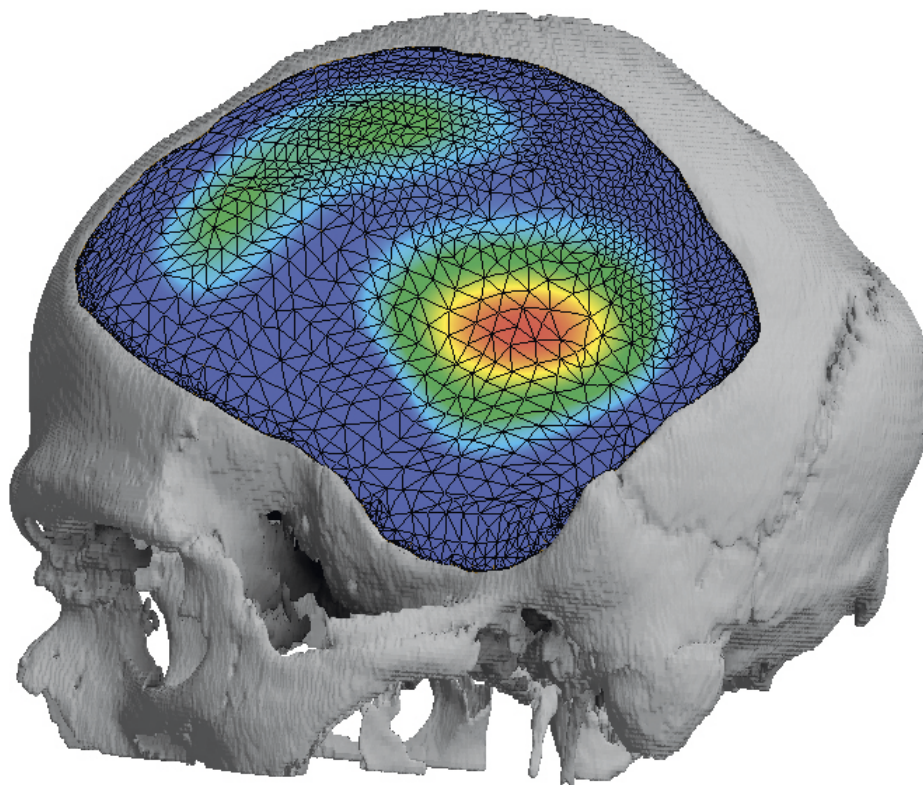


Lukáš Čapek, Petr Hájek, Petr Henyš a kolektiv

Biomechanika člověka

ČESKÁ SPOLEČNOST PRO
BIOMECHANIKU





Lukáš Čapek, Petr Hájek, Petr Henyš a kolektiv

Biomechanika člověka



Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

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

**Doc. Ing. Lukáš Čapek, Ph.D., MUDr. Petr Hájek, Ph.D.,
Ing. Petr Henyš, Ph.D., a kolektiv**

Biomechanika člověka

Kolektiv autorů:

Doc. Ing. Lukáš Čapek, Ph.D., MUDr. Petr Hájek, Ph.D., Ing. Petr Henyš, Ph.D., doc. Ing. Zdeněk Horák, Ph.D., doc. Ing. Lukáš Horný, Ph.D., doc. Ing. Luděk Hynčík, Ph.D., Ing. Alena Jonášová, Ph.D., Ing. Miloslav Vilímek, Ph.D., doc. Ing. Jan Vimmr, Ph.D.

Recenzent:

Prof. Ing. Jiří Křen, CSc.

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

© Grada Publishing, a.s., 2018

Design Photo © Grada Publishing, a.s., 2018

Obrázek na obálce doc. Ing. Lukáš Čapek, Ph.D.

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

jako svou 6989. publikaci

Odpovědná redaktorka Karla Hejduková

Grafika obrázků Kateřina Lisková

Sazba a zlom Antonín Plicka

Počet stran 208

1. vydání, Praha 2018

Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a.s.

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 ale nevyplývají pro autory ani pro nakladatelství žádné právní důsledky.

