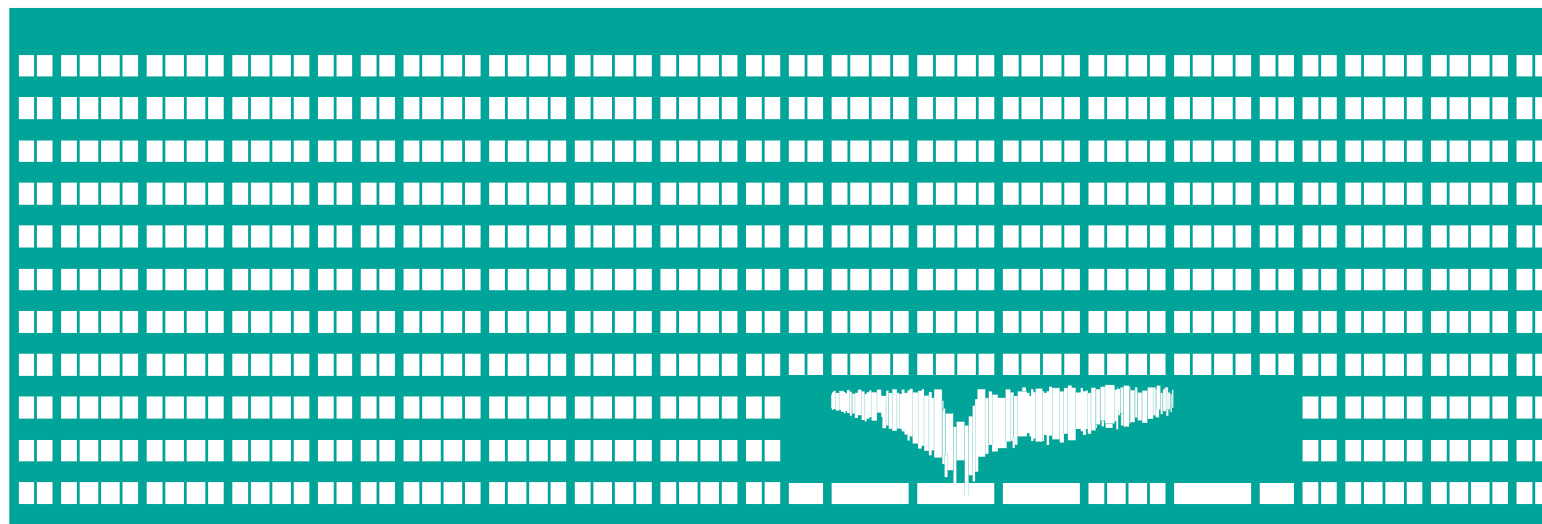


VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

VSB TECHNICAL
UNIVERSITY
OF OSTRAVA



www.vsb.cz

Biomechanika - statické a dynamické vlastnosti

Živé tkáně se svými mechanickými vlastnostmi odlišují jak od pevných látek, tak od kapalin. Nejvíce lze jejich vlastnosti přirovnat k vysoce polymerizovaným makromolekulárním látkám, které se nazývají elastomery.

Statické vlastnosti

- Pevnost- popisuje strukturní soudržnost materiálu (popř. tkáně) vůči vnějším silám
- Elasticita (pružnost) – schopnost tělesa nabýt samovolně původní tvar.

Statické vlastnosti

- Důstojnost (roztahlivost) – poddajnost látky vůči působení deformující síly (opak elastického odporu)
- Plasticita (tvárnost) – schopnost látky měnit permanentně svůj tvar v závislosti na deformujících silách

Dynamické vlastnosti

- Viskozita – viz. hydromechanika; odpor proti změně tvaru látky

Tyto vlastnosti se v různé míře zastoupení objevují u všech tkání

1. Elastické látky

- Pod mezí pružnosti je průběh deformace lineární
- dle Hookova zákona

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \sigma$$

ε = relativní prodloužení

E = modul elasticity (Youngův

modul pružnosti; Pa)

σ = napětí (Pa)

Biomechanika

2. Plastické látky

- Deformace nastává až po dosažení určité hodnoty působící deformační síly
- Po ukončení působení deformační síly si plastické látky zachovávají maximální deformaci dosaženou během působení deformační síly

3. Viskózní látky

- Podle závislosti rychlosti deformace dělíme na:
 - Newtonské kapaliny
 - Rychlost deformace se mění lineárně s hodnotou působící deformační silou
 - Neneutonské kapaliny
 - Nelineární závislost

Deformace látky závisí na její viskozitě

4. Viskoelastické látky

- Deformace je funkcí působící síly a zároveň i času
- Při rychle nastoupivším silovým napětím o konstantní hodnotě roste hodnota deformace exponenciálně; po ukončení silového působení exponenciálně klesá
- Není však možné, aby látka dosáhla původního stavu; k úplnému zrušení deformace je potřeba dodat silové působení v opačném směru k původnímu silovému působení
- Podobné vlastnosti mají i některé tekutiny = Maxwellovy tekutiny (krev)

5. Plasticko – viskózně – elastické látky

- Elastická deformace nastává pouze tehdy, je-li překonáno prahové napětí
- Rychlost deformace je funkcí koeficientu plastičnosti; látka vykazuje vždy určitý stupeň hystereze

