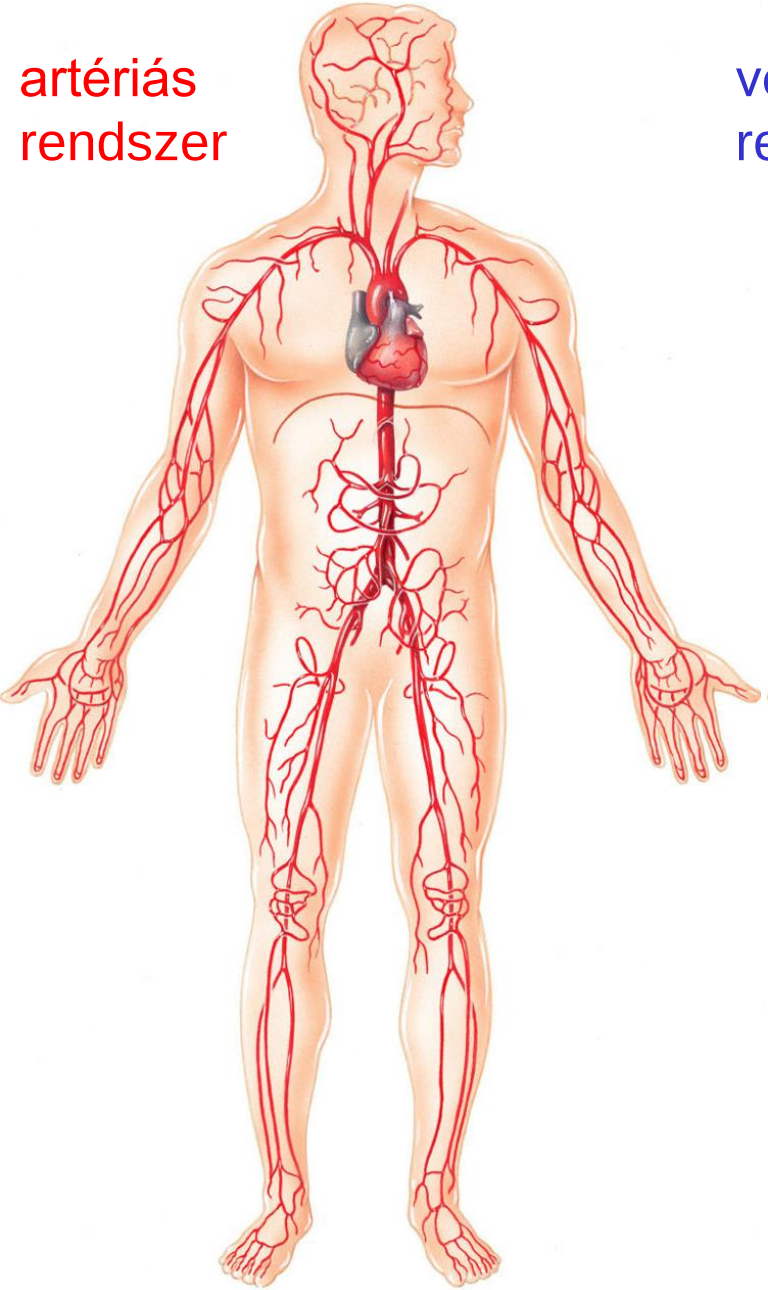
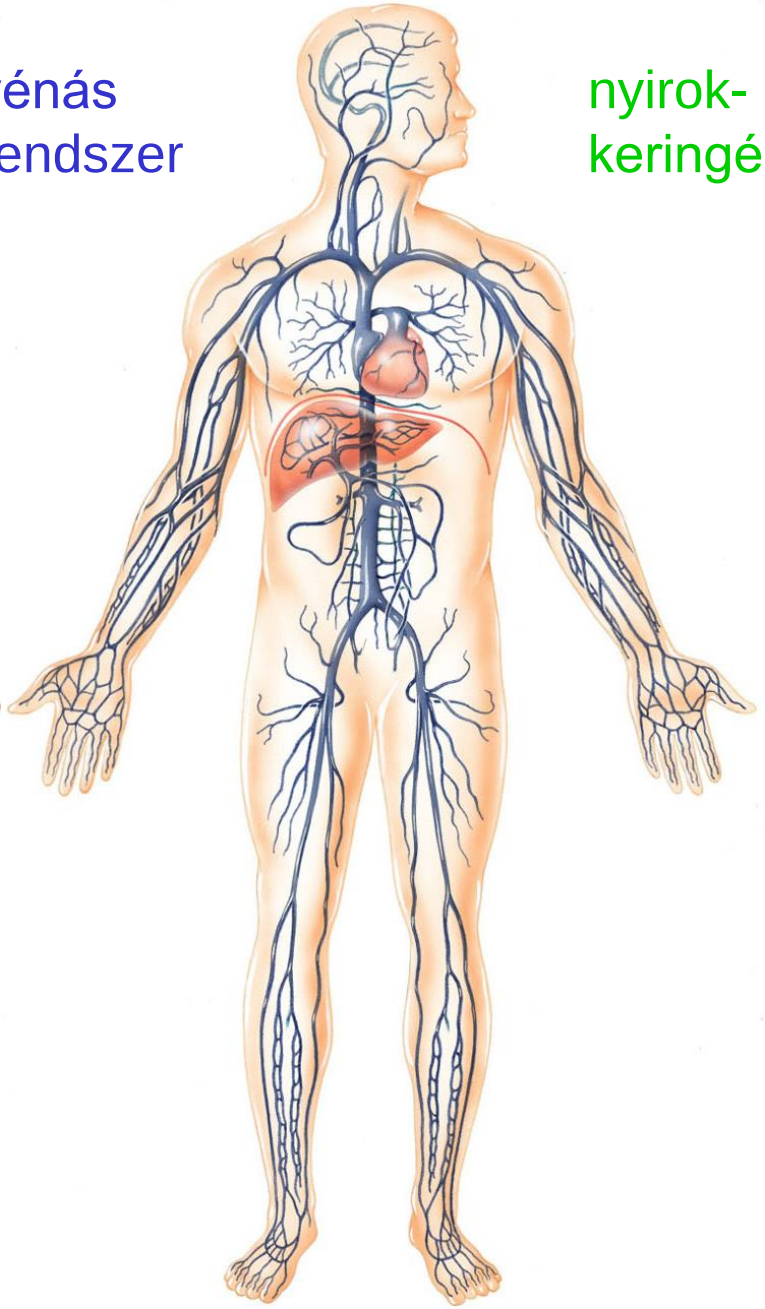
A keringési rendszer jellemzői, az érrendszer szakaszai és működése

Az emberi keringési rendszer áttekintése

artériás rendszer



vénás rendszer



nyirok-keringés

Keringési rendszer, keringésszabályozás

Hemodinamika vizsgálja:

- a vér fizikai jellemzőit,
- a véráramlás fizikai jellemzőit
- a nyomásviszonyokat
- az ellenállásviszonyokat
- az áramlási viszonyokat

Hagen-Poiseuille törvény:

$$R = \frac{8\eta l}{r^4 \pi} \qquad Q = \frac{(p_1 - p_2) r^4 \pi}{8\eta l}$$

R: ellenállás

Q: az áramlás intenzitása

A keringési rendszer fizikai jellemzői

- az érrendszerre "egyszerű" fizikai törvények jellemzőek:

  - a vérnyomás a vénás rendszer felé csökken

perfúziós nyomás: a vérkeringés fenntartása - kamrák szerepe!

- nagy vérkör: P_{aorta}-$P_{jobb\ pitvar}$
- kis vérkör: $P_{a.\ pulmonalis}$-$P_{bal\ pitvar}$

- a különböző erek össz-keresztmetszetén azonos idő alatt azonos vérmennyiségnek kell áthaladnia

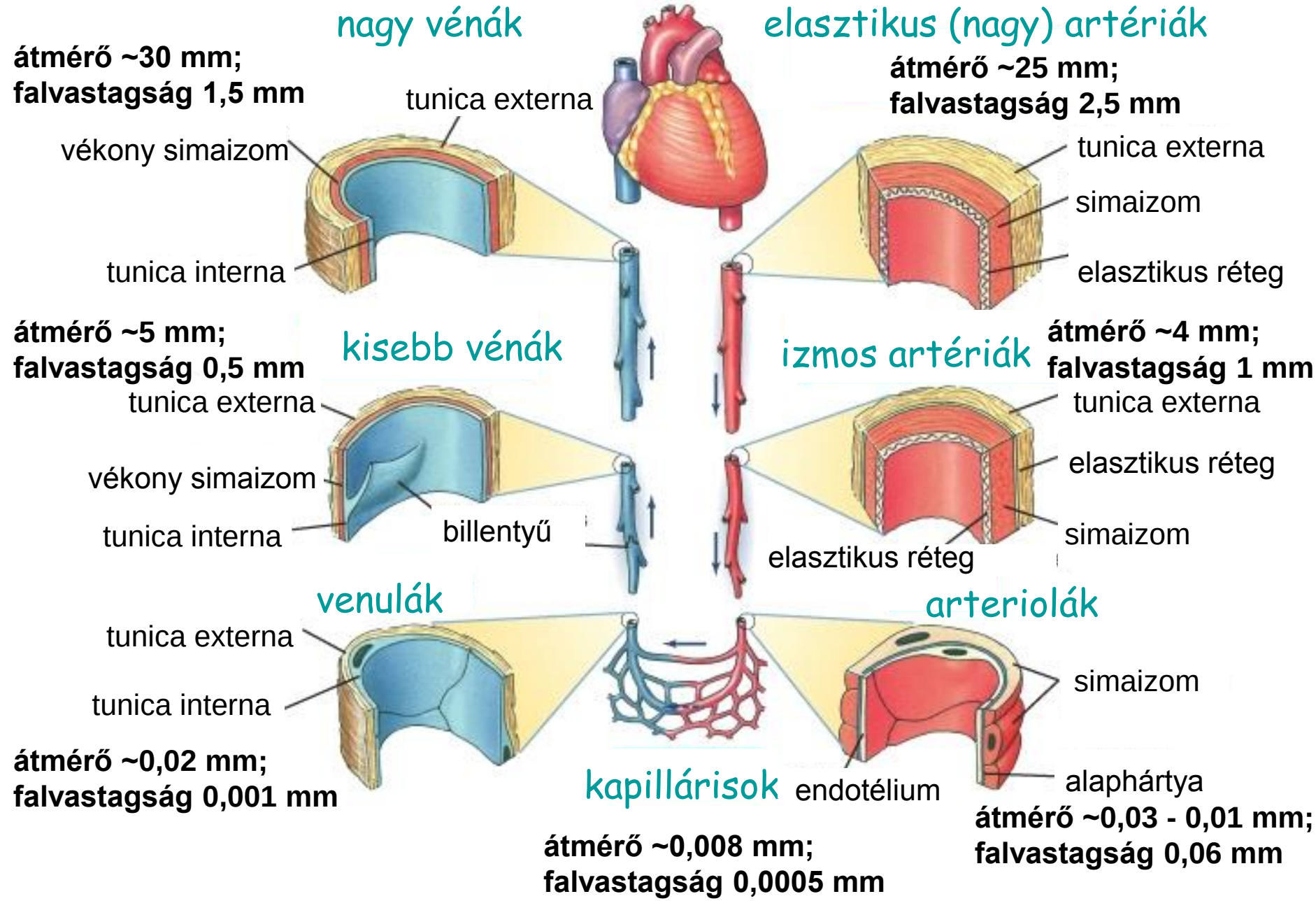
minél nagyobb az össz-keresztmetszet, annál lassabb az áramlás sebessége

