

# ORVOSI BIOFIZIKA II.

## BIOMECHANIKA: BIOMOLEKULÁRIS ÉS SZÖVETI RUGALMASSÁG

KELLERMAYER MIKLÓS  
MÁRTONFALVI ZSOLT

1. Történeti áttekintés
2. Mechanikai alapok
3. Celluláris biomechanika
4. Szöveti biomechanika
5. Molekuláris biomechanika

## A BIOMECHANIKA TÖRTÉNETE



**Aristoteles** (384-322 BC) – Első biomechanika könyv, *De Motu Animalium* (Az állati mozgásokról).



**Leonardo da Vinci** (1452-1519) – Az első mechanikai szemléletű anatómus. Az izom összehúzódás révén fejt ki erőt! (kivételek...)



**Galileo Gailei** (1564-1642) – A csontok üregesek, így magximális szilárdsághoz minimális tömeg tarozik.



**René Descartes** (1596-1650) – Az élőlények, beleértve az embert is ( alélek kivételével) egyszerűen gépek, melyekre ugyanazon mechanikai törvényszerűségek vonatkoznak.



**Étienne-Jules Marey** (1830 - 1904) – Kinematográfia alkalmazása a mozgások tanulmányozására.


Manapság a biomechanika egy forrongó tudományterület. Az egyik fő fókusza a mesterséges szövetek előállítása illetve a szöveti rekonstrukció ( "tissue engineering" ).

## MECHANIKAI ALAPOK

### Hooke-féle rugalmasság

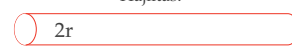
- Rugóállandó ( $k=F/\Delta L$ ) függ az anyagi minőségtől.
- A rugóállandó ( $k$ ) függ a test alakjától és a rá ható erő irányától.
- Kifejezi a megnyúlás mértékét egységnyi erőhatás esetén.

Nyújtás:

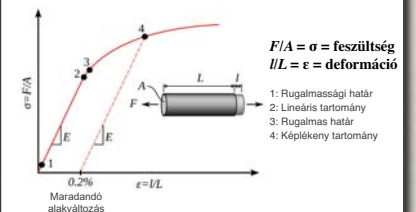

$$\kappa = \frac{F}{\Delta L} = \frac{EA}{L}$$

$F$  = erő  
 $A$  = kereszt metszeti felület  
 $L$  = nyugalmi hossz  
 $\Delta L$  = megnyúlás  
 $F/A = \sigma$  = feszültség  
 $\Delta L/L = \epsilon$  = relatív megnyúlás  
 $E$  = Young modulus (Pa)

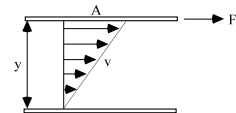
Hajlítás:


$$\kappa = \frac{4\pi}{3} \frac{Er^4}{L^3}$$

### Feszültség – deformáció görbe



### Viszkózitás


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

$F$  = nyíró erő  
 $A$  = folyadék réteg felülete  
 $\eta$  = viszkózitás  
 $v$  = áramlási sebesség  
 $y$  = folyadék rétegek közötti távolság  
 $F/A$  = nyírófeszültség ( $\tau$ )  
 $\Delta v / \Delta y$  = sebesség gradiens (D)

## BIOMECHANIKA A SEJTEK SZINTJÉN

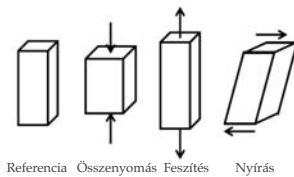
### A szövetekben működő erőhatások

#### A szöveti erők eredete:

- sejtes feszítés/nyomás
- folyadék áramlás
- nyújtás
- hidrosztatikai/oszmózis nyomás

#### Celluláris dimenziók:

Hossz:  $\mu\text{m}$  Erő:  $\text{pN}$   
 $1\text{Pa} = 1\text{pN}/\mu\text{m}^2$