ISBN 978-80-271-2144-1 (pdf)

ISBN 978-80-271-0367-6 (print)

Kolektiv autorů

Doc. Ing. Lukáš ČAPEK, Ph.D.
Technická univerzita v Liberci

MUDr. Petr HÁJEK, Ph.D.
Univerzita Karlova
Lékařská fakulta v Hradci Králové

Ing. Petr HENYŠ, Ph.D.
Technická univerzita v Liberci

Doc. Ing. Zdeněk HORÁK, Ph.D.
Vysoká škola polytechnická Jihlava

Doc. Ing. Lukáš HORNÝ, Ph.D.
České vysoké učení technické v Praze

Doc. Ing. Luděk HYNČÍK, Ph.D.
Západočeská univerzita v Plzni

Ing. Alena JONÁŠOVÁ, Ph.D.
Západočeská univerzita v Plzni

Ing. Miloslav VILÍMEK, Ph.D.
České vysoké učení technické v Praze

Doc. Ing. Jan VIMMR, Ph.D.
Západočeská univerzita v Plzni

Obsah

Slovo odborníka úvodem	11
Předmluva	13
1 Co je biomechanika?	15
2 Úvod do mechaniky	17
2.1 Mechanická odezva tkání na zatížení	19
2.2 Elastické materiály	20
2.3 Elastoplastické materiály	24
2.4 Viskoelastické materiály	25
3 Funkční anatomie	29
3.1 Tkáň	29
3.1.1 Pojivová tkáň	29
3.1.2 Další tkáň	30
3.1.3 Lidská krev	31
3.2 Popis lidského těla	33
3.3 Kosterní soustava	34
3.3.1 Obecná osteologie	34
3.3.2 Obecná artrologie	35
3.3.3 Osový skelet	38
3.3.4 Lebka	41
3.3.5 Kostra horní končetiny	41
3.3.6 Kostra dolní končetiny	43
3.4 Svalová soustava	47
3.4.1 Obecná myologie	47
3.4.2 Svalstvo trupu a hlavy	48
3.4.3 Svaly horní končetiny	50
3.4.4 Svaly dolní končetiny	51
3.5 Kůže	52
3.6 Oběhový systém	53
4 Biomechanika tkání	57
4.1 Biomechanika lidské kůže	57
4.1.1 Mechanické vlastnosti kůže	58
4.1.2 Matematické modely lidské kůže	59
4.2 Biomechanika srdce a krevních cév	61
4.2.1 Stavba cévní stěny	61
4.2.2 Fyziologie pohybu krve	62
4.2.3 Mechanické vlastnosti srdce a cév	64
4.2.4 Matematický popis napjatosti a deformace cév	67
4.2.5 Vliv stárnutí a onemocnění	69
4.2.6 Trendy v biomechanice krevního oběhu	71
4.3 Biomechanika kosterního svalu	74

4.3.1	Elementární svalová komponenta – funkční vlastnosti	74
4.3.2	Úroveň aktivace	79
4.3.3	Dynamika šlachy	79
4.3.4	Dynamika svalové kontrakce	83
4.4	Biomechanika kostní tkáně	87
4.4.1	Mikrostruktura kosti	87
4.4.2	Základní mechanické a biomechanické vlastnosti kosti	89
4.4.3	Remodelace kostní tkáně a její adaptace na zatížení	93
4.4.4	Klinické důsledky biomechaniky kosti	95
5	Experimentální biomechanika	99
5.1	Návrh a hodnocení experimentu v biomechanice	101
5.1.1	Návrh experimentu	102
5.1.2	Vyhodnocení experimentu a report	105
5.2	Elektromyografie	106
5.2.1	Elektrická aktivita činného svalu – akční potenciál (AP)	106
5.2.2	Podstata EMG záznamu	107
5.2.3	Elektrody	108
5.2.4	Řízení a odstupňování síly	109
5.2.5	Aktivita motorické jednotky (MJ) vzhledem k síle	109
5.2.6	Aktivace svalu	110
5.2.7	Časové zpoždění	110
5.2.8	Svalová vlákna a typy svalových vláken	110
5.2.9	Závislost síla – EMG signál	112
5.2.10	Porovnání mezi objekty, svaly a kontrakcemi	113
5.2.11	Zpracování EMG signálu	114
6	Výpočtová biomechanika	117
6.1	Metoda konečných prvků v biomechanice	117
6.1.1	Stručný základ MKP	118
6.1.2	Materiálové modely	121
6.1.3	Lineární versus nelineární MKP	122
6.1.4	Přesnost a adaptivita MKP	124
6.1.5	Víceškálové modelování	127
6.2	Virtuální modely člověka pro analýzu nárazu	131
6.2.1	Impaktní biomechanika	131
6.2.2	Biomechanické modely člověka	136
6.2.3	Škálování	141
6.2.4	Validace	145
6.2.5	Virtuální testování	147
6.3	Matematické modelování proudění krve v reálných modelech cév	152
6.3.1	Vlastnosti krvinek	153
6.3.2	Reologie krve	154
6.3.3	Newtonské a neneutronské modely krve	157
6.3.4	Hemodynamika a její význam v kardiovaskulárních onemocněních	159
6.3.5	Matematické modely proudění krve	163
6.3.6	Numerická simulace proudění krve v modelech cév	172

