

## Orvosi Fizika 1.

# Az izomműködés fizikai alapjai, az izom munkája

Bari Ferenc  
egyetemi tanár  
SZTE ÁOK-TTIK Orvosi Fizikai és Orvosi  
Informatikai Intézet

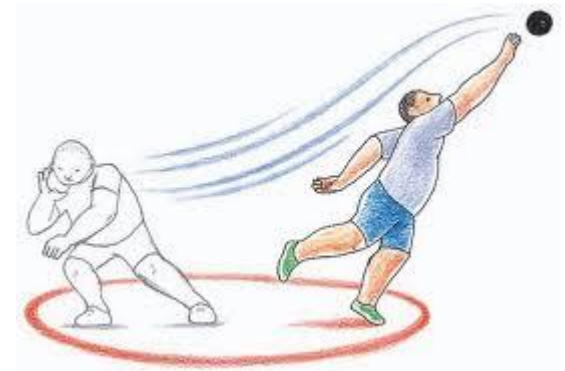
Szeged, 2018. szeptember 17.

# Mechanikai munka



Fizikai értelemben akkor történik munkavégzés, ha egy testre erő hat, és ennek következtében a test az erő irányába elmozdul. Pl.: egy testet függőleges irányban állandó sebességgel felemelünk.

Ha az erő és az elmozdulás egymásra merőleges, akkor fizikai értelemben nem történik munkavégzés. Pl.: ha egy táskát függőlegesen tartunk, és úgy sétálunk, akkor sem a tartóerő, sem a nehézségi erő nem végez munkát.



# Teljesítmény

A munkavégzés sebességét jellemző fizikai mennyiség :

$$P = \frac{dW}{dt} \quad \left[ W = \frac{J}{s} \right]$$

A munka (energia) más mértékegységei:

$$[J = Ws]; \quad kWh = 3,6 \cdot 10^6 J$$

$$(1 \text{ LE} = 0,736 \text{ kW} )$$

Egy  $\vec{v}$  sebességgel mozgó testen az  $\vec{F}$  erő által kifejtett teljesítmény:

$$P = \vec{F} \vec{v}$$

# Az energia

Egy meghatározott **A** állapotban levő test (vagy rendszer) energiával rendelkezik, ha megfelelő körülmények között munkavégzésre képes.

Energiáját azzal a munkával mérjük, amelyet a test végez, míg egy **A** állapotból a megállapodás szerint választott **A<sub>0</sub>** állapotba jut, vagy azzal a munkával, amelyet a testre ható erők ellenében végeznünk kell, míg **A<sub>0</sub>**-ból **A**-ba juttatjuk.

Az energia mértékegysége megegyezik a munkáéval. [**J**, **kWh**]

- Az energiamegmaradás tétele:

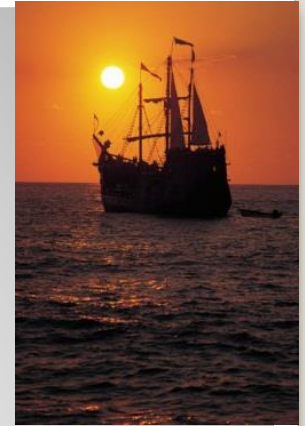
Konzervatív terekben a helyzeti energia és a mozgási energia összege állandó

$$W_{h1} + W_{m1} = \text{áll.} = W_{h2} + W_{m2}$$

$$mgh_1 + mv_1^2/2 = mgh_2 + mv_2^2/2$$

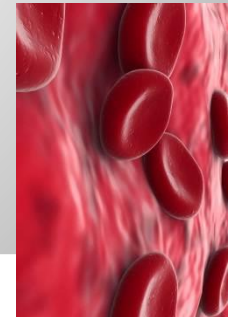
Mit jelent, hogy konzervatív erőter (gravitációs tér, elektrosztatikai tér)

- "1840 nyarán a Jáva szigetére újonnan megérkezett európaiakon végrehajtott érvágásoknál azt tapasztaltam, hogy a kar vénájából eresztett vérnek majdnem kivétel nélkül föltűnően vörös színe volt. Ez a jelenség magára vonta teljes figyelmemet. Kiindulván a Lavoisier égés-elméletéből, mely az állati hő égésfolyamatnak tulajdonítja, azt a kettős színváltozást, melyet a vér a kicsiny és a nagy körfutás hajszáledényeiben szenved, úgy tekintettem, mint a vérrel végbemenő oxidácziónak érzékileg észrevehető jelét, látható reflexusát. Az emberi test állandó mérsékletének megtartására kell, hogy annak hőfejlesztése a hő veszteségével, tehát a környező médium mérsékletével is szükségképen bizonyos értékviszonyban álljon s ennél fogva kell, hogy mind a hőtermelés és az oxidáczió- folyamat, mind pedig mind **a két vérnemnek színkülönbsége a forró égöv alatt egészben véve kisebb legyen mint a hidegebb vidékeken.**"

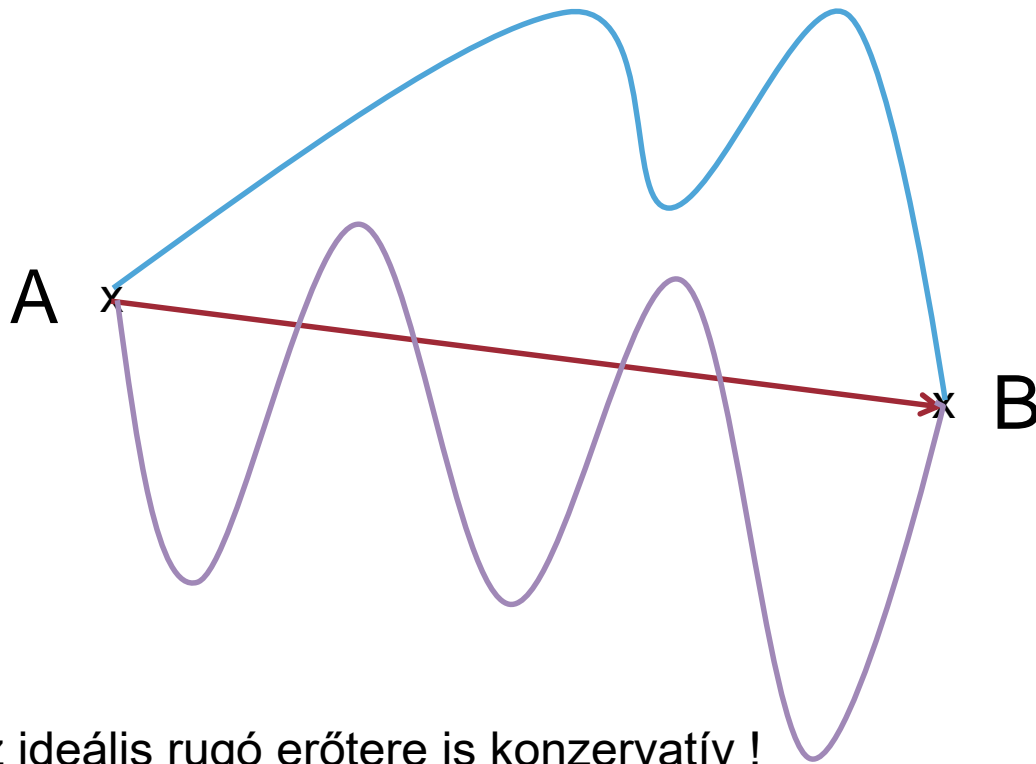


Julius Robert Mayer

## Az energia megmarad



Konzervatív erőterekben a test helyzete (koordinátái) határozza meg az energetikai viszonyokat



Az ideális rugó erőtere is konzervatív !

A nem konzervatív erőket **disszipatív erőknek** nevezzük (súrlódási erő)

# A kinetikus energia

$\vec{F}_x$  Állandó erő hason  $x$  irányban egy  $m$  tömegű testre.  
 $s$  úton történő elmozdulás során a végzett munka:

$$W = F_x s = (ma_x) s$$

$$a_x = \frac{v - v_0}{t}$$

$$s = \frac{1}{2}(v_0 + v)t$$

$$W = m \left( \frac{v - v_0}{t} \right) \frac{1}{2} (v + v_0) t$$

$$W = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v_0^2$$

A mozgási (kinetikus) energia:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2$$

**Skalár, mértékegysége ua. mint a munkáé: [J]**



# A kinetikus energia tétele

$$W = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$



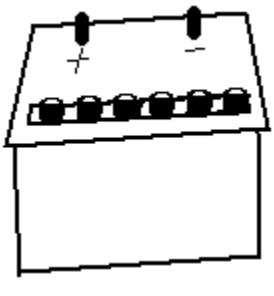
$$W = \Delta E_{\text{kin}}$$

Egy tömegpont kinetikus energiájának megváltozása megegyezik a ráható erők eredője által végzett munkával.

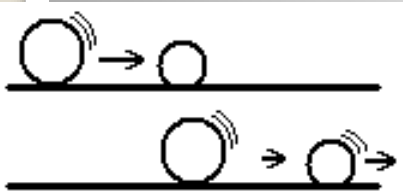
Vagy:

egy mozgó tömegpont munkavégző képességgel rendelkezik, azaz kinetikus energiájának csökkenése árán munkát végezhet.

# Az energia megmarad

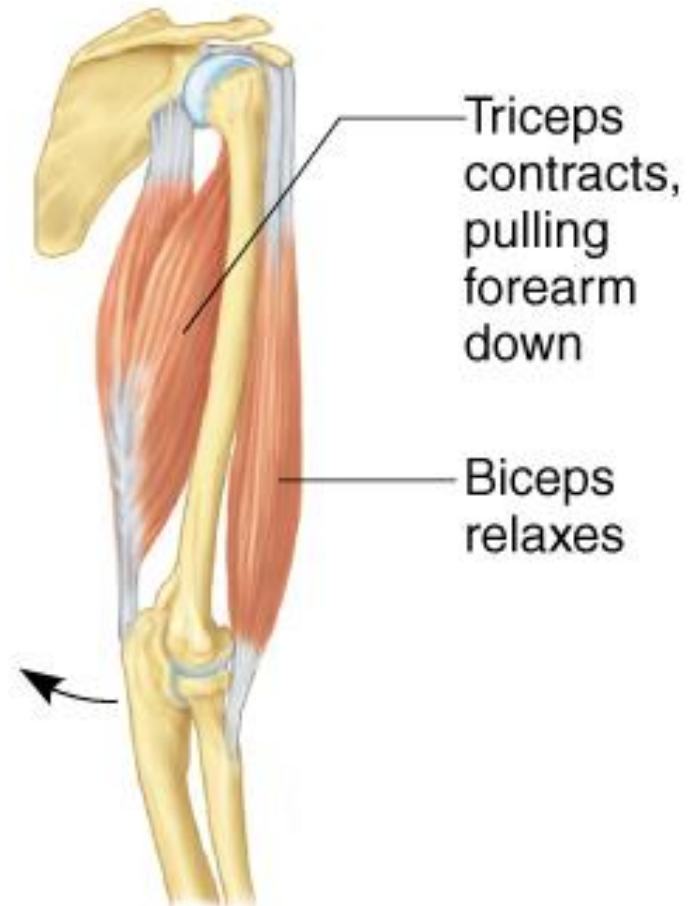
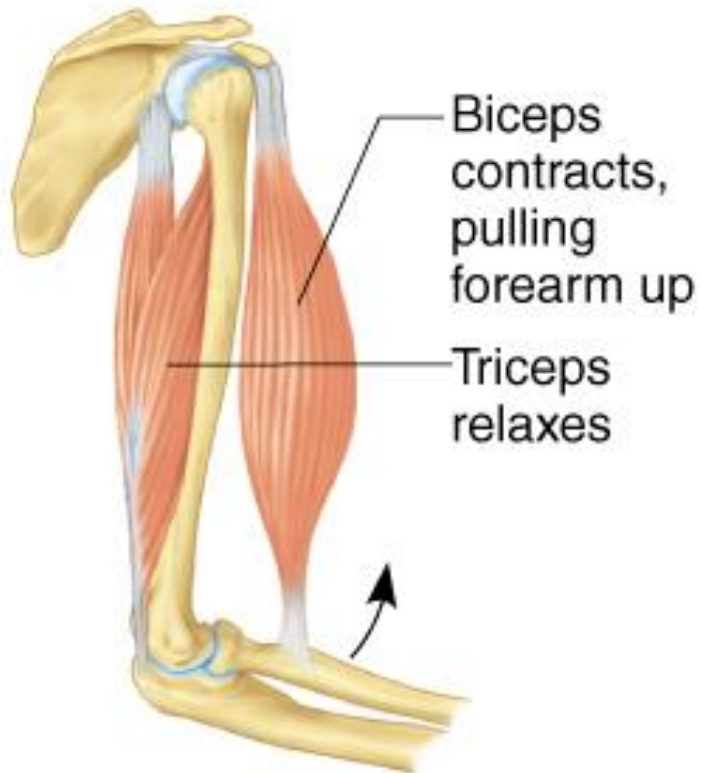


