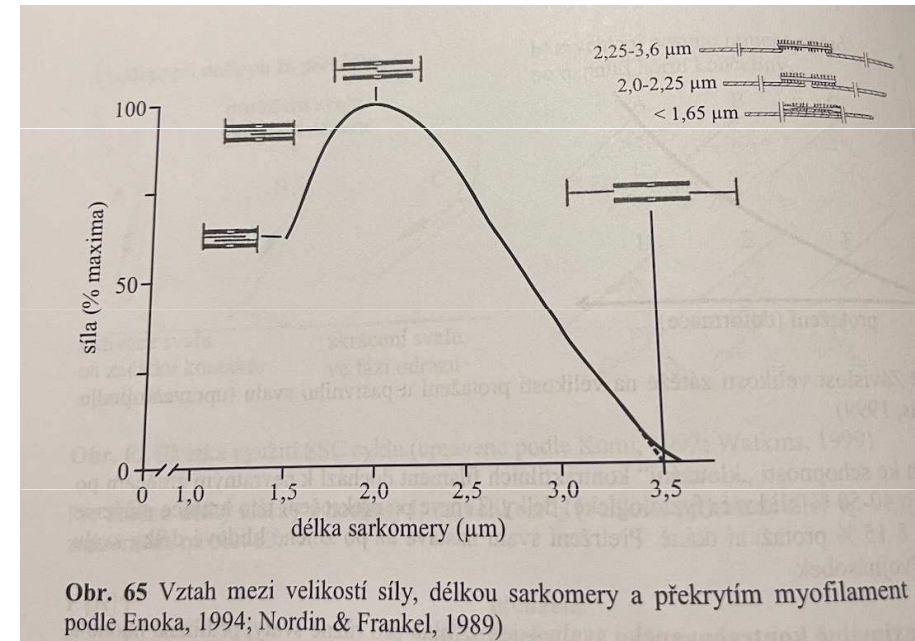


# BIOMECHANIKA

- ▶ **Mechanické vlastnosti svalu:**
  - ▶ **Pevnost svalu v tahu v klidu: 0,26 - 0,90 MPa**
  - ▶ **Pomalé protažení pasivního svalu → vlivem kontraktálního elementu a sarkomery vzniká odpor proti tomuto protažení = tuhost svalu.**
  - ▶ **Pro aktivní sval větší než pro sval bez inervace.**
  - ▶ **Nevratné změny až po protažení o 40 – 50% klidové délky svalu (poté pozorujeme 8 – 15% protažení tkáně.**
  - ▶ **Přetržení svalu = po změně klidové délky svalu na 1,5 – 2x**
  - ▶ **Pevnost maximálně kontrahovaného svalu: různá pro různé svaly, průměrně 1,25 MPa.**

# BIOMECHANIKA

- **Velikost svalové síly a parametry svalu**
- **Svalová síla a délka sarkomery**
  - Síla aktuální kontrakce dána počtem aktin-myosinových můstků.
  - Maximální síla svalového vlákna = při jeho klidové délce (délka sarkomery 2 – 2,5  $\mu\text{m}$ )  
**PROČ?** Vytvoření maximálního množství příčných můstků.
  - Protážení = pokles počtu příčných můstků, filamenta se oddalují a síla se blíží nule.
  - Zmenšení délky sarkomery pod 2  $\mu\text{m}$  = aktinová filamenta se blíží k M linii → ubývá funkčních můstků.