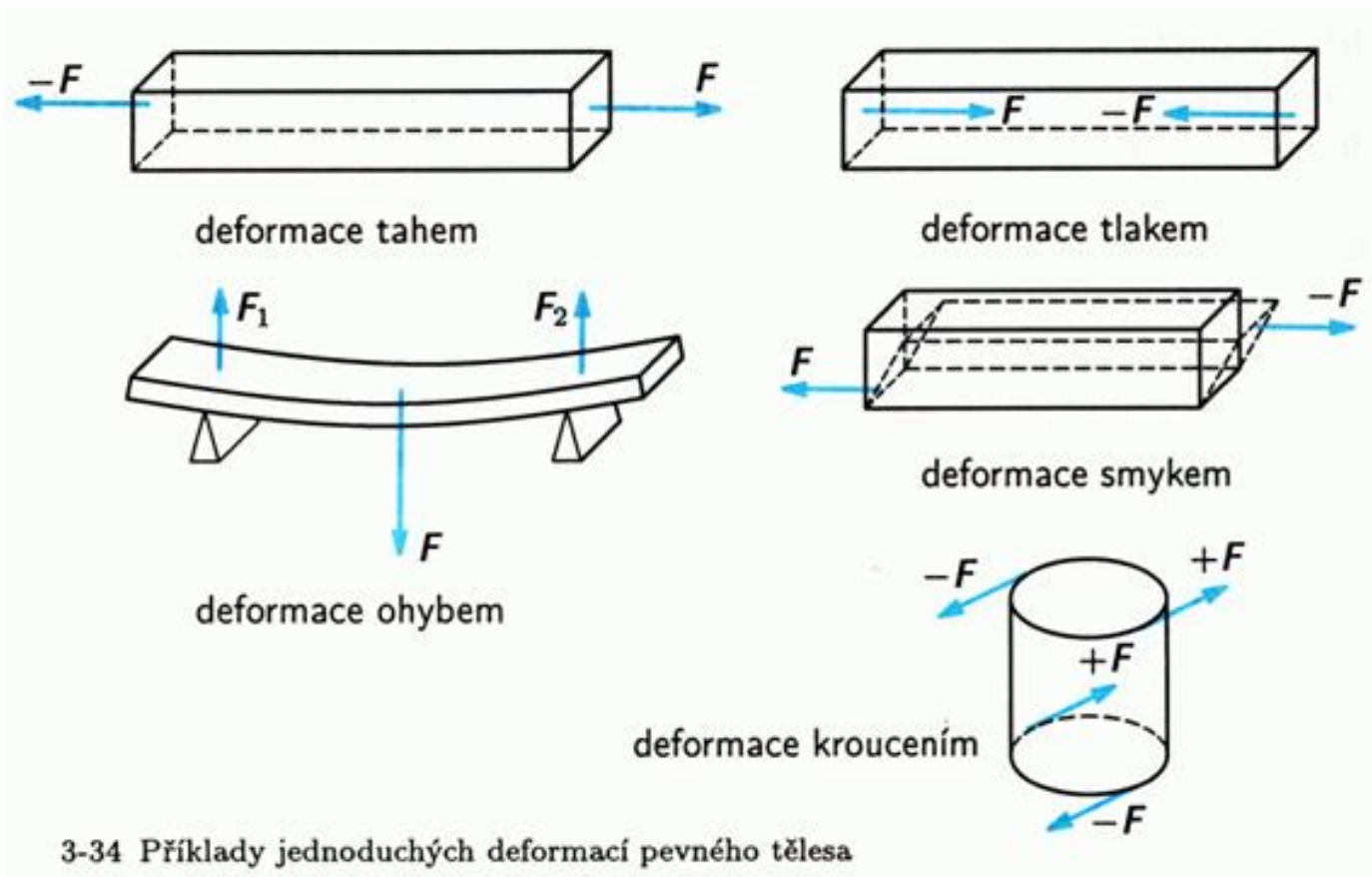
- Měkké tkáně, σ_{g0} $U \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}$

Hystereze

Hystereze - v dynamickém systému výstupní veličina nezávisí jen na nezávisle proměnné vstupní veličině, ale také na předchozím stavu systému

U některých látek nedochází po ukončení působení zatížení k odstranění deformace ihned, ale pouze k odstranění její části. Zbytek deformace pak mizí po určitou dobu. Tento jev se nazývá dopružování (elastická hystereze)

Deformace



Biostatika

- studuje síly působící na živý organismus a také síly, kterými živé organismy působí na prostředí, ve kterém se vyskytují

Biomechanika

Základní oporným mechanismem člověka a všech obratlovců je pojivová tkáň

- Složení: buňky a mezibuněčná hmota (vláknitá a amorfní)
- Vazivo, chrupavka, kost
- Vazivová tkáň
 - Fibroblasty, kolagenní vlákna, elastická vlákna, amorfní hmota

Vazivo

Kolagenní vlákna

- Nejobjemnější složka v pojivové tkáni
- Pevná v tahu, velmi ohebná
- Omezená elasticita (prodloužení max. o 10 % své délky)
- Zatížení 50 N na 1 mm²
- V průběhu času stárnutí; snížení meze pevnosti v tahu i elasticity

Vazivo

Elastická vlákna

- Méně početná; často ve směsi s kolagenními
- Vysoká elasticita – prodloužení až o 200 % své původní délky
- Nízká pevnost v tahu; maximální zatížení 3 N na 1 mm²
- Jejich funkcí je zvýšení elasticity vaziva (snížení hystereze)

Vazivo

Amorfní mezibuněčná hmota

- Gelovitý roztok (proteoglykany – kyselina hyaluronová)
- Stabilizace struktury vaziva
- Vodné prostředí – výživa tkáně
- Lubrikační schopnost HA

Vazivo

Řídké kolagenní vazivo

- Nosná struktura pro cévy a nervy; umožňují hladký posun orgánů

Tuhé kolagenní vazivo

- Neuspořádané vazivo – kolagenní a elastická vlákna; celkově vysoká mechanická pevnost; vazivová vrstva kůže
- Uspořádané vazivo – šlachy (max. 5 % elastických vláken – přenos svalové síly na kostru; vazy – fixace pohybového systému