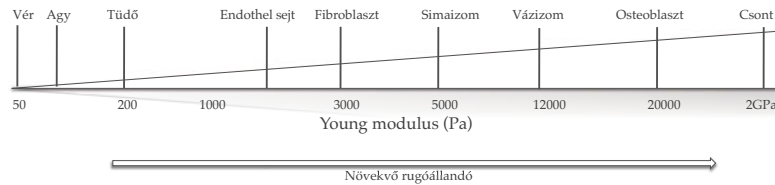


#### Erők mint mechanikai szignál:

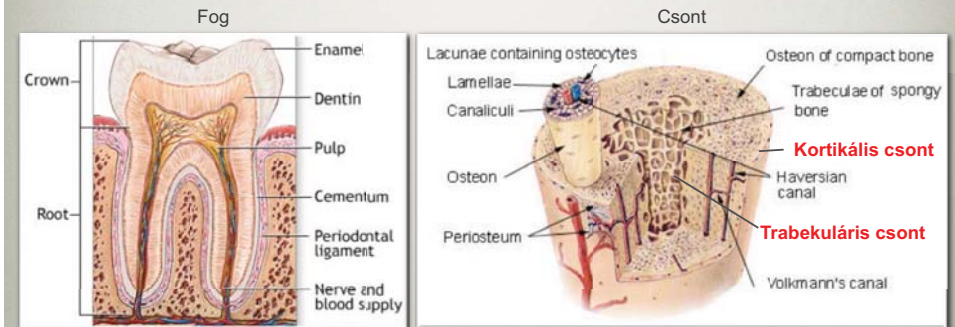
- irányított
- lecsengés:  $1/r$
- komplex térbeli információt hordoz
- hosszú távú kommunikáció
- gyorsan szabályozható
- nincs diffúzibilis intermedier

#### Oldékony (kémiai) szignálok:

- gyors diffúzió (nem irányított)
- lecsengés:  $1/r^2$
- rövid távú kommunikáció
- diffúzibilis intermedierek

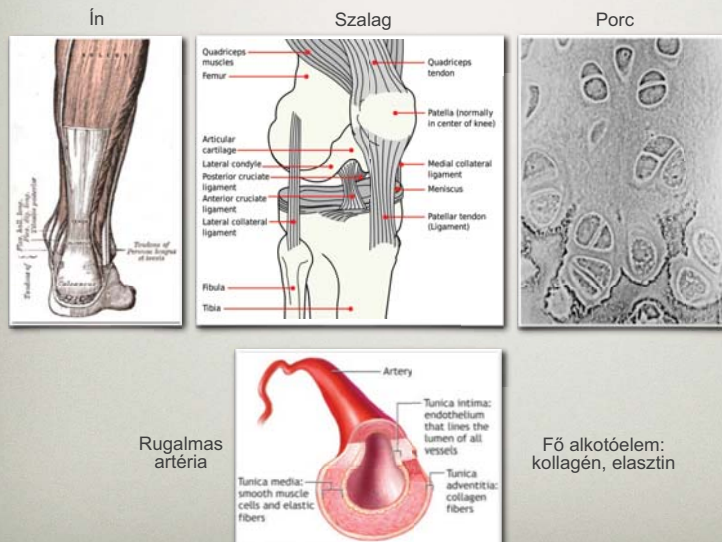


## KEMÉNY SZÖVETEK



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

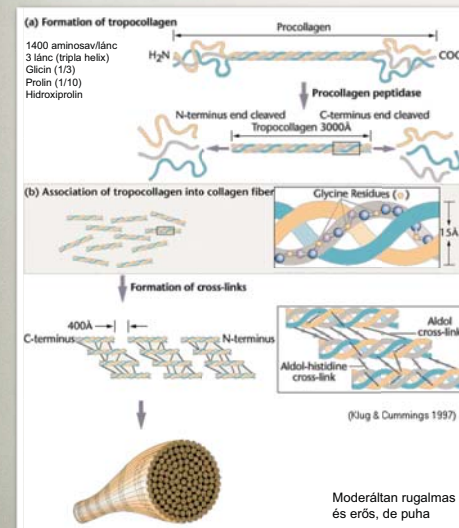
## PUHA SZÖVETEK



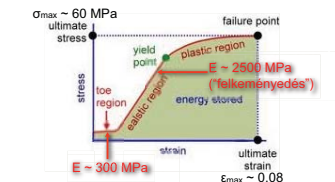
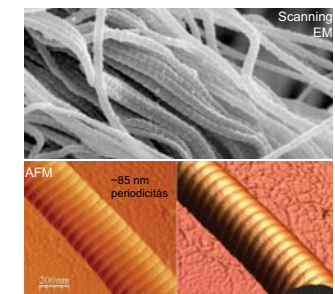
Fő alkotóelem: kollagén

