

Biomechanika

Biomolekuláris és szöveti rugalmasság

Mártonfalvi Zsolt



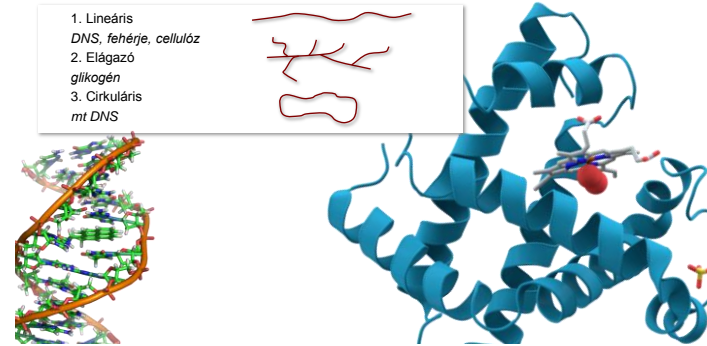
Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet
Semmelweis Egyetem
Budapest

Biomolekulák mint polimerek

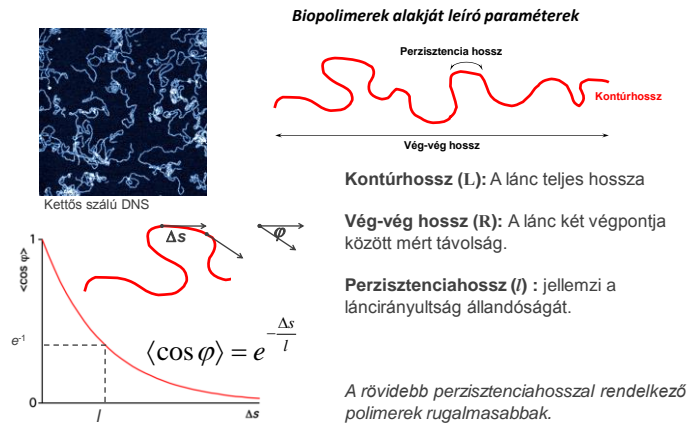
A biomolekulák polimerek.

Közös bennük: Lineáris elsődleges szerkezet (fehérje, DNS)
Monomerek között erős kötések (kovalens)
A lánc távoli részei között gyengébb másodlagos kötések

1. Lineáris
DNS, fehérje, cellulóz
2. Elágazó
glikogén
3. Cirkuláris
mt DNS

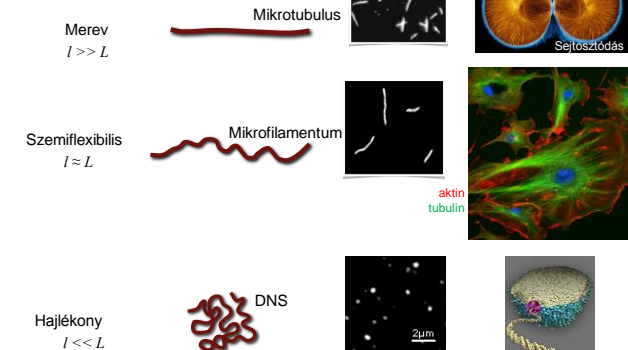


Milyen alakúak a biopolimerek?



Biopolimerek osztályozása hajlékonyságuk alapján

l = perzisztenciahossz
 L = kontúrhossz



Rugalmasak-e a biopolimerek?

Igen, de nem érvényes Hooke törvénye. Rugalmasságuk nem lineáris.

Entropikus rugalmasság

Hőmérsékleti energia ($k_B T$) a láncban hajlító mozgásokat gerjeszt

A lánc rendezetlensége (entrópiája) növekszik.

