

Biomechanika Biomolekuláris és szöveti rugalmasság

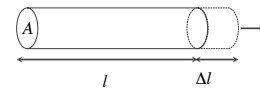
Mártonfalvi Zsolt



Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet
Semmelweis Egyetem
Budapest

Szöveti rugalmasság mechanikai alapjai

Hook féle rugalmasság



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

$$\sigma = E \varepsilon$$

F = erő

A = keresztmetszeti felület

l = nyugalmi hossz

Δl = hosszváltozás

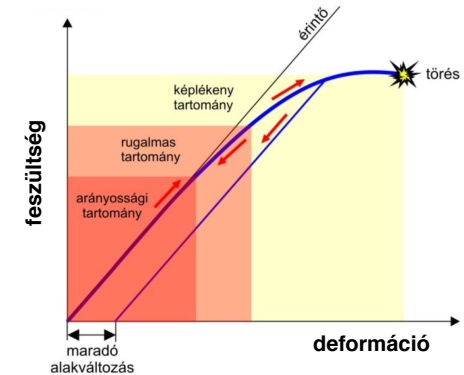
F/A = σ = feszültség (N/m² = Pa)

Δl/l = ε = deformáció (nincs m.e.)

E = σ / ε Young modulus (Pa)

(rugalmassági modulus - a név megtévesztő! inkább a merevséget jellemzi)

Feszültség-deformáció diagram

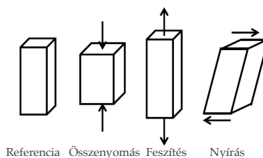


Mechanikai erők a sejtek szintjén

A szövetekben működő erőhatások

A szöveti erők eredete:

- sejtés feszítés/nyomás
- folyadék áramlás
- mozgás: nyújtás/összenyomás
- hidrosztatikai/oszmózis nyomás



Celluláris dimenziók:

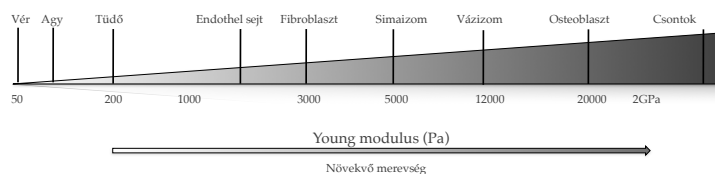
Hossz: μm Erő: pN
1Pa = 1pN/μm²

Erők mint mechanikai szignál:

- irányított
- lecsengés: 1/r
- komplex térbeli információt hordoz
- hosszú távú kommunikáció
- gyorsan szabályozható
- nincs diffúzibilis intermedierek

Oldékony (kémiai) szignálok:

- gyors diffúzió (nem irányított)
- lecsengés: 1/r²
- rövid távú kommunikáció
- diffúzibilis intermedierek



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

Melyik szövettípusban terjed gyorsabban a hang? Az egyes szövetek akusztikai tulajdonságait a rugalmasságuk is megszabja

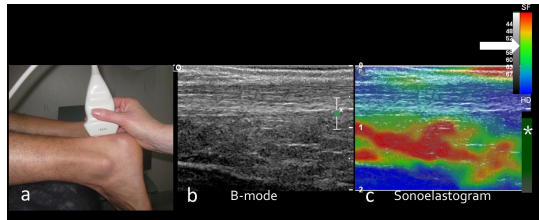
	E (GPa)	K (GPa ⁻¹)	c _{hang} (m/s)
Tömör csont	18	0.05	3600
Izomszövet	7x10 ⁻⁵	0.38	1568

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

κ = $\frac{-\Delta V/V}{\Delta p}$ — térfogati deformáció
— kompresszibilitás
— feszültség

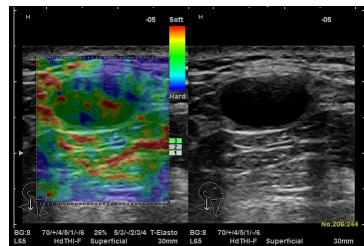
Nagyobb Young-modulus, nagyobb hangsebesség

Diagnosztikai felhasználás: szonoelasztográfia

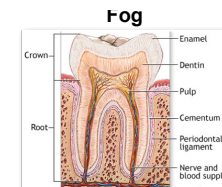


Achilles vizsgálat

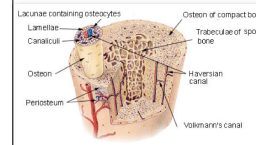
Nyirokcsomó vizsgálat



Kemény szövetek



Csont

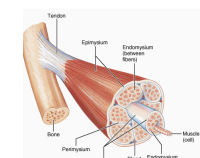


Fő alkotóelemek:
kollagén (szerves),
apatit (szervetlen)