A keringési rendszer fizikai jellemzői

- az érrendszerre "egyszerű" fizikai törvények jellemzőek:
  - kapillárisok: legvékonyabb erek, de nagyon nagy a mennyiségük (összkeresztmetszet itt a legnagyobb)
    - lassú áramlási sebesség
    - tápanyagok, gázok, salakanyagok kicserélődéséhez elegendő idő

- az érrendszer mégsem "ideális" csőrendszer:
    - viszkozitás - hematokrit
    - turbulens és lamináris áramlás
    - arteriolák nagy ellenállása
    - rugalmas érfal

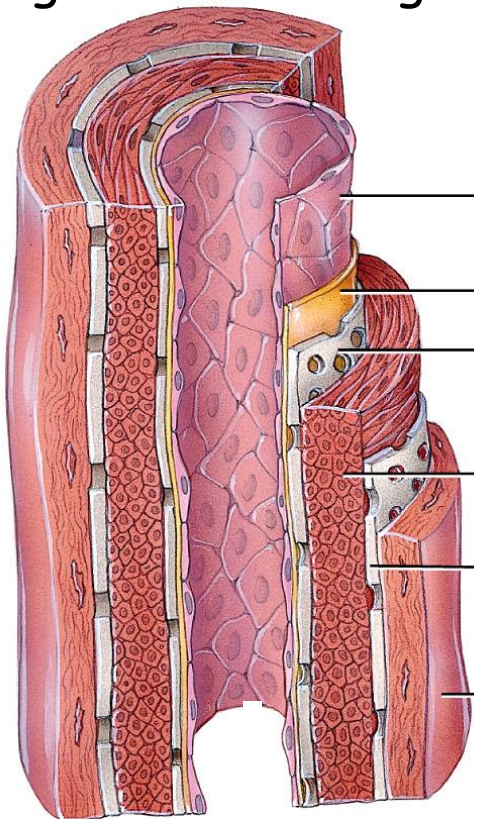
Az érrendszer felépítése



Az egyes értípusok jellemzői

- érfal: 3 réteg
  - belső réteg (tunica interna v. intima)
    - endotél sejt (hámszövet), alaphártya
  - középső réteg (tunica media)
    - simaizom: keresztmetszet szabályozása
  - külső réteg (tunica externa v. adventitia)
    - rugalmas és kollagén rostok (kötőszövet); idegek

artéria



tunica interna

endotélium

alaphártya

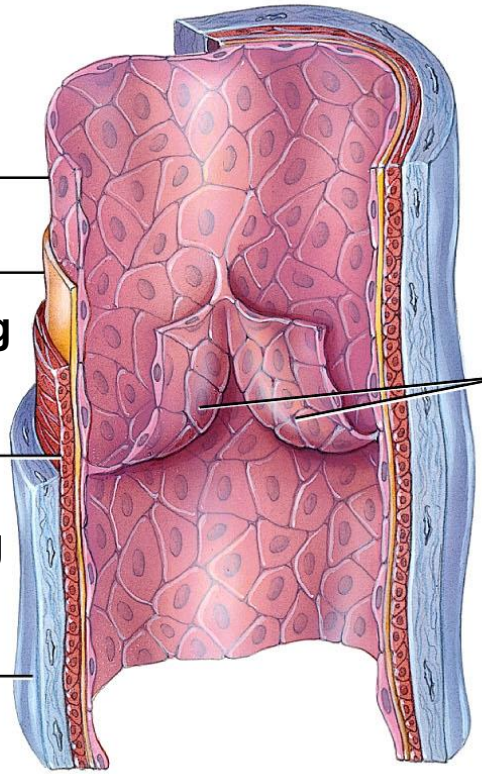
elasztikus réteg

tunica media

simaizom

elasztikus réteg

tunica externa



véna

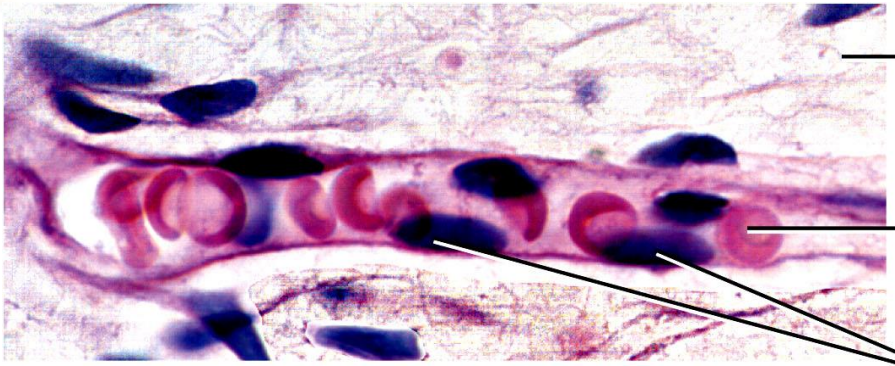
billentyű

- rugalmas rétegek
- vastag simaizom

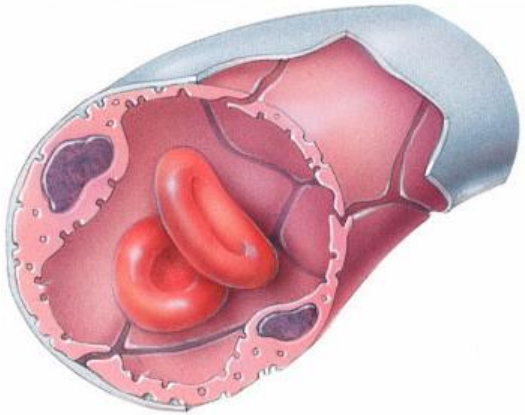
- billentyűk
- tágulékony

Az egyes értípusok jellemzői

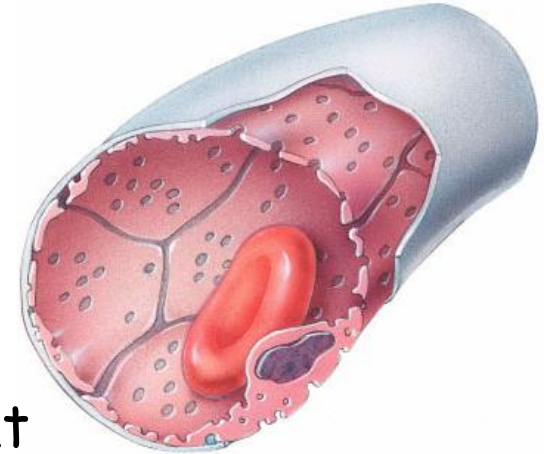
- kapillárisok
  - vékony keresztmetszet (5-10 μm) - vörösvértest "éppen" átfér
  - alaphártya + endotél sejt 1 rétegben
  - szöveti sejtektől max. néhány sejtnyi távolságra futnak
  - anyagcsere, gázellátás



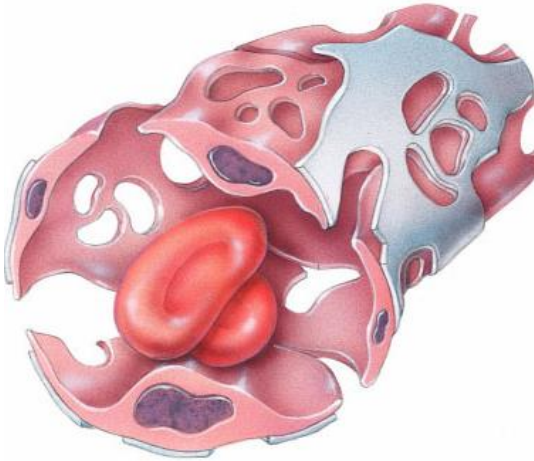
A kapillárisok típusai



1. folyamatos
   - folyamatos alaphártya, egymás melletti sejtek szorosan kapcsoltak
   - szabályozható permeabilitás: víz és kis molekulák (ultrafiltráció)
   - leggyakoribb: izom-, idegszövet, tüdő, kötőszövet