Fő alkotóelem: kollagén, elasztin

## KOLLAGÉN



Moderátan rugalmas és erős, de puha





# KOLLAGÉN HÁLÓZATRA HATÓ ERŐK

(ERŐK AZ EXTRACELLULÁRIS MÁTRIXBAN)

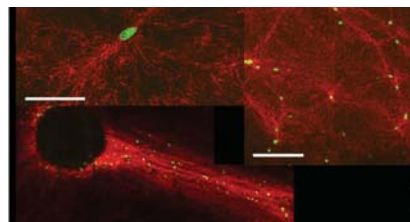
## Kollagén gél nyújtása



Növekvő feszültség

Megnyújtott kollagén mátrixban az egyedi rostok beállnak az erő irányába. Az extracelluláris mátrix szerkezeti elrendeződése erőfüggő.

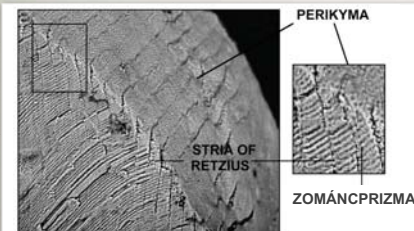
## Sejtek kollagén mátrixban



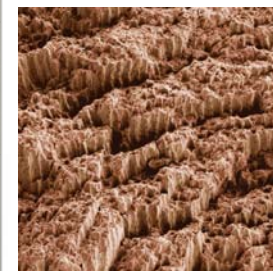
Zöld: sejtmag  
Vörös: kollagén rostok

A sejtek feszültség változást okoznak környezetükben, így megváltoztatják a kollagén hálózat mintázatát.

# FOGZOMÁNC



ZOMÁNCPRIZMA



Szerkezeti egység: Zománcprizma (nanokristályok)

Összetétel: 92% Hidroxipatit (HAP)

Merev, kemény, rideg



HAP crystals

A legkeményebb anyag az emberi szervezetben

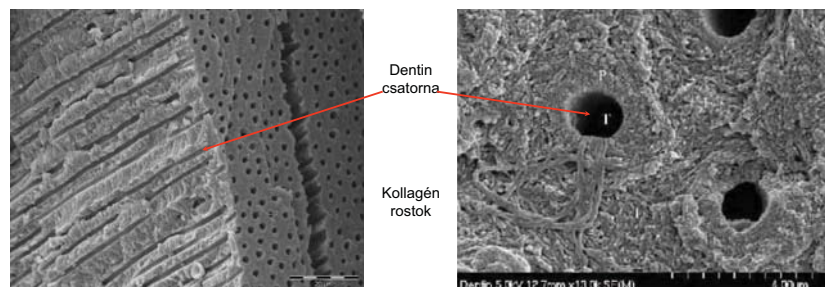


$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$   
 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$



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

# DENTIN



Dentin csatorna

Kollagén rostok

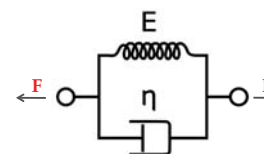
Összetétel: 35% szerves anyag(kollagén) + víz, 65% hidroxipatit

Szerkezet: A kollagén rostok által alkotott hálózatba 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

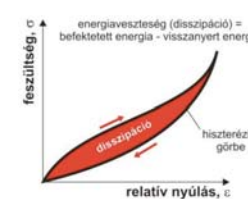
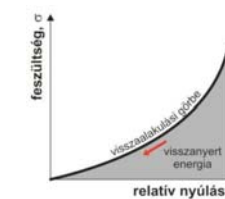
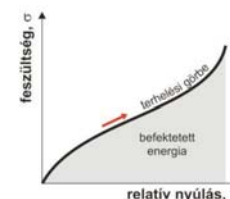
# VISZKOELASZTICITÁS