- Az energia **szubsztanciaként** való kezelése milyen mélyen beivódott fizika szakmódszertani kultúránkba. Még mindig van „*hőmennyiség*”, amelyet a szerzők nyilván nem anyagi szubsztanciának gondolnak. A biológiai, kémiai folyamatok elemzése során gyakran beszélünk „*energiát tároló vegyületekről*”. Villamos vezetékeink „*szállítják az energiát*”, az elektromos áramkörben lévő, ellenállással rendelkező elektromos eszközt „*fogyasztónak*” nevezzük. Gyakran mondjuk, hogy kölcsönhatás közben „*az egyik test energiát ad át a másiknak*”.
- A sajátos gyermeki elképzelésekben az energia „**termelődik és elhasználódik**”, vagyis nem érvényes benne az energia-megmaradás elve . Úgy tűnik, ez a törvény nem tartozik azok közé, amelyek már születésünkkel adóttak bennünk, ezt igen nehéz is lenne elképzelni. Az energia megmaradását tehát meg kell tanulnunk.
- A **tankönyvek** gyakran fogalmazzák meg pl. azt, hogy az erőművekben az energia **keletkezik**, az égéskor is ugyanez történik. Az energiának egyik formából a másikba való **átalakulása** nem szerepel ezekben a leírásokban, a tanulók teljes nyugalommal hihetik azt, hogy az energiát valóban előállítják, pl. szénből, vagy uránból.



- Az emberei szervezet részben egyensúlyi állapotokban vagy hely, helyzetváltoztató mozgást végez (csontok, izmok erő kifejtése révén)
- Az izommunka során felhasznált energia nagy része, 75- 80% a hő formájában szabadul fel! A felhasznált energiának csak mintegy 25% át hasznosítják az izmok!

# Az alkar mozgatósa



## **Mit csinál az izom a kontrakció alatt ?**

**Erőt fejt ki és forgatónyomatékokot hoz létre**

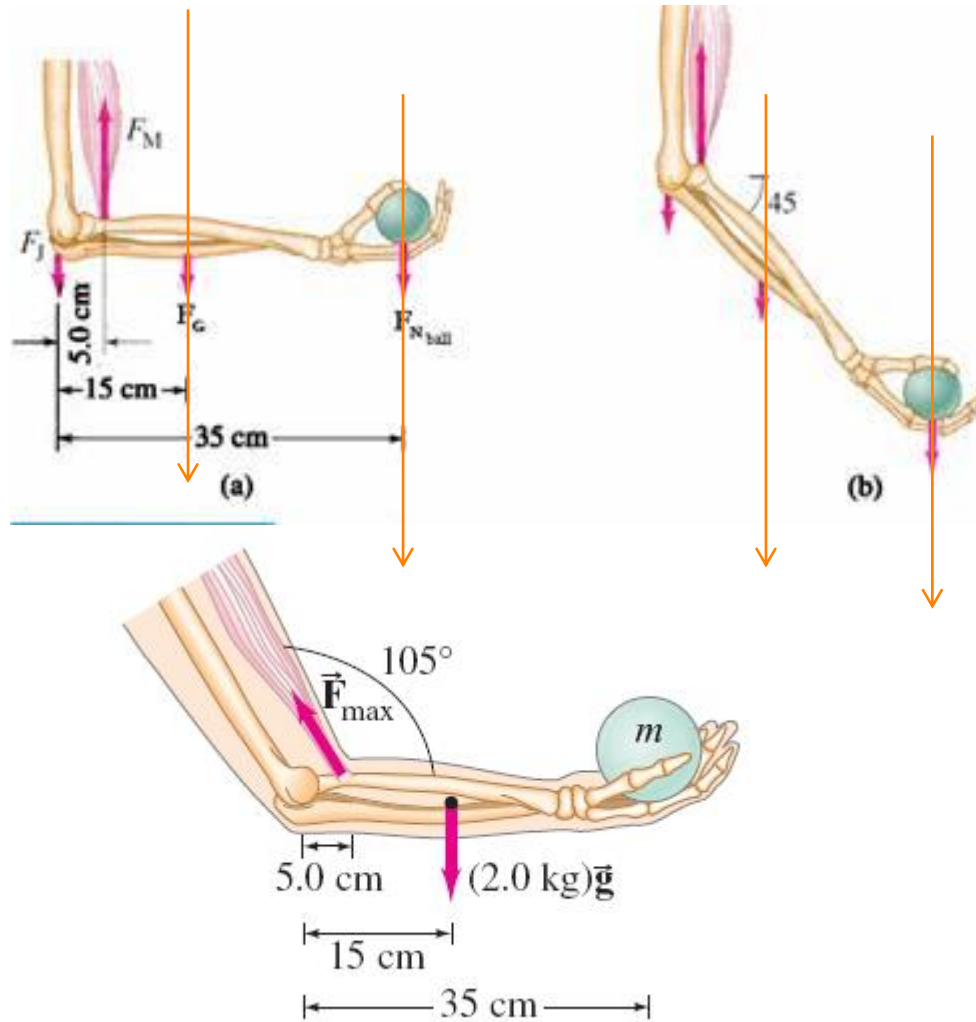
**A feszülését megváltoztatja az idő függvényében**

**Megváltoztatja hosszát az idő függvényében**

**Munkát végez**

**Teljesítményt produkál**

**Energiát alakít át egyik formából a másikba („tárol és hasznosít”)**



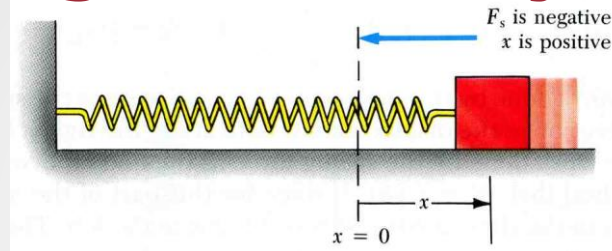
Mikor van egyensúly ? Mi a feltétele?

A hosszabb izom ugyanakkora erő kifejtésre képes?

## A rugóerő által végzett munka:

A rugóerő:  $F_x = -Dx$

### A rugóerő munkája,



$$W = \frac{Dx \cdot x}{2} = \frac{1}{2} Dx^2$$

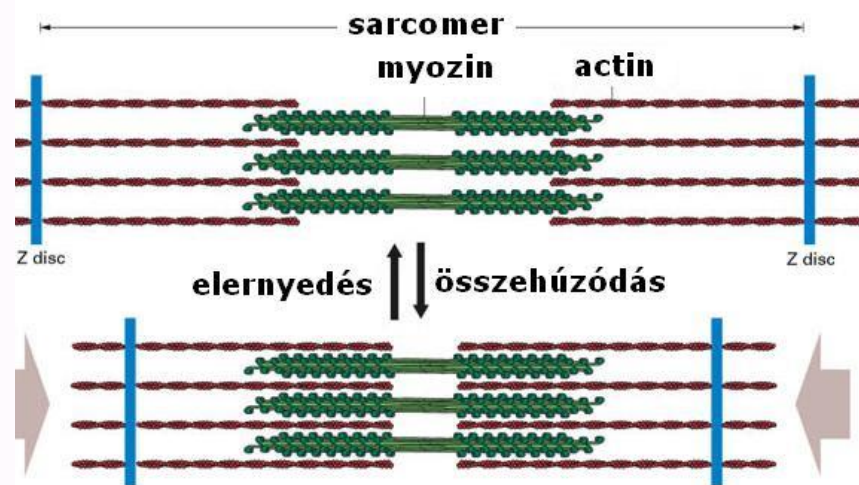
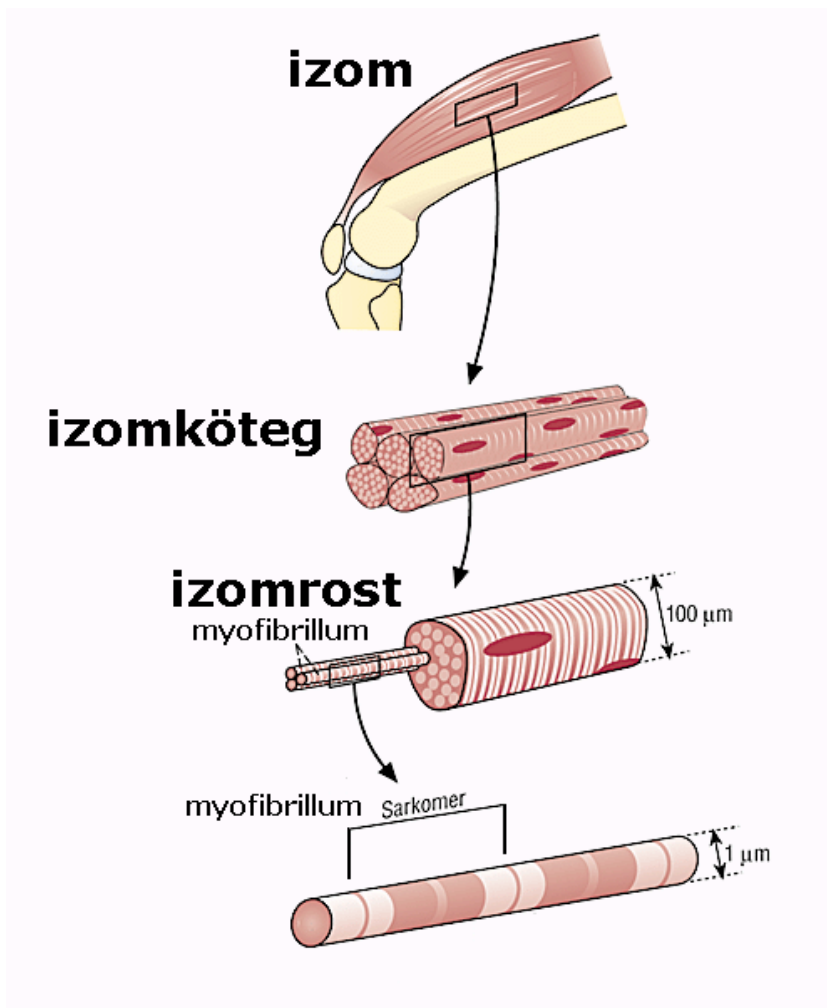
Modellezhetők e az izmaink rugóval?

