

## A biológiai mozgás molekuláris mechanizmusai

Mártonfalvi Zsolt

1

## A biológiai mozgások

Molekuláris mozgás



Axoplazma

Celluláris mozgás



Keratocita mozgása felületen

Szervezet mozgása



2

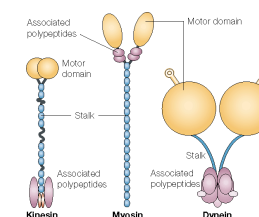
## Motorfehérjék

**Olyan mechanoenzimek, amelyek kémiai energiát alakítanak át mechanikai munkává.**

1. Specifikusan kapcsolódnak valamilyen citoskeletális filamentumhoz vagy biopolimerhez (pl. DNS).
2. A filamentum mentén elmozdulnak, illetve erőt fejtenek ki.
3. Eközben ATP-t hidrolizálnak.

3

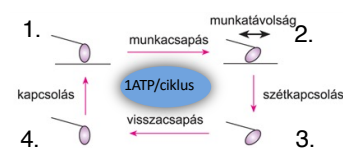
## Motorfehérjék közös tulajdonságai



### I. Szerkezeti homológia

N-terminális globuláris fej: ez a **motor domén** (ATPáz), ami specifikusan köt a megfelelő citoskeletális polimerhez.

C-terminális kötőhely: a mozgott képlethez kapcsolódik.

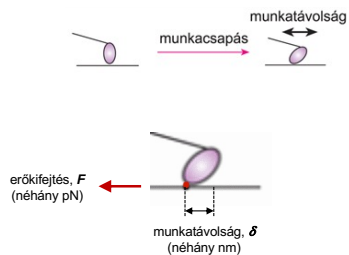


### II. Ciklusos működés

1. Kapcsolódás
2. Munkacsapás (húzás)
3. Szétkapcsolás
4. Visszacsapás

4

## Motorfehérjék erőkifejtése



Egyetlen motorfehérje által végzett munka,  $W$

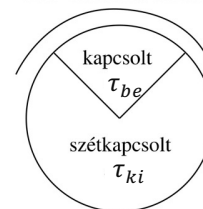
$$W = F \cdot \delta$$

nagyságrend:  $10^{-20}$  J (zeptojoule =  $10^{-21}$  J)

5

## Motorfehérjék munkaciklusa

ATP-hidrolízis-ciklus



Munkaciklus arány ( $r$ ):

$$r = \frac{\tau_{be}}{\tau_{be} + \tau_{ki}} = \frac{\tau_{be}}{\tau_{teljes}}$$

**Processzív motor:**  $r \sim 1$

Pl. kinezin, DNS-, RNS-polimeráz.

Munkaciklus nagy részében kapcsolt állapotban van. Egymaga képes a terhet továbbítani.

**Nem processzív motor:**  $r \sim 0$

Pl. konvencionális miozin (vázizom: miozin II.). Munkaciklus nagy részében szétkapcsolt állapotban. Sokaság működik együtt.

$$v_{csapás} = \frac{\delta}{\tau_{be}} \quad \tau_{be} = \frac{\delta}{v_{csapás}} \quad r = \frac{\delta k_{ATPáz}}{v_{csapás}}$$

$$k_{ATPáz} = \frac{1}{\tau_{teljes}}$$

$\delta$  = munkatávolság  
 $v_{csapás}$  = csapássebesség  
 $k_{ATPáz}$  = ATPáz sebesség

6

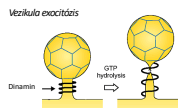
## Motorfehérjék típusai

### 1. Aktin alapú

- **Miozinok:** Az aktin filamentum mentén a plusz vég irányába mozognak. (lamellipodium formálás, izomkontrakció)

### 2. Mikrotubulus alapú

- **Dineinek:** Ciliáris (flagelláris) és citoplazmáris dineinek. A mikrotubulus mentén a mínusz vég irányába mozognak. (axonális retrográd transport)
- **Kinezinok:** A mikrotubulus mentén a plusz vég irányába mozognak. (axonális anterográd transport)
- **Dinaminok:** Mikrotubulus-függő GTPáz aktivitás.