7	Vývoj implantátů	183
7.1	Vymezení pojmu a historický vývoj	183
7.2	Legislativa zdravotnických prostředků	184
7.3	Vývojová fáze implantátu	185
7.4	Příčiny selhání implantátů	187
7.4.1	Technické příčiny selhání implantátu	187
7.4.2	Biologické příčiny selhání implantátu	191
7.5	Stabilita implantátů	192
7.5.1	Preklinické ověřování stability	193
7.5.2	Klinické ověřování stability	193
	Seznam použitých zkratk	197
	Rejstřík	199
	Souhrn	201
	Summary	203
	Stručné představení autorů	205

Slovo odborníka úvodem

Autorům této knihy se podařilo do relativně nemnoha stran vtěsnat značné množství informací týkajících se biomechaniky tkání a vybraných orgánových systémů lidského těla. V úvodu skromně zmiňují, že kniha je určena studentům magisterského studia biomechaniky a biomedicíny. Domnívám se však, že texty jednotlivých kapitol mají daleko významnější edukační potenciál spočívající ve snadnějším nalézání východisek pro mezioborovou spolupráci při studiu lidského těla jako takového, a lepším pochopení obsahu základních pojmů, kterým rozumí jinak člověk s technickým či matematickým vzděláním, jinak absolvent studia přírodních věd a jinak také medicínským vzděláním jedinec. Tato kniha nabízí možnost začít používat společný jazyk odborníkům všech zmíněných oborů.

Podíváme-li se na strukturu v knize nabízených informací, nemůžeme nezaregistrovat její precizní podobu, kterou se pokusím shrnout do několika bodů:

1. Kniha začíná definicí biomechaniky s připomínkou nejvýznamnějších osobností, které formovaly rozvoj tohoto oboru.
2. Následuje vysvětlení základních pojmů týkajících se mechanických vlastností lidských tkání a jejich odezvy na zatížení, a popis charakteristik materiálů používaných v humánní medicíně.
3. Další kapitolou je podrobný popis morfologie tkání a orgánových systémů z hlediska jejich funkce psaná pro potřeby technického vzdělání, ale právě tím je přínosná i pro biology a lékaře.
4. Na tento popis morfologie navazuje popis mechanických vlastností lidských tkání včetně konstatování jejich změn působením některých patofyziologických jevů, jakými jsou nemoc, poranění či jeho hojení, stárnutí.
5. Není opomenuta problematika vhojování materiálů používaných v implantologii a reakce tkání na tyto materiály.
6. Dalším významným oddílem knihy je popis možností zkoumat biomechanické jevy týkající se živého organismu experimentálními metodami.
7. Velká pozornost je věnována výpočtové biomechanice, která posouvá zkoumání mechanických vlastností lidských tkání na úroveň zcela oddělenou od samotného organismu, což umožňuje pochopení těch skutečností, které nelze ověřit experimentem, ale lze je věrohodně simulovat matematickým modelem.
8. Závěrem je zmíněna problematika implantologie jak z hlediska vývoje a legislativy, tak z hlediska sledování posuzování mechanických vlastností implantátů při jejich spojení s lidskou tkání.

Knihu Biomechanika člověka považuji za zdařilé a pro naše podmínky velmi potřebné dílo, které bylo sepsáno špičkovými odborníky. Nepochybuji, že si kniha najde své čtenáře napříč obory zabývajícími se studiem biomechanických vlastností lidských tkání a orgánových systémů, a studiem materiálů vhodných pro použití v humánní implantologii.

prof. MUDr. Valér Džupa, CSc.

Předmluva

Vážená čtenářko, vážený čtenáři,

dovolte mi, abych knihu, která se vám dostala do ruky, začal úsměvnou historkou, která se přihodila před lety při pořádání národního kongresu České společnosti pro biomechaniku. Pro soz zahraničních přednášejících byl zajištěn transport z Prahy a dotyčný řidič se zvesela bavil s naším mladším kolegou. Po chvílce zvážněl a zeptal se, co to je vlastně za akci, na kterou má vézt zahraniční hosty. Kolega odpověděl, že kongres biomechaniky a dotyčný v patřičném úžasu nevěřičně lapal po dechu řka, že všechno, co je bio nestojí za řeč, natož za kongres.