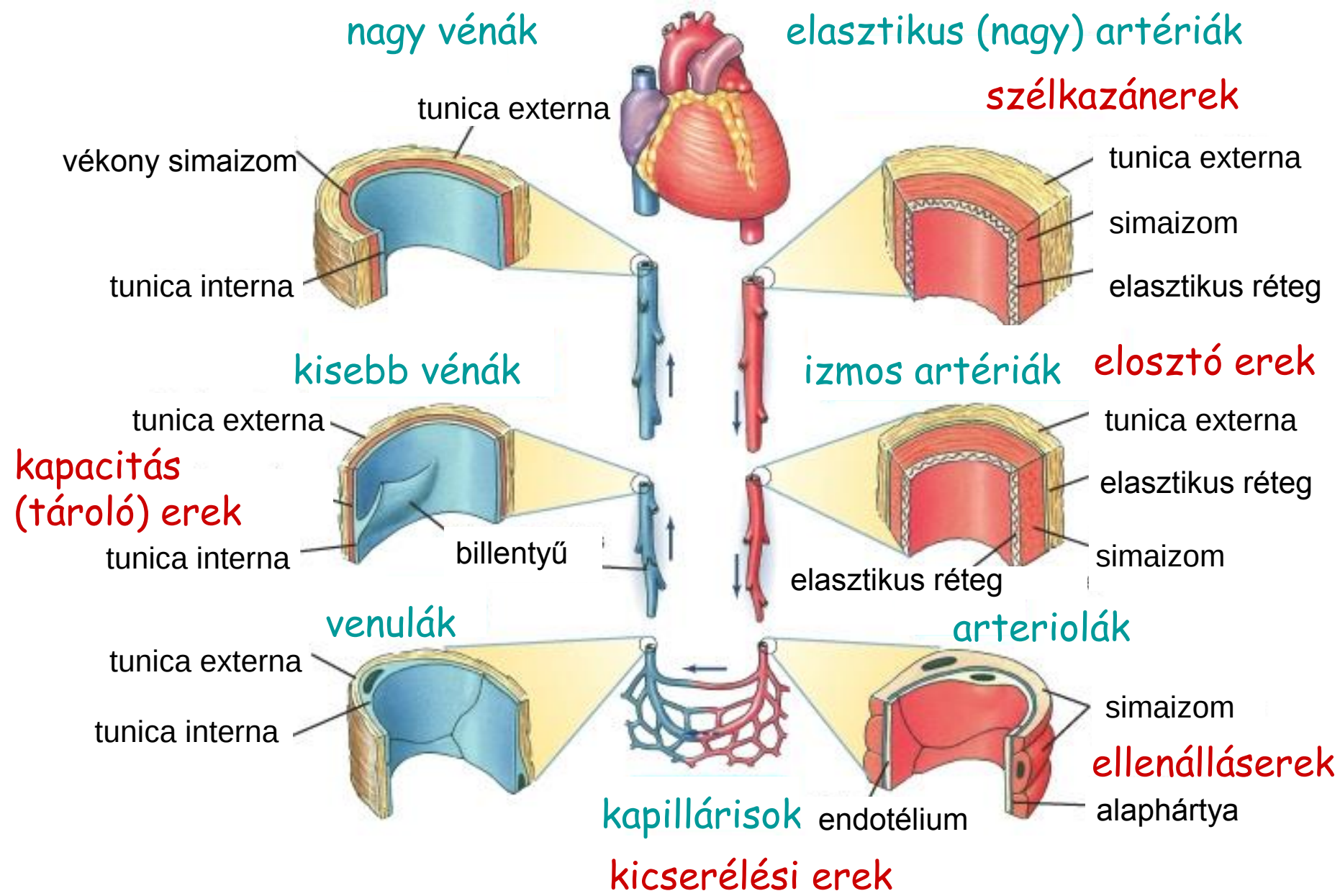


2. fenesztrált (ablakos)
   - a sejteken 50-60 nm "ablakok", folyamatos alaphártya
   - fehérjéken és vvt-n kívül gyak. minden átjuthat
   - gyomor-bél, mirigyek, vese; agyban a cirkumventrikuláris szervek

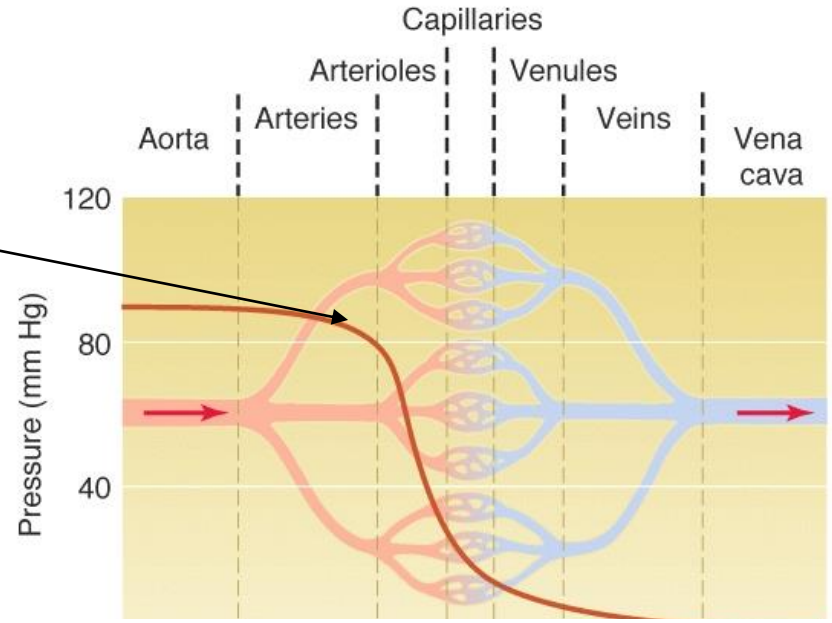


3. szinuszoid
   - alaphártya szaggatott, sejteken nagy nyílások
   - szabad anyagáramlás
   - máj, csontvelő, lép (vérsejtképzés)

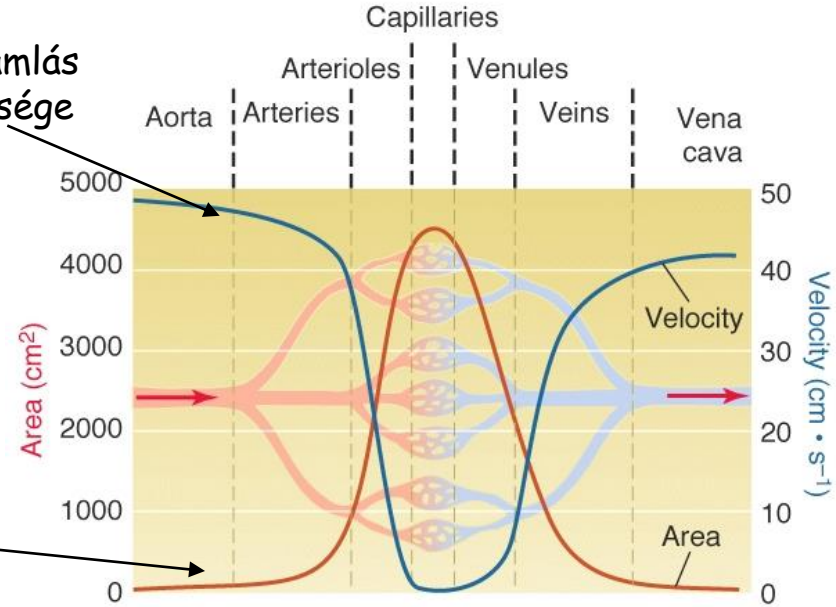
A nagy vérkör szakaszai



A keringési rendszer általános jellemzői



vérnyomás

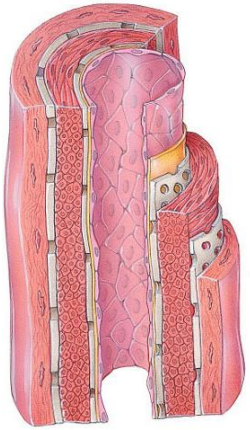


véráramlás sebessége

össz-keresztmetszet

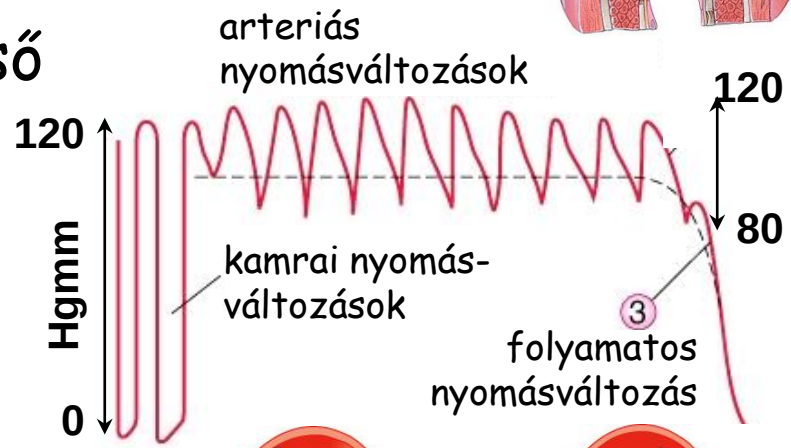
A keringési rendszer szakaszai

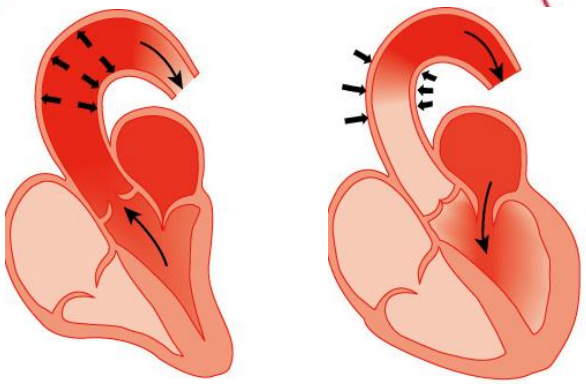
1. a magas nyomású érszakasz (80-120 Hgmm) – az arteriás rendszer



- aorta és a nagyobb, rugalmas és izmos, vékonyabb arteriák
  - vastag, elasztikus réteget és simaizmot is tartalmaznak

- belső nyomás nagy mértékben, szélső értékek között ingadozik: 80 - 120 Hgmm
  - "szélkazán" funkció: mérsékeli a nyomásváltozások amplitúdóját, folyamatos kimeneti áramlás
  - viszonylag nagy térfogat, rugalmas fal, szűk kimenet - kis nyomásváltozással folyamatos áramlás biztosítása