### 3. DNS alapú mechanoenzimek

- A DNS fonal mentén haladnak és fejtenek ki erőt (DNS- és RNS-polimerázok, vírus kapszid csomagoló motor)

### 4. Rotációs motorok

- Membránba ágyazva működnek, a membrán két oldalán kialakult proton gradiens a hajtóerejük. F1Fo-ATP szintetáz, bakteriális flagelláris motor

### 5. Mechanoenzim komplexek

- Riboszóma

7

## Citoszkeleton alapú motorok

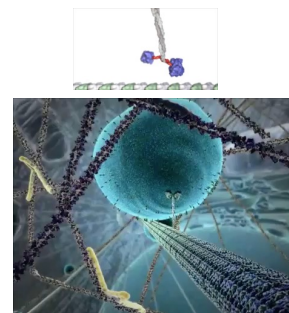
### Nem processzív motor

Vázizom miozin II.  
Aktin filamentum mentén mozog.



### Processzív motor

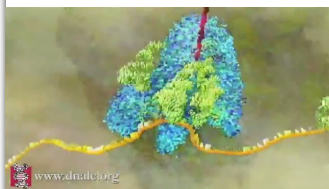
Kinezin  
Mikrotubulus mentén mozog.



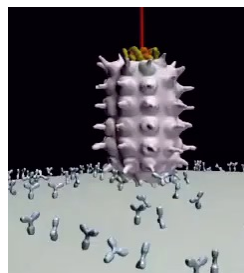
8

## Nukleinsav alapú motorok

**Riboszóma**  
mechanoenzim komplex



**Virális portális motor**  
DNS „pakolás“

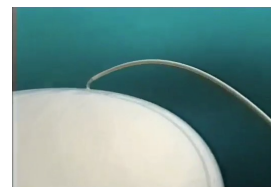
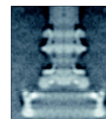


9

## Rotációs motorok

hajtóerő: proton grádiens

**Flagelláris motor**  
bakteriális mozgás



**$F_1F_0$  ATP szintetáz**  
reverzibilis működés



10

## Az izomműködés biofizikája



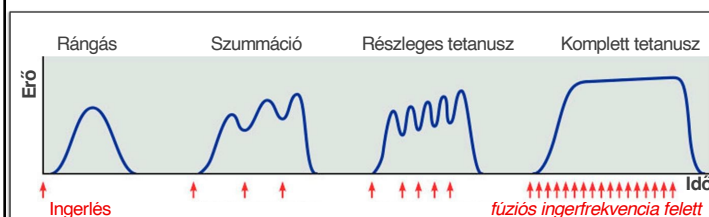
*Machina Carnis*

Mozgásra, mozgásra specializálódott sejt  
illetve szövet.

Csak húzni képes, tolni nem!

11

## Az izomműködés alapjelenségei I.



Egyszeri ingerlés egy összehúzódási választ – egy **rángást** – vált ki (összehúzódás – elernyedés).

Egy ingersorozat fokozza az összehúzódási erőt, mert a következő inger még részlegesen kontrahált állapotban éri az izmot, így a rángások összeadódnak – **szummáció**.

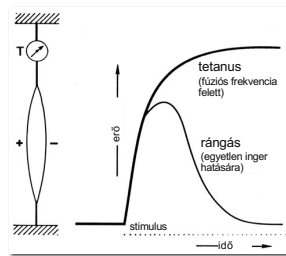
Fúziós frekvencia feletti ingersűrűség esetén a relaxáció gátolt, így az izom állandó tónusba kerül – **tetanusz**.

12

## Az izomműködés alapjelenségei II.

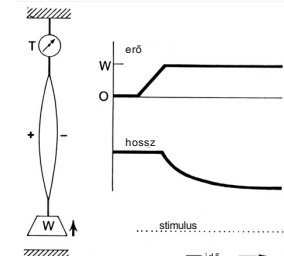
### 1. Izometriás kontrakció

Az izom nem rövidül (vagy nem képes rövidülni), de a kifejtett erő növekszik



### 2. Izotóniás kontrakció

A kifejtett erő állandó, miközben az izom rövidül.