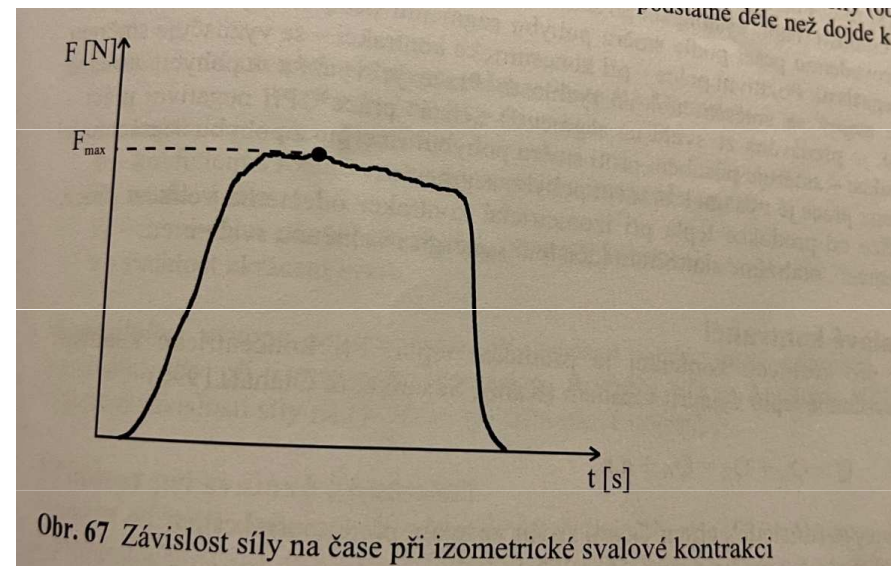
Obr. 65 Vztah mezi velikostí síly, délkou sarkomery a překrytím myofilament podle Enoka, 1994; Nordin & Frankel, 1989)

Janura, 2003



# BIOMECHANIKA

- **Velikost svalové síly a parametry svalu**
- **Velikost síly a rychlost kontrakce**
  - **Dynamická kapacita svalu.**
  - **S rostoucí rychlostí kontrakce se zmenšuje velikost vyvíjené síly.**
- **Velikost síly a doba kontrakce**
  - **Izometrická svalová kontrakce: první fáze – rychlé zvětšení svalové síly, poté pozvolný nárůst. Další fáze – setrvalý stav nebo dokonce pokles svalové síly v čase.**