Szerves anyag: ellenállás
Szervetlen anyag: keménység

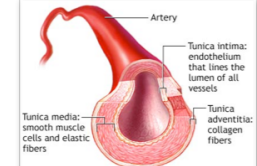
Lágy szövetek

Vázizom



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

Rugalmas artéria



kollagén, elasztin

Szalag



In

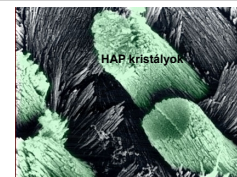
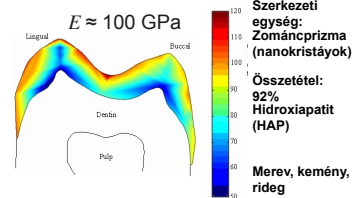
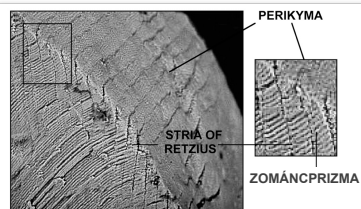


Porc



Kollagén, proteoglikánok (víz)

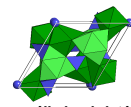
Fogzománc



A legmerevebb anyag az emberi szervezetben, de törékeny!

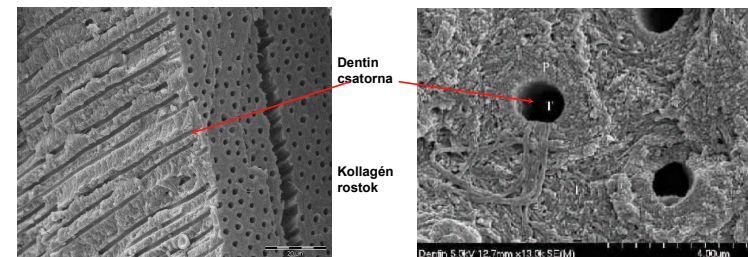


$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$
 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$



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

Dentin



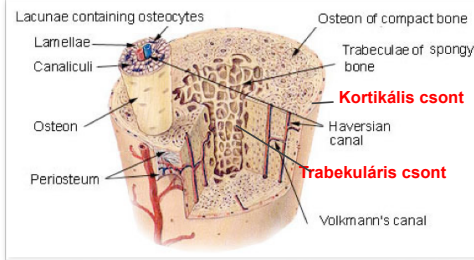
Összetétel: 35% szerves anyag(kollagén) + víz, 65% hidroxipatit

Szerkezet: A kollagén rostok által alkotott hálózathoz ágyazva találhatók 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. $E \approx 15 \text{ GPa}$

Csontszövet

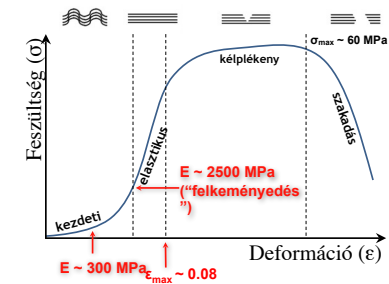
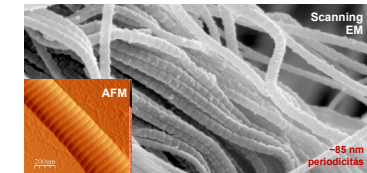
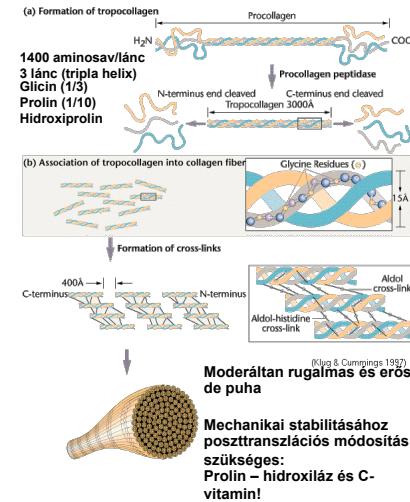
Az eltérő belső szerkezete miatt a csöves csontok keresztmetszetén a Young modulus anizotróp módon oszlik el. A tömörebb kortikális csontszövet nagyobb Young modulussal rendelkezik a trabekuláris csontszövethez képest.
 Young-modulus: 5-20 GPa
 Dekalcifikált csont savas kezelése: rugalmas
 Szerves anyagától 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!