A kettő keveréke: auxotóniás kontrakció (rövidülés és erőfejlesztés egyszerre)

13

## Az izomműködés alapjelenségei III.

### 1. Munka és Teljesítmény

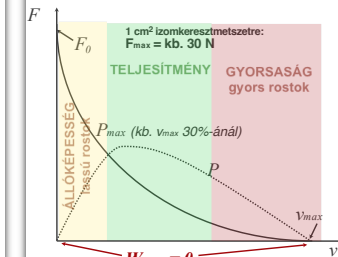
$$W = F \cdot s$$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot v$$

Ha a rövidülési sebesség nulla, akkor az erő maximális értékű: maximális izometriás erő ( $F_0$ )

Ha  $v = \text{maximum}$ , akkor  $F = 0$

### 2. Erő - sebesség összefüggés



Hill egyenlet:

$$(F + a)(v + b) = (F_0 + a)b$$

$F$ : erő,  $v$ : rövidülési sebesség

$a$  és  $b$ : konstansok,

$F_0$ : maximális izometriás erő

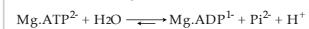
$$v_{\max} = \frac{bF_0}{a}$$

14

## Az izomműködés energetikája

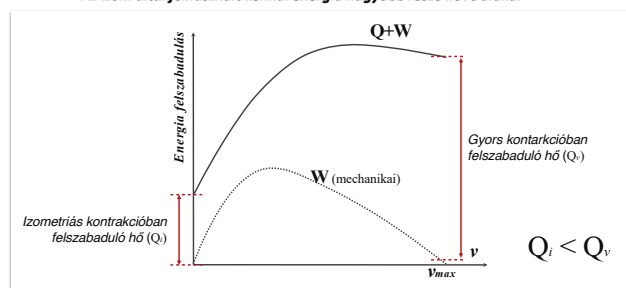
ATP hidrolízis, hőfelszabadulás

Energia forrása:



**Fenn-féle effektus:** A hőfelszabadulás megnő ha az izom rövidülés közben végez munkát. A hőfelszabadulás mértéke nő a kontrakció sebességének növekedésével.

Az izom által felhasznált kémiai energia nagyobb része hővé alakul

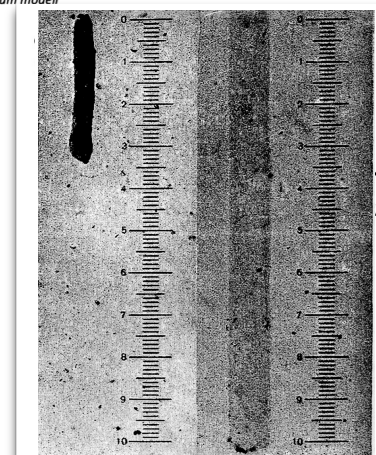
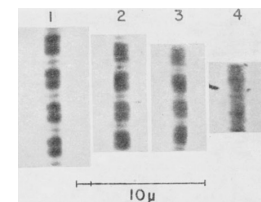
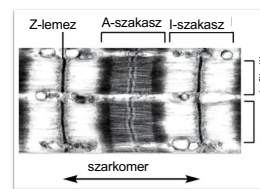


15

## Az izomösszehúzódnás mechanizmusa

Fenomenológiai mechanizmus: csúszófilamentum modell

Szarkomer

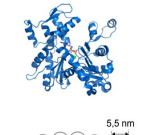


16

## Kontraktilis apparátus tagjai

### Globuláris aktin (G-aktin)

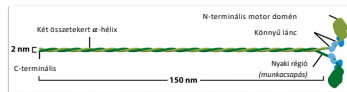
Az aktin filamentumot felépítő monomer egység



Straub F. Brúnó  
az aktin felfedezője  
(1941)

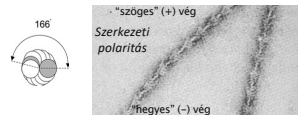
### Miozin II

Nem-processzív, aktin alapú motorfehérje



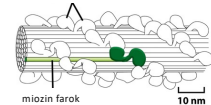
### Aktin filamentum (F-aktin)