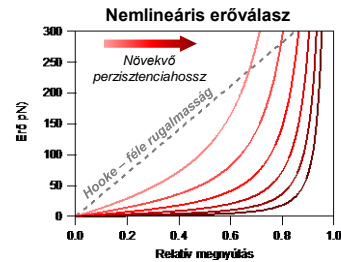
A lánc rövidül



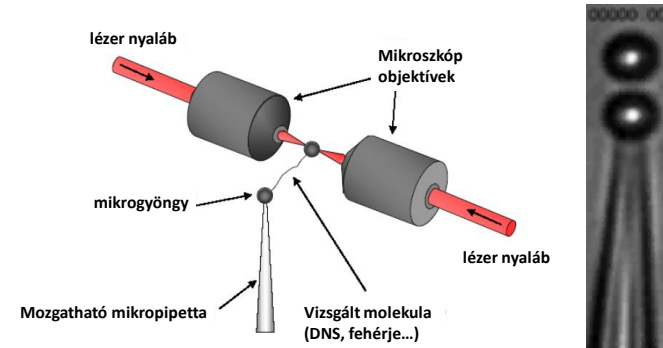
A megrövidült lánc erővel kinyújtható

$$F \sim \frac{k_B T}{l} \cdot \frac{R}{L} + \left(\frac{R}{L}\right)^3$$

F = erő
 l = perzisztenciahossz
 k_B = Boltzmann állandó
 T = abszolút hőmérséklet
 L = kontúrhossz
 R = vég-vég hossz
 R/L = relatív megnyúlás

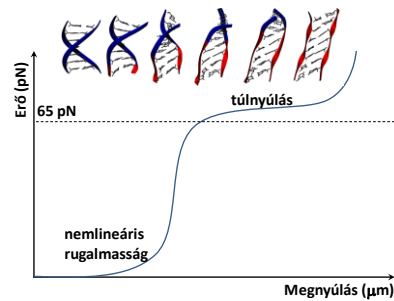


Lehet egyedi molekulákat nyújtani? a lézercsipesz

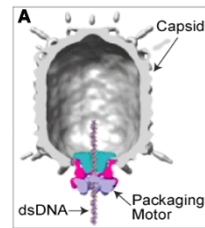


<http://glass.phys.uniroma1.it/dileonardo/Applet.php?applet=TrapForcesApplet>

Kettős szálú DNS nyújtása lézercsipeszsel



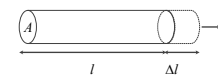
Bakteriofág DNS „pakoló” motorja



$F = 55 \text{ pN}$

Szöveti rugalmasság mechanikai alapjai

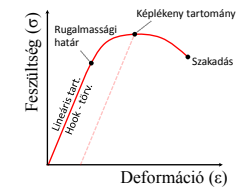
Hook féle rugalmasság



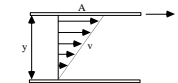
$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta l}{l}$$

F = erő
 A = keresztmetszeti felület
 l = nyugalmi hossz
 Δl = hosszváltozás
 $F/A = \sigma$ = feszültség ($\text{N/m}^2 = \text{Pa}$)
 $\Delta l/l = \epsilon$ = deformáció (nincs m.e.)
 $E = \sigma / \epsilon$ Young modulus (Pa)

Feszültség-deformáció diagram



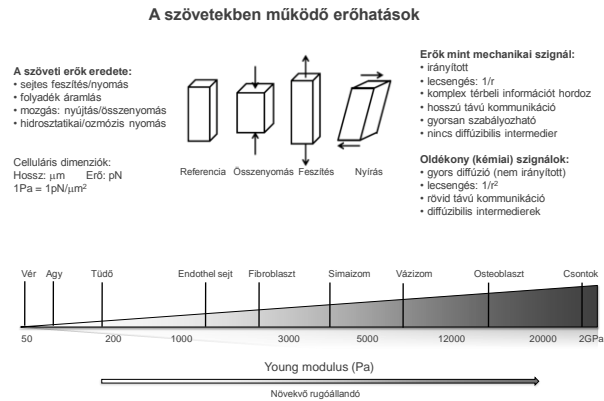
Viszkózitás



$$\frac{F}{A} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

F = nyíróerő
 A = folyadékfelület
 η = viszkózitás
 y = folyadékrétegek közötti távolság
 v = áramlási sebesség
 F/A = nyírófeszültség
 $\Delta v/\Delta y$ = sebesség gradiens (deformáció)

Mechanikai erők a sejtek szintjén



Visszatekintés: Mit tanultunk az ultrahang terjedéséről....?

Melyik szövetípusban terjed gyorsabban a hang?