Izometriás (az izom hossza állandó) változások

Izotóniás (a terhelés állandó)

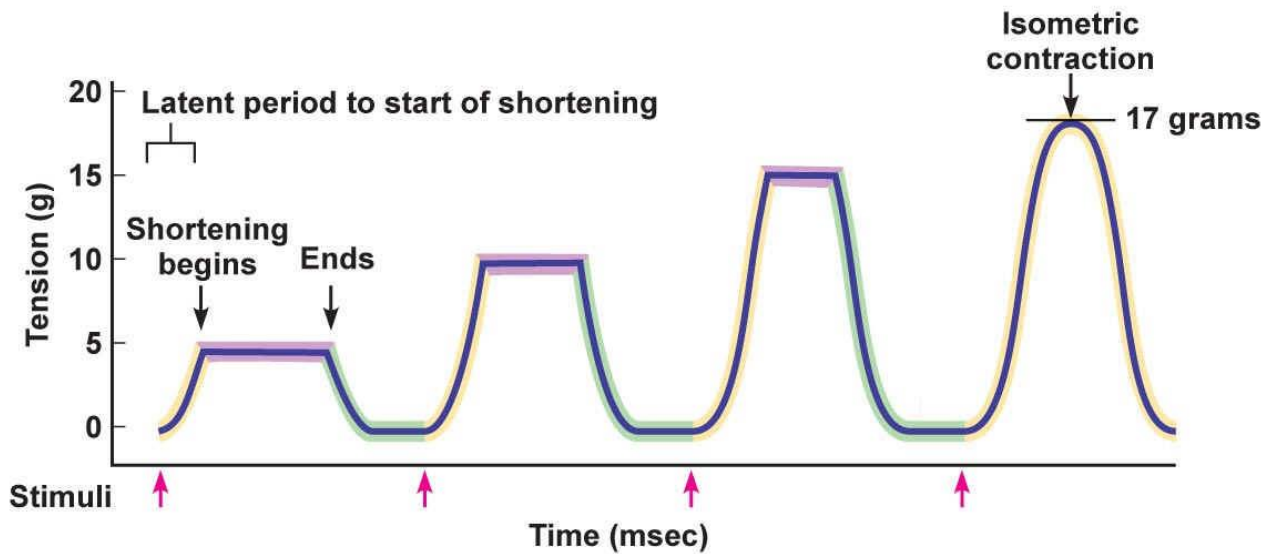
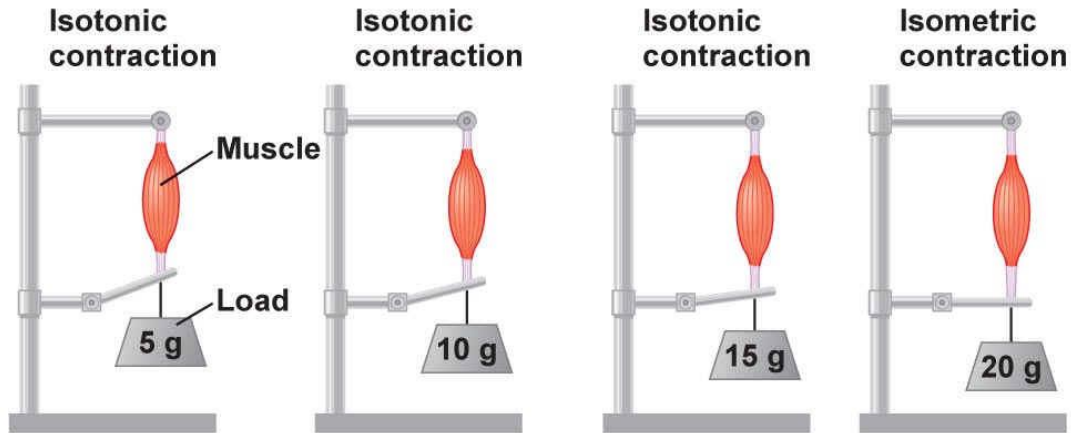
Az izomról még bővebben lesz szó

# A VÁZIZOM ELEMI EGYSÉGE -

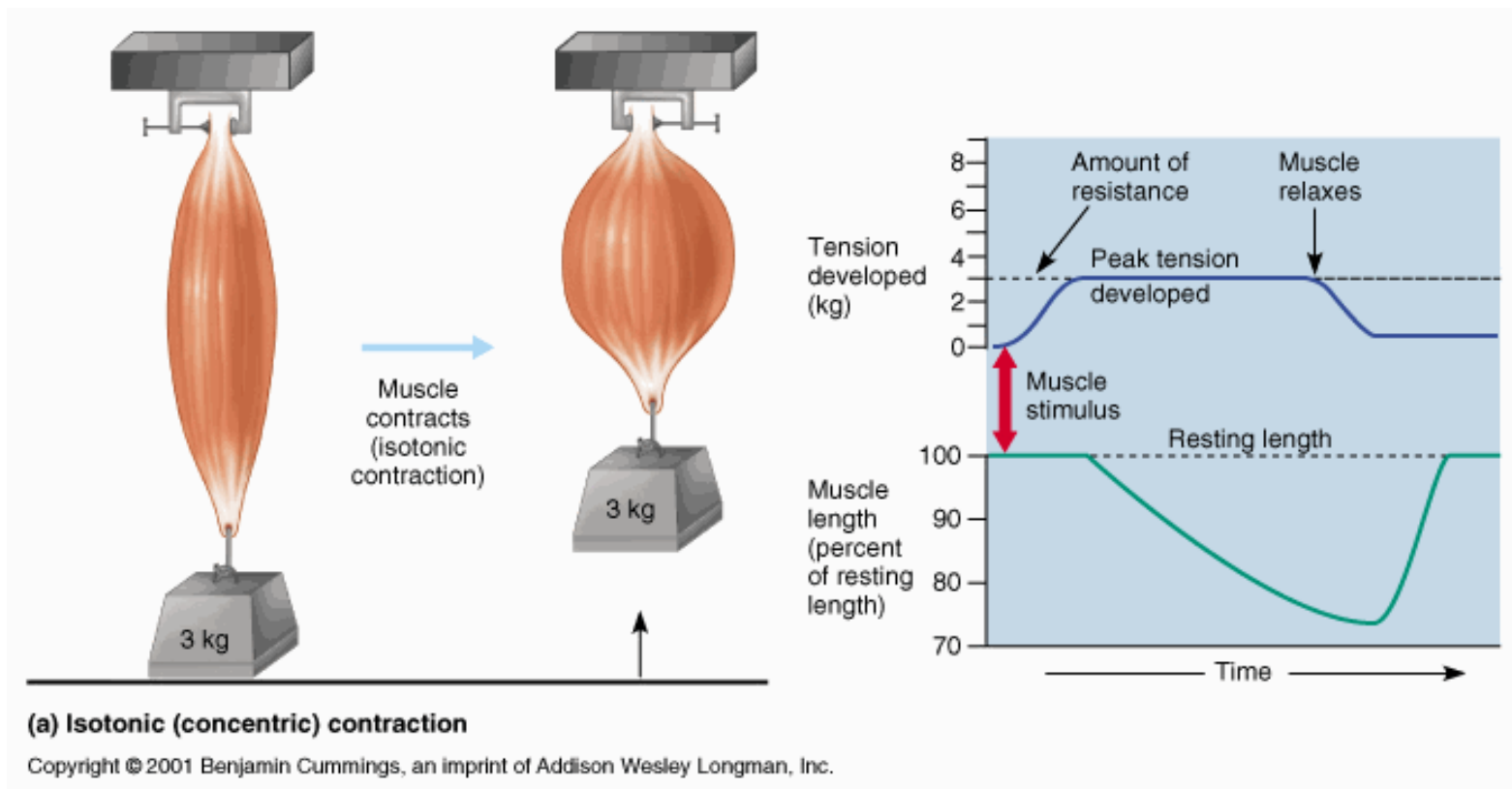




# Az izom passzívan nyújtható-aktív összehúzódásra is képes

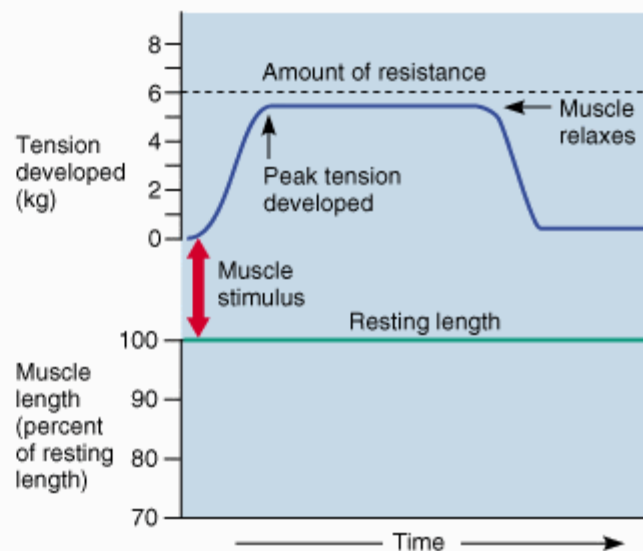
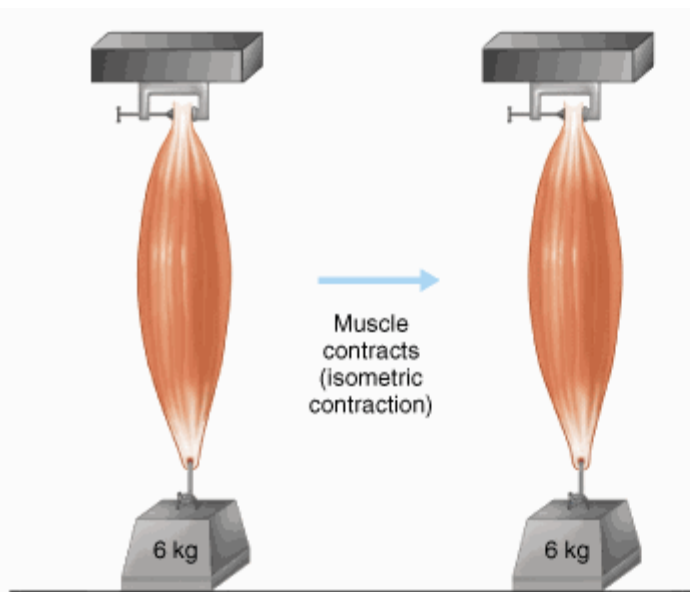


Stimulációra az izom összehúzódik (mi változik?)  
A terhelés nem (a tónus)  
Csak az izom hossza- fizikai értelemben munkát végez



Az izom a terhelésre aktívan válaszol – nem nyúlik meg  
A hossz nem változik - benne a feszülés a terhelés függvénye

Izometriás kontrakció (közben kereszthidak- kapcsolatok)



Nyugalmi hossz

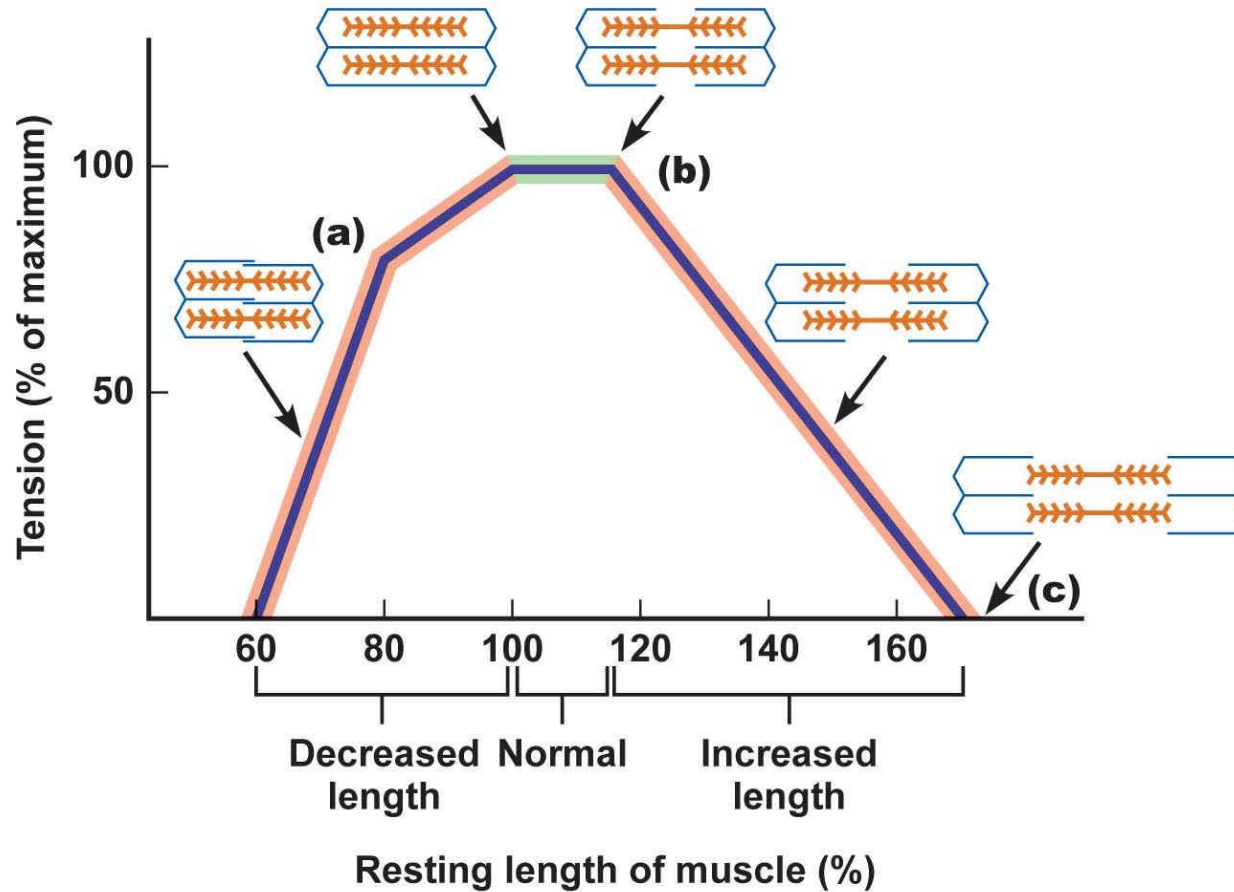
(b) Isometric contraction

Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.