Citoszkeletális semiflexibilis polimerlánc



### Vastag filamentum

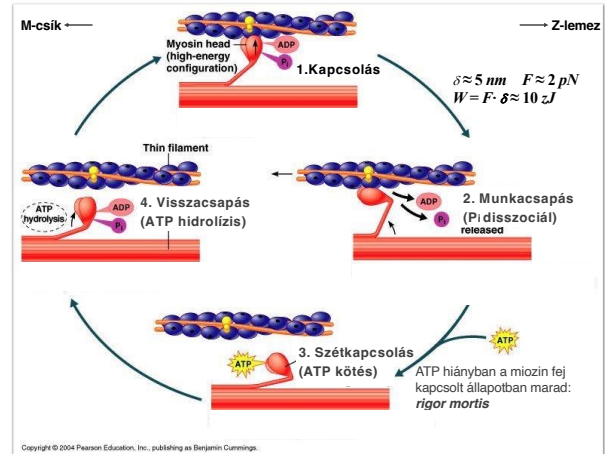
miozin fejek (motor domének)



17

## A miozin II motorfehérje munkaciklusa

Az izomösszehúzás molekuláris folyamata



18

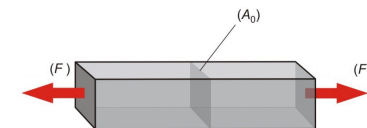
## Biomechanika Biomolekuláris és szöveti mechanika

19

## A biomechanika fizikai alapjai

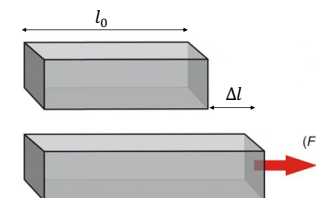
### Feszültség (stressz)

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \left[ \frac{N}{m^2} = Pa \right]$$



### Deformáció

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \left[ \frac{m}{m} \right] \text{ Dimenzió nélküli}$$

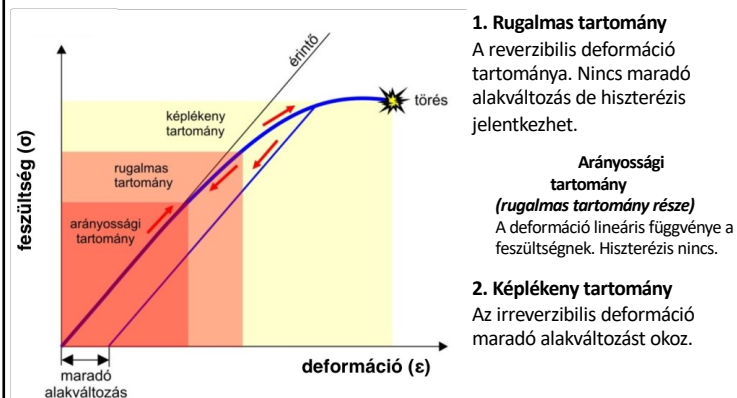


### A deformáció arányos a mechanikai feszültséggel!

$$\sigma \sim \varepsilon$$

20

## Feszültség – deformáció diagram



### 1. Rugalmas tartomány

A reverzibilis deformáció tartománya. Nincs maradó alakváltozás de hiszterézis jelentkezik.

#### Arányossági tartomány (rugalmas tartomány része)

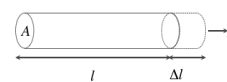
A deformáció lineáris függvénye a feszültségnek. Hiszterézis nincs.

### 2. Képlékeny tartomány

Az irreverzibilis deformáció maradó alakváltozást okoz.