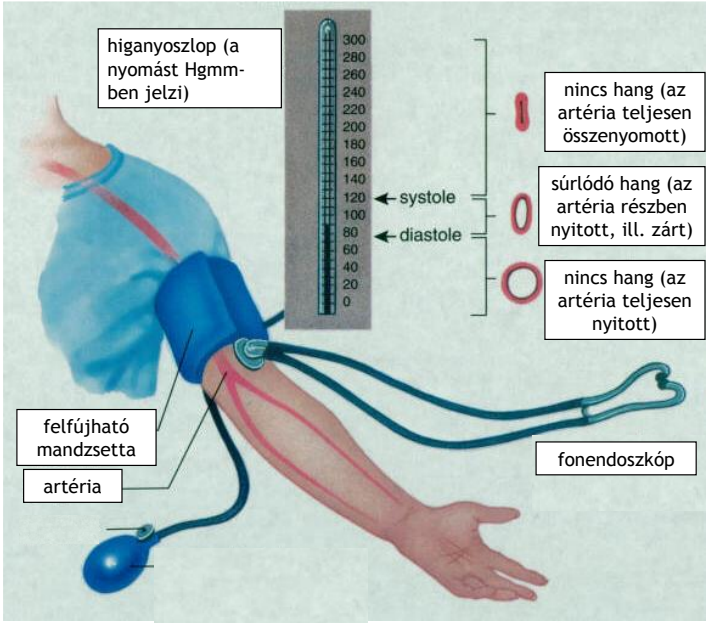


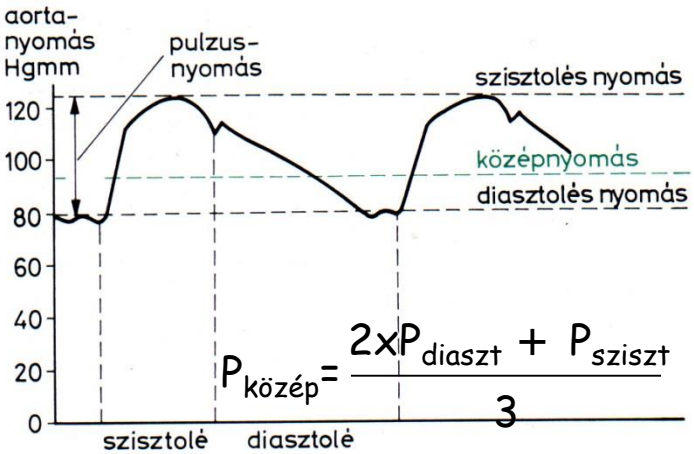


A keringési rendszer szakaszai

1. a magas nyomású érszakasz (80-120 Hgmm) – az artériás rendszer

- vérnyomásmérés: a. brachialis-ban a kamrai szisztóle és diasztóle alatt mérhető nyomás
  - pulzusnyomás: a pulzustérfogattól és a tágulékonyságtól függ
  - artériás középnyomás: az artériás vértérfogattól, az aorta/artéria falának rugalmasságától és az arteriolák kersztmetszetétől függ
- idős korban érfal rugalmassága csökken - szisztólés nyomás nő





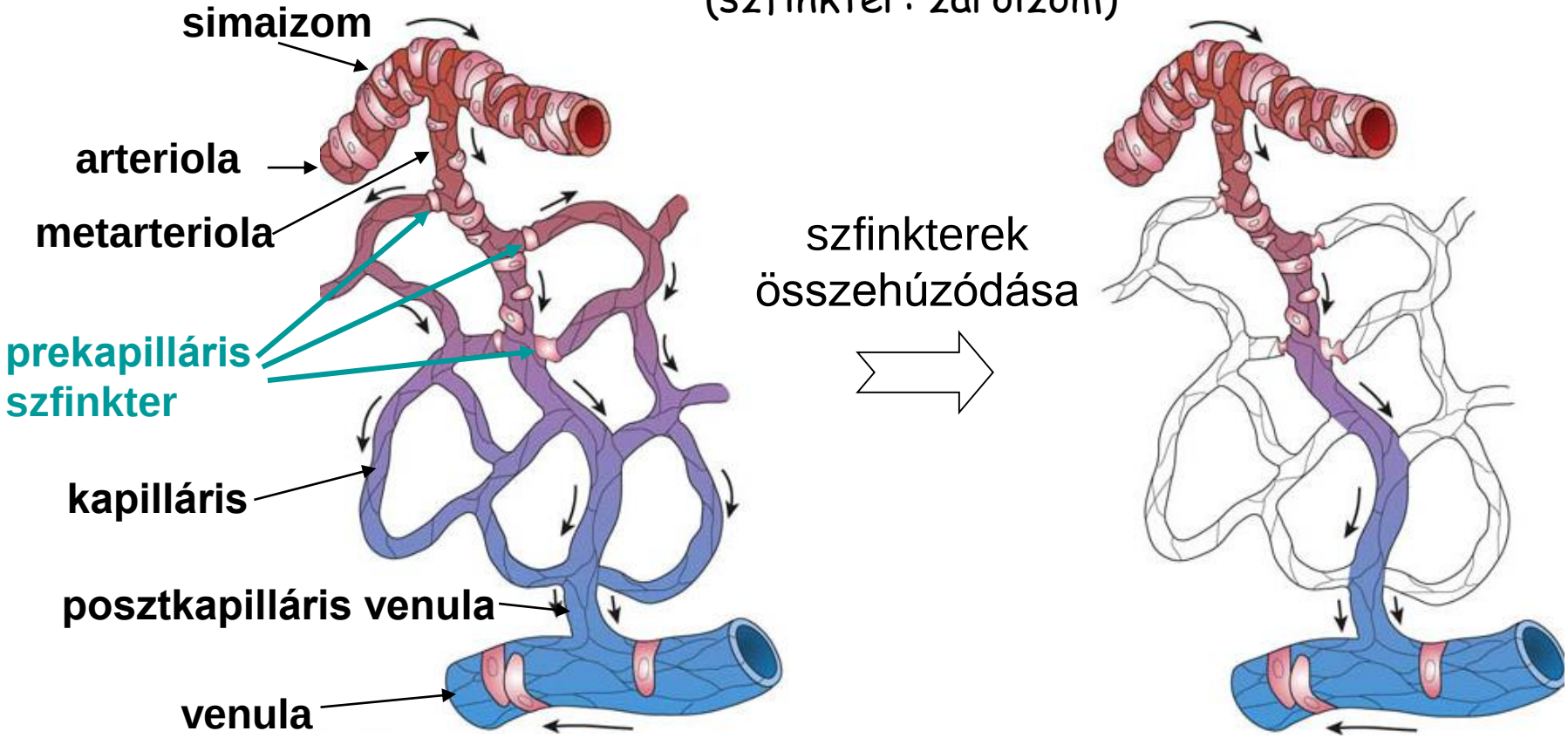
$$P_{közép} = \frac{2 \times P_{diaszt} + P_{sziszt}}{3}$$

A keringési rendszer szakaszai

2. prekapilláris rezisztanciaerek (100-40 Hgmm)

- kis artériák + arteriolák + prekapilláris szfinkterek

(szfinkter: záróizom)



- a nagy vérkör perifériás ellenállásának, a nyomás- és áramlásviszonyok beállításának nagy része itt zajlik

A keringési rendszer szakaszai

2. prekapilláris rezisztanciaerek (100-40 Hgmm)

- az érkeresztmetszet kis változása már jelentős változásokat okoz - mechanikai, kémiai és idegi tényezők hatékony szabályozó szerepe

<u>ha tágulnak:</u>

- a magas nyomású érszakaszon az artériás nyomás csökken;
- véráramlás sebessége nő;
- kapillárisokban vérnyomás nő

<u>ha szűkülnek:</u>

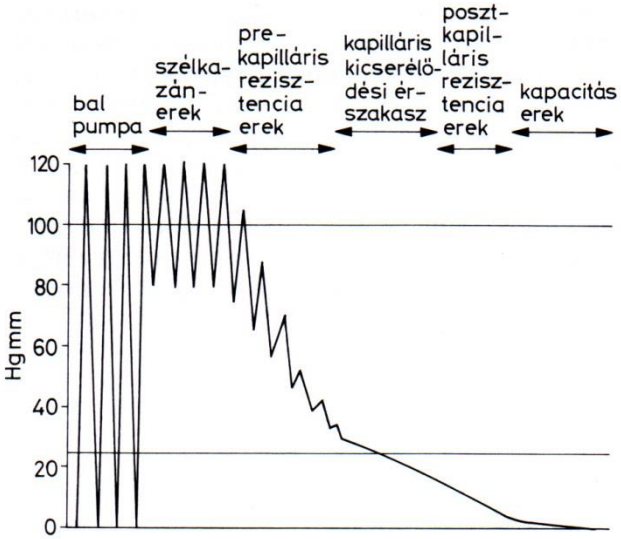
- artériás nyomás nő
- átáramlás sebessége csökken;
- a kapilláris nyomás csökken

- arteriolák kezdete és vége között nagy nyomásesés

A keringési rendszer szakaszai

3. az alacsony nyomású érszakasz (<20 Hgmm)

- az artériák pulzáló áramlása és nyomás ingadozása a kapillárisok elejére megszűnik - folyamatos áramlás
- kapillárisok, teljes vénás rendszer, jobb szívfél, tüdőkeringés, bal pitvar (bal kamra nem!)
- kapillárisok: kicserélődési szakasz
- venulák, vénák: kapacitás (tároló) erek, térfogati rezervoárok (össz-vérmennyiség 55-65%-a)



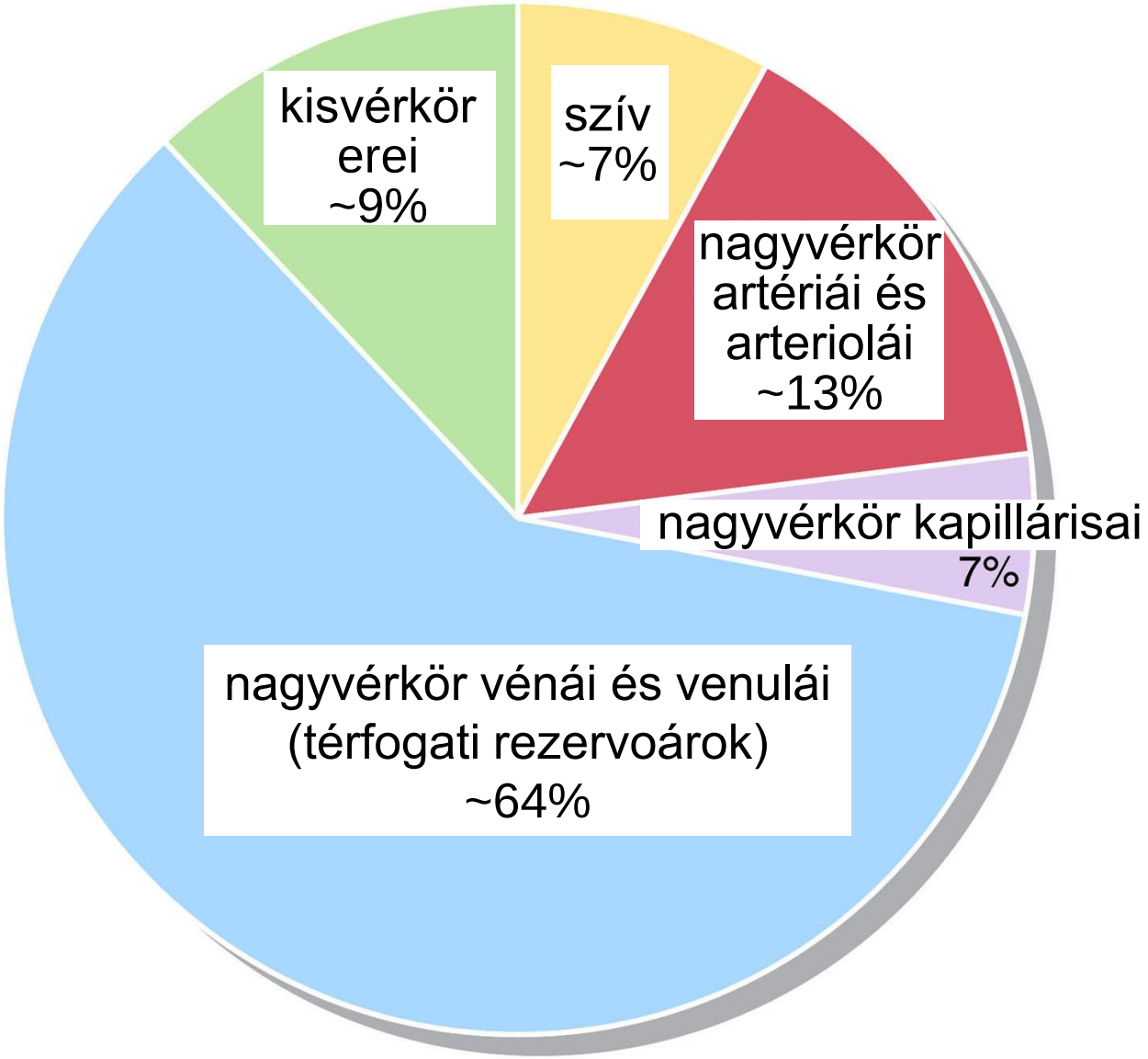
9–5. ábra
A nyomás változásai a nagy vérkör ereiben az aortától a nagy vénákig