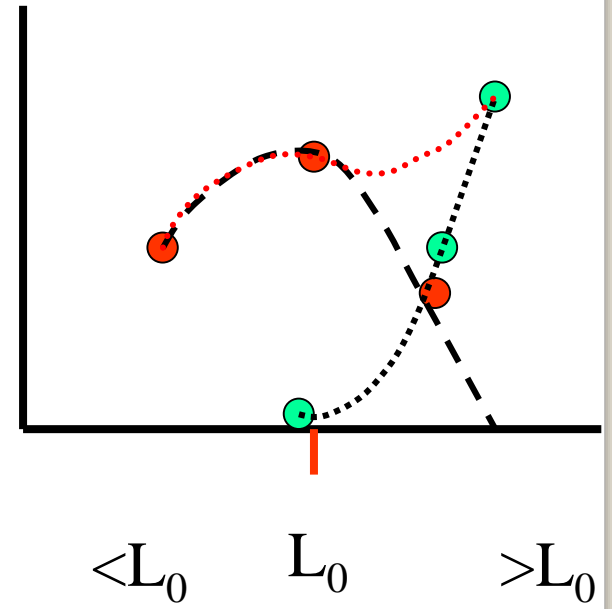
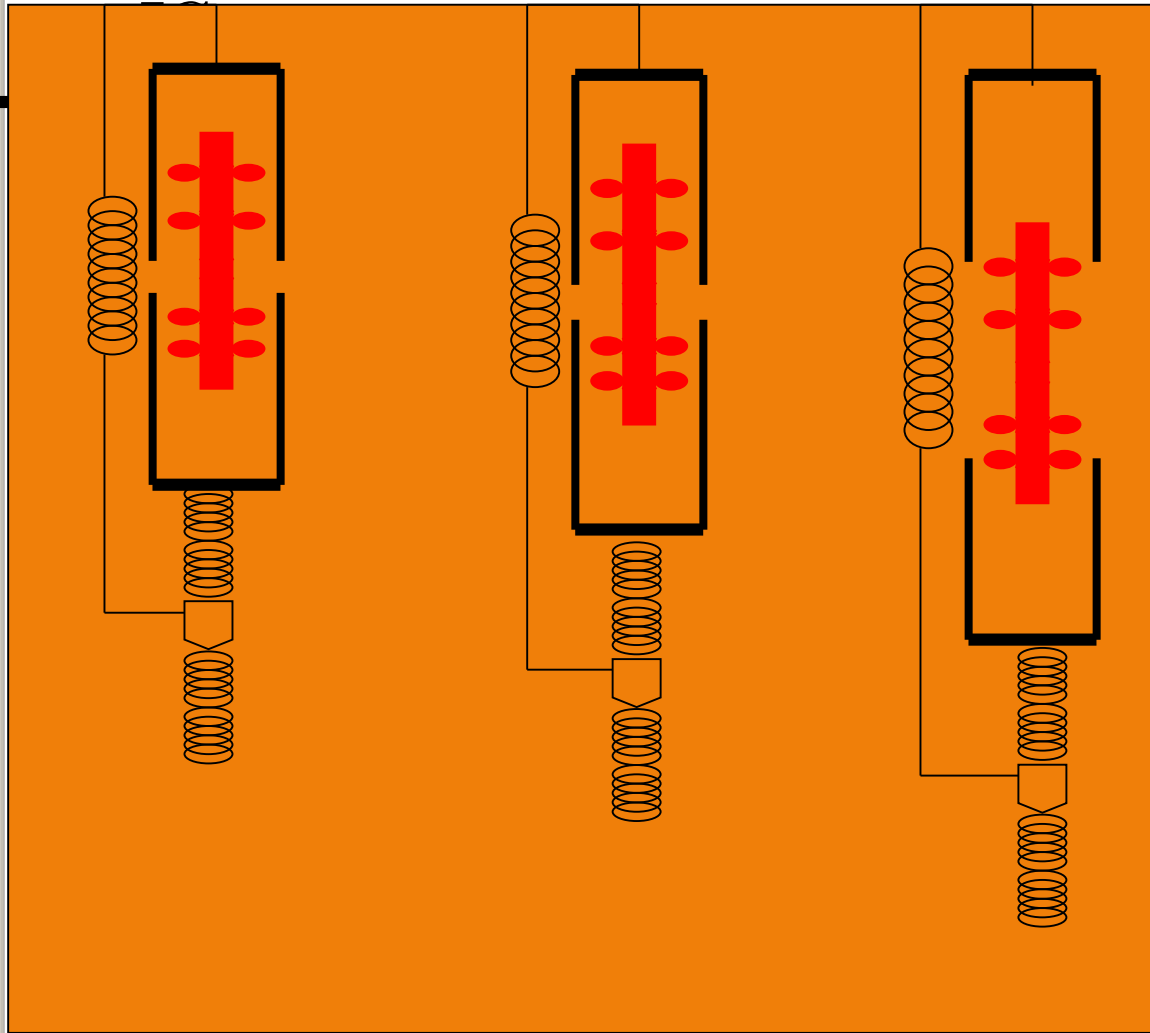
## **A maximális izometriás erő nagyságát befolyásoló tényezők**

- Izomhossz (erő- hossz összefüggés)**
- Izületi szög (nyomaték – izületi szög összefüggés)**
- Az izom élettani keresztmetszete (hipertrófia)**
- Izomfelépítés, architektúra (tollazottsági szög)**
- Testhelyzet**

Az izomban kifejlődő erő függ az izom hosszától  
(nyugalmi izomhossznál van az erő maximuma)



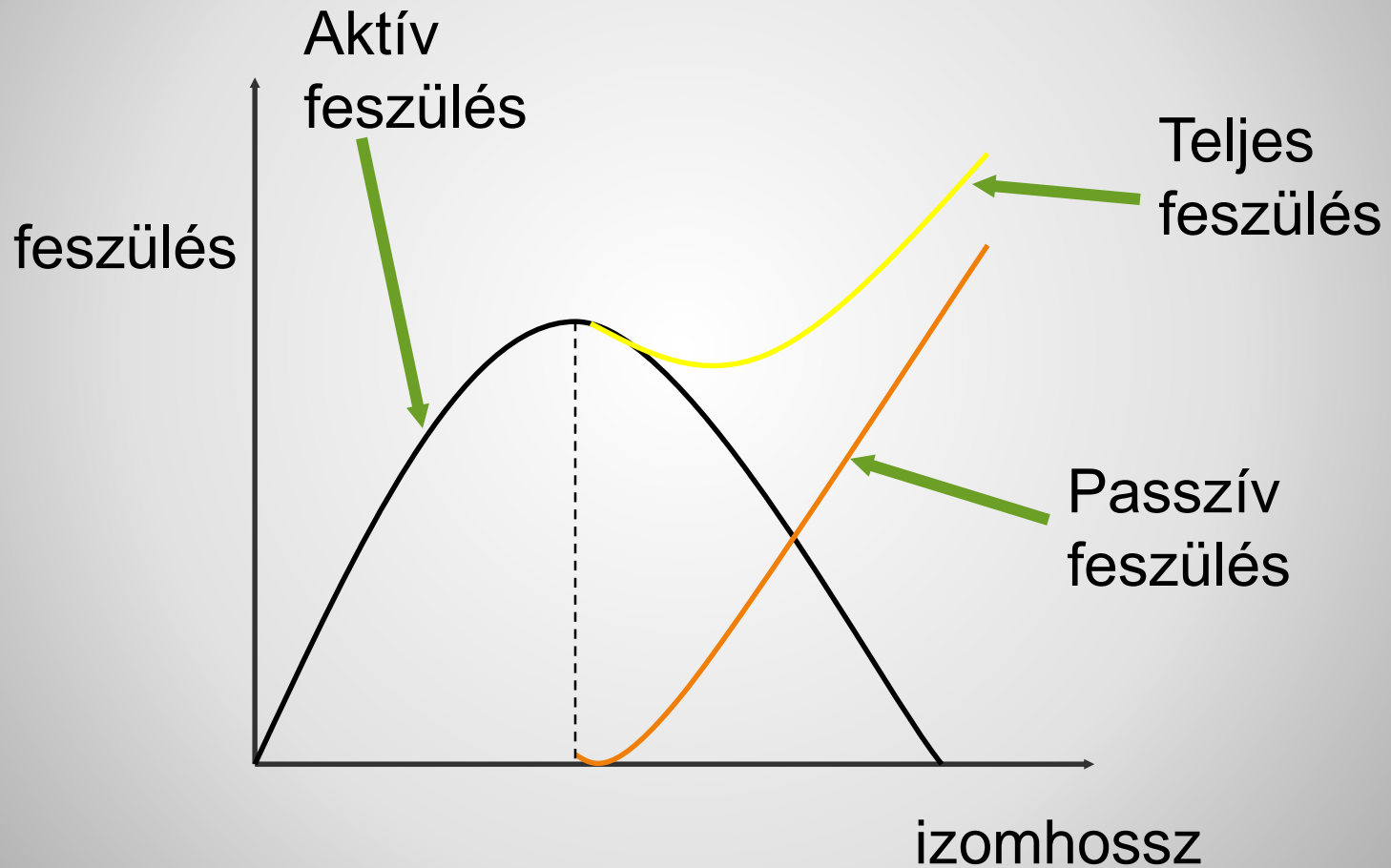
# Az izom hossz-feszülés görbéje

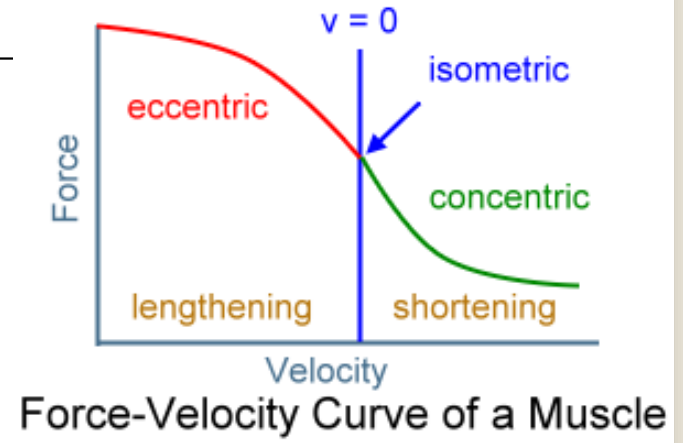
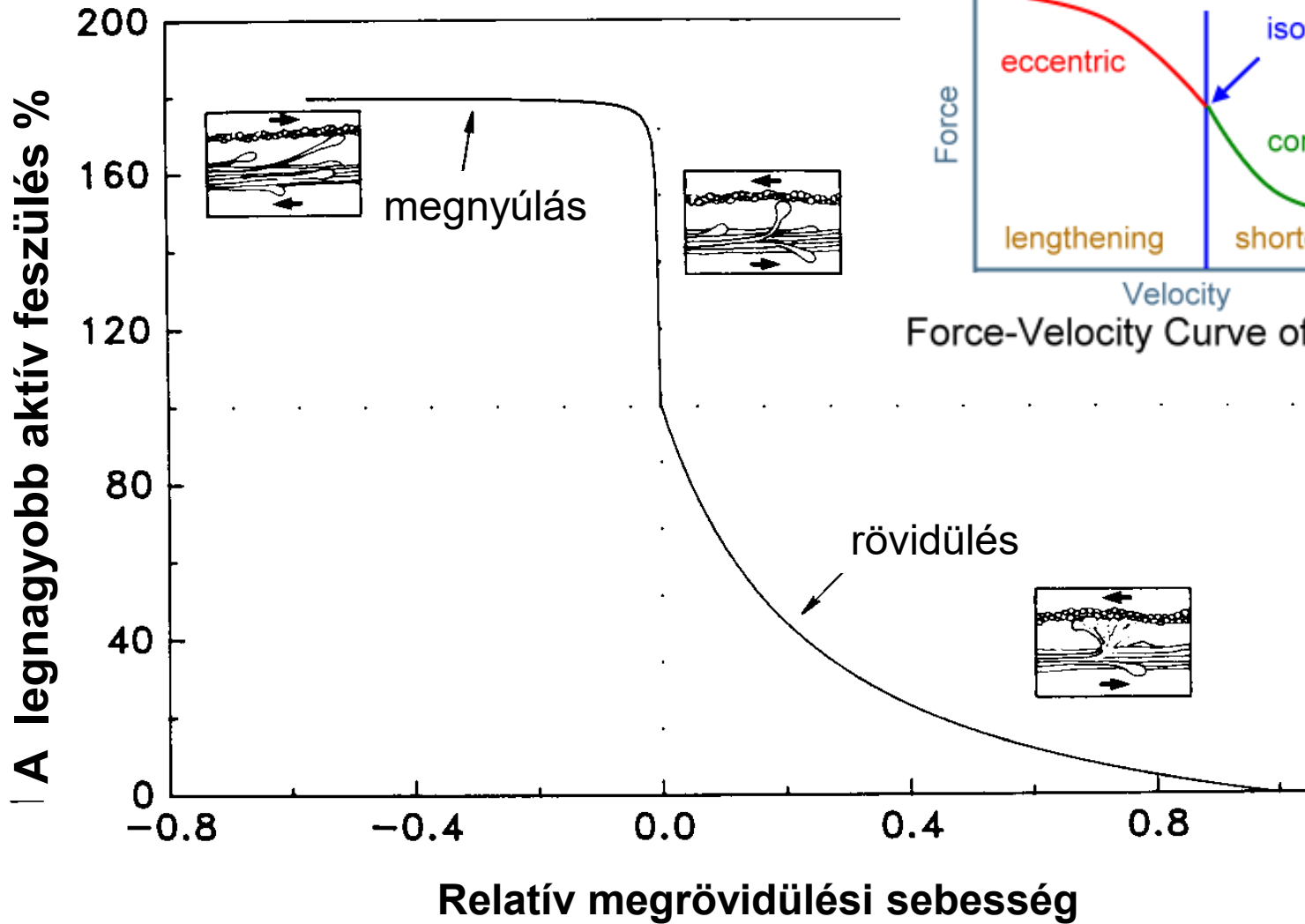