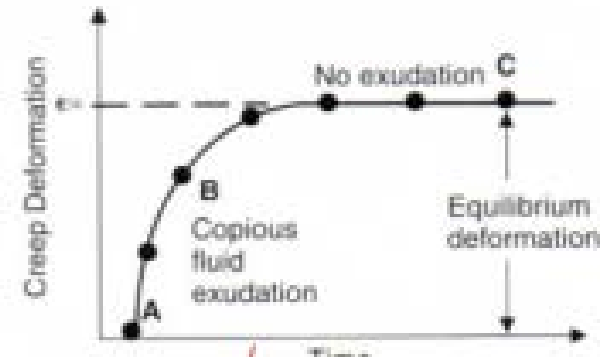
Chrupavka

Chondrocyty, kolagenní vlákna, elastická vlákna

Mezibuněčná hmota

- Podobné složení jako u vaziva
- Izolace chondrocytů
- Prostředí usnadňující výživu

Pevnost v tahu u chrupavky je max. 5 % pevnosti kosti
Elasticita variabilní podle obsahu vody



Chrupavka

Hyalinní chrupavka

- v porovnání s ostatními typy je křehká; tvrdá hladká
- Kolagenní vlákna tvoří trojrozměrné sítě, stavba sítě odpovídá zatížení chrupavky
- Např. kloubní konce

Chrupavka

Elastická chrupavka

- Pružná a ohebná (elastin)
- Po deformaci se vrací do původního stavu
- Boltec, průdušky, zvukovod

Vazivová chrupavka

- Silná kolagenní vlákna
- Mechanická odolnost v tahu, tlaku i zkrutu
- Meziobratlové destičky

Kosti

Heterogenní, viskoelastický materiál

Osteoblasty

Mezibuněčná hmota – kolagenní vlákna; amorfní hmota (mineralizována; až 65% hmotnosti kosti)

Lamelární kost

- Kompaktní kost – uspořádání kolagenu a stupeň mineralizace určuje pevnost v tahu, tlaku a ohybu

Kosti

- Spongiózní kost – prostorová struktura z trámčů a plotének (architektonika kosti); tato struktura je výsledek silových působení na kost
při zranění (zlomeniny) se struktura přestavuje tak, aby vyhovovala novému silovému zatížení

Kosti

Pevnost kosti – kompaktní kost

- Pevnost dlouhých kostí je 100 – 200 Mpa
- Největší zatížení snese kost ve směru své osy; při příčném zatížení je pevnost poloviční
- V tahu odolnější než v tlaku
- Nejmenší pevnost je ve zkrutu (lamely jsou jen zřídka spojeny kolagenem)

Kosti

Pevnost kosti – kompaktní kost

- Mineralizace není uniformní; v místech, kde se absorbuje energie, je nižší
- Dynamické zatížení je závislé na rychlosti pohybu

Pevnost kosti - spongióza

- Trámce tvoří klenby v místě nejčastěji probíhajících siločar tlaku a tahu; prostorově odolnější (příčné)
- Částečná absorpce zátěže „výplní“

Kosti

Wolfův zákon kostní transformace – kostní struktura se přizpůsobuje permanentním změnám v silovém působení na organismus; při jakékoliv změně dochází k přestavbě kosti, aby bylo dosaženo původního stavu

- Chybí-li organismu gravitační silové působení v osách dlouhých kostí, začne organismus vylučovat zvýšené množství vápníku

Kostní spoje

Pevné x pohyblivé

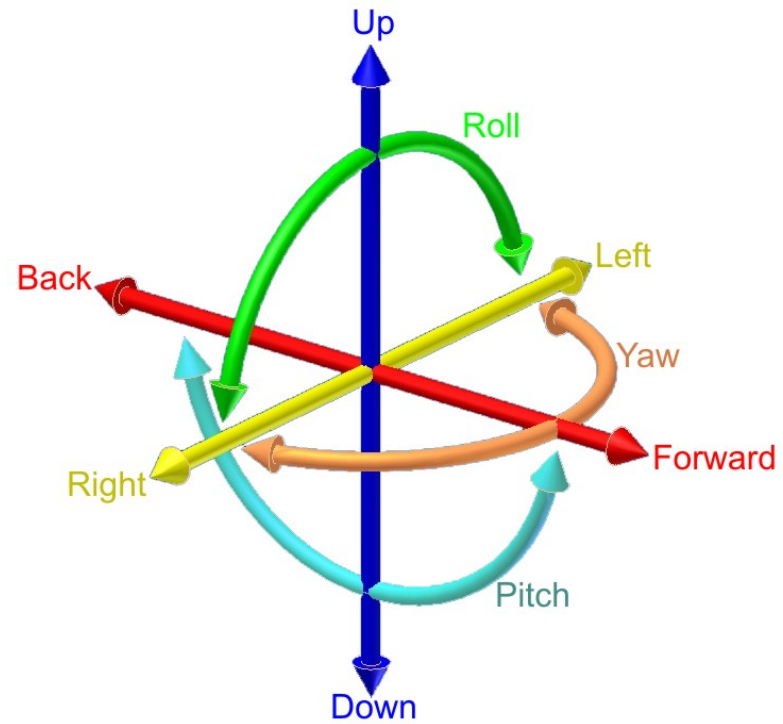
- Vazivové – syndesmózy, sutury...; umožňují mírné posuny spojených kostí
- Chrupavčité – synchrondrózy, symfýzy; nepohyblivé
- Kostěnné – synostózy; vytváří se z předchozích dvou; nepohyblivé

Kostní spoje

Klouby – pohyblivá kostěnná spojení dvou či více kostí

- Rozsah pohybu závisí na tvaru styčných ploch, poměru hlavice a jamky, svalovém aparátu apod.
- Pohyb úhlový – body na pohybujícím se útvaru opisují kruhové oblouky se středem na ose otáčení
- Pohyb translační – všechny body pohybujícího se útvaru urazí stejnou dráhu