4. bal kamra (8-120 Hgmm)

A kis és a nagy vérkörre jellemző értékek

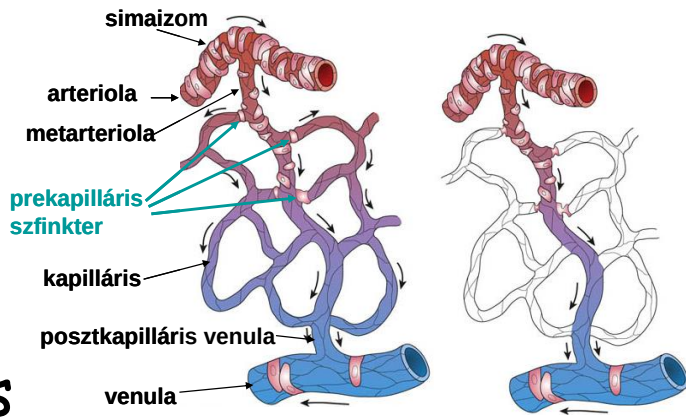
[Hgmm]	nagy vérkör	kis vérkör
perctérfogat	5-5,5 l	5-5,5 l
kamrai diasztólés nyomás	>5	1-2
kamrai szisztólés nyomás	120	24
artériás szisztólés nyomás	120	24
artériás diasztólés nyomás	80	9
pulzusnyomás	40	13
artériás középnyomás	93	14
perfúziós nyomás	91	6
vérmennyiség eloszlása	~73%	~27%

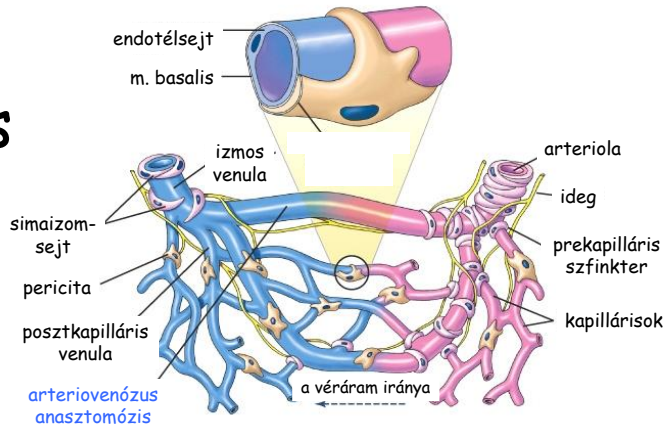
A vérmennyiség átlagos megoszlása



A kapilláris keringés

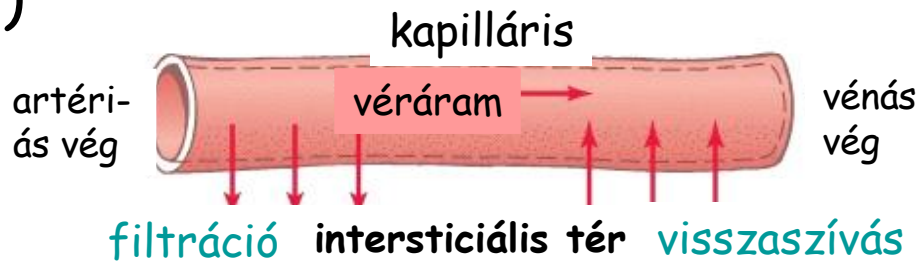
- áramlás, nyomásviszonyok szabályozása: prekapilláris szfinkter
  - kapilláris hely és funkció-függő zárása/nyitása
- 1 mm hossz, 3-10 μm átmérő; növekedés igény-függő
- arterio-venózus anasztomózis v. átkötés (bőr, bőr alatti kötőszövet)
- ellátási (anyagcsere) és nem-ellátási (pl. hőszabályozás) keringés
- anyagkicserélés: kapillárisok és posztkapilláris venulák
- ált. lassú átáramlás (0,5-1 mm/sec; vörösvértest átl. 1 sec-t tölt a kapillárisban), szöveti sejtek max. 3-4 sejtnyi távolságra





Anyagtranszport a kapillárisokban

- anyagok átjutása:
  - gázok: diffúzió
  - lipid-oldékony anyagok: érfalon keresztül diffúzió
  - vízoldékony anyagok: endotél sejtek típusától függően
- kapillárisfal fehérjére ált. nem permeábilis – ultrafiltráció (csak víz és kis molekula jut át)
  - a nyomásviszonyok miatti filtráció sokkal hatékonyabb, mint a diffúzió!



  - artériás végen átszűrődés (filtráció) a szövet közötti térbe
  - vénás végen visszaszívódás a szövet közötti térből
- a folyadékáramlás irányát a kapillárisokon belüli és kívüli hidrosztatikai (vérnyomás) és kolloidozmotikus (vérplazma fehérjék) nyomáskülönbség befolyásolja

A kapilláris filtráció

a vér kolloidozmotikus nyomása (P_{ozm}): ozmotikus nyomáskülönbség a vérplazma és a szövet közötti folyadék között (fehérjék)

a vér hidrosztatikai nyomása (P_{kap}): vérnyomáskülönbség az erek belseje és a szövet közötti tér között

} a kettő viszonya szabja meg az effektív filtrációs nyomást

- <u>Starling-féle filtrációs mechanizmus</u>

  - a vérplazmában a fehérjék konc-ja nagyobb, mint az intersticiális folyadékban -> nagyobb a P_{ozm} is!

    - vér kolloid ozmotikus nyomása (BCOP): 26 Hgmm ("vizet vonz a kapillárisba")
    - szövet közötti tér ozmotikus nyomása (IFOP): 1 Hgmm ("vizet vesz ki a kapillárisból")

  - az artériás és a vénás végek között a P_{ozm} nem változik sem a kapilláris hosszában, sem a szövet közötti térben

A kapilláris filtráció

a vér kolloidozmotikus nyomása (P_{ozm}): ozmotikus nyomáskülönbség a vérplazma és a szövet közötti folyadék között (fehérjék)

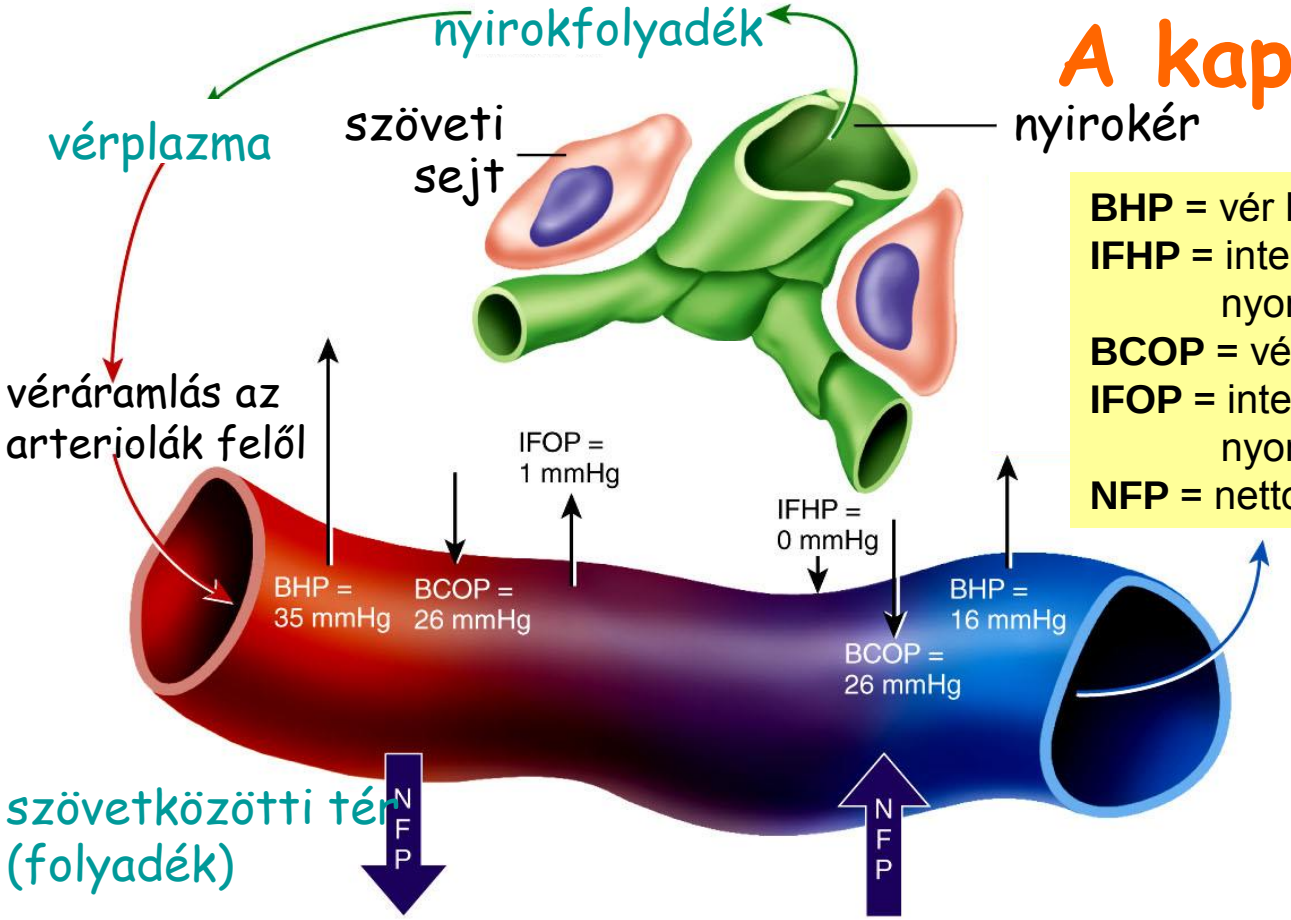
a vér hidrosztatikai nyomása (P_{kap}): vérnyomáskülönbség az erek belseje és a szövet közötti tér között