Hill egyszerűsített modellje (1938)

– az aktív tag mellé bekerül a kötőszövet és az ín is

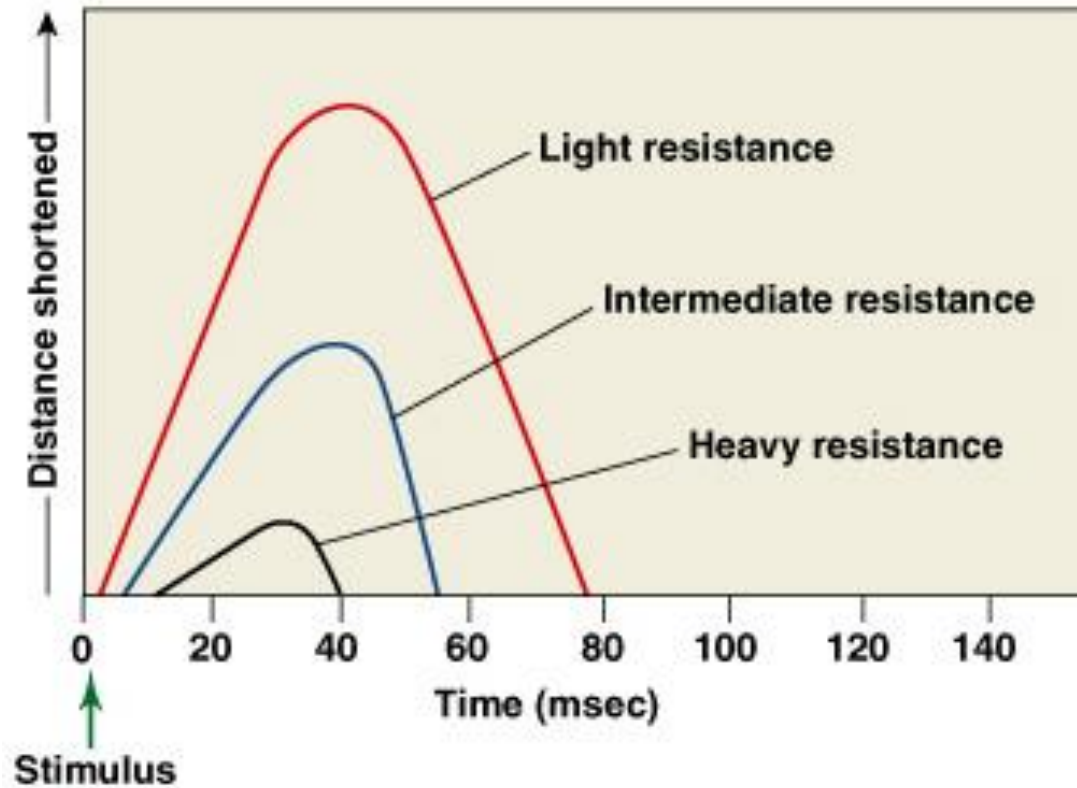
# Izomhossz- feszülés görbe







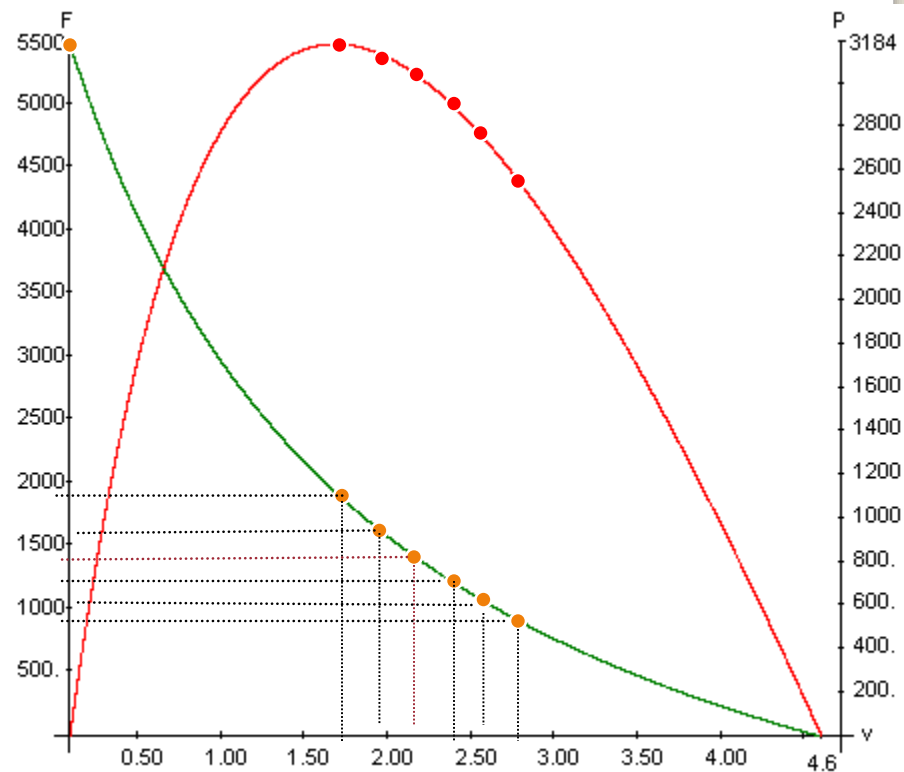
## Terhelés és rövidülési sebesség



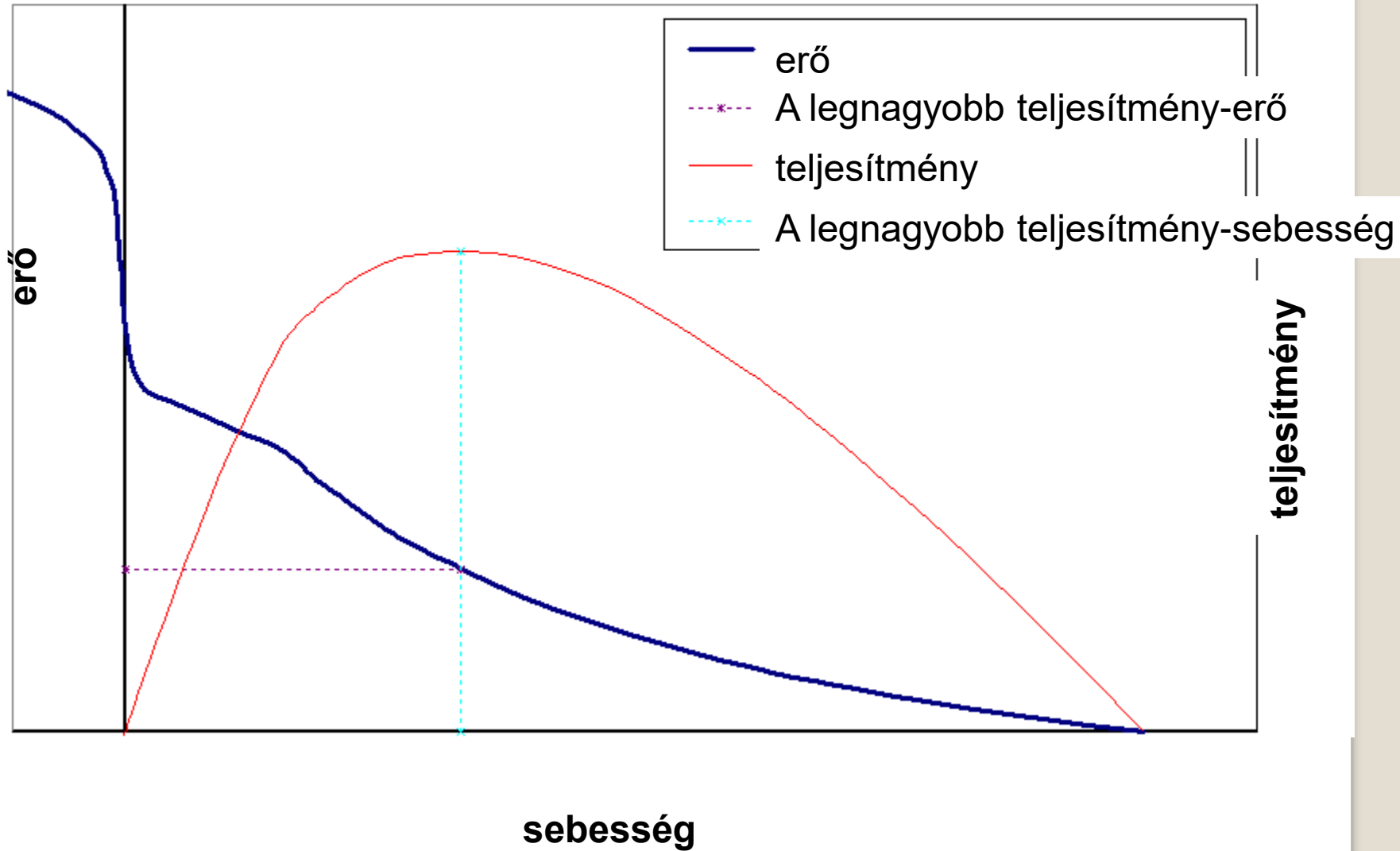
# Teljesítmény – sebesség görbe

$$P = F \cdot v \text{ (Nm/s, Watt)}$$

$$P = M \cdot \omega \text{ (Nm rad/s, Watt)}$$



# Erő-sebesség- teljesítmény a vázizom esetén



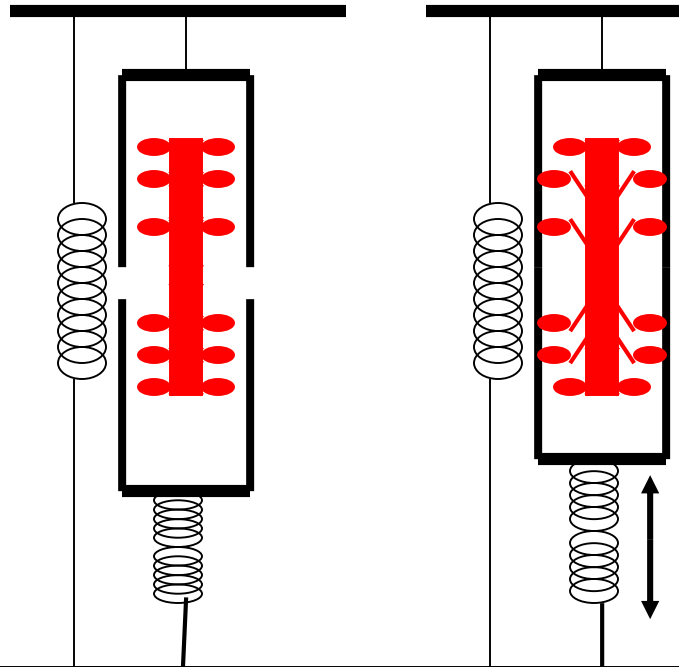
# Néhány változó értéke

**A maximális teljesítmény az izom azzal a teher (súly) nagysággal éri el, amely a maximális statikus erő 30-40 százaléka.**