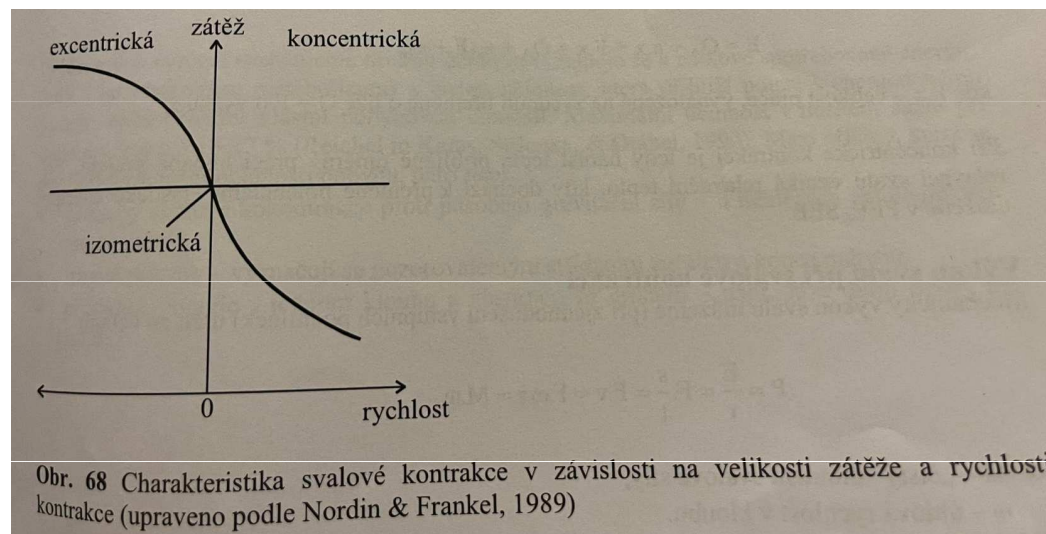


Janura, 2003



# BIOMECHANIKA

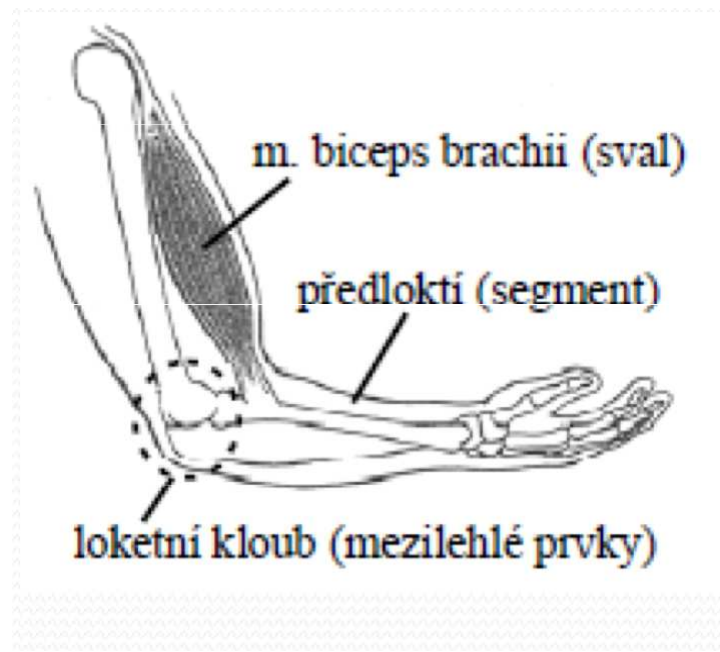
- **Velikost svalové síly a parametry svalu**
- **Velikost zátěže a rychlost kontrakce**
  - **Malá zátěž: koncentrická kontrakce nejrychlejší.**
  - **↑ zátěž = ↓ rychlosti**
  - **Zátěž = max. síla → rychlost nulová**
  - **Další ↑ zátěž → přeměna izometrické kontrakce na excentrickou → rychlost kontrakce se opět zvyšuje.**



Janura, 2003

# BIOMECHANIKA

- ▶ **Mechanická triáda: základní struktura umožňující interakci pohybového systému a okolí**
  - sval (generátor tahové síly),
  - mezilehlý prvek (přenos svalové síly na segment),
  - segment (zajištění kontaktu s vnějším prostředím).

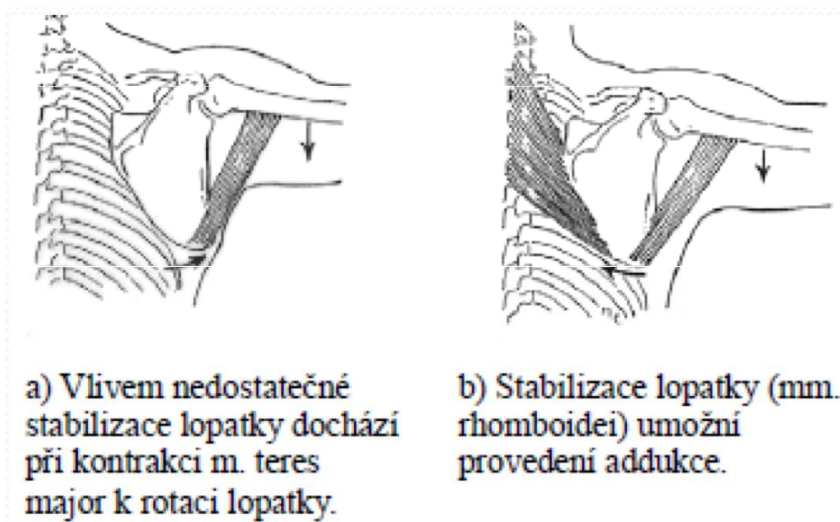


Janura, 2003

# BIOMECHANIKA

## ► Princip pohybu:

- Zkrácení svalu umístěného mezi dvěma segmenty → pohyb méně stabilizovaného segmentu.
- Stabilizace segmentů hlavně svalově, vliv ale také hmotnost segmentu.
- Nedostatečná stabilizace segmentu → omezení provedení pohybu.