21

## Hooke törvénye



$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\frac{F}{A_0} = E \cdot \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Hooke tv.}$$

$$F = \frac{E \cdot A_0}{l_0} \cdot \Delta l$$

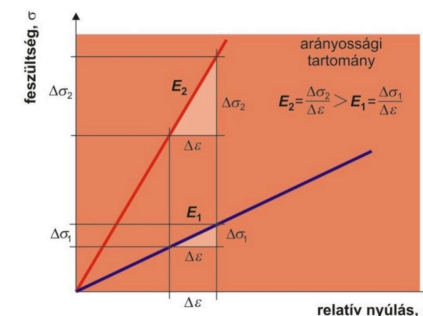
$$F = D \cdot \Delta l$$

**Young modulus = 1. Merevség**  
(anyag merevsége)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{l_0}{\Delta l} \quad E = \left[ \frac{N}{m^2} = Pa \right]$$

**Rugóállandó**  
(test merevsége)

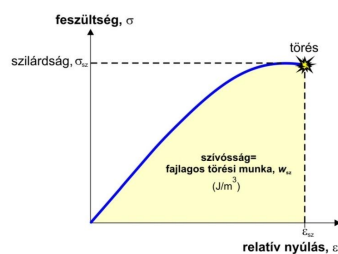
$$D = \frac{F}{\Delta l} \quad D = \left[ \frac{N}{m} \right]$$



22

### 2. Szilárdság

$\sigma_a$ : a szakadáshoz, töréshez tartozó feszültségérték, mértékegysége Pa. Lehet szakít-, nyomó-, hajlító-, stb...

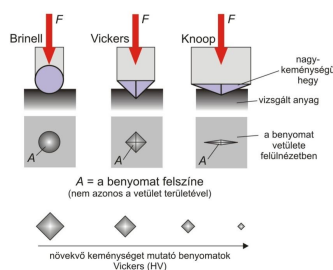


### 3. Szívósság

vagy **fajlagos törési munka ( $w_a$ )**: a törésig történő deformáció közben az anyag egységnyi térfogatán végzett munka.

### 4. Keménység

ennyire áll ellen adott anyag a képlékeny alakváltozásnak egy másik, keményebb anyaggal való mechanikai kölcsönhatás során.