(MECHANIKAI MODELL)



modell: párhuzamosan kapcsolt rugó és dugattyú

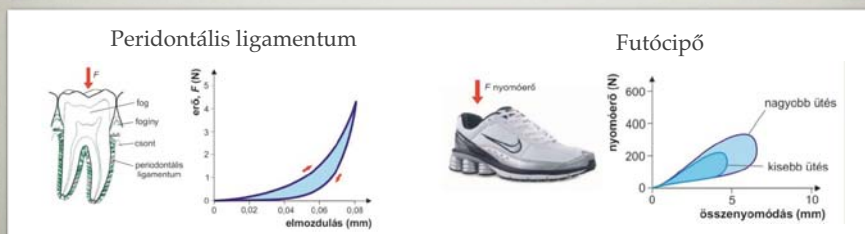
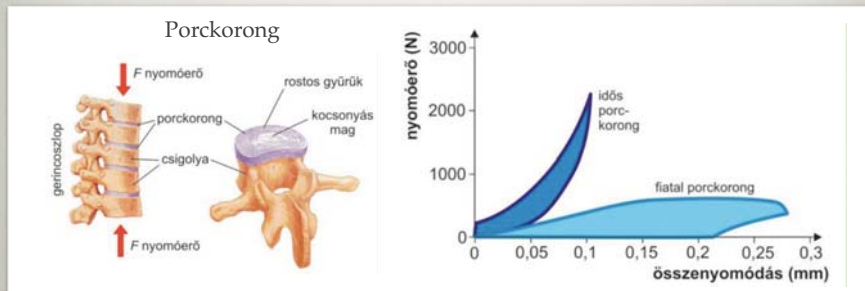
Rugó: ideális rugalmas (Hooke) test  
Dugattyú: ideális viszkózus (Newton) test



energiavesztés (disszipáció) = befektetett energia - visszanyert energia

# VISZKOELASZTICITÁS

(PÉLDÁK)

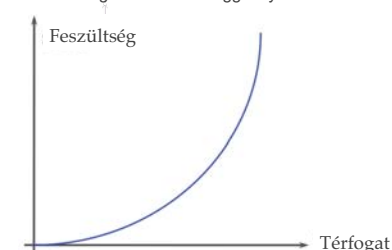


# RUGALMAS ARTÉRIÁK

## BIOMECHANIKÁJA

### Nem lineáris rugalmasság

A feszültség nem lineáris függvénye a deformációnak

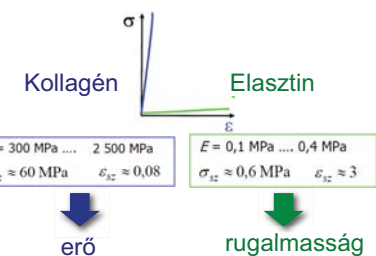
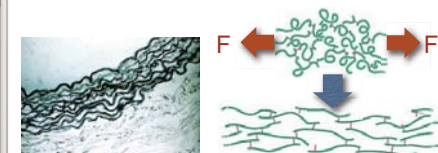


Erek rugalmasságáért felelős:

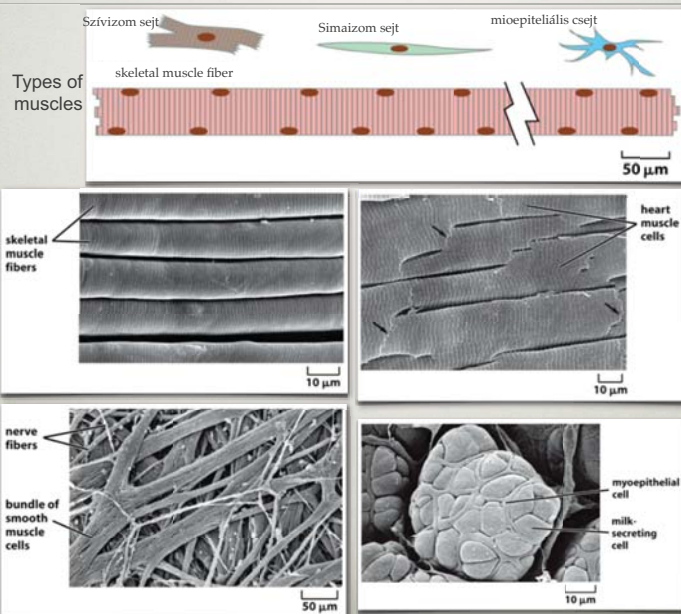
Elasztin  
Kollagén  
Simaizom

Rugalmassághoz köthető funkciók:

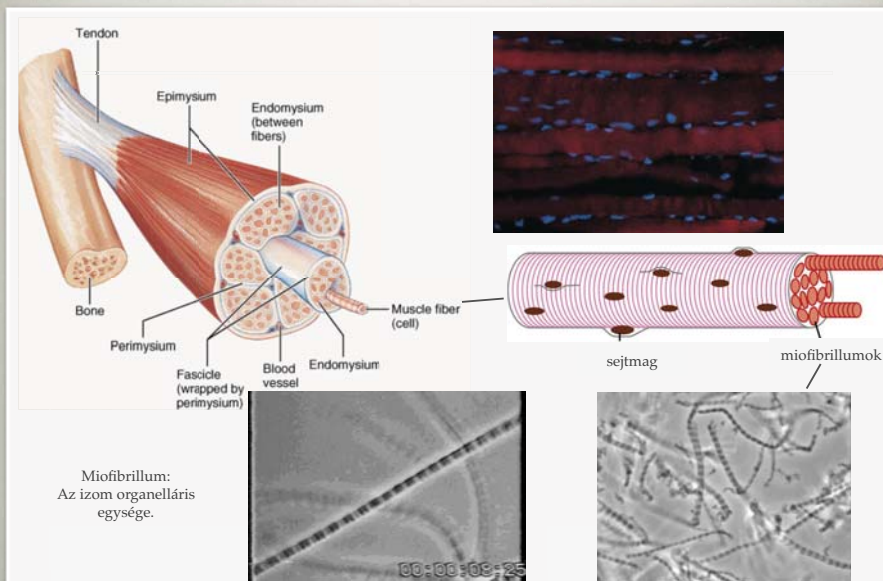
Rugalmas energia tárolása, nyomás impulzusok csillapítása, állandó áramlási sebesség fenntartása