Kostní spoje

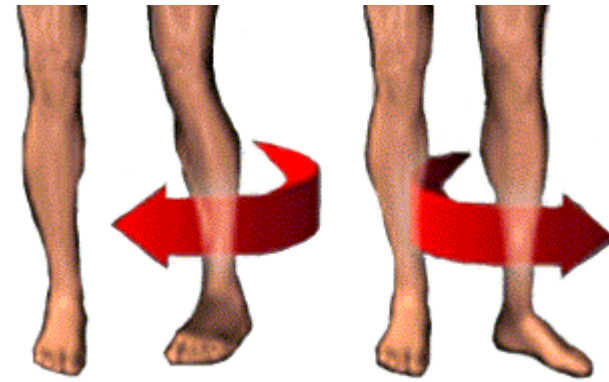
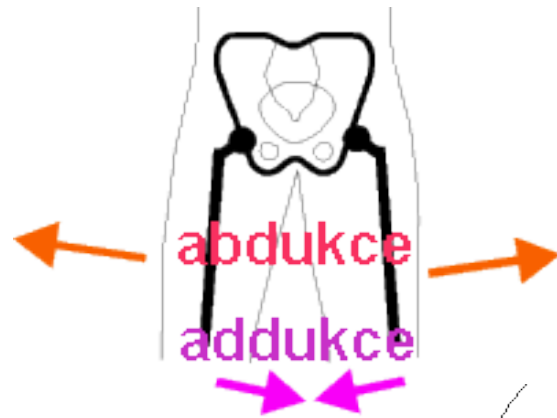


Kostní spoje

Rotační pohyby

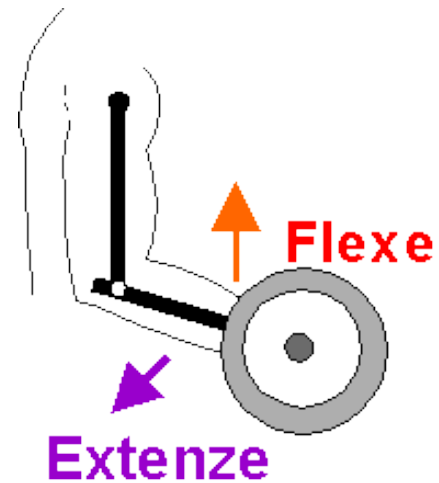
- Osa X: abdukce a addukce
 - Osa Y: flexe a extenze
 - Osa Z: vnitřní a zevní rotace
-
- Stupeň volnosti pohybu závisí na tvaru styčných ploch; maximum jsou tři (ramenní; kyčelní)

Kostní spoje



Medial Rotation

Lateral Rotation



Kostní spoje

Klouby

- Několik kloubů za sebou = kinematický řetězec (vyšší volnost pohybu)
- Kloubní chrupavka
 - Pružná deformace
 - Konstantní tlak svalového tonu až 8 kg na 1 cm²
- Synoviální tekutina
 - Výživa
 - Pružnost chrupavek
 - Snižuje tření

Svaly

Svaly

- Motorický orgán
- Využití chemické energie chemických vazeb na mechanickou energii (která je vykonána kontrakcí)
- Principem svalové kontrakce je zasunutí aktinových vláken do myosinových vláken; energie je poskytována ATP

Svaly

Svaly

- Agonisté; antagonisté; synergisté
 - Vyvážení těchto skupin je důležité pro stabilizaci polohy – např. svaly trupu a dolních končetin = stabilizace vzpřímené polohy (antigravitační soustava svalů)
- Funkce
 - Fixační a kinetická
 - Hlavní x vedlejší

Svaly

Svaly

- Jednokloubové
 - Vyvolává pohyb vždy v jednom kloubu
- vícekloubové
 - Největší uplatnění v kloubu nejbližším; jinak většinou stabilizační funkce

Svaly

Svaly

- Dva typy svalové kontrakce
 - Izotonická (konstantní zatížení)
 - Izometrická (konstantní vzdálenost)
- Vykonává se práce; uvolňuje se teplo; izotonická:
 - Aktivační teplo (uvolněno při počátku pohybu) Q_a
 - Zkracovací teplo (zkrácení svalu) Q_z
 - $Q_z = k \cdot x$ (x =délka; k =konstanta $3,5 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$)
 - Celková energie izotonické kontrakce $E = Q_a + Q_z + W$;
mechanická práce = součin dráhy a síly
- Izometrická: dráha = 0; práce je zjištěna nepřímou kalorimetrií

Svaly

Svaly

- Po ukončení svalové kontrakce se sval vrací do své původní délky
- Při dosažení meze pevnosti se sval trhá
- Fyziologická mez pevnosti u svalů 0,4 až 1,2 MPa

Mechanická práce srdce

Srdce

- Pumpa
 - Předsíně = rezervoáry
 - Komory = samotné pumpy
 - Jednosměrné proudění krve = chlopně
- Stažením komor (systola) dochází k vypuzení určitého objemu krve (tepový objem) do krevního řečiště

Mechanická práce srdce

Srdce jako pumpa koná mechanickou práci

- Představíme-li si srdce jako píst, který koná objemovou práci, lze statickou práci srdce (pístu), kterou srdce vytlačí pod tlakem p objem krve ΔV zapsat:

$$W_p = p \cdot \Delta V$$

Mechanická práce srdce

Srdce jako pumpa koná mechanickou práci

- Při vypuzení tepového objemu je zároveň tomuto objemu udělena rychlost a je tedy vykonána i kinetická práce:

$$W_k = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot \Delta V$$

Mechanická práce srdce

Srdce jako pumpa koná mechanickou práci

- Celková mechanická práce je pak součtem statické a kinetické práce

$$W = W_p + W_k = p \cdot \Delta V + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot \Delta V$$

Mechanická práce srdce

$$W = W_p + W_k = p \cdot \Delta V + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot \Delta V$$

- Ke zjištění mechanické práce je potřeba znát tlak krve v systole, tepový objem a rychlost vypuzení krve