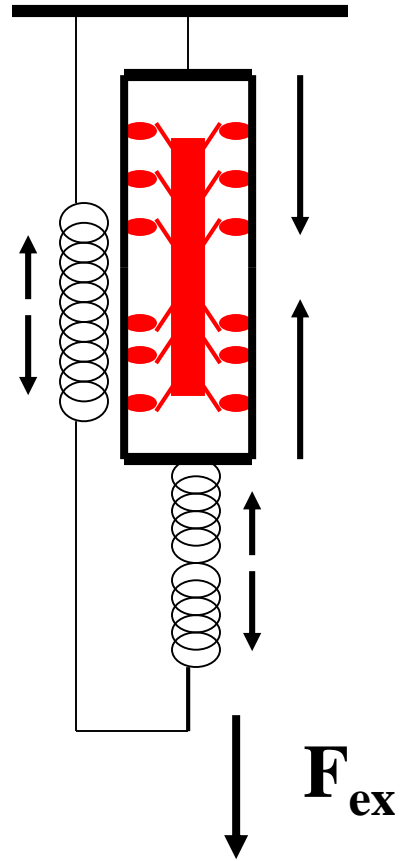
**Példa:**

**Ha maximális statikus erő 1000 N, akkor a maximális teljesítmény az izom akkor éri el, ha 300-400 N súlyerőt kell mozgatni meghatározott úton a lehető legrövidebb idő alatt.**

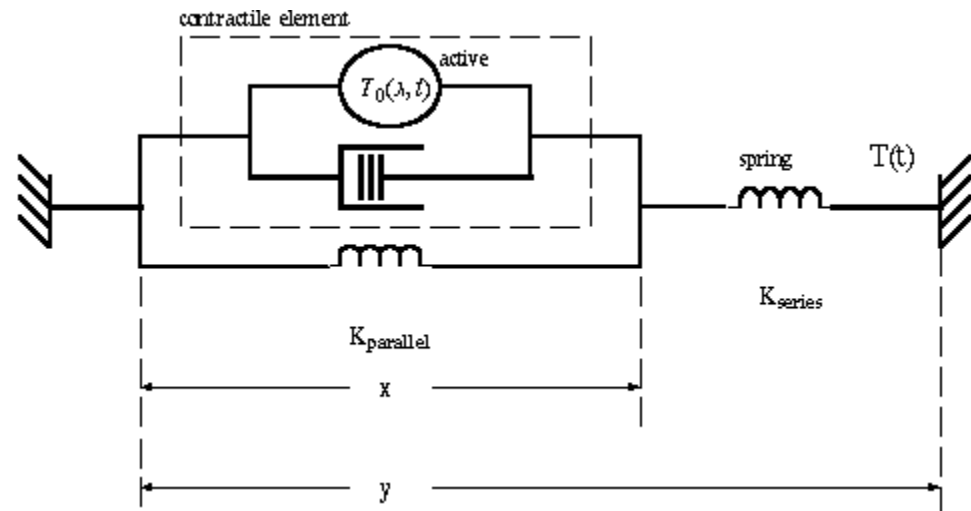
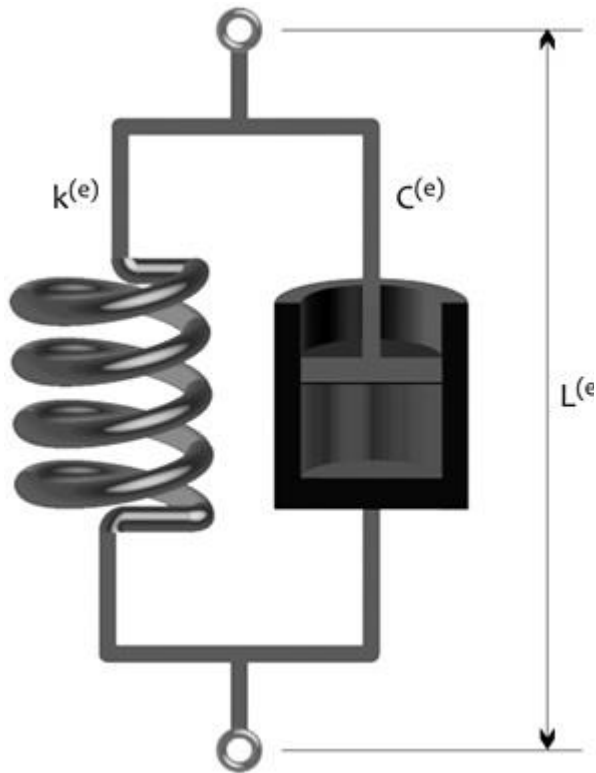
IC



EC



A valóságos izmot nem egy (vagy több) rugóval, hanem egyéb (aktív) taggal is modellezzük

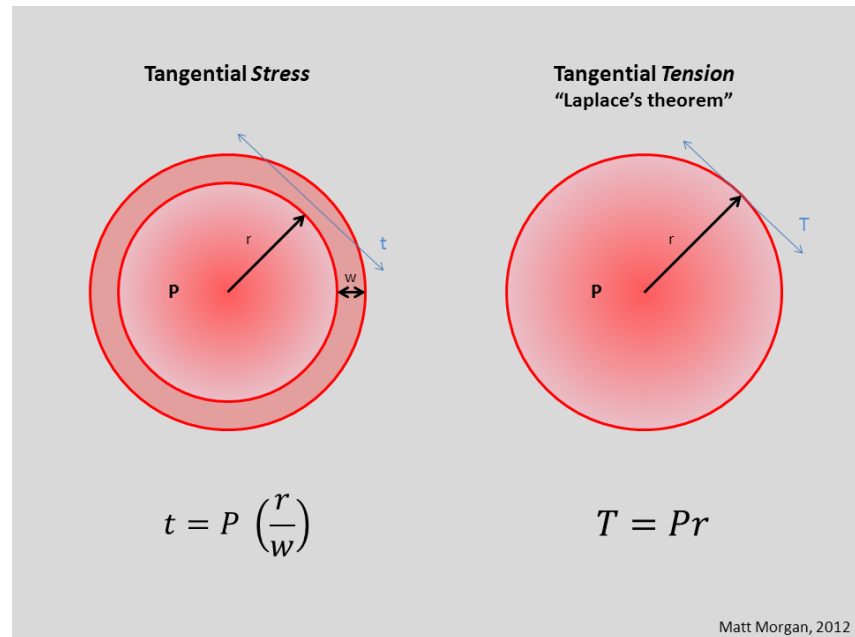
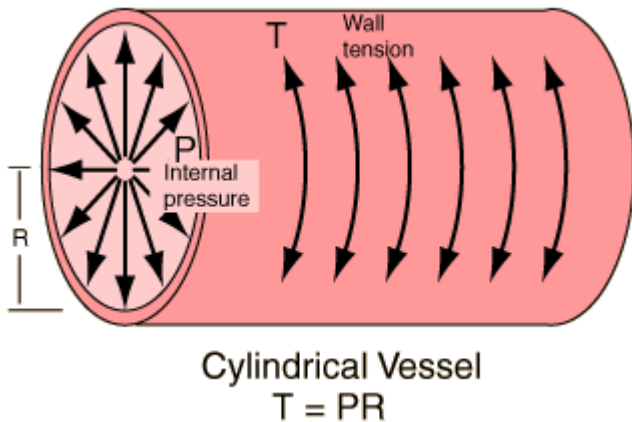


A viszko-elasztikus tag:

$$F(t) = -Dx(t) - \eta v(t) = -Dx(t) - \eta dx(t)/dt$$

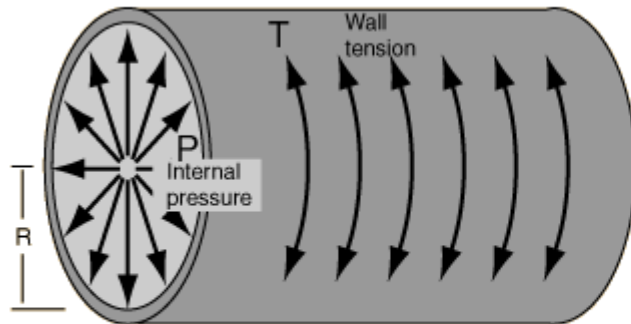
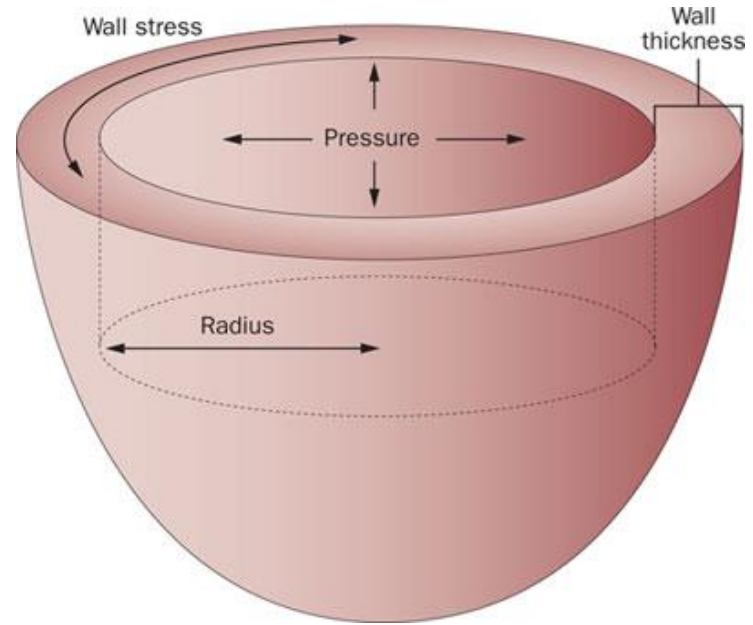
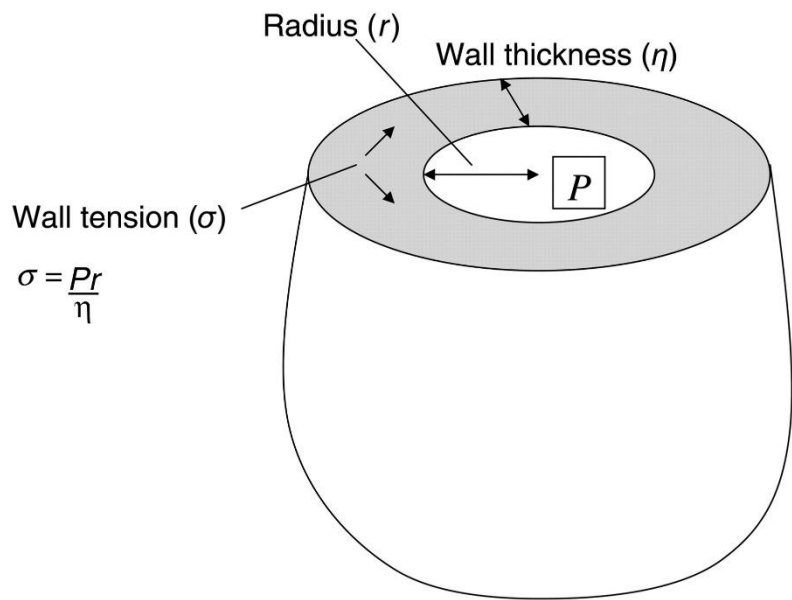
Mi a lényeg: minél nagyobb sebességgel húzódik össze, annál nagyobb csillapítás

# Az üreges szervek nyomás és fal feszülés összefüggései

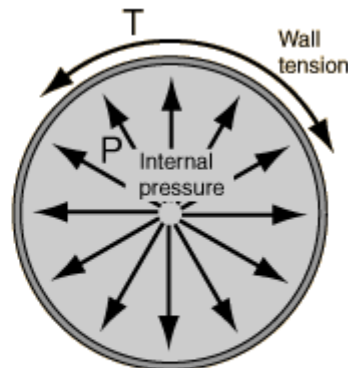


A külső és belső nyomások  
különbsége feszíti a falat  
T=fal feszülés  
P=nyomás  
R= a cső (gömb) sugara

$T = t \times w$  ahol a  $t$  a keresztmetszeti feszülés  
 $w$  a falvastagság  
Laplace törvény!