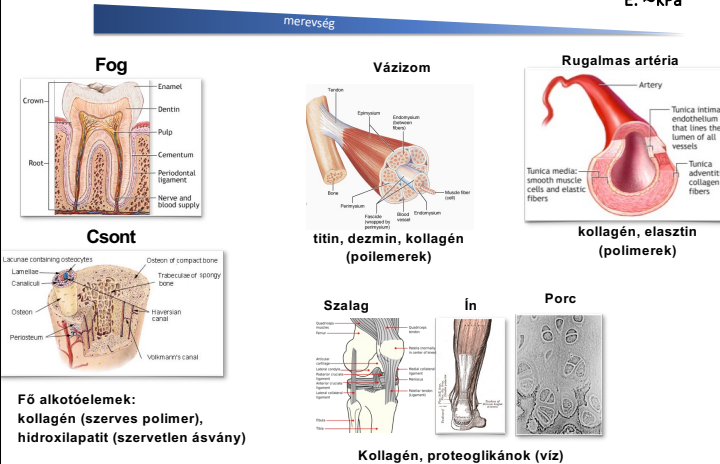


$$H = \frac{F}{A} = [Pa]$$

23

$E: \sim GPa$

$E: \sim kPa$

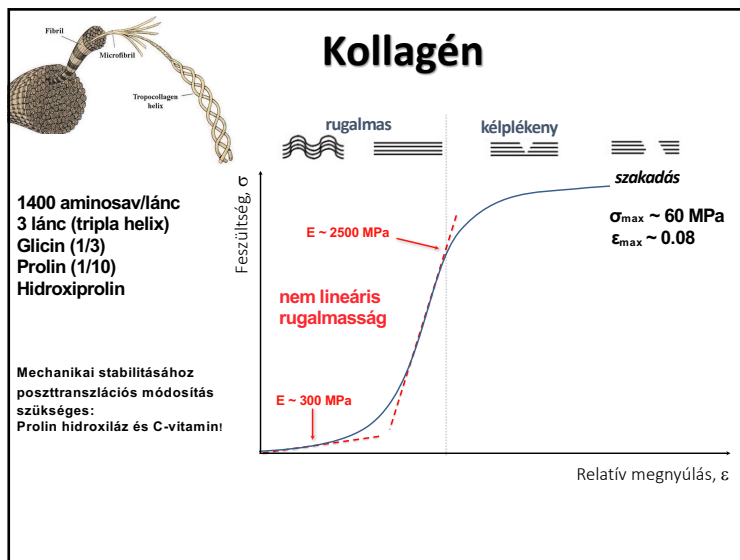


**Fő alkotóelemek:**  
kollagén (szerves polimer),  
hidroxilapatit (szervesen ásvány)

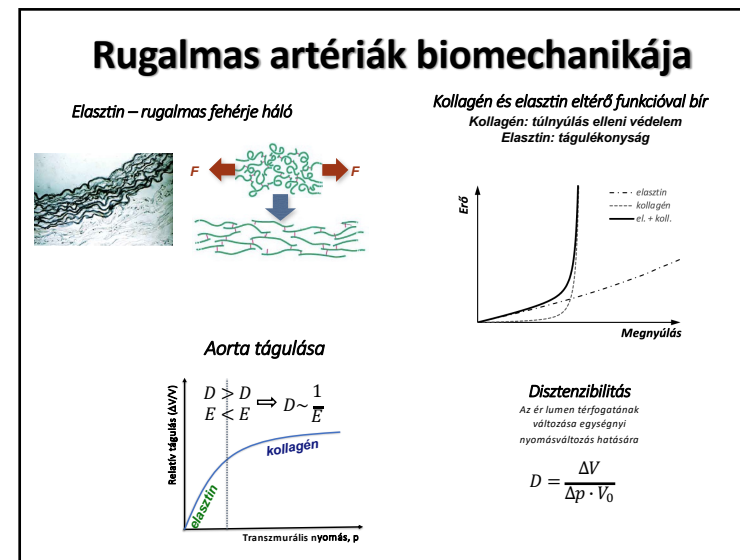
polimer: rugalmasság, szívósság  
ásvány: merevség, keménység