Za ideálních fyziologických podmínek ($p=13,3$ kPa, $V = 70$ ml, $v = 0,3$ m.s⁻¹, $\rho = 1,06 \cdot 10^3$ kg.m⁻³) je statická a kinetická práce levé komory rovna:

$$W_p = 0,93 \text{ J}$$

$$W_k = 0,003 \text{ J}$$

$$W = 0,94 \text{ J}$$

Mechanická práce srdce

- Pravá komora vykoná 20 % práce levé komory = 0,19 J
- Celková mechanická práce srdce v jedné systole = 1,13 J
- Celková energie srdečního svalu rovna součtu mechanické práce a energie nutné k udržení svalového tonu

Mechanická práce srdce

- Samotná mechanická práce představuje jen 10 %, zbytek energie se spotřebuje na udržení svalového napětí
- Účinnost
 - Myokard 30 %
 - Celé srdce 10%
- Výkon
 - 13 W (jen 1,3 W je samotná mechanická práce)

Mechanická práce srdce

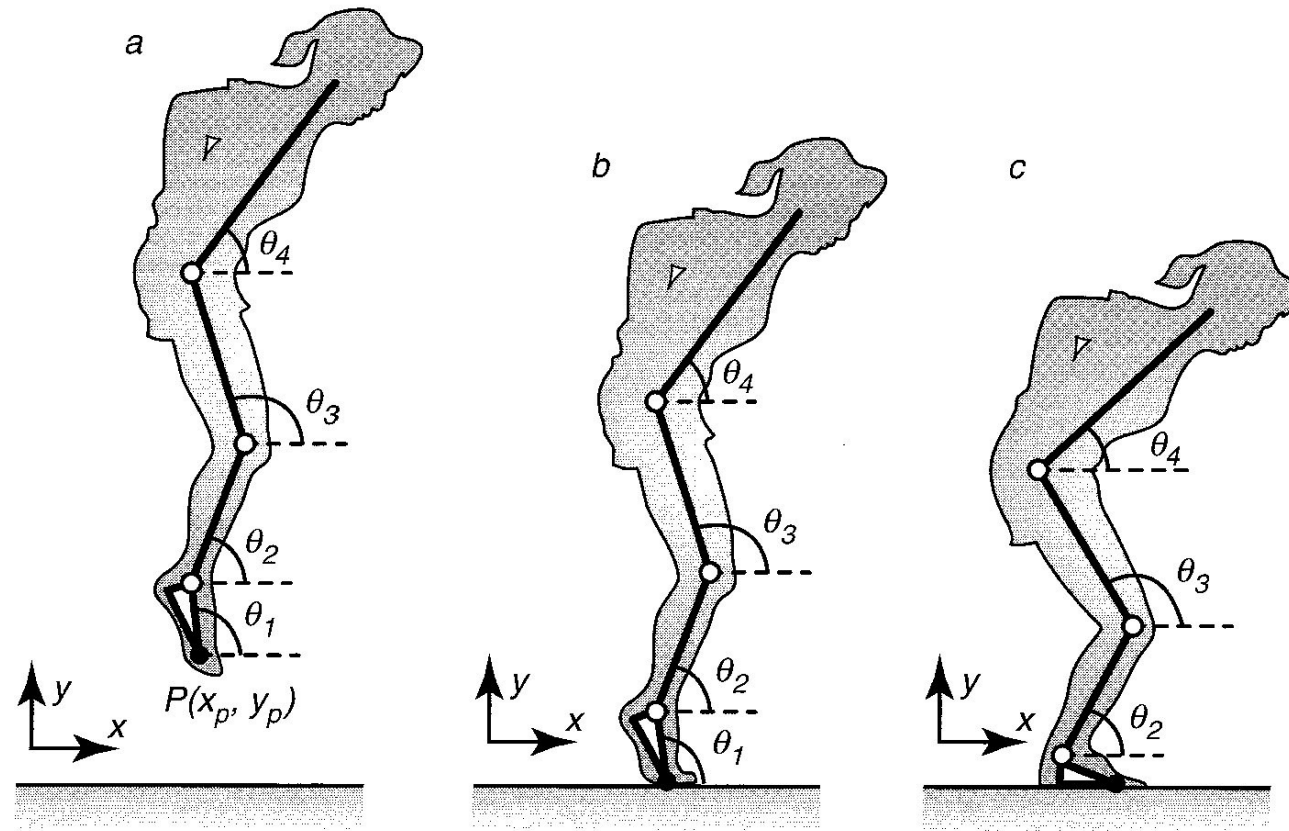
Výkon

- Lze hodnotit také prostřednictvím objemu vypuzené krve:

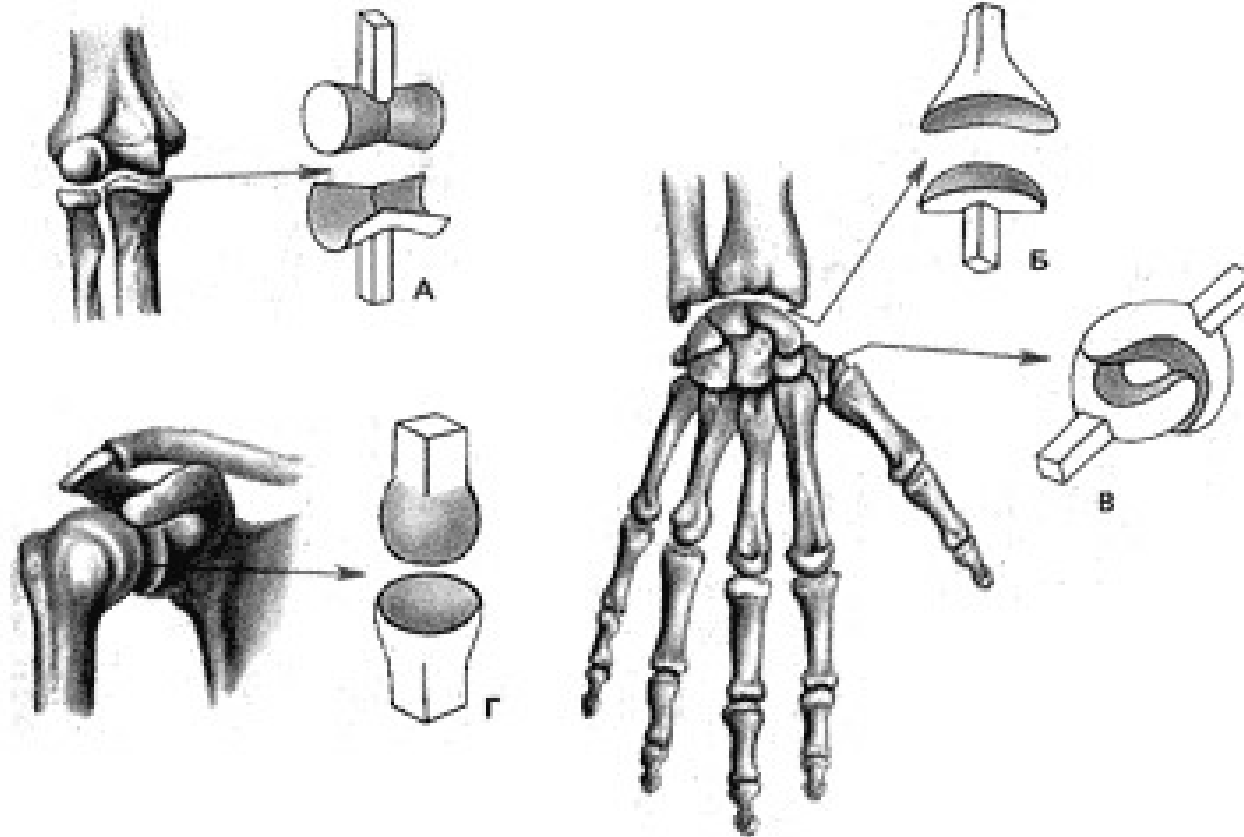
$$EF = \frac{eDV - eSV}{eDV}$$

- EF = ejekční frakce; eDV objem komory na konci diastoly; eSV objem komory na konci systoly
- Nárůst hodnoty eSV značí ochablost komor (patologie) a nižší výkon

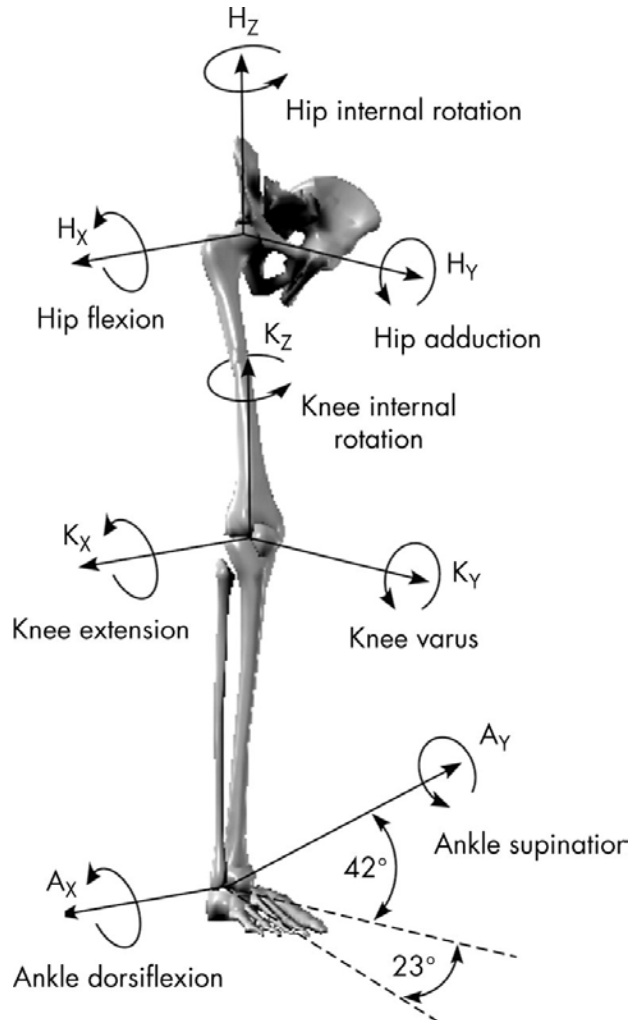
Stupně volnosti



Stupně volnosti



Stupně volnosti



Síla

Síla je veličina, kterou užíváme k popisu vzájemného působení těles.

Jednotkou síly je newton [N].

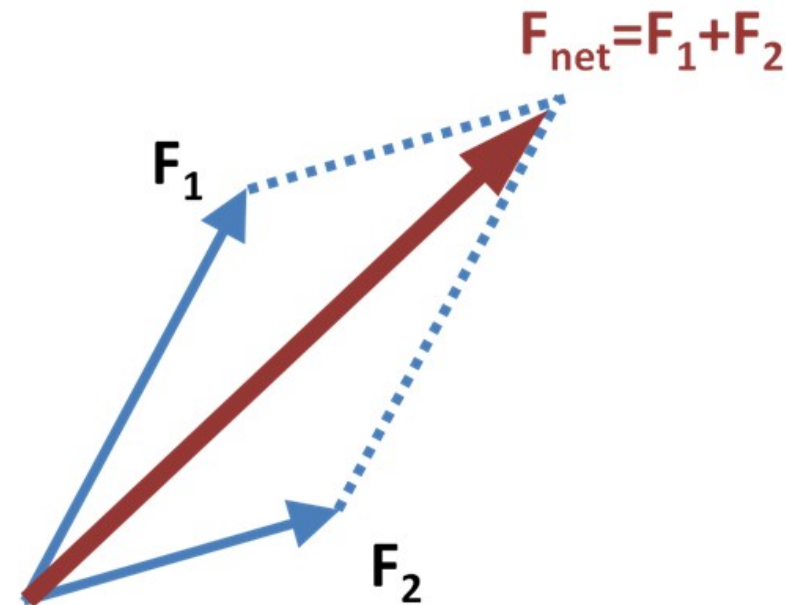
Znázornění síly orientovanou úsečkou (úsečka s šipkou). Bod, ve kterém síla působí, se nazývá působíště síly. Přímka, v níž síla působí, se nazývá nositelka síly. Sílu můžeme posunovat podél její nositelky bez změny účinku.