# Az izom biomechanikája



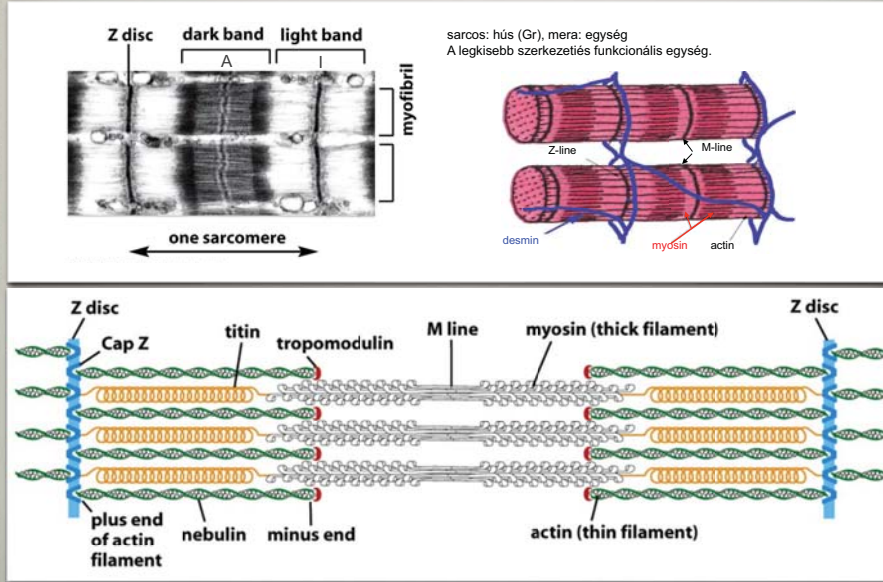
# HARÁNTCSÍKOLT IZOM





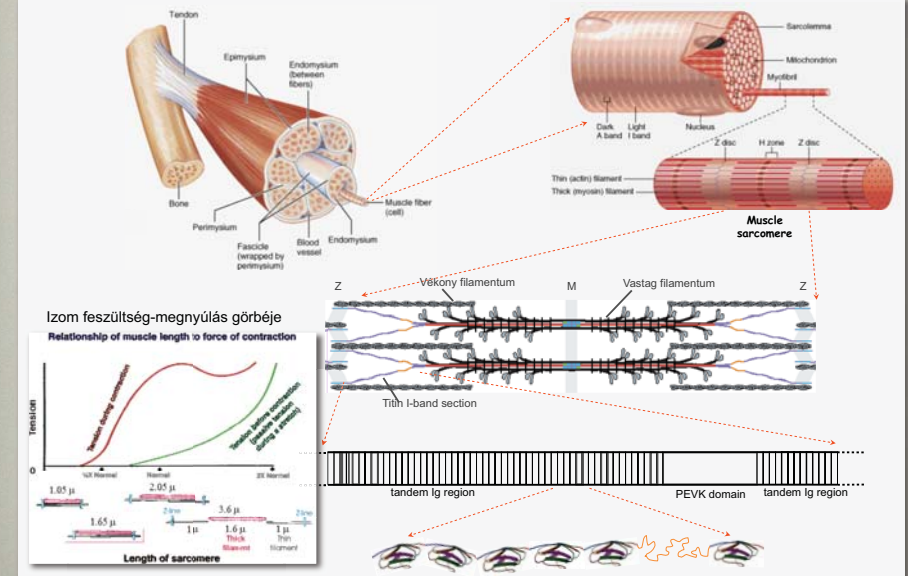
# Szarkomer

az izom funkcionális egysége



## TITIN:

### A SZARKOMER RUALMAS FILAMENTUMA



## BIOPOLIMEREK MECHANIKÁJA

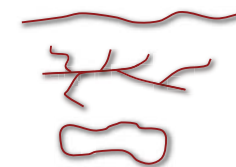
Polimer:  
Monomerek építik fel

Monomerek száma:  $N \gg 1$ ;  
Tipikusan,  $N \sim 10^2 - 10^4$ ,  
de, a DNS-t pl.:  $N \sim 10^9 - 10^{10}$

Biopolimer	Monomer	Kötés
Fehérje	Aminosavak	Kovalens (peptid kötés)
Nukleinsav (RNS, DNS)	Nukleotidok (CTUGA)	Kovalens (foszfodiészter)
Poliszacharid (pl. glikogén)	Monoszacharid (pl. glükóz)	CKovalens (pl., $\alpha$ -glikozidos)
Fehérje polimer (pl., mikrotubulus)	Fehérje (pl., tubulinn)	Másodlagos

## POLIMEREK ALAKJA

1. Lineáris
2. Elágazó
3. Cirkuláris

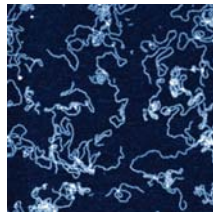


A polimererek alakja dinamikusan változik. Lehetséges mechanizmusok:

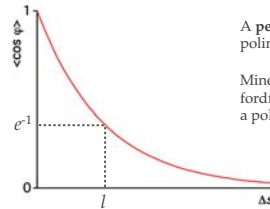
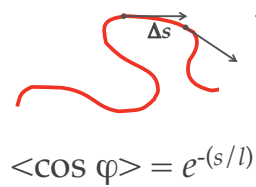
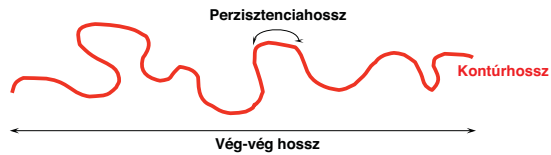
1. Kötések menti rotáció
2. Szabadon kapcsolt lánc (Freely Jointed Chain, FJC)
3. Féregszerű lánc, (Worm like chain WLC)



## RUGALMAS POLIMEREKET LEÍRÓ PARAMÉTEREK



Kettős szálú DNS



A perzisztencia hossz ( $l$ ) jellemzi a polimerlánc rugalmasságát.

Minél rövidebb, annál rugalmasabb és fordítva, minél hosszabb annál merevebb a polimer.