24

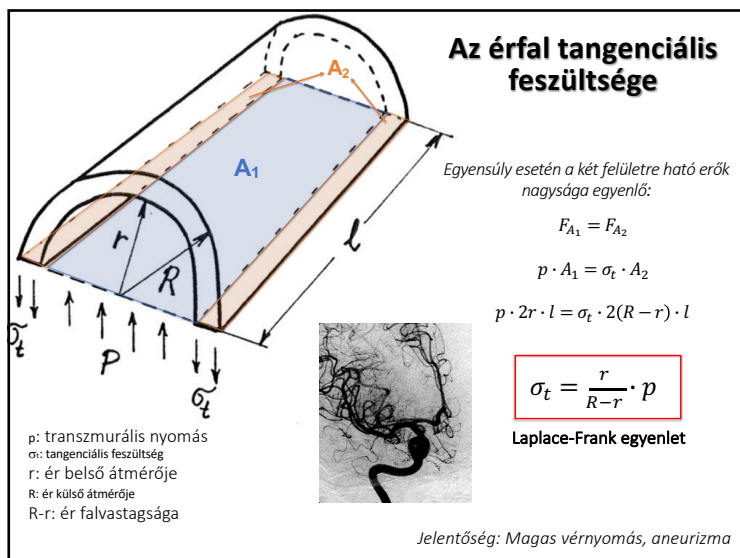




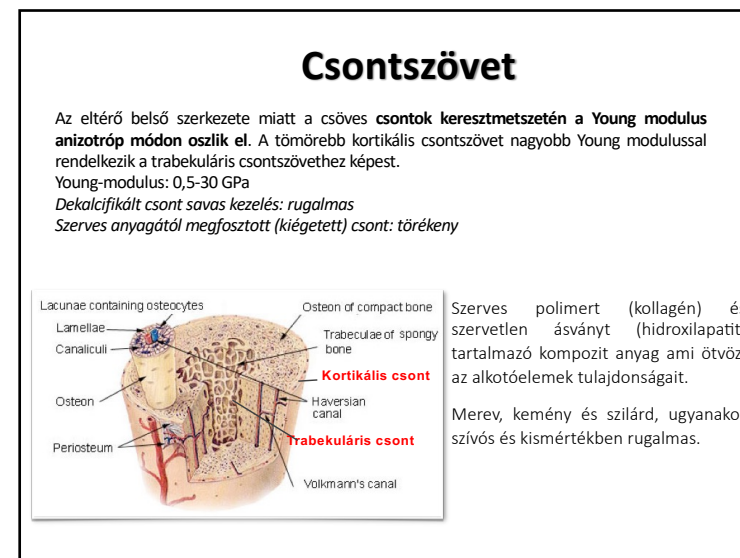
25



26

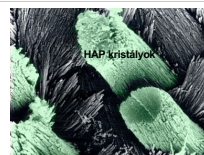
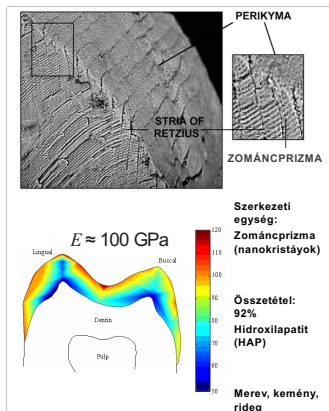


27



28

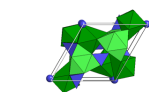
## Fogzománc



A legmerevebb anyag az emberi szervezetben, de törékeny!



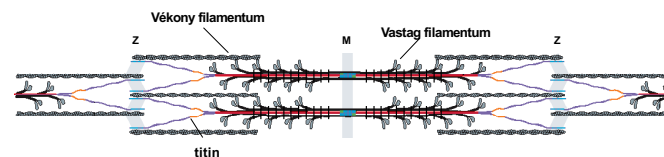
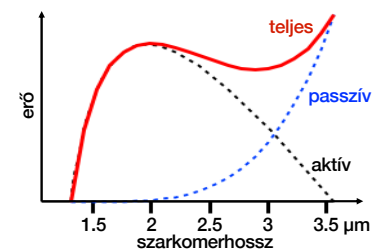
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$   
 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$



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

29

## Titin: a szarkomer rugalmas filamentuma

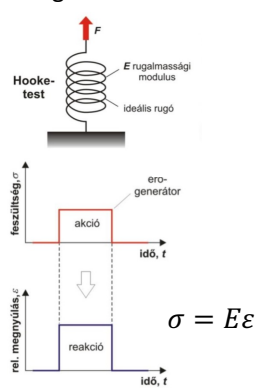


30

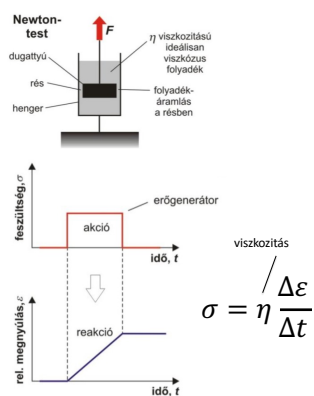
## Viszkoelaszticitás

(mechanikai modell)

### Rugalmas test



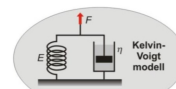
### Viszkózus test



31

## 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 dugattyú mozgását.

2. A nyúlás addig tart, amíg a rugóban növekvő feszültség ki nem egyenlíti az erőgenerátor által a rendszerre kapcsolt feszültséget.

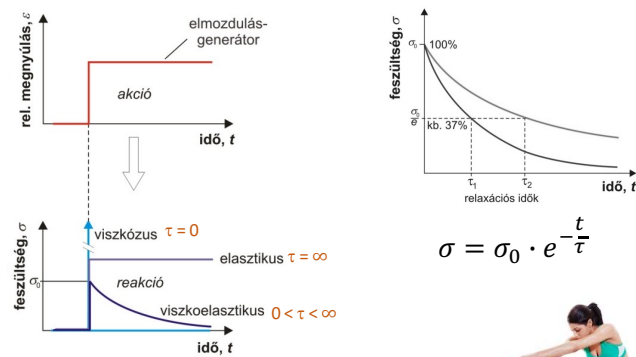
3. A külső feszültség eltűnésekor a rugó igyekszik összehúzódní, de a lengéscsillapító megint csak fokozatosan, egyre lassabb tempóban engedi.