Na této veselé historce jsem si před lety uvědomil, že povědomost o našem oboru je ve společnosti velmi malá, i přes skutečnost, že z jejích poznatků čerpá nemalý prospěch. Vždyť právě díky našemu oboru mohou lékaři vykonávat ty nejsmělejší operace, sportovci podávat špičkové výkony, pacienti se vracet dříve do normálního života a policisté dopadnout pachatele. Z tohoto stavu není třeba vinit společnost, ale především sami sebe, nás biomechaniky, kteří slávu našeho oboru nešíří na všechny světové strany. Tento fakt, jako určitý impuls sebereflexe, je jedním z hlavních motivů pro sepsání této knihy.

Čtenář se logicky bude ptát, na co kniha navazuje a proč stojí za přečtení. V historickém kontextu předkládané knize předchází především skripta profesora Jaroslava Valenty a kol. (Biomechanika srdečně cévního systému člověka) a profesora Jiřího Křena a kol. (Biomechanika). Navíc před více než 10 lety vyšla monografie autorů Nedoma a kol. (Biomechanika lidského skeletu a umělých náhrad jeho částí). Nejnovější ucelené dílo pochází z dílny autorů Rosenberg a kol. s názvem Experimentální chirurgie – nové technologie v medicíně: Biomechanika. V ostatních případech se jedná pouze o dílčí kapitoly, které jsou začleněny do různých tematických děl. Samostatná kniha o biomechanice, která by byla napsána jako konsenzus autorů napříč institucemi v České republice, za posledních 20 let nevyšla.

Kniha je členěna do šesti kapitol, v kterých se autoři snaží shrnout současný stav poznání v dané problematice. V žádném případě se nejedná o vyčerpávající text k danému tématu a s určitým nadhledem, možné je jej chápat jako určitý kompromis, který autoři volili mezi odborností a čtivostí knihy. V případě potřeby hlubšího poznání čtenáři musí přistoupit ke studiu cizojazyčné literatury, která je vždy uvedena na závěr jednotlivých kapitol. Kniha je především určena studentům magisterského studia oborů biomechaniky a biomedicíny. Navíc, díky zjednodušenému charakteru textu i pro studenty lékařských oborů, kteří si chtějí rozšířit své znalosti z oboru biomechaniky. V širším kontextu se autoři snaží sjednotit názvosloví a nomenklaturu tohoto oboru v České republice.

Jednotliví autoři patří mezi přední odborníky biomechaniky s dlouholetou, bohatou zkušeností jak v oblasti vědy, tak i pedagogiky. Všichni autoři jsou členy České společnosti pro biomechaniku, která náš obor sjednocuje.

Na závěr je mou milou povinností poděkovat všem, kteří se podíleli na vzniku této knihy, a popřát vám příjemné čtení.

za autorský kolektiv
Lukáš Čapek

1 Co je biomechanika?

Hledáme-li význam slova biomechanika, například v Masarykově slovníku naučném, nalezneme „Podle Delagea¹ nauka o příčině podmíněných dějích životních, ať se vyvíjejících, ať již hotových, tedy vývojová mechanika a fyziologie zároveň“. Zjednodušeně dnes biomechaniku definujeme jako mechaniku aplikovanou v biologii. Nicméně čtenáři je jistě zřejmé, že definice je poněkud povrchní, a proto se pokusme vymezit cíle tohoto oboru, na kterých bude vše zřetelnější. Cílem oboru je porozumět:

- mechanickým zákonitostem živých organismů, a to především člověka
- fyziologickým stavům
- předpovědět patologické změny v organismu
- navrhnout umělé náhrady

Přesah oboru je nesmírný a hranice nejsou jednoznačně definované. Historicky biomechanika vykrystalizovala z oboru mechaniky, a především funkční medicíny. Za svůj rozvoj děkuje pracím takových odborníků jako William Harvey, Giovanni Borelli, Thomas Young, Herrmann von Helmholtz a jiní.

Mezník v moderní biomechanice lze vnímat uspořádáním světového kongresu v roce 1967 ve švýcarském Zürichu a vydáním, dnes již legendární monografie Biomechanics od Yuana Funga. V České republice je potřeba zmínit především význam profesora Jaroslava Valenty, který má zásluhu na rozvoji biomechaniky na předním národním pracovišti, a vzniku České společnosti pro biomechaniku, která má více než třicetiletou historii a pobočky ve všech významných akademických centrech.

Práce antických, středověkých a renesančních biomechaniků najdeme v každé encyklopedii. Pojďme se raději podívat na současné žijící legendy, které posunuly hranici našeho poznání v posledních 30 letech².