Kollagén

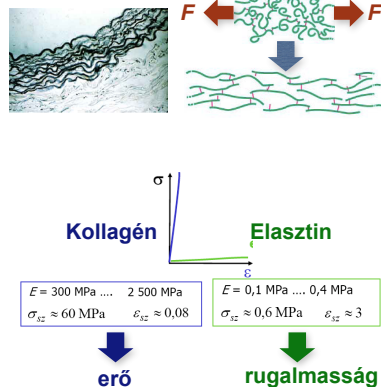


Rugalmas artériák biomechanikája

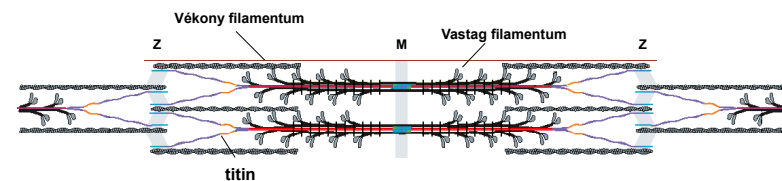
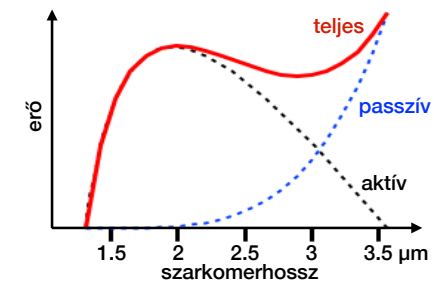
Nem lineáris rugalmasság
 A feszültség nem lineáris függvénye a deformációnak



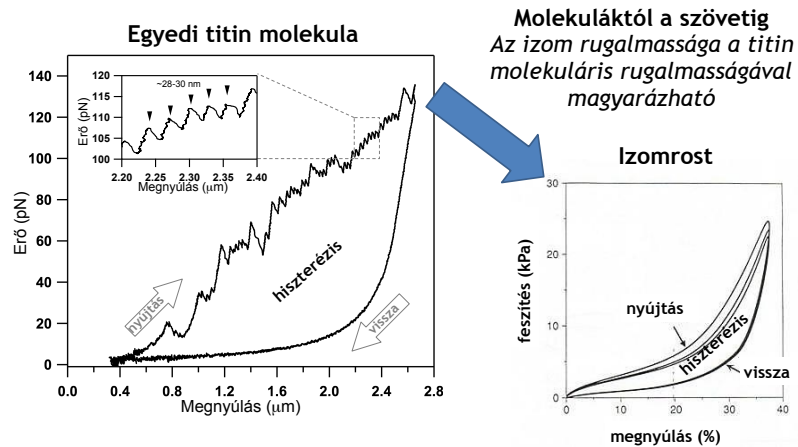
Rugalmassághoz köthető funkciók:
 Rugalmas energia tárolása, nyomás impulzusok csillapítása, állandó áramlási sebesség fenntartása



Titin: a szarkomer rugalmas filamentuma



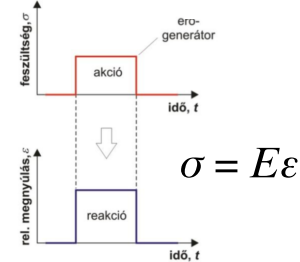
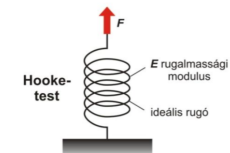
A titinmolekula az izom passzív rugalmasságának fő meghatározója



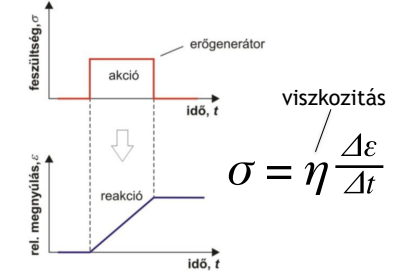
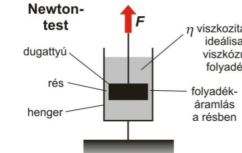
Viszkoelaszticitás

(mechanikai modell)

Rugalmas test

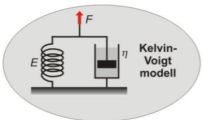


Viszkózus test



Viszkoelaszticitás

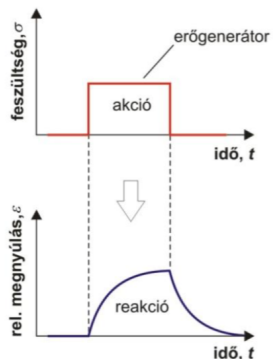
(mechanikai modell)