Az egyes szövetek akusztikai tulajdonságait a rugalmasságuk is megszabja

	E (GPa)	κ (GPa^{-1})	c_{hang} (m/s)
Tömör csont	18	0.05	3600
Izomszövet	7×10^{-5}	0.38	1568

$$c_{\text{hang}} = \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot \kappa}}$$

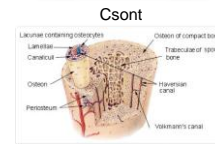
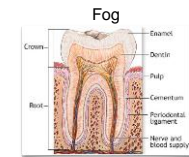
kompresszibilitás

$$\kappa = \frac{-\Delta V / V}{\Delta p}$$

térfogati deformáció feszültség

Nagyobb Young-modulus, nagyobb hangsebesség

Kemény szövetek



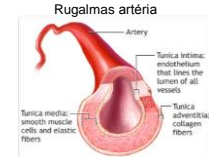
Fő alkotóelemek:
kollagén (szerves),
apatit (szervetlen)

Szerves anyag: ellenállás
Szervetlen anyag: keménység

Lágy szövetek



Passzív mechanika: titin, dezmin
Aktív mechanika: aktin, miozin

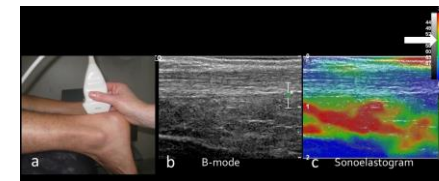


kollagén, elasztin



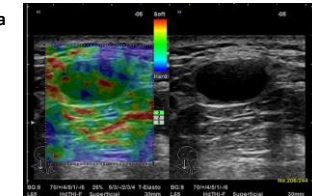
Kollagén, proteoglikánok (víz)

Diagnosztikai felhasználás: szonoelasztográfia



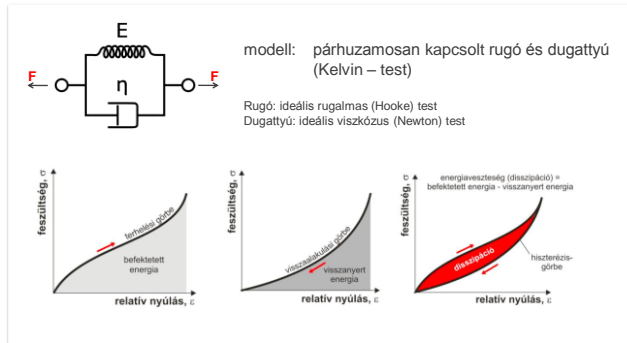
Achilles vizsgálata

Nyirokcsomó vizsgálata



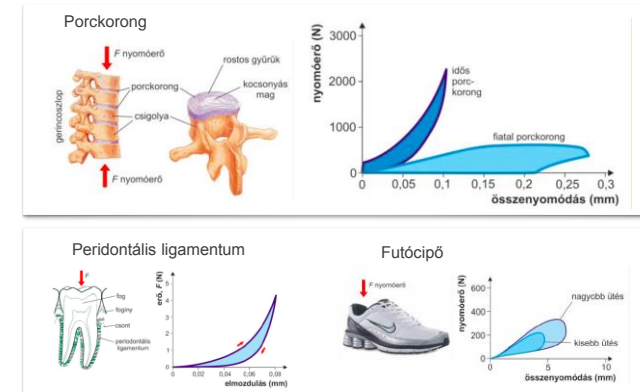
Viszkoelaszticitás

(mechanikai modell)



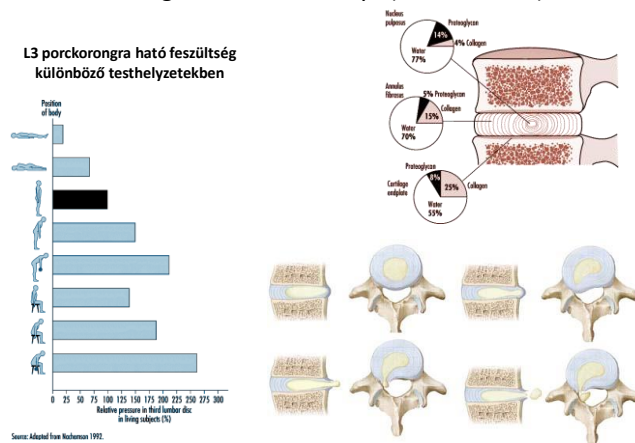
Viszkoelaszticitás

(példák)



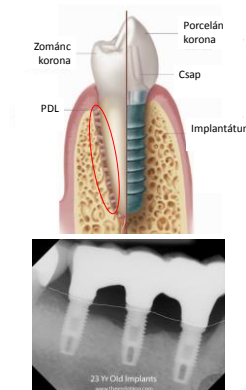
Péda I: A porckorongot érő mechanikai feszültségnek következménye (disc hernia)

L3 porckorongra ható feszültség különböző testhelyzetekben



Péda II: Implantátum vagy fog?