Amit Gefen svou prací nespádá do hlavního proudu našeho oboru, nicméně výsledky jeho práce posouvají hranice našeho poznání velkou měrou. Profesor Gefen se specializuje především na úlohu mechanických stimulů při vzniku a šíření nemocí, a to především nádorových onemocnění. Dlouhodobě pracuje jako klíčový pracovník na universitě Tel Aviv v Izraeli. Jeho současný H index je 46.

<https://www.eng.tau.ac.il/~msbm/>

¹ Profesor působící na pařížské Sorboně na přelomu 20. století. Proslavil se především prací o buňkách a jejich mechanobiologii.

² Čtenáři je jistě zřejmá určitá nadsázka v textu. Je velmi obtížné vybrat jen několik vynikajících vědců z tisíců. Nicméně se domníváme, že vybraní vědci svou činností zcela nesmazatelně celosvětově posouvají hranice poznání nebo propagují tento obor více oproti jiným.

Walter Herzog patří mezi přední propagátory spojující neurologii s biomechanikou. Hlavní jeho práce jsou zaměřeny na pohybový aparát, jmenovitě na růst, léčbu a adaptaci měkkých tkání. Profesor Herzog dlouhodobě působí na University of Calgary v Kanadě. Jeho současný H index je 46.

<http://contacts.ucalgary.ca/info/kn/profiles/196-1425>

Gerhard Holzapfel působící v současné době na Graz University of Technology patří mezi světovou špičku v oblasti tvorby konstitutivních vztahů. Jeho tým pracuje především v oblasti výpočtové biomechaniky měkkých tkání. Mezi jeho nejznámější práce bezpochyby patří nový konstitutivní model určený pro modelování tepny (Holzapfel, Gasser, Ogden: New Constitutive Framework for Arterial Wall Mechanics and a Comparative Study of Material Models). Podle agentury Thomson Reuter se profesor Holzapfel v roce 2014 zařadil mezi vědce, kteří v celosvětovém měřítku posouvají hranice našeho poznání. Jeho současný H index je 53.

https://www.biomech.tugraz.at/people/gerhard_holzapfel

Jay Humphrey dlouhodobě patří mezi průkopníky kardiovaskulární biomechaniky současné doby. Momentálně působí na Yale School of Engineering and Applied Science. Kromě jeho rozsáhlé odborné publikační činnosti je nutné zmínit především jeho dnes již legendární knihu Cardiovascular Soft Tissue Mechanics, kterou napsali se Stefanem Cowinem v roce 2001.

<http://seas.yale.edu/faculty-research/faculty-directory/jay-humphrey?destination=node%2F319>

Peter Hunter v současné době zastává funkci ředitele Auklandského bioinženýrského institutu na Novém Zélandu a institutu Výpočtové fyziologie na Oxfordské Univerzitě ve Velké Británii. Jeho vědecká práce zasahuje především do oblasti výpočtové biomechaniky, jmenovitě do více škálového modelování srdečního svalstva.

<https://unidirectory.auckland.ac.nz/profile/phun025>

Marcus Pandy je současným vedoucím oddělení Biomedicínského inženýrství na australské Univerzitě v Melbourne. Jeho tým dlouhodobě pracuje v oblasti biomechaniky pohybového aparátu, kde se snaží porozumět funkcím svalstva a kloubů během fyziologických aktivit, jako jsou chůze, běh a jiné. Jeho současný H index je 63.

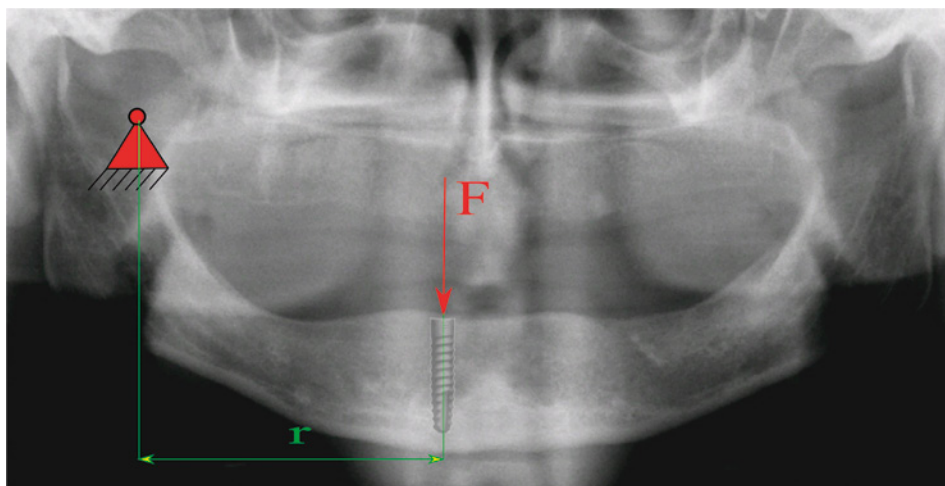
http://www.mech.unimelb.edu.au/people/staff.php?person_ID=98740