} a kettő viszonya szabja meg az effektív filtrációs nyomást

- <u>Starling-féle filtrációs mechanizmus</u>
  - a kapillárison belül a vérnyomás (hidrosztatikai nyomás) az artériás és vénás vég között csökken
    - artériás kapilláris vérnyomás (BHP): 35 Hgmm
    - vénás kapilláris vérnyomás (BHP): 16 Hgmm
  - a szövet közötti tér hidrosztatikai nyomása állandó
    - IFHP: ~0 Hgmm

az effektív filtrációs nyomás az átszűrődés és a folyadék-visszaszívás arányát határozza meg

A kapilláris filtráció



BHP = vér hidrosztatikai nyomása
IFHP = intersticiális folyadék hidrosztatikai nyomása
BCOP = vér kolloid ozmotikus nyomása
IFOP = intersticiális folyadék ozmotikus nyomása
NFP = netto filtrációs nyomás

- a vissza nem szívott folyadékot a nyirokrendszer szállítja el

NFP = (BHP+IFOP) - (BCOP+IFHP)

<u>artériás vég</u>

NFP = (35 + 1) - (26 + 0)
NFP = 10 Hgmm

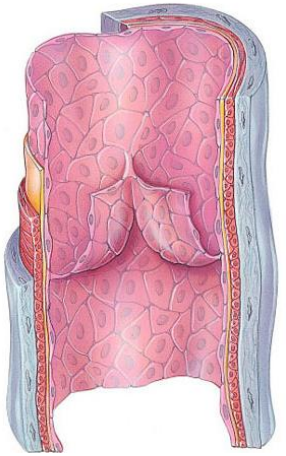
netto filtráció

<u>vénás vég</u>

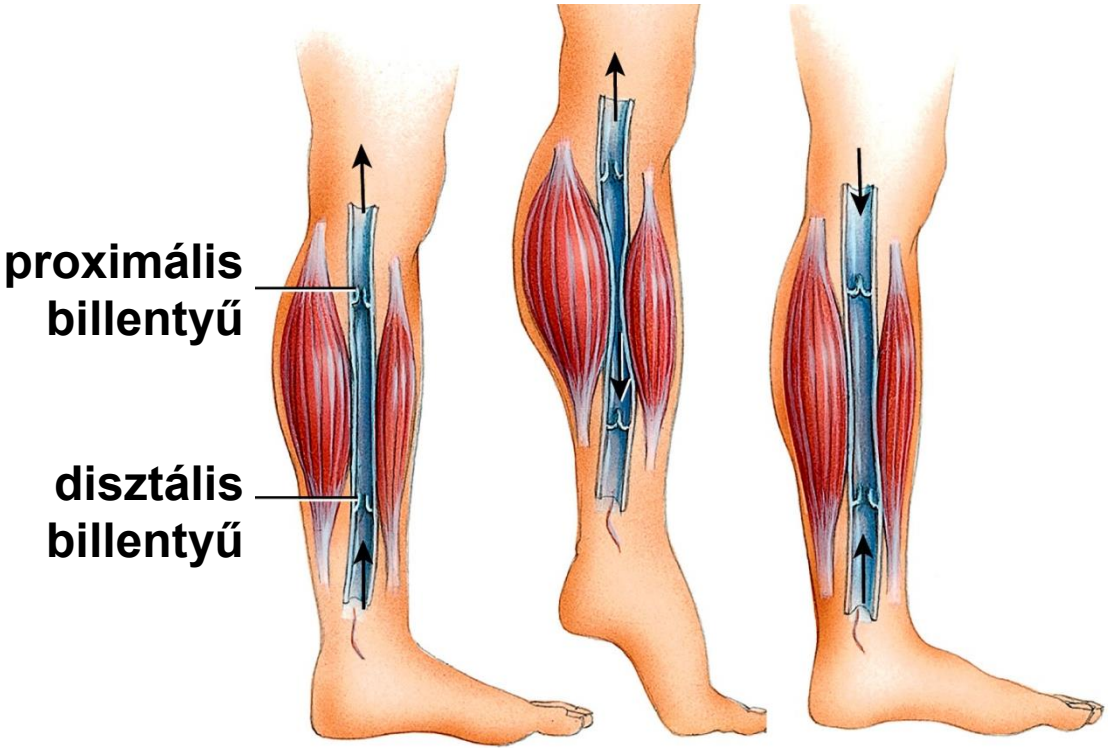
NFP = (16 + 1) - (26 + 0)
NFP = -9 Hgmm

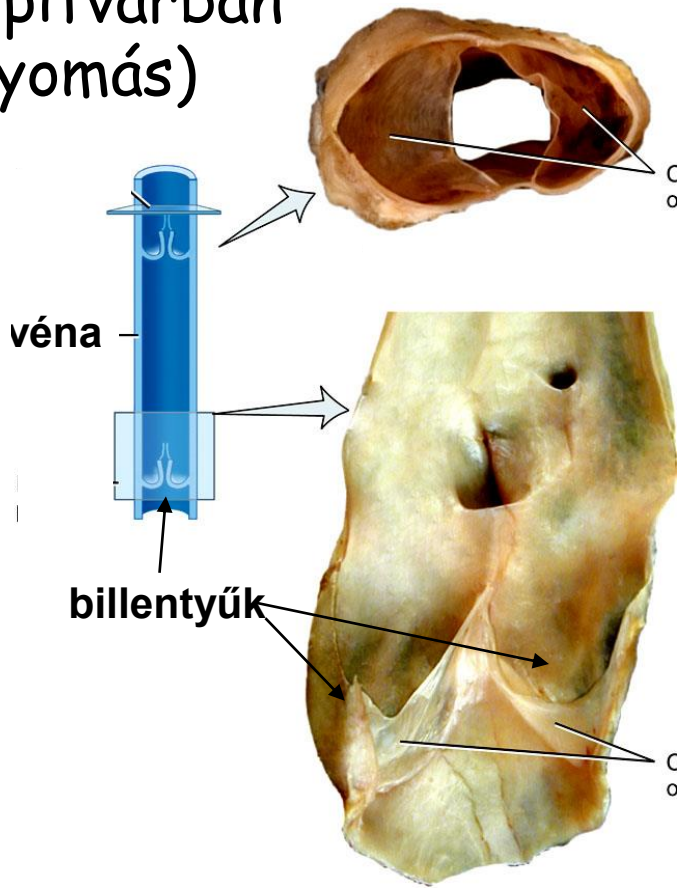
netto reabszorpció

A vénás rendszer



- vékony fal, nagy tágulékonyság - kapacitáserek
- billentyűk - véráramlás segítése, izompumpa
- sok "átkötés" (anasztomózis) a mély és a felületi vénák között (visszér: kitágult vénák)
- alacsony nyomás (max. 11 Hgmm) - jobb pitvarban nyugalomban 0 Hgmm (centrális vénás nyomás)





A vénás rendszer

mi szabja meg a vénás vérnyomást?

1. keringési tényezők:
   - kapillárisnyomás (vénákba jutó vér mennyisége, beáramló vér nyomása)
   - jobb szívfél, kis vérkör működése ("kimeneti" vérnyomás, vénákból kiáramló vér mennyisége)
   - saját simaizomsejtek tónusa (nagyobb vénák szimpatikus beidegzése: keresztmetszet-csökkenés)
   - külső nyomás (pl. szoros harisnya, zokni)
2. keringésen kívüli tényezők:
   - légzési hatás (hasüregi és mellüregi nyomásváltozások: vénák összenyomása / tágítása)
   - vázizomzat működése (izompumpa)
   - testhelyzet (gravitációs hatás, alsó vénák tágulása)

Az egyes szervek keringése

Szív: perctérfogat 5 %-a
O_2 fogyasztás 12 %-a

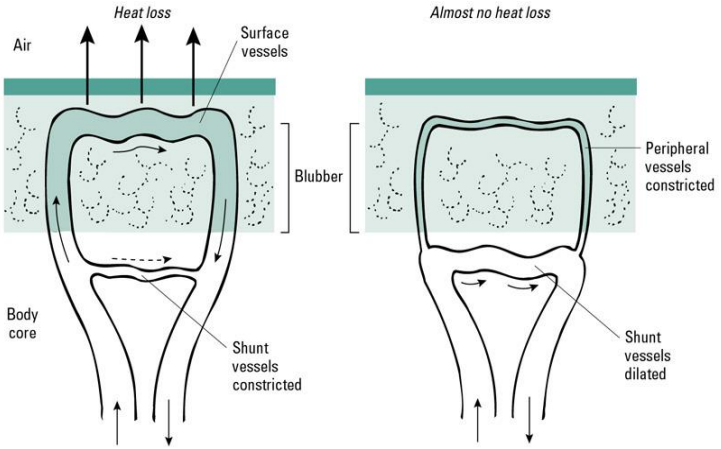
Agy: perctérfogat 15 %-a
O_2 fogyasztás 20 %-a

Izom: perctérfogat 15 %-a
O_2 fogyasztás 20 % (80% is lehet)

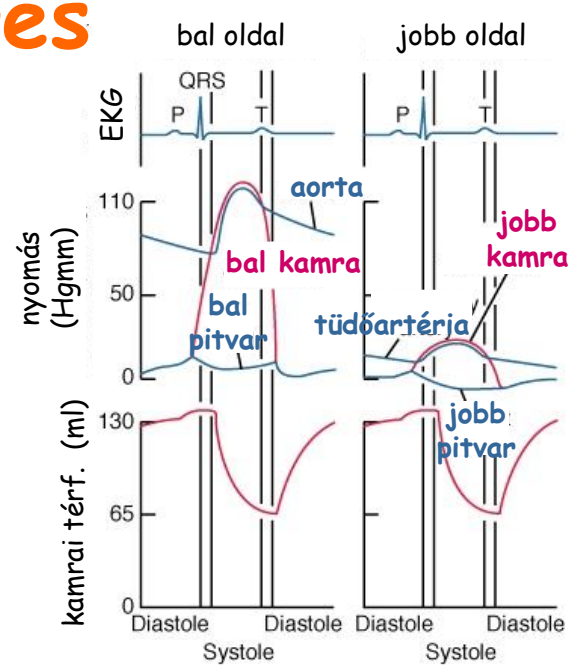
Vese: perctérfogat 22 %-a
O_2 fogyasztás 7 %-a