A különbség a periodontális ligamentum!



PDL hiánya:

- A rágási erők érzékelése csökken
- A viszkoelasztikus csillapítás elvesz rágáskor
- Egyes szenzoros funkciók elvesznek
- Az implantátum nem képes mozogni az állkapocsban

Az implantátum direkt kontaktusban áll az állkapoccsal



Megnövekedett kompressziós feszültség (rágás)



Csontvesztés (0.2 mm / év)
Ínyvisszahúzódás

Implantátum ↔ Gyökérkezelés

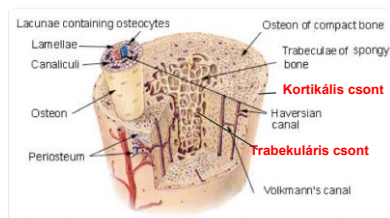
Csontszövet

Az eltérő belső szerkezete miatt a csöves **csontok keresztmetszetén a Young modulus anizotróp módon oszlik el**. A tömörebb kortikális csontszövet nagyobb Young modulusal rendelkezik a trabekuláris csontszövethez képest.

Young-modulus: 5-20 GPa

Dekalcifikált csont savas kezelés: rugalmas

Szerves anyagától megfosztott (kiégetett) csont: törékeny

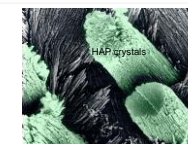
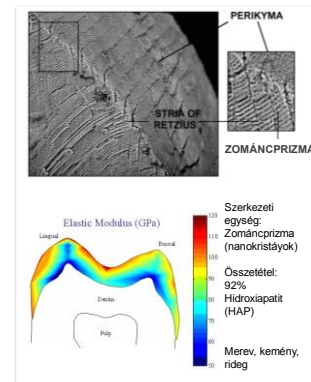


Számolási feladat:

A csöves csontok átlagos Young modulusa 18 GPa.

A maximális kompressziós feszültség amit még a törés előtt kibír, 1.6×10^8 Pa. Számoljuk ki a 46 cm hosszú femur maximális kompressziós deformációját amit még törés nélkül elvisel!

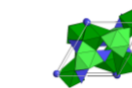
Fogzománc



A legkeményebb anyag az emberi szervezetben

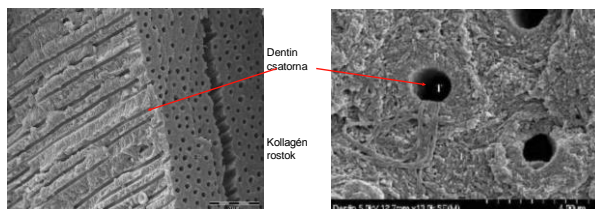


$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$
 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$



Hexagonális ion kristály
20-60 nm x 6 nm - dentin, csont
500-1000 nm x 30 nm - zománc

Dentin

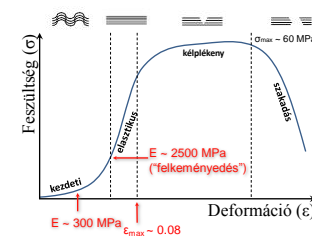
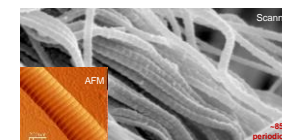
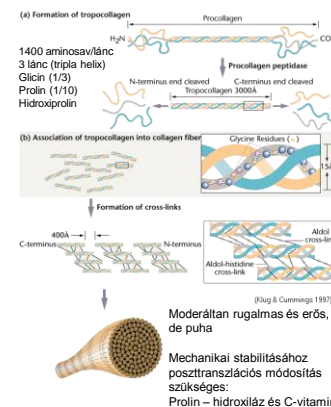


Összetétel: 35% szerves anyag(kollagén) + víz, 65% hidroxil-apatit

Szerkezet: A kollagén rostok által alkotott hálózatba ágyazva találhatóak a 20–60 nm hosszúságú, 6 nm vastagságú apatit nanokristályok