Marco Viceconti je zakládajícím členem Virtual Physiological Human komunity a současným profesorem na University of Sheffield. Jeho práce je ovšem neodmyslitelně spjata s Ortopedickým Institutem Rizzoli v Boloni, kde dlouhodobě působil jako technický ředitel Medical Technology Lab a se svými kolegy tuto laboratoř dostal mezi světové hráče v oblasti klinické biomechaniky. Jeho vědecké působení je patrné hlavně v tvorbě a validaci matematických modelů v oblasti pohybového aparátu. Zásadní přínos v oboru je masivní využití metody konečných prvků v ortopedii. Jeho současný H index je 43. <https://www.sheffield.ac.uk/mecheng/staff/mviceconti>

2 Úvod do mechaniky

Mechanika tvoří slovní základ biomechaniky, a tudíž je zcela jasné, že bez pohledu do této disciplíny se tato kniha neobejde. Následující kapitola je určena v první řadě pro netechnicky vzdělané čtenáře, kteří by zde měli nalézt vymezení základních pojmů, které se následně objevují v kapitolách. Výjimku tvoří podkapitola o nelineárních materiálových modelech, která je určena pro čtenáře, jež si již osvojili znalosti z mechaniky kontinua. Podrobnější výklad je v jednotlivých kapitolách.

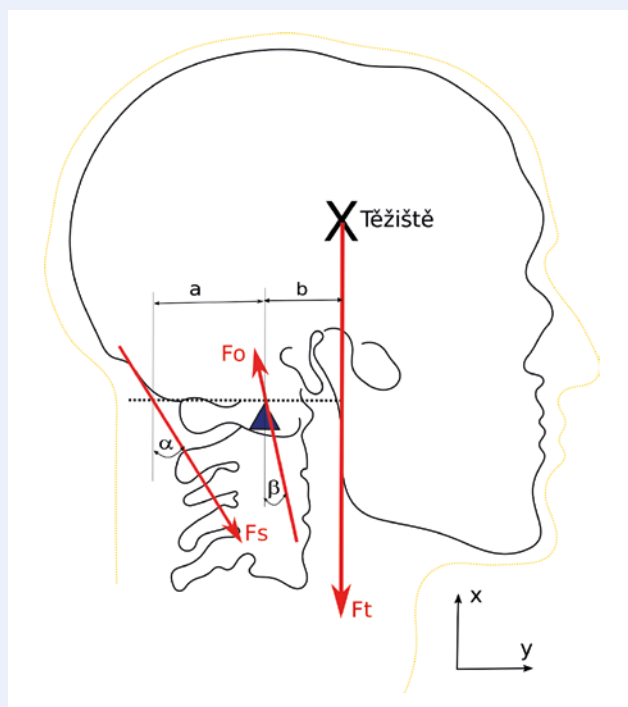
Z pohledu definice se mechanika zabývá pohybem a změnami tvaru těles. V našem případě se věnuje pohybu lidského těla a změnami tvaru lidských tkání, případně implantátů. Při fyziologických pohybech lidského těla, tj. při jeho denní aktivitě, jsou orgány, tkáně zatěžovány **silami**. Pojem síly má abstraktní charakter a vychází z lidského vnímání zátěže na člověka. Síla je definována nejen svojí velikostí, ale i směrem a smyslem. Idealizovaná síla působí v jednom bodě. Vzhledem k vektorovému charakteru síly lze sílu rozložit do složek zvoleného souřadnicového systému pomocí směrových úhlů. Míru točivého účinku síly k bodu vyjadřuje **moment síly**, který je dán součinem této síly a vzdáleností mezi tímto bodem a nositelkou síly (obr. 1). Základní úlohou v biomechanice je vyšetření silového působení na lidské tělo. K tomu využíváme základní Newtonovy zákony. Pokud objekt setrvává v klidu, musí být soustava sil, která na něj působí, v rovnováze. Soustava sil je v rovnováze, pokud je její výslednice nulová a součet všech momentů sil je také nulový. Jinými slovy, pokud jejich výsledné nahrazení je nulové.