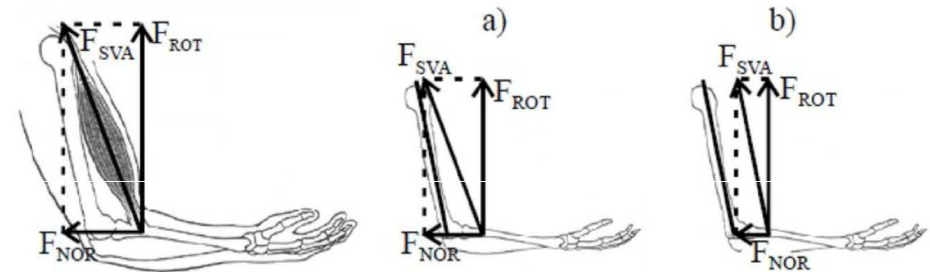
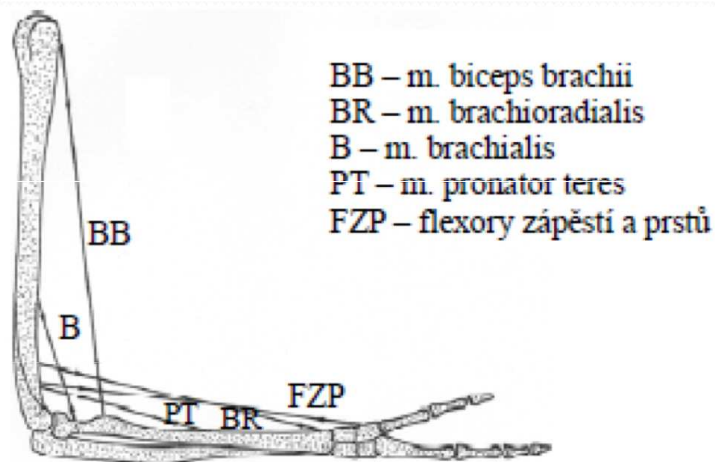


Janura, 2003

# BIOMECHANIKA

## ► Rozklad tahové (šlachové) síly svalu

- $F_{ROT}$  – rotační (tangenciální) složka: vlastní rotace segmentu, kolmý směr na segment.
- $F_{NOR}$  – normálová (stabilizační) složka: v ose segmentu, průchod středem (bodem otáčení) daného kloubu.



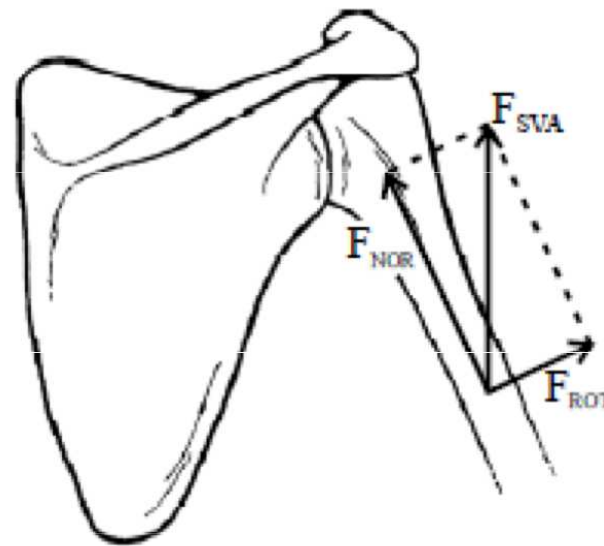
$F_{SVA}$  – svalová síla,  $F_{ROT}$  – rotační složka síly,  
 $F_{NOR}$  – normálová složka síly

Janura, 2003

# BIOMECHANIKA

## ► Rozklad tahové (šlachové) síly svalu

- $F_{\text{NOR}}$  – normálová (stabilizační) složka: v ose segmentu, průchod středem (bodem otáčení) daného kloubu. **CAVE! Ne vždy! Může být i destabilizační složka.**