Cylindrical Vessel  
 $T = PR$



Spherical Vessel  
 $T = \frac{PR}{2}$

A Laplace törvény  
jelentősége

$P$  nő

$W$  csökken

$R$  nő/csökken

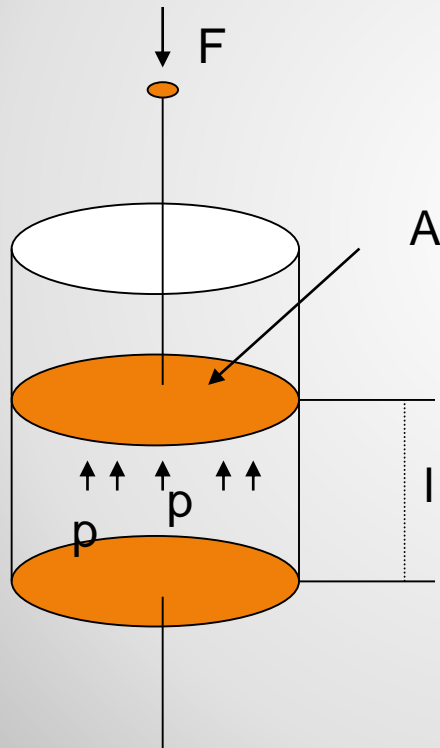
Laplace törvénye az erekre és a gömbszerű üreges szervekre



A kis és nagy nyomású szívfelek  
A falvastagság tükrözi az eltérő feszüléseket



# A szív munkája



$$W = F \cdot s$$

$$F \text{ (nyomóerő)} = A \times p$$

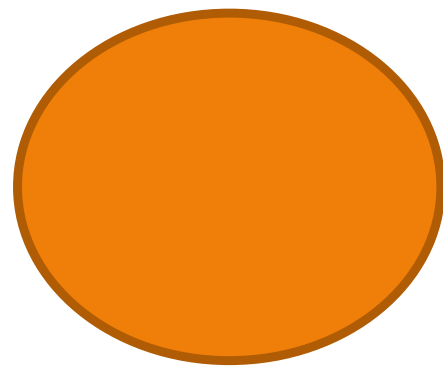
Amennyiben a dugattyút  $s$  úton mozgatjuk, akkor a végzett munka:  
 $W = A \times p \times l$

Ahol:  $(A \times l) = V$  (a kinyomott folyadék térfogata)



P  
(Hgmm)

A szív balkamrája

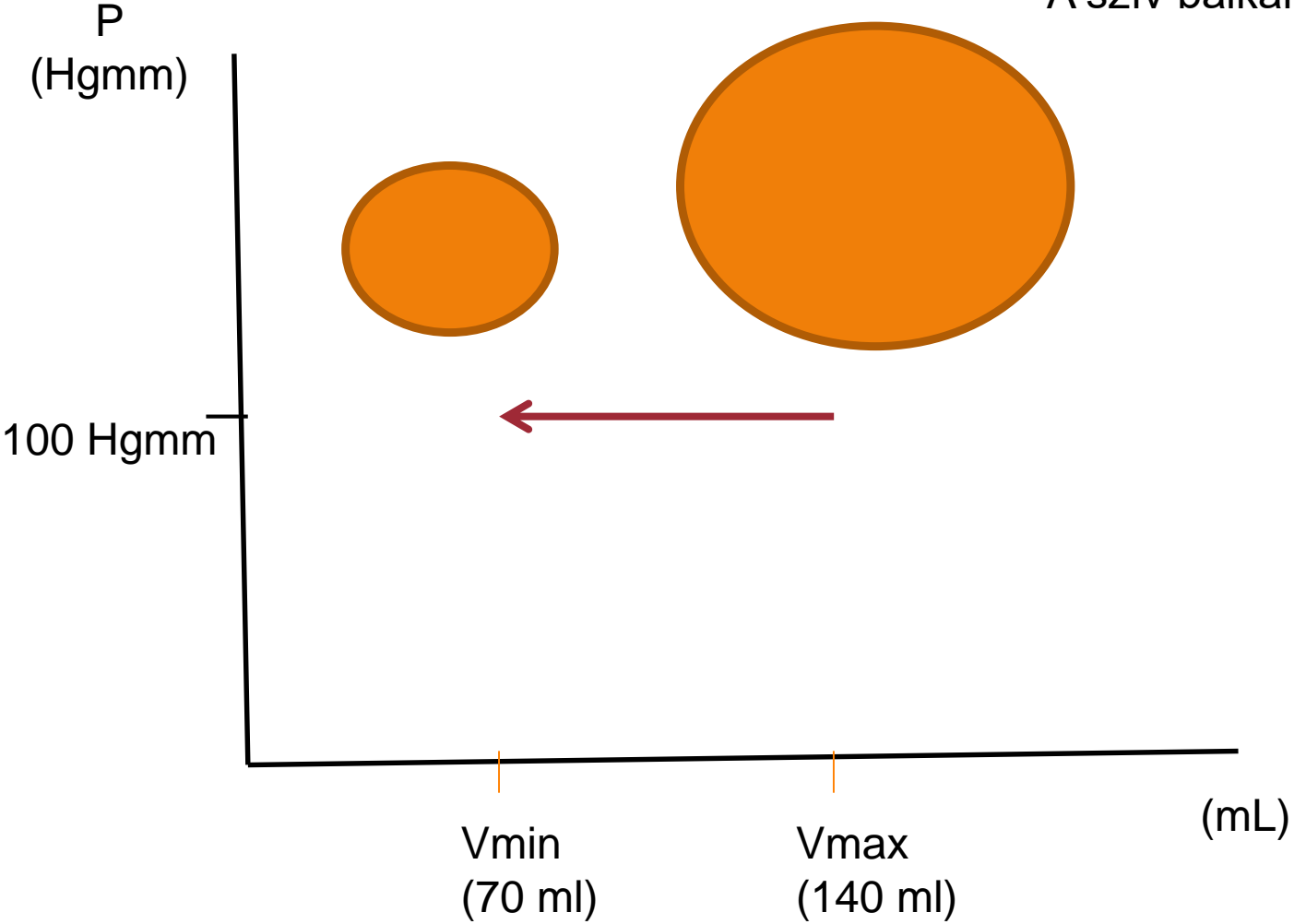


Vmin

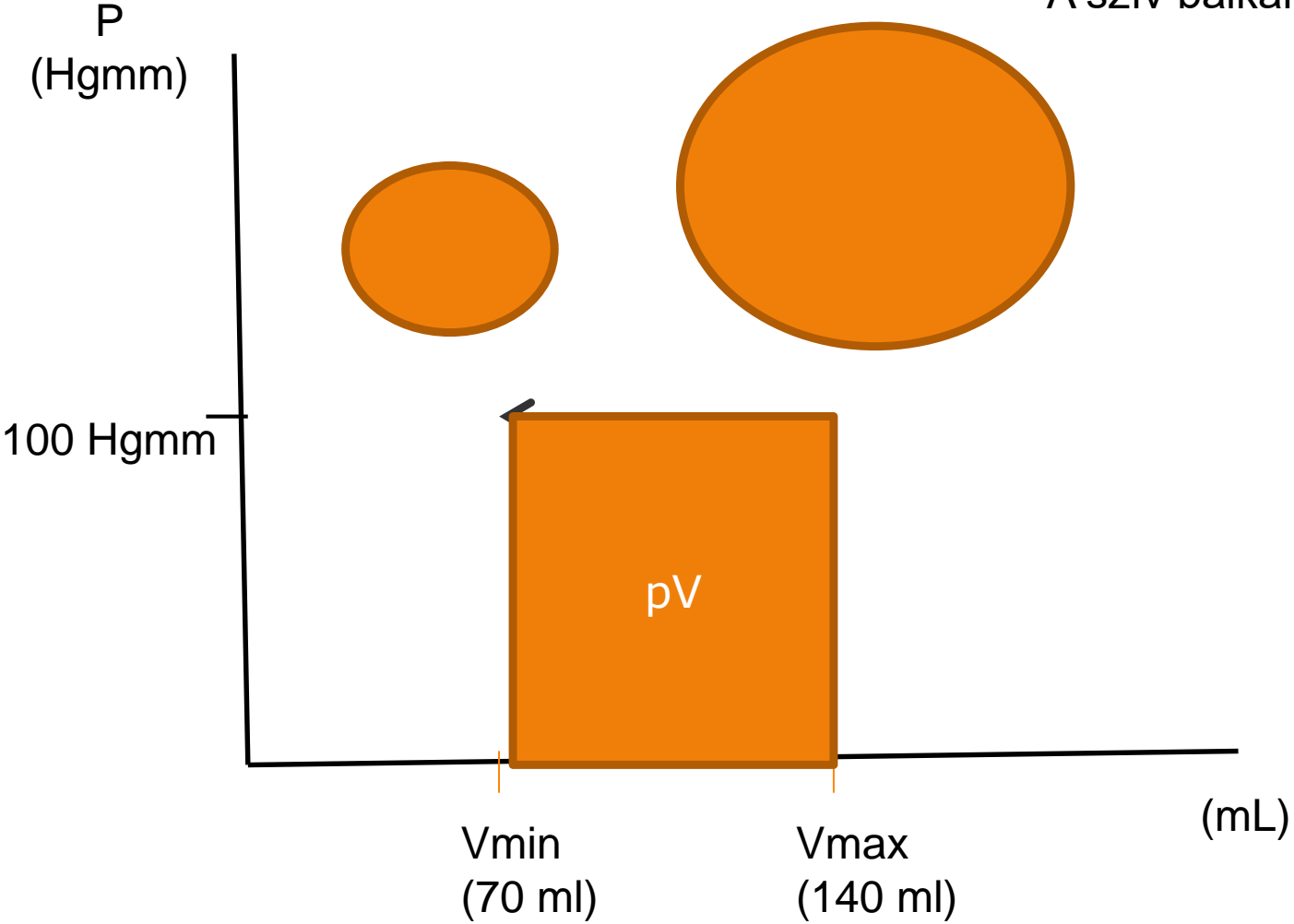
Vmax  
(140 ml)

(mL)