Obr. 1 Vyjádření momentového účinku síly působící na dentální implantát $M = F \cdot r$ v radiografickém snímku bezzubé dolní čelisti

Příklad 1

Všichni známe situaci, kdy při spánku vsedě nám hlava klesne dopředu. Je to způsobeno tím, že těžiště lebky není ve stejné ose jako páteř a vyrovnávací funkci přejímá svalstvo. Vypočítejme zatížení druhého krčního obratle (C2) od prostého působení hlavy v přimžené poloze (obr. 2). Předpokládáme, že vyrovnávací funkci zajišťuje především *m. rectus capitis posterior major*.



Obr. 2 Zjednodušený analytický výpočet zatížení druhého krčního obratle od působení tíhy hlavy

Nejprve znázorníme schematický náčrt situace. Pro zjednodušení provedeme řešení pouze v rovinném zobrazení. Do těžiště hlavy zavedeme tíhovou sílu odpovídající součinu hmotnosti a gravitační konstanty. V nositelce svalu uvedeme sílu F_s a v místě kontaktu obratlů (kloubní plocha) reakční sílu F_o . Nalezení těchto sil spočívá v řešení soustavy rovnic rovnováhy:

$$\rightarrow: F_s \sin(\alpha) - F_o \sin(\beta) = 0$$

$$\uparrow: -F_s \cos(\alpha) + F_o \cos(\beta) - F_t = 0$$

$$\searrow: a F_o \cos(\beta) - (a + b) F_t = 0$$

Získali jsme soustavu tří lineárních rovnic. Následnými soustavami rovnic dostaneme:

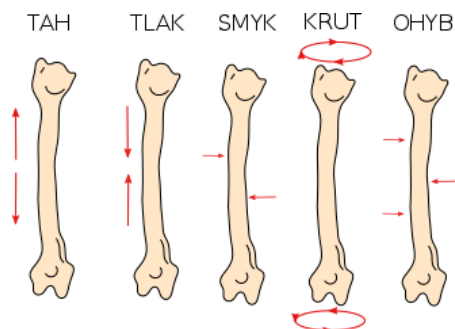
$$F_o = \frac{(a+b)}{a \cos(\beta)} F_t$$

$$F_s = \frac{(a+b)}{a \sin(\alpha)} \operatorname{tg}(\beta) F_t$$

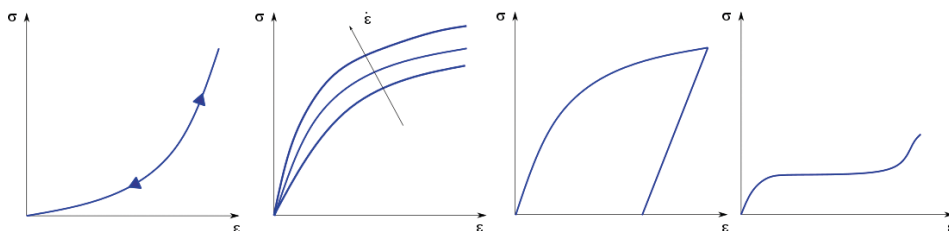
2.1 Mechanická odezva tkání na zatížení

Biologické, resp. syntetické materiály při zátěži vykazují různou **tuhost** a **pevnost**. Tuhost si lze představit jako odolnost proti zatížení, kdežto pevnost jako odolnost proti porušení. V běžném životě jsou biologické materiály vystaveny složitému namáhání, které souhrnně označujeme jako kombinované, tj. jedná se o kombinaci základních druhů namáhání. Základní druhy namáhání dle [obrázku 3](#) rozlišujeme na **tah (tlak)**, **krut**, **smyk** a **ohyb**. V případě, že jsou orgány nebo tkáně vystaveny těmto druhům namáhání, mění tvar, případně i objem, nebo dochází k porušení. Při zkoumání mechanických vlastností orgánů nebo tkání, získáme mechanickou odezvu tkání na daný druh zatížení. Podle typu odezvy rozeznáváme následné chování materiálů:

- **elastické** – není závislé na historii zatěžování a po odlehčení se tvar vrací do svého původního. Toto chování vykazuje především kostní tkáň, nebo konstrukční technické materiály v počáteční fázi zatěžování.
- **elastoplastické** – je závislé na historii zatěžování. Po odlehčení se nevrací do původního tvaru, ve struktuře vzniká plastická deformace. Toto chování je typické pro kovy nebo kostní tkáň.
- **viskoelastické** – je závislé na rychlosti zatěžování. Zpravidla při cyklickém zatěžování vzniká hysterezní křivka. Jedná se o typické chování měkkých tkání při cyklickém zatěžování.
- **viskoplastické** – je závislé na historii a rychlosti zatěžování. Vykazuje kombinaci chování výše uvedených. Typickým představitelem materiálů s tímto chováním jsou polymery, ve zdravotnictví např. vysokomolekulární polyetylen.