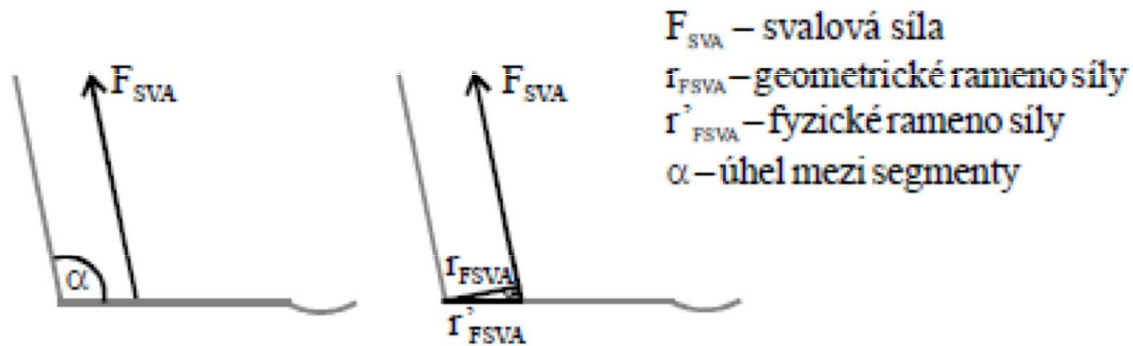


Janura, 2003

# BIOMECHANIKA

## ► Moment svalové síly

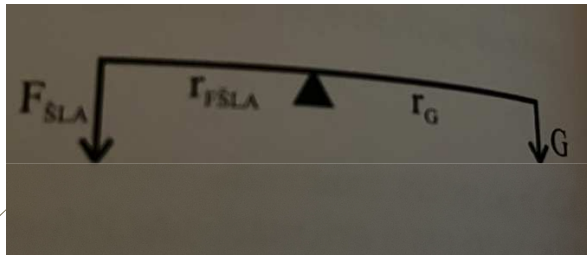
- Velikost otáčivého účinku síly
- $M = F \times r$
- $F$  – síla,  $r$  – vzdálenost vektoru síly od okamžitého středu otáčení
- Rameno síly:
  - Fyzické: vzdálenost šlachy daného svalu od středu otáčení
  - Geometrické:  $r_{FSVA} = r'_{FSVA} \cdot \sin \alpha$



# BIOMECHANIKA

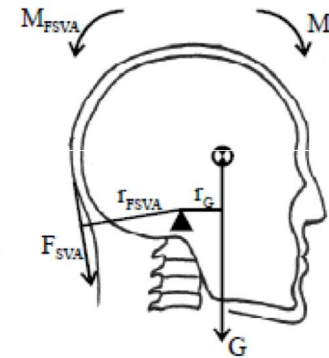
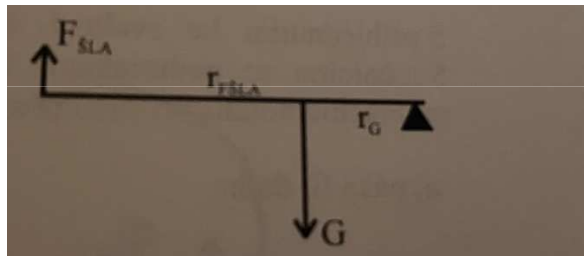
## ► Páka prvního druhu:

- bod otáčení je mezi působícími silami.



## ► Páka druhého druhu (páka síly):

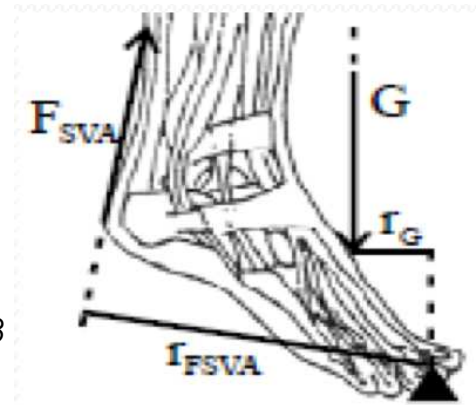
- vektor tíhové síly mezi bodem otáčení a vektorem šlachové síly (pohyb v MTF skloubení)
- tíhová síla blíže k bodu otáčení:  $r_G < r_{\text{šLA}} \rightarrow F_{\text{šLA}} < G$
- působící tíhovou sílu překonáváme silou, která je menší, lze tedy přemístit větší hmotnost po menší dráze.