Máj: perctérfogat 28 %-a (arteria hepatika 20-30 %
vena porta hepatica 70-80 %)
O_2 fogyasztás 20 %-a

Bőr: perctérfogat 5 %-a
O_2 fogyasztás 12 %-a



A kis vérköri keringés



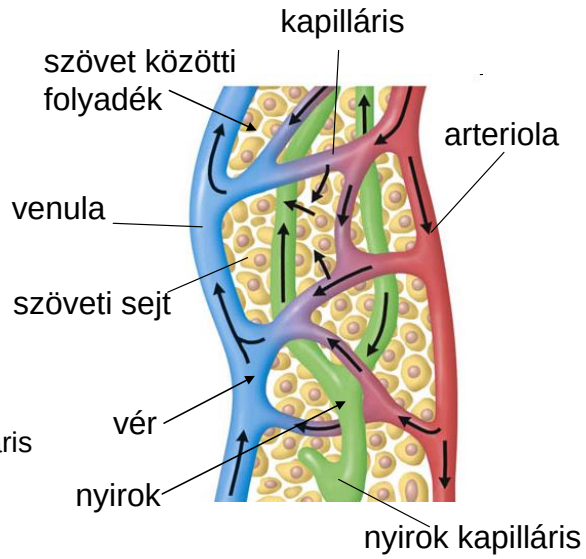
- jobb kamra - a. pulmonalis - artériák - arteriolák - tüdőkapillárisok - venulák - vénák - v. pulmonalis - bal pitvar
- a kis és a nagy vérkörben az átáramló vérmennyiség (a perctérfogat) azonos, de a nyomásviszonyok jelentősen eltérnek
- az artériás középnyomás csak 1/7-e a nagy vérkörinek és csak kis mértékben csökken, így
  - a tüdő arteriolák nem rezisztencia-erek (nincs prekapilláris szfinkter!)
  - a kis vérköri ellenállás sokkal kisebb (érfal vékonyabb, kevesebb izom, jóval tágulékonyabb)
  - az alacsonyabb hidrosztatikai nyomás miatt a tüdőben általában csak kevés intersticiális folyadék keletkezik

A kis vérköri keringés

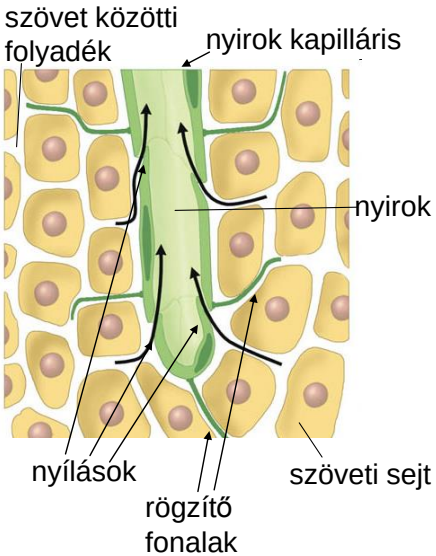
- alveoláris O_2 hiány (hipoxia): vazokonstrikció (érszűkület) – a nem megfelelően ventillált tüdőrész kiesik a keringésből (a nagy vérkörben ezzel szemben a hipoxia értágulást okoz!)

A nyirokáramlás

- szövetközötti tér (intersticiális tér; ICF): kötőszöveti rostállomány, mátrixanyagok (kevés fehérje is), elektrolit oldat (ionok)



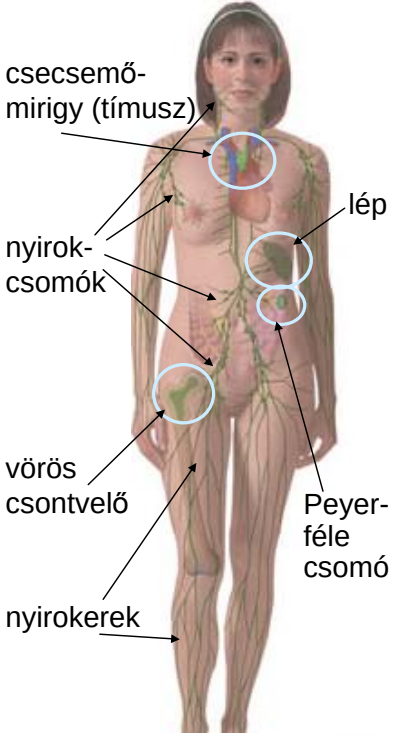
- intersticiális folyadék: folyamatos kicserélődés a vérplazmával a kapillárisokon keresztül; kb. 1%-a nyirok-kapillárisokba kerül (nyirok)

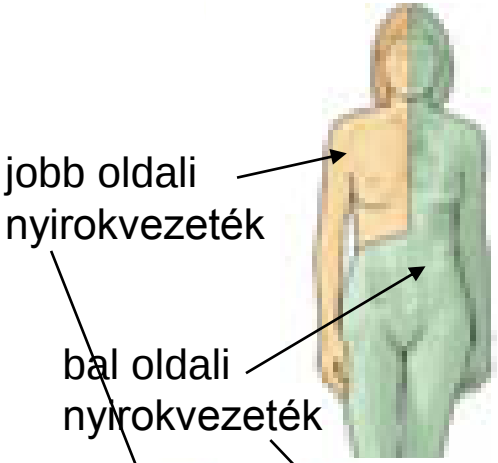


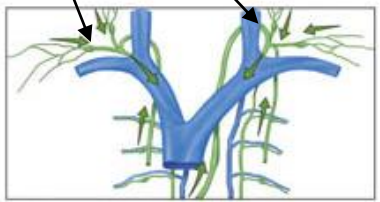
- egyirányú áramlás; ~3 l/nap

A nyirokkeringés

- nyirokkapilláris - nyirokér - nyirokcsomó - ductus thoracicus, tractus lymphaticus - vénás rendszer
- a bal oldali nyirokkeringés nagyobb területet fed le
- fő funkciók:
  - szövetközti folyadék állandó szinten tartása (kapilláris filtráció > visszaszívás)
  - immunológiai fukció: nyiroksejtek, védekezés
  - lipidek, zsíroldékony vitaminok szállítása (főleg bélből)

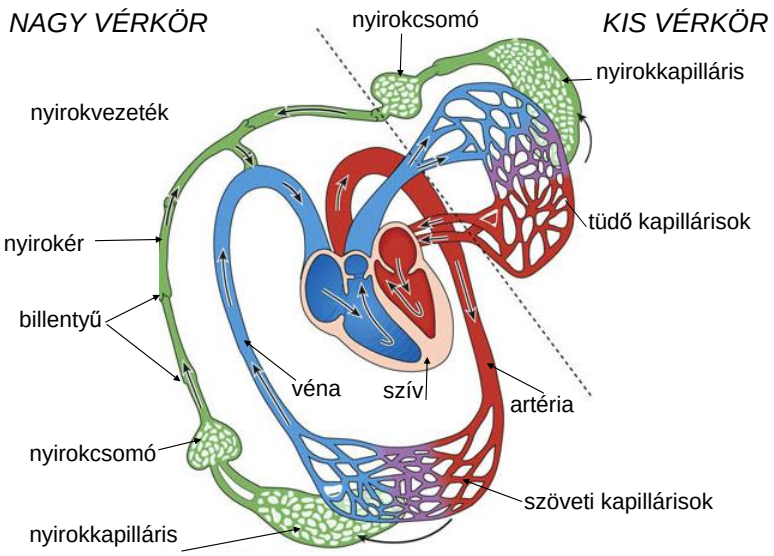






A nyirokkeringés

- a nyirokkeringés fenntartása (ld. vénás rendszer):
  - billentyűk: egyirányú áramlás
  - izompumpa (vázizom)
  - légzési hatás (mellüregi / hasüregi nyomás változása)
- ödéma: filtráció - reabszorpció - nyirokáramlás egyensúlyának felborulása
  - vénás visszaáramlás gátlása (gravitáció)
  - nyirokér elzáródás (elkötés; mozdulatlan végtag)
  - effektív filtráció növekedése (pl. máj-, veseelégtelenség; éhezés: plazmafehérje konc. csökkenés -> BCOP csökken, kevesebb visszaszívás)