Obr. 3 Základní druhy namáhání v biomechanice



Obr. 4 Závislosti napětí na deformaci pro různé typy chování materiálů

Výsledná odezva je ve formě křivky, která má různý charakter (obr. 4). Naměřená závislost se zpravidla nevykresluje v osách síly [N] a posuvu [mm], nýbrž s ohledem na možnost srovnání těchto fyzikálních veličin. Z praktických důvodů se zavádí jednotka **napětí** [Pa] a **deformace** [-]. V případě zatěžování do porušení koncový bod na křivce odpovídá **mezi pevnosti** daného materiálu (označujeme R_m). Plocha pod touto křivkou určuje práci vykonanou během zatížení vzorku.

Pokud materiály vykazují v různých směrech zatěžování různé chování, pak mluvíme o materiálech **anizotropních**. Materiály používané ve zdravotnictví, vyjma textilních, vykazují většinou **izotropní** chování. Jinými slovy, vykazují stejnou odezvu v různých směrech zatížení. Oproti tomu většina biologických materiálů vykazuje **příčně izotropní**, případně **ortotropní** chování. Příčně izotropní materiál má různé vlastnosti ve vzájemně kolmých směrech tak, že vlastnosti ve dvou ze tří směrů jsou stejné. Ortotropní materiál vykazuje různé vlastnosti ve vzájemně kolmých směrech. Z tohoto důvodu není možné k identifikaci materiálu použít pouze jednoosou tahovou zkoušku, neboť k popisu chování materiálu je zapotřebí více nezávislých konstant, které z jednoosého tahu nejsme schopni určit. Provádíme zkoušky víceosé, nejčastěji dvouosé. I přes tuto skutečnost, jednoosá tahová zkouška patří mezi nejčastější typ zkoušek v biomechanice a *de facto* je to první volba při výzkumu mechanického chování. V následující podkapitole se zaměříme pouze na jednoosou napjatost, tj. na stav, kdy ve struktuře figuruje pouze jedna složka napětí³.

2.2 Elastické materiály

V předchozí kapitole jsme ukázali, jaká je odezva materiálů na mechanické zatížení. V oblasti výpočtové mechaniky potřebujeme výpočtový model, tak abychom mohli popsat chování daného materiálu. Vztahy mezi napětím a deformací popisují **konstitutivní rovnice**. Zaměříme se nejprve na materiály elastické, tj. takové, jejichž odezva není závislá na historii zatěžování a při jejich zatěžování nedochází k disipaci energie. Odezva na zatížení má buď charakter lineární, nebo nelineární.

³ Napjatost je tenzorová veličina a v prostoru je popsána šesti nezávislými složkami.

Lineární odezva se většinou vyskytuje u materiálů vykazujících malé přetvoření, tj. protažení je malé. Pro tento předpoklad v jednorozměrné úloze (1D) můžeme definovat následující vztahy:

smluvní napětí

$$\sigma_{\text{smluvní}} = \frac{F}{S_0} \quad [2.1]$$

deformace

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \quad [2.2]$$

poměrné protažení⁴

$$\lambda = \frac{L}{L_0}, \quad [2.3]$$

kde F je zatěžující síla, S_0 je počáteční průřez, L_0 počáteční délka, Δl je rozdíl konečné (L) a počáteční délky. Fenomenologicky chování materiálu přirovnáváme k pružině, která má definovanou tuhost a při zatěžování vykazuje lineární chování. Vzhledem k přímkovému charakteru odezvy můžeme konstitutivní vztah popsat rovnicí přímky procházející počátkem souřadnicového systému v osách napětí a deformace, tuto rovnici nazýváme **Hookeovým zákonem**:

$$\sigma = E \varepsilon, \quad [2.4]$$

kde E je **Youngův modul** pružnosti, charakterizující sklon přímky, získáme jej takto:

$$E = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}. \quad [2.5]$$

V případě biologických materiálů využíváme s výhodou jednotku $\mu\varepsilon$, která je označována jako **mikrodeformace** (mikrostrain), a získáme ji následovně $\varepsilon \cdot 10^6$.

U měkkých tkání odezva na zatížení má zpravidla jiný průběh. Vzhledem k faktu, že zde neexistuje přímkový charakter křivky, určujeme u těchto materiálů počáteční, sečný a tečný modul (obr. 5).

⁴ Terminologie tohoto výrazu není v české literatuře ustálená. V anglosaské literatuře je ekvivalent „stretch“.