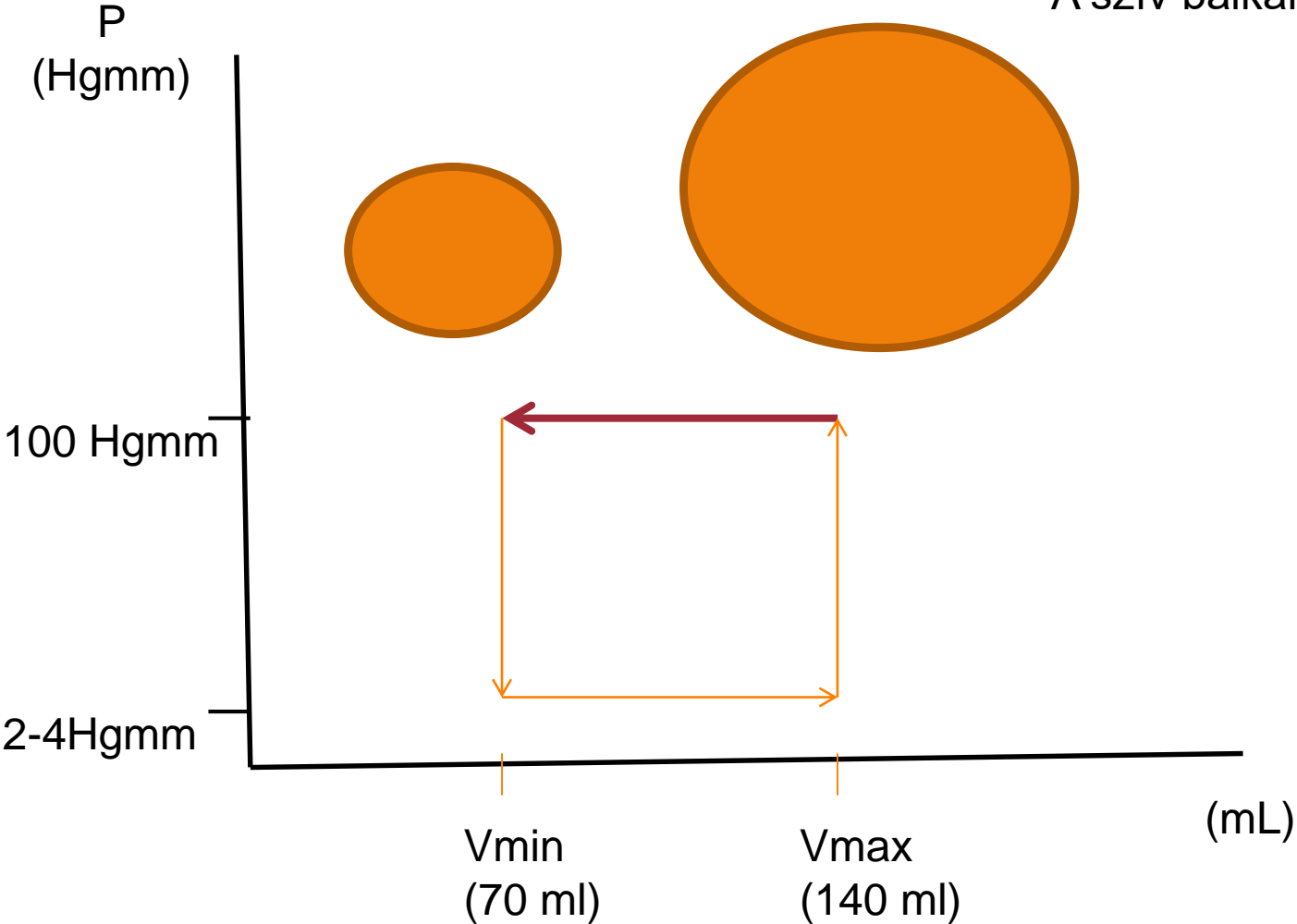
A szív balkamrája



A szív balkamrája



A szív balkamrája



# A szív munka becslése egy szisztole alatt

- $p = \text{const.} \Rightarrow W = p \cdot \Delta V,$

$p_{ao}$  az aortában uralkodó középnyomás

$p_{vp}$  a v. pulmonarisban

Bal kamra

$$p_{ao} = 100 \text{ Hgmm (13.3 kPa)}$$
$$\Delta V = 70 \text{ ml (70} \times 10^{-6} \text{ m}^3)$$

$$W = 0,93 \text{ J}$$

Jobb kamra

$$p_{vp} = 20 \text{ Hgmm (2.7 kPa)}$$
$$\Delta V = 70 \text{ ml}$$

$$W = 0,19 \text{ J}$$

**Összesen:  $W = 1,22 \text{ J}$**

**(Egy nap alatt:  $24 \times 60 \times 72 \times 1,22 \text{ J} = 126,5 \text{ kJ}$ )**

**A kipumpált vér kinetikus energiája**

$$E_{kina} = 0.009 \text{ J} \quad = 0,0018 \text{ J}$$

(mivel  $W_k = 1/2 \cdot \rho \cdot v_m^2 \cdot \Delta V$ ,  $\rho = 1.06 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $v_m = 0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , resp.  $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  in pulmonary artery)

## ***A kipumpált vér kinetikus energiája***

*mivel  $W_k = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot \Delta V \times v_m^2$ .*

*$\rho = 1.06 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $v_m = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$*

*$1,06 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 70 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \times 1 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 1,06 \times 7 \times 10^{-2} = 7,42 \times 10^{-2} \text{ J}$*

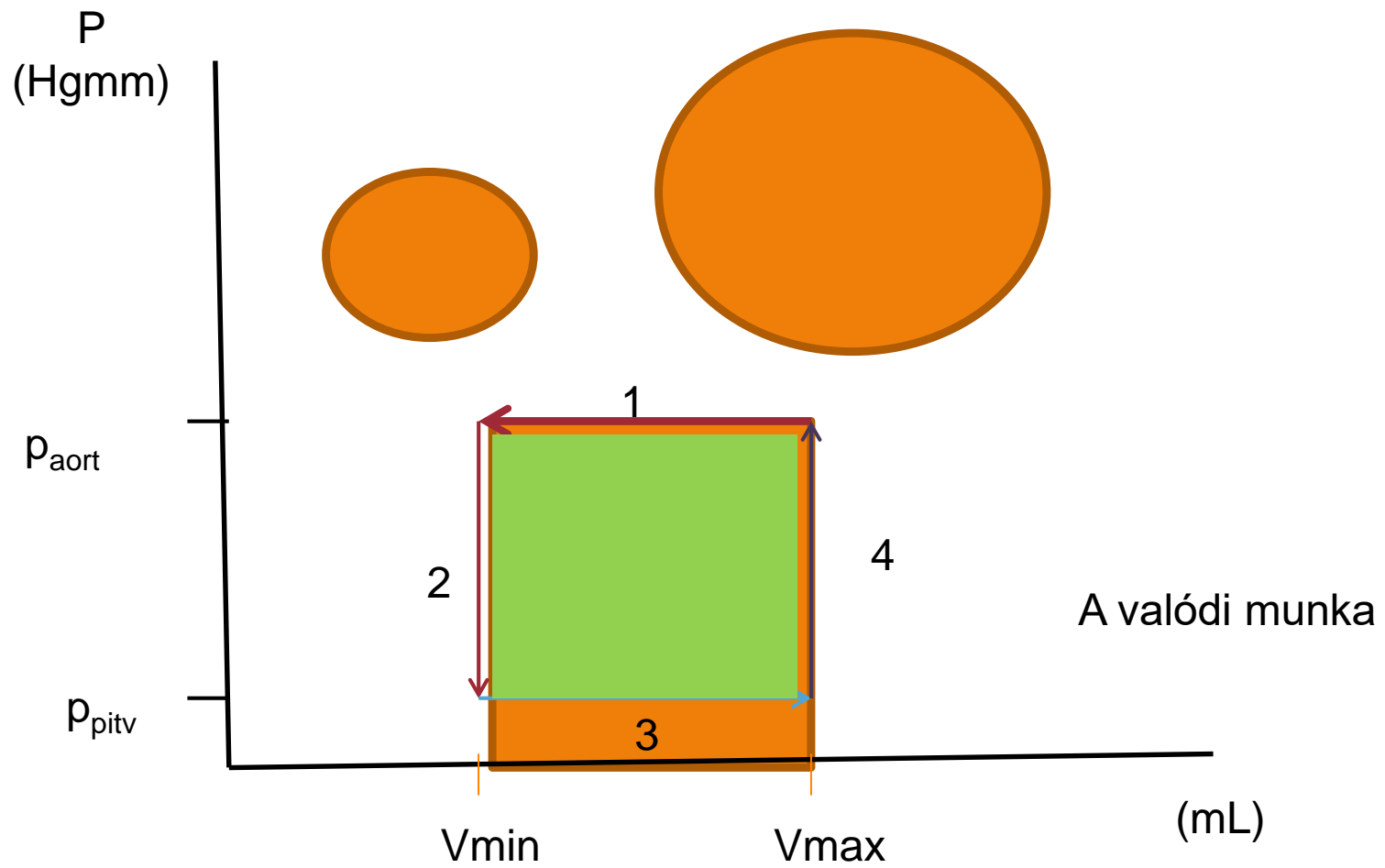
**$E_{k\text{ina}} = 0.075 \text{ J}$**

*És ez ismétlődik naponta  
60x1440 alkalommal*

MI lesz ezzel az energiával ?

A vér mozog, ill. rugalmas energiává alakul a nagyerek falában





Bal kamrai nyomás-térfogat görbe a valóságban

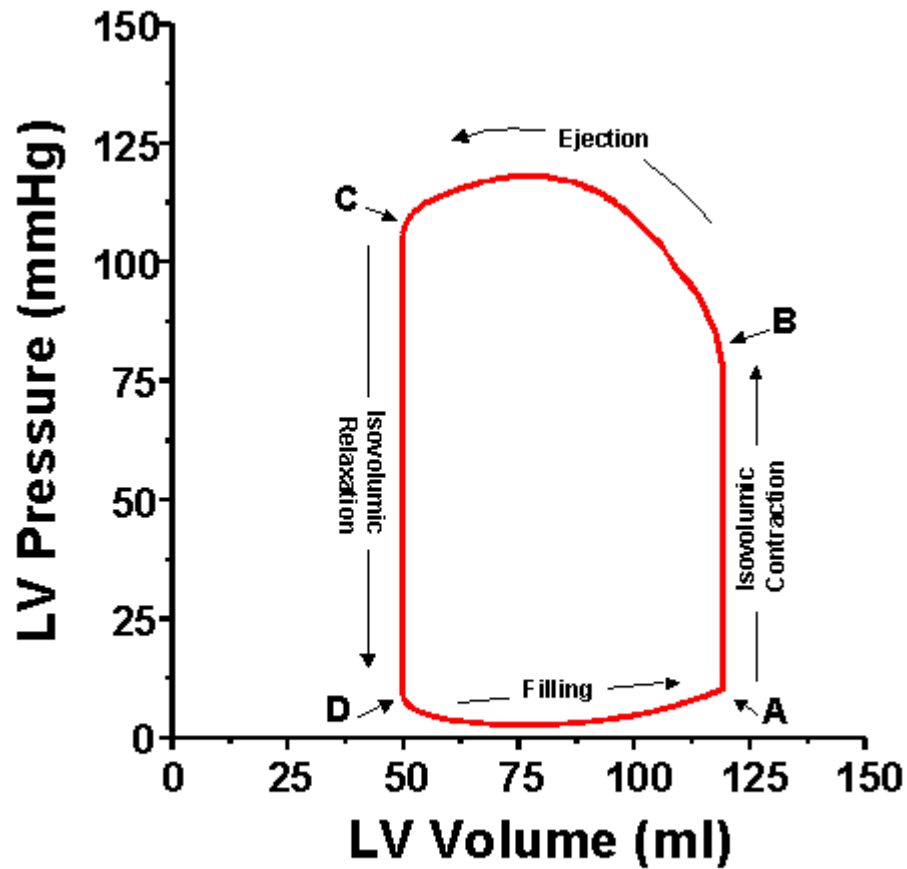


Figure 2

## Bal kamrai nyomás-térfogat görbe a valóságban

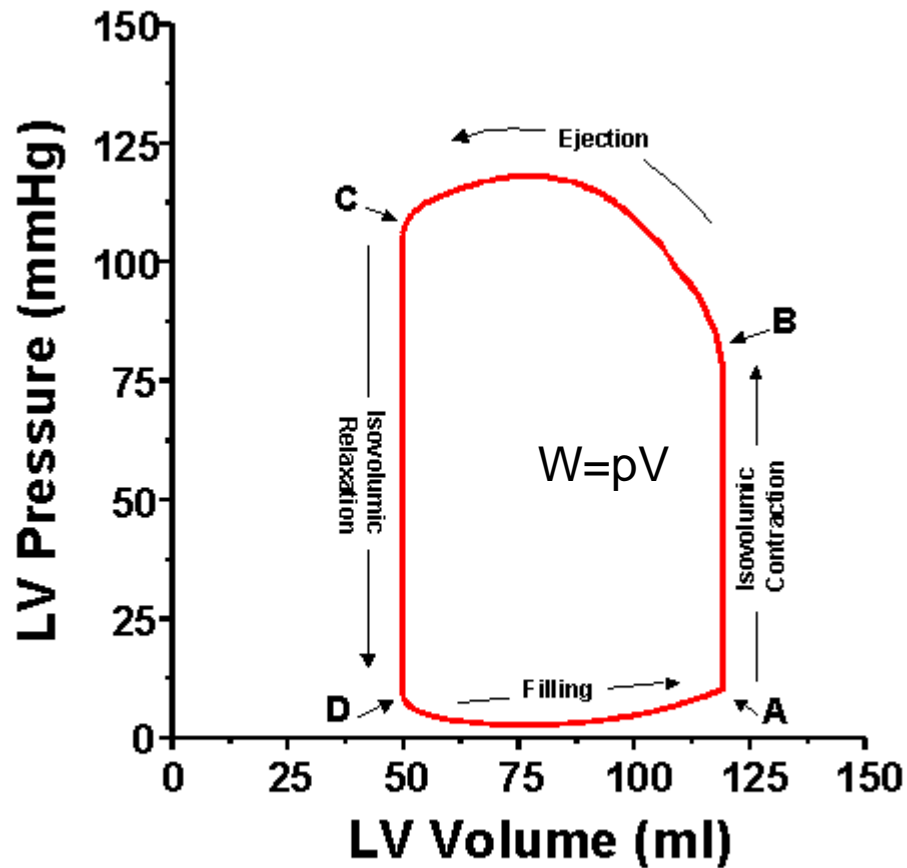


Figure 2