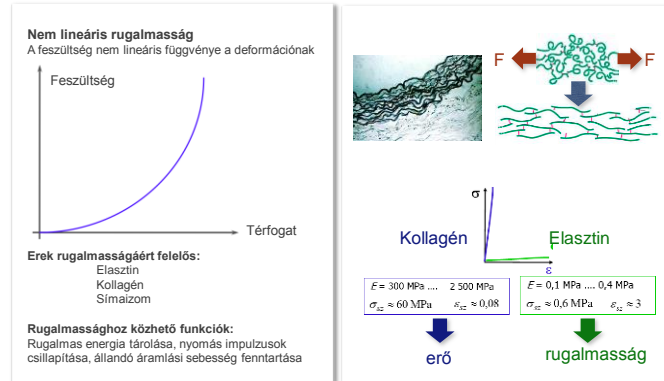
A két anyag együttesen adja a csontszövet és a dentin különlegesen jó mechanikai tulajdonságait, viszonylag nagy keménységét, nagy szilárdságát, szívósságát, ugyanakkor rugalmasságát

Kollagén

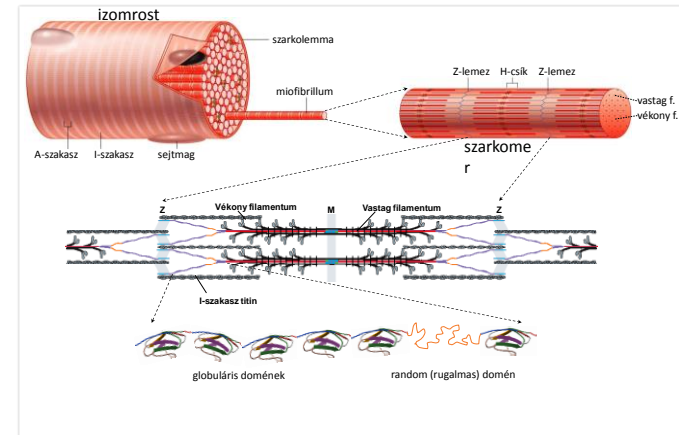


Mechanikai stabilitásához posztranszlaációs módosítás szükséges:
Prolin - hidroxiláz és C-vitamin!

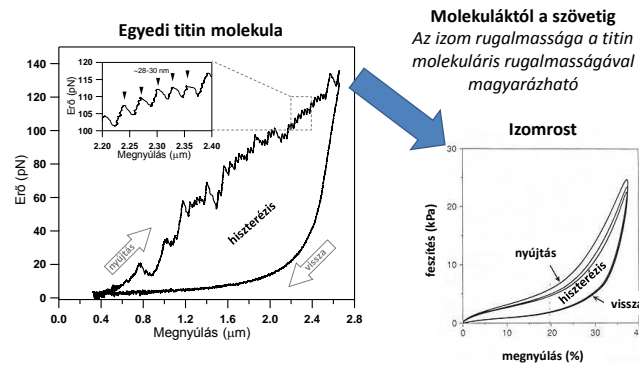
Rugalmas artériák biomechanikája



Titin: a szarkomer rugalmas filamentuma



A titinmolekula az izom passzív rugalmasságának fő meghatározója



Példák

A bicepsz elernyedt állapotban 25 N erő hatására 3 cm-t nyúlik, míg maximális megfeszítés mellett ugyanekkora megnyúláshoz 500 N erő szükséges. Számolja ki a bicepsz Young modulusát elernyedt és megfeszített állapotokra egyaránt. A számoláshoz az egyszerűség kedvéért feltételezzük, hogy a bicepsz egy 6 cm átmérőjű és 20 cm hosszú homogén henger. (59 kPa, 1.18 MPa)

Kollagén rostot nyújtunk 12 N erővel. A rost keresztmetszete 3 mm², a kollagén Young modulusa 500 Mpa. Hány százalékos a rost relatív megnyúlása? (0.8%)

Egy fogszabályozásban használt rugalmas szál hossza 6 cm, keresztmetszete 1 mm², Young modulusa 5 Mpa. A szál 40%-al megnyújtjuk. Mekkora a visszatérítő erő és mennyi a szálban tárolt rugalmas energia? (2 N, 24 mJ)