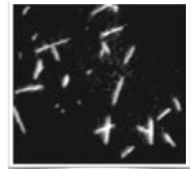
## BIOPOLIMEREK RUGALMASSÁGA

$l$  = perzisztenciahossz  
 $L$  = kontúrhossz

Merev lánc  
 $l \gg L$



Mikrotubulus



Szemiflexibilis lánc  
 $l \sim L$



Actin filamentum



Flexibilis lánc  
 $l \ll L$



DNS



## POLIMEREK MECHANIKÁJA

### Entrópikus elaszticitás

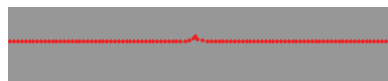
Termikus fluktuációk a polimer láncban



Szerkezeti entrópia (az elemi irányvektorok rendezetlensége) nő.

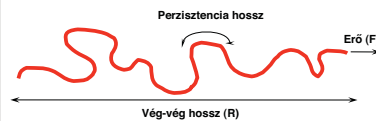


A lánc rövidül



### Erő szükséges egy entrópiás lánc megnyújtásához

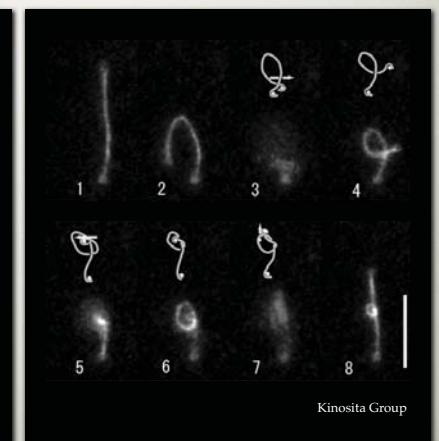
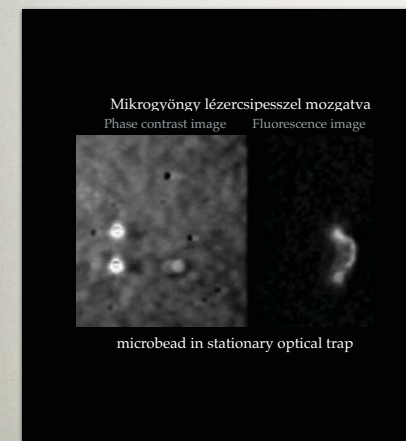
$$\frac{Fl}{k_B T} \sim \frac{R}{L}$$



$F$ =force  
 $l$ =correlation length (persistence length, describes bending rigidity)  
 $k_B$ =Boltzmann's constant  
 $T$ =absolute temperature  
 $L$ =contour length  
 $R/L$ =relative extension