Skládání sil

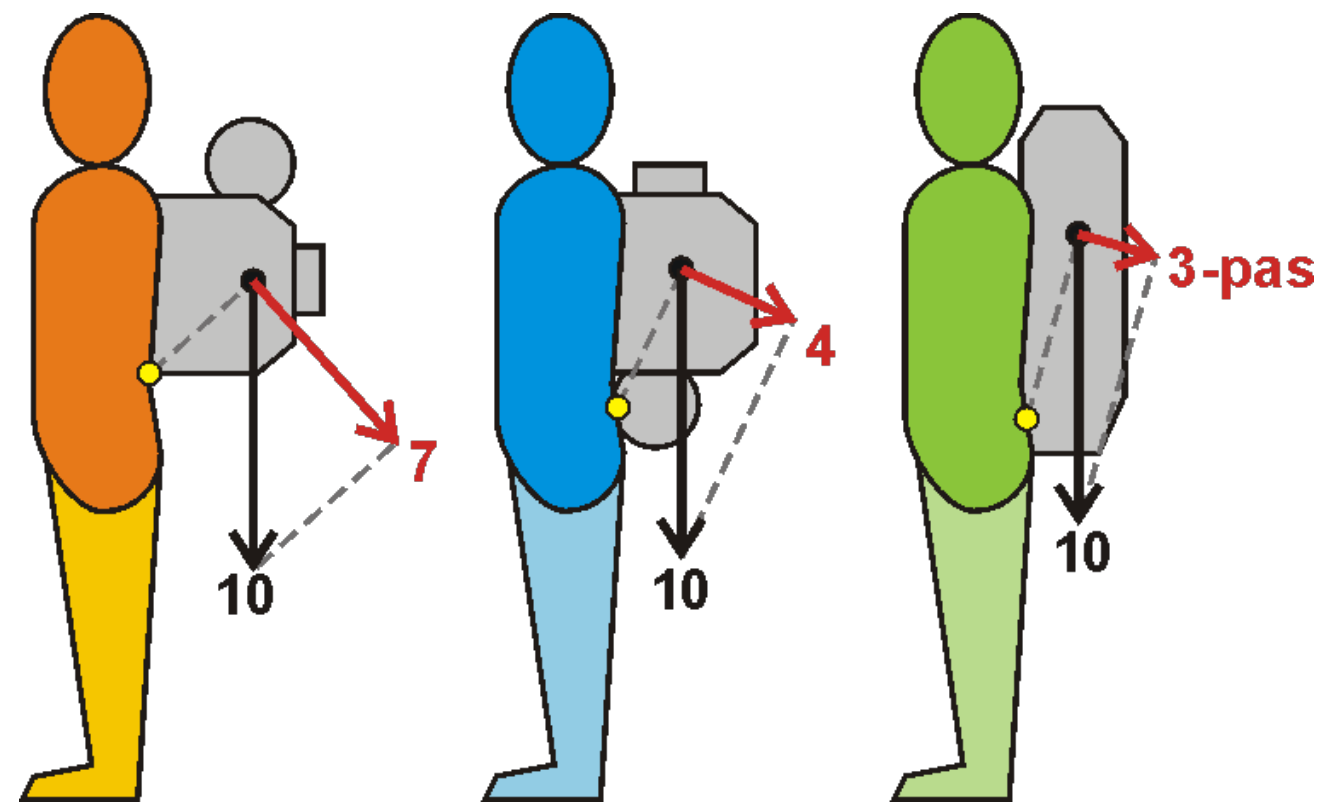
Skládání dvou různoběžných sil se stejným působištěm:

úsečky znázorňující síly
doplníme na rovnoběžník
výslednice je síla, která je
úhlopříčkou rovnoběžníka
a vychází z působiště obou
sil

každou sílu můžeme
rozložit na dvě složky



Rozklad síly



Moment síly

Moment síly popisuje otáčivé účinky síly.

Moment síly je roven součinu ramene síly a síly ($M = d F$).

Rameno síly je kolmá vzdálenost nositelky síly a osy otáčení.

Jednotkou momentu síly je newtonmetr, který má značku
N.m.

Dvojice sil dvě rovnoběžné, stejně veliké síly opačného směru, s různými nositelkami.

Moment síly



Příklad

Na těleso působí síly F_1 a F_2 . Když je velikost výslednice těchto sil R rovna 5 N a platí $R_x = 3$ N, $F_{1x} = 2$ N, $F_{1y} = 1$ N, určte složky síly F_2 .