$F_{\text{SVA}}$  – svalová síla šíjového svalstva  
 $G$  – tíhová síla hlavy  
 $r_{\text{FSVA}}, r_G$  – ramena působících sil  
 $M_{\text{FSVA}}, M_G$  – momenty působících sil

Janura, 2003

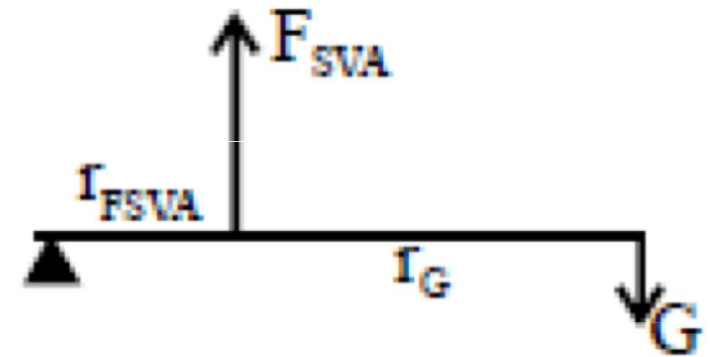
Janura, 2003





# BIOMECHANIKA

- ▶ Páka třetího druhu (páka rychlosti):
  - vektor šlachové síly mezi bodem otáčení a vektorem tíhové síly,
  - např. m. biceps brachii: tíhová síla působí v těžišti segmentu, bodem otáčení je střed loketního kloubu,
  - velikost ramen:  $r_G > r_{\text{šLA}}$ ,  $F_{\text{šLA}} > G$
  - typický pro dlouhé kosti, při svalové kontrakci koná distální část segmentu pohyb o velkém rozsahu, body na konci se pohybují velkou rychlostí.

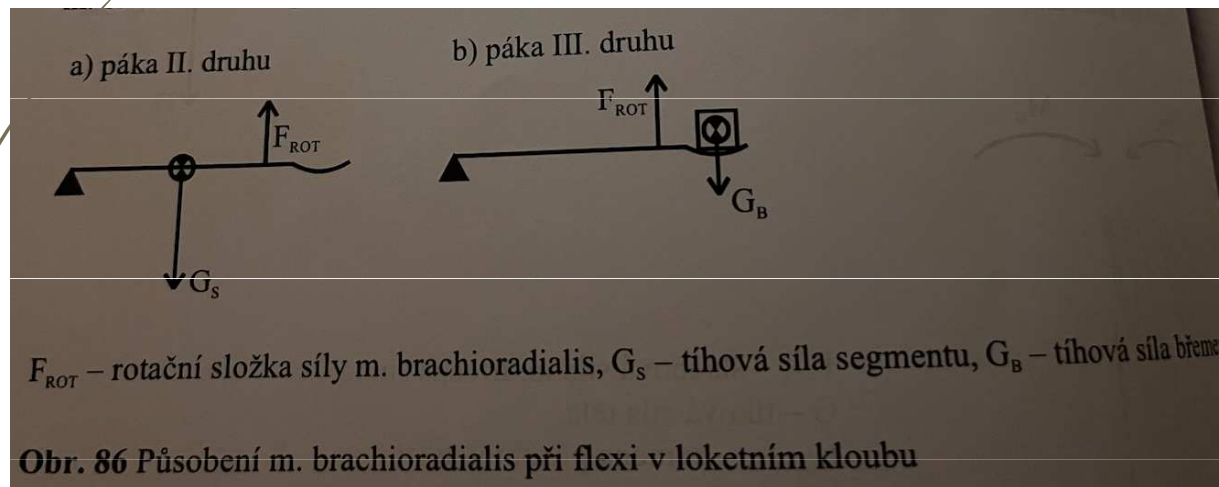


Janura, 2003



# BIOMECHANIKA

- ▶ Páka třetího druhu (páka rychlosti):
  - změna podmínek mění typ páky,
  - bez působení břemene = páka II. typu,
  - s břemenem = páka III. typu.



Janura, 2003



# BIOMECHANIKA

- ▶ **JANURA, M.** *Úvod do biomechaniky pohybového systému člověka.* 1. vyd. Olomouc: UP, 2003. 84 s. ISBN. 802 440 6446.
  - ▶ **HÁJEK, P. a kol.** *Biomechanika člověka.* 1. vyd. Praha: Grada, 2018. 208 s. ISBN 978 802 710 3676.
- 