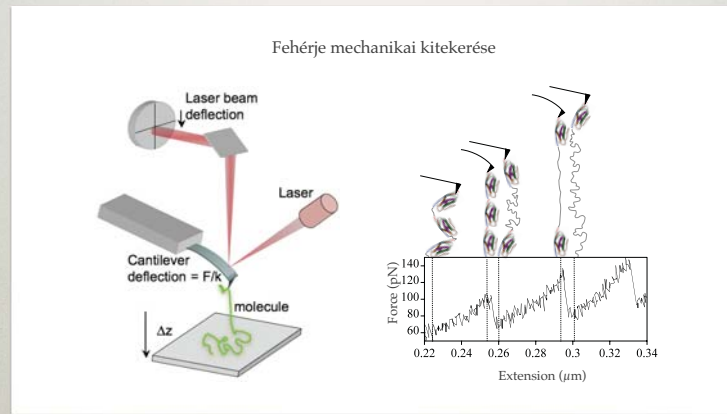
## BIOPOLIMEREK RUGALMASSÁGA

Csomót kötni egy DNS molekulára

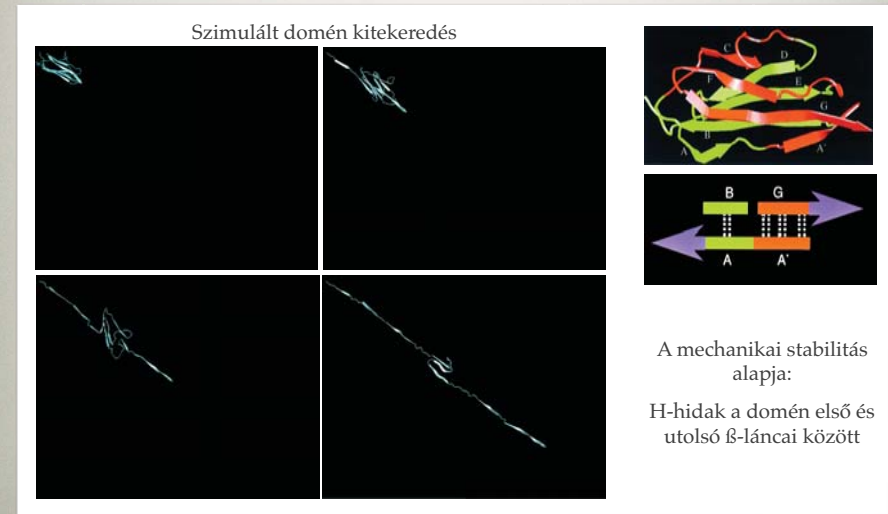


Kinosita Group

## BIOPOLIMEREK NYÚJTÁSA ATOMERŐ MIKROSKÓPPAL

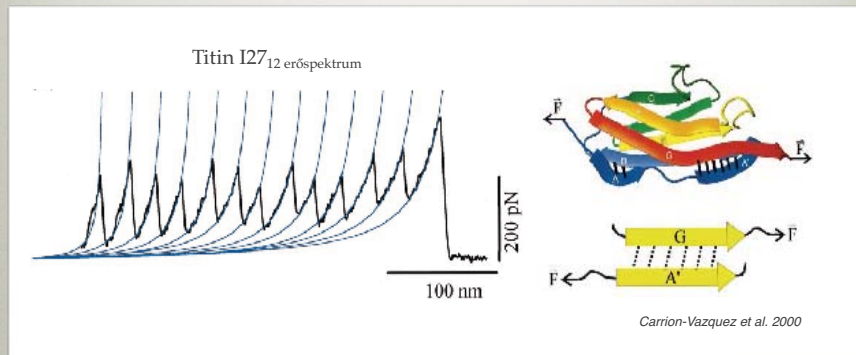


## GLOBULÁRIS DOMÉN MECHANIKAI KITEKERÉSE



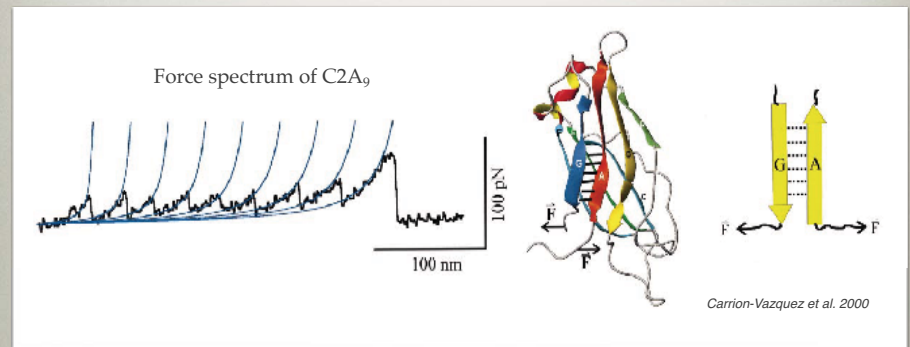
## BIOLÓGIA A MECHANIKAI STABILITÁS HÁTTÉRÉBEN I.

A mechanikai stabilitást a H-hidak elrendezése adja



## BIOLÓGIA A MECHANIKAI STABILITÁS HÁTTÉRÉBEN I.

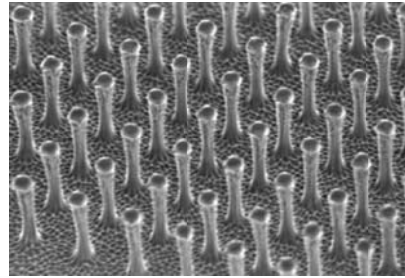
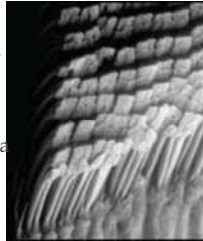
Alacsony mechanikai stabilitás: H-hidak párhuzamosak az erővel-



## MACHANIKAI STABILITÁS A TERMÉSZETBEN: GEKKO



Gecko talp  
tapadása:  
Sörték (setae)  
Párhuzamos kapcsolása



Mesterséges gekko talp