A viszkoelaszticitás a viszkózus és elasztikus viselkedés együttes megjelenését jelenti

modell: párhuzamosan kapcsolt rugó és dugattyú (Kelvin-Voigt modell)

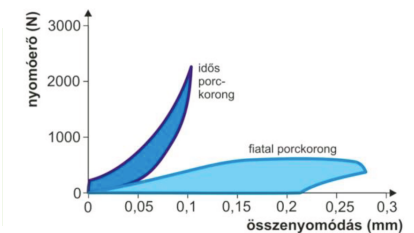
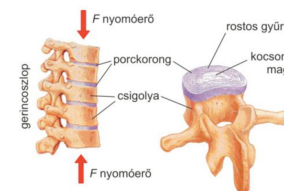
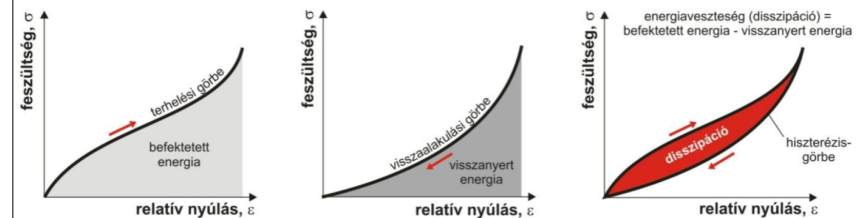
Rugó: ideális rugalmas (Hooke) test
Dugattyú: ideális viszkózus (Newton) test



1. Nyújtáskor a rugó nem tud azonnal megnyúlni, a dugattyú nem engedi. A nyúló rugó lassítja a dugattyú mozgását.
2. A nyúlás addig tart, amíg a rugóban növekvő feszültség ki nem egyenlíti az erőgenerátor által a rendszerre
3. A külső feszültség eltűnésekor a rugó igyekszik összehúzódní, de a lengéscsillapító megint csak fokozatosan, egyre lassabb tempóban engedi.

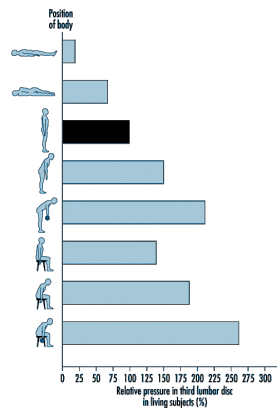
Energiavesztés a viszkoelasztikus rendszerben

(histerézis)

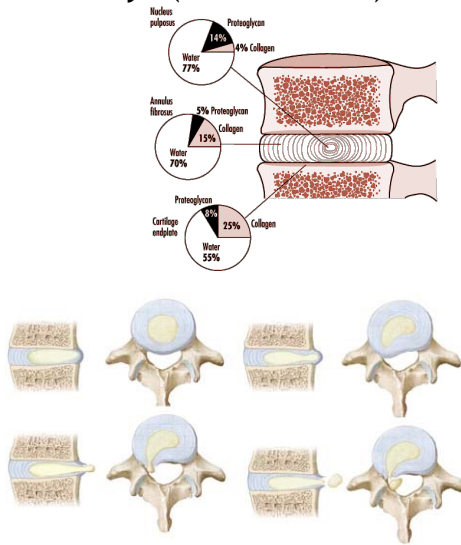


Péda I: A porckorongot érő mechanikai feszültségnek következménye (*discus hernia*)

L3 porckorongra ható feszültség különböző testhelyzetekben

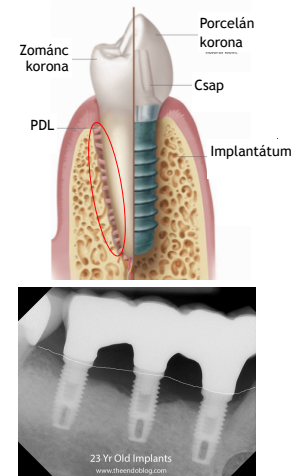


Source: Adapted from Nachemson 1992.



Péda II: Implantátum vagy fog?

A különbség a periodontális ligamentum!



PDL hiánya:

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

Az implantátum direkt kontaktusban áll az állkapoccsal



Megnövekedett kompressziós feszültség (rágás)



Csontvesztés (0.2 mm / év)
Ínyvisszahúzódás

Implantátum ↔ Gyökérkezelés

Példák

A bicepsz elernyedtt 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 elernyedtt 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 szálát 40%-al megnyújtjuk. Mekkora a visszatérítő erő és mennyi a szálban tárolt rugalmas energia? (2 N, 24 mJ)