$$F_{2x} = 1\text{ N}, F_{2y} = 1\text{ N}$$

$$F_{2x} = 1\text{ N}, F_{2y} = 3\text{ N}$$

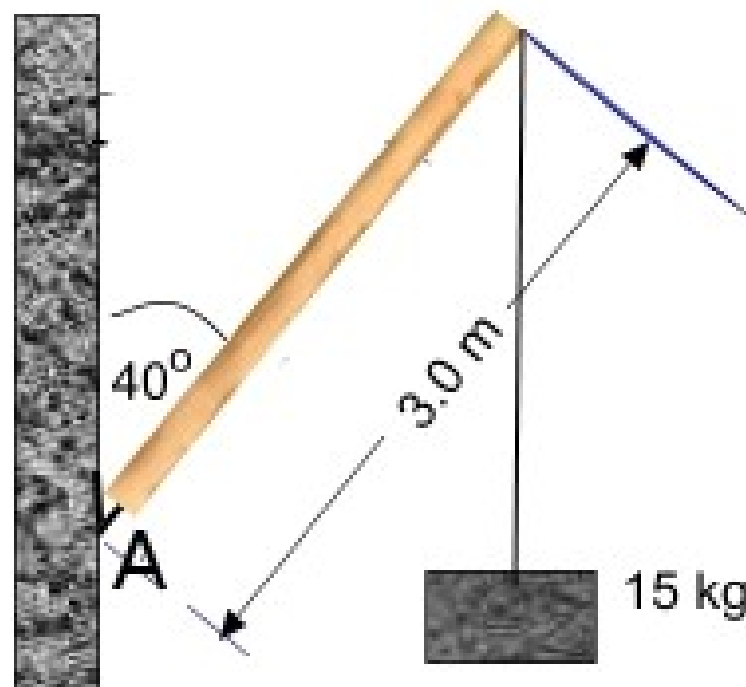
$$F_{2x} = 2\text{ N}, F_{2y} = 2\text{ N}$$

$$F_{2x} = 2\text{ N}, F_{2y} = 4\text{ N}$$

Příklad

Závaží o hmotnosti 15 kg působí na tyč o délce 3 m podle obrázku. Určte jak velký moment síly působí v bodě A

- 120 Nm
- 280 Nm
- 330 Nm
- 450 Nm



Příklad

Pro síly F_1 , F_2 a F_3 platí $F_3 = F_1 + F_2$ a pro jejich velikosti platí $F_3^2 = F_1^2 + F_2^2$. Když složky síly F_3 jsou $F_{3x}=3$ N a $F_{3y}=4$ N, určte velikosti sil F_1 a F_2 .

$$F_1 = 2,0\text{N}, F_2 = 4,5\text{N}$$

$$F_1 = 3,0\text{N}, F_2 = 4,0\text{N}$$

$$F_1 = 1,8\text{N}, F_2 = 3,2\text{N}$$

$$F_1 = 2,2\text{N}, F_2 = 4,3$$

Příklad

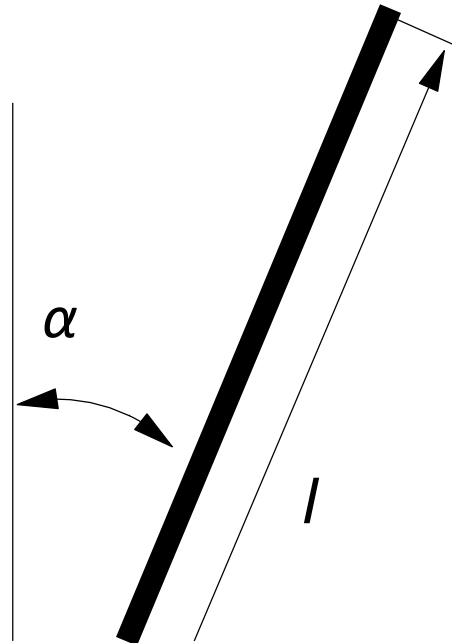
Homogenní tyč o délce $l = 3$ m a hmotnosti $m = 10$ kg se vychýlí z rovnovážné polohy o úhel $\alpha = 30^\circ$. Určte moment tíhy tyče vzhledem k bodu A.

55 Nm

75 Nm

89 Nm

150 Nm



Příklad

Na těleso působí síly F_1 a F_2 . Když je velikost výslednice těchto sil R rovna 5 N a platí $R_x = 3$ N, $F_{1x} = 2$ N, $F_{1y} = 1$ N, určte složky síly F_2 .

$$F_{2x} = 1\text{ N}, F_{2y} = 1\text{ N}$$

$$F_{2x} = 1\text{ N}, F_{2y} = 3\text{ N}$$

$$F_{2x} = 2\text{ N}, F_{2y} = 2\text{ N}$$

$$F_{2x} = 2\text{ N}, F_{2y} = 4\text{ N}$$

Příklad

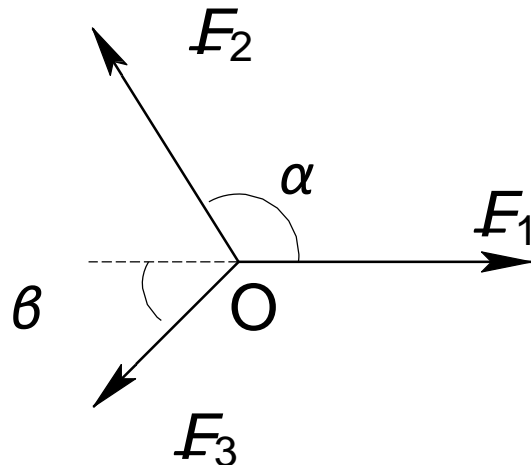
Určte velikost síly F_3 a úhel β , tak aby účinek sil F_1 , F_2 a F_3 působících v bodě O byl nulový. ($F_1 = 200N$, $F_2 = 300N$, $\alpha = 120^\circ$)

$$F_3 = 345N, \beta = 68^\circ$$

$$F_3 = 322N, \beta = 73^\circ$$

$$F_3 = 265N, \beta = 79^\circ$$

$$F_3 = 186N, \beta = 43^\circ$$



Moment síly je nenulový když

rameno nenulové síly je nulové

nositelka nenulové síly prochází středem otáčení

střed otáčení neleží na nositelce nenulové síly

nenulová síla leží na přímce, která spojuje střed otáčení a
působíště síly

Účinek trojice sil působících na těleso v rovině je nulový.

uvedený výrok neplatí nikdy

jen když je jich vektorový součet nulový

jen když je jejich vektorový součet nenulový

jen když síly leží na přímce a mají stejnou velikost ale

opačný směr

Jak velkým momentem působí ryba na ruku držící rybářský prut podle obrázku.

112 Nm

168 Nm

109 Nm

188 Nm