32



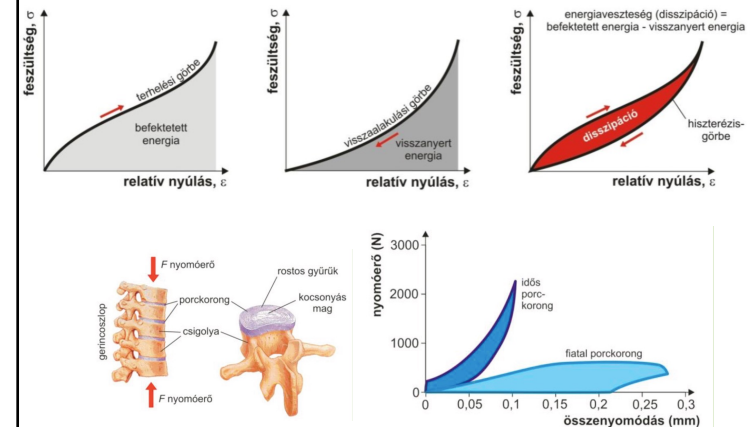
## Feszültség-relaxáció a viskoelasztikus rendszerben

Állandó deformáció mellett a feszültség idővel csökken



33

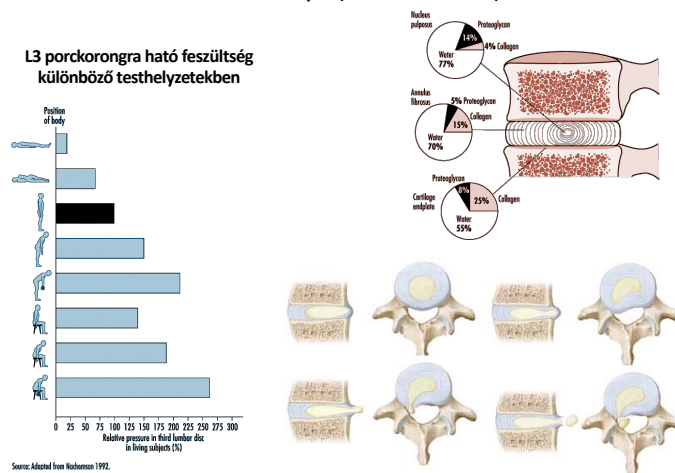
## Energiavesztés a viskoelasztikus rendszerben (hiszterézis)



34

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

L3 porckorongra ható feszültség különböző testhelyzetekben



35

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

Melyik szövetípusban terjed gyorsabban a hang?  
Az egyes szövetek akusztikai tulajdonságait a merevségük is megszabja

	$E$ (GPa)	$K$ (GPa)	$c_{hang}$ (m/s)
Tömör csont	18	0.05	3600
Izomszövet	$7 \times 10^{-5}$	0.38	1568

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

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

térfogati deformáció

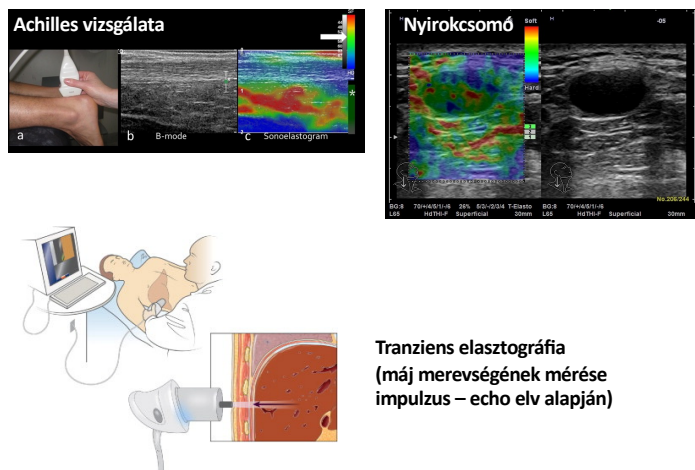
feszültség

kompresszibilitás

Nagyobb Young-modulus, nagyobb hangsebesség

36

### Diagnosztikai felhasználás: szonoelasztográfia



37