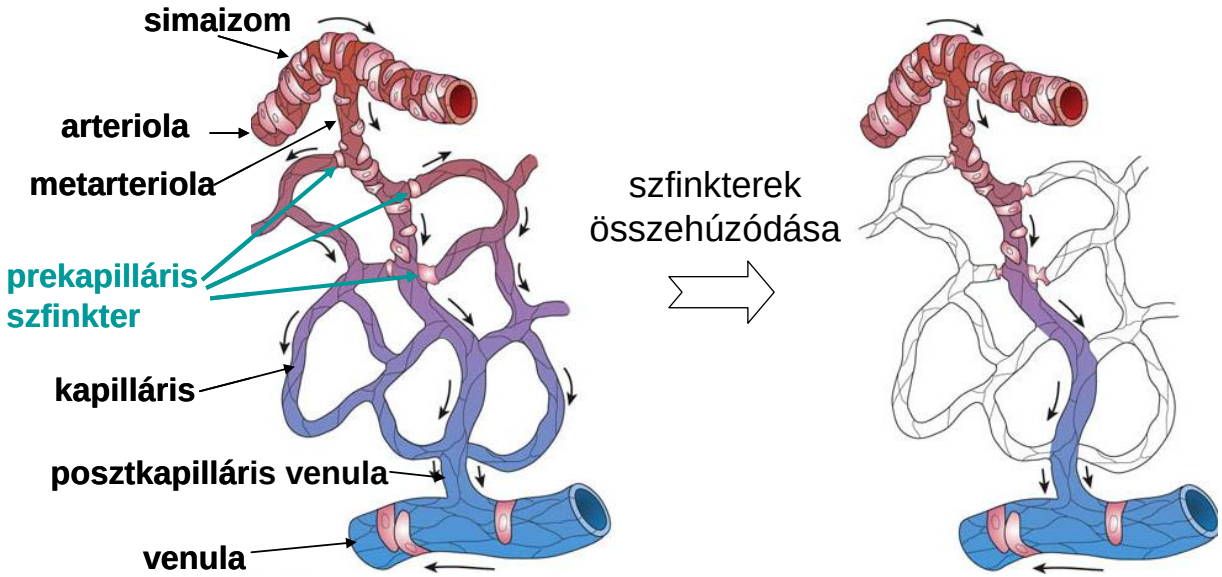


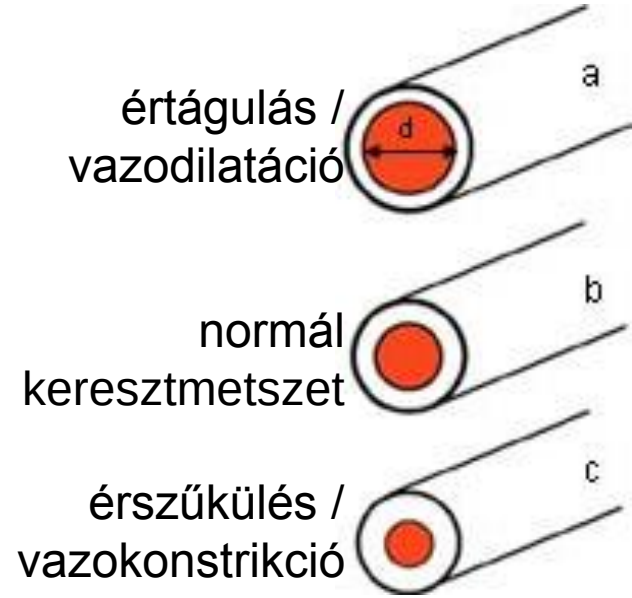
A perifériás ellenállás szabályozása

- ellenálláserek: kis artériák + arteriolák + prekapilláris szfinkterek
- az ellenállás nagyon függ az érkeresztmetszettől ($R \sim 1/d^4$)

⇩

- kismértékű érszűkülés / tágulás jelentősen befolyásolja a véráramlást és a vérnyomást





Az érkeresztmetszet szabályozása 1.

1. autoreguláció (bazális értónus)

- az érfalak a vérnyomás kisebb változásait képesek kiküszöbölni, így a véráramlás kis változások esetén közel állandó maradhat (vese, vázizom, agy, máj, szívizom)

- anyagcseretermékek (metabolitok)
  - $pO_2\downarrow$ (kivéve a tüdőt), pH↓, $pCO_2\uparrow$, pOsm ↑, T ↑, tejsav ↑ (vázizom) : értágulás, áramlásnövekedés

- érsérülés, T ↓ : érszűkület, ellenállásnövekedés

- endotél sejtekben termelődő faktorok
  - NO (nitrogén monoxid): hatásos értágító
  - endotelinek: hatásos érszűkítők
  - prosztaciklinek: értágítás, vérlemezke aggregáció gátlása (ld. aszpirin)

Az érkeresztmetszet szabályozása 2.

2. hormonok

keringési vazodilatátor (értágító) hatás:

a) pitvari natriuretikus peptid (ANP)

- megnövekedett vénás telődés miatti pitvarfal-feszülésre termelődik
- szívben szekretált, vérnyomás- és vértérfogat-csökkentő hatás
- vesében Na^+ és víz kiválasztást fokozza (=natriuretikus), szomjérzetet csökkenti

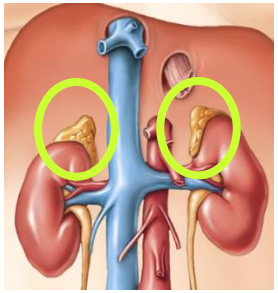
b) vazoaktív intesztinális peptid (VIP)

- bélrendszerben termelődik
- gyomor-bélrendszerben elektrolitok és víz kiválasztását ↑
- perifériás ereket tágítja: vérnyomáscsökkentés

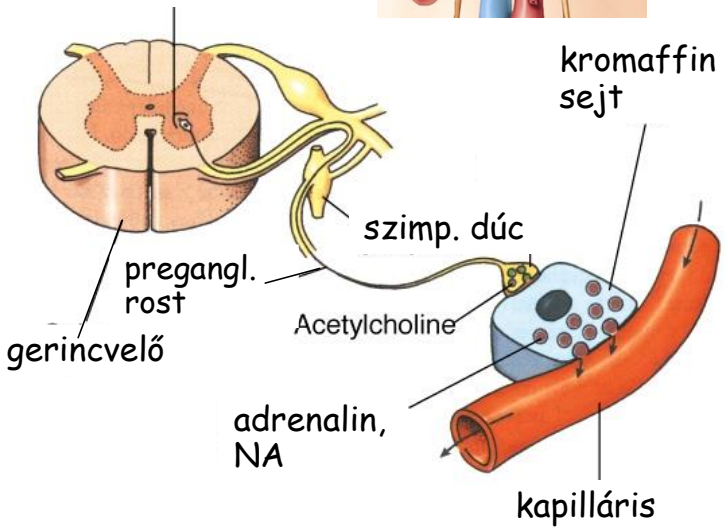
Az érkeresztmetszet szabályozása 3.

2. hormonok

keringési <u>vazokonstriktor (érszűkítő)</u> hatás:



a) adrenalin, noradrenalin (A, NA)



- a mellékvesevelő kromaffin sejtjeiben termelődik
- magas noradrenalin szint (szimpatikus hatás): arteriola simaizom összehúzódása (bőr, zsigerek): perifériás ellenállás, arteriás vérnyomás növelése (β_1 adrenerg receptorok hatása)
- vénákban tárolt vér mennyiségét csökkenti: keringési újraelosztás
- váz-, szívizom (koronáriaerek), tüdő arteriolákban: értágító hatás a véráramlás fokozására! (β_2 adrenerg receptorok hatása)

Az érkeresztmetszet szabályozása 4.

2. hormonok

keringési vazokonstriktor (érszűkítő) hatás:

b) vazopresszin (antidiuretikus hormon, ADH)

- termelődés a hipotalamusz n. supraopticus, n. paraventricularis magban; neurohipofízisből szabadul fel
- kiszáradás, stressz, erős vérzés: érszűkítés, artériás vérnyomásnövelés
- normál körülmények mellett a fiziológiás szerepe kérdéses

c) angiotenzin I : a vesében felszabaduló renin hatására alakul ki

- hatásos vazokonstriktor: szisztólés és diasztólés vérnyomást is emeli

Az érkeresztmetszet szabályozása 5.

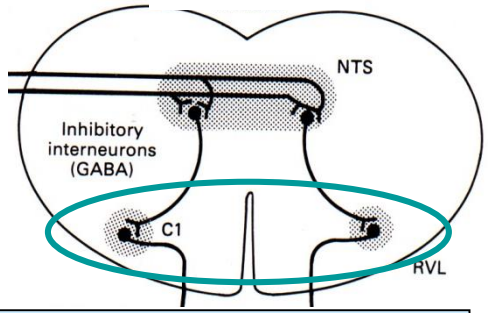
3. az érátmérő idegi szabályozása

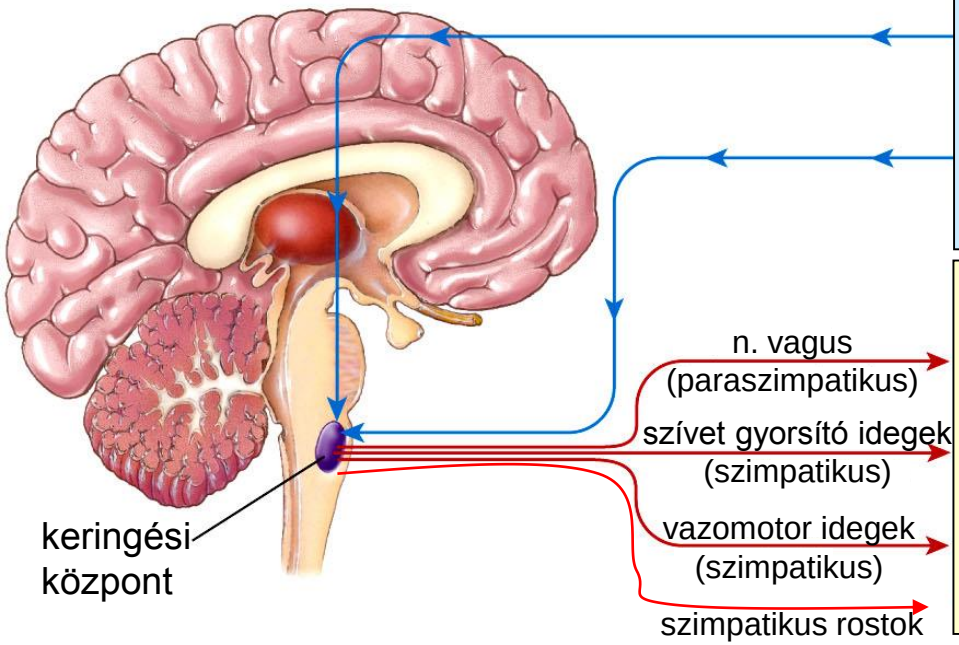
- értónus (perifériás ellenállás) szabályozása kizárólag a szimpatikus vegetatív idegrendszeren keresztül
- szimpatikus vazokonstriktor (érszűkítő) hatás ⇨ perifériás ellenállás ↑
  - simaizmot tartalmazó erek: noradrenerg beidegzés a szimpatikus posztganglionáris rostokból
    - pl. prekapilláris rezisztenciaerek: véráramlás sebessége, artériás nyomás szabályozása
    - pl. zsigeri vénák: érösszehúzódás a vért az arteriális oldalra tereli (keringési átrendeződés)
    - α_1 adrenerg receptorok
- szimpatikus vazodilatátor (értágító) hatás ⇨ vérellátás ↑
    - vázizom, szív, tüdő, vese: szimpatikus izgalomra vérellátás növekedése; β_2 adrenerg receptorok

A keringésszabályozási központ

- nyúltvelői „presszor" (vérnyomásemelő) központ
  - nyúltvelői rostroventrolaterális (RVL) sejtek
  - pacemaker aktivitás, fő szabályozó régió

agykéreg
↓
hipotalamusz
⇩
nyúltvelő





bemenet

- magasabb agyi központok (agykéreg, limbikus rendszer, hipotalamusz)
- proprioceptorok (ízületek mozgása)
- baroreceptorok (vérnyomás)
- kemoreceptorok (pH, CO_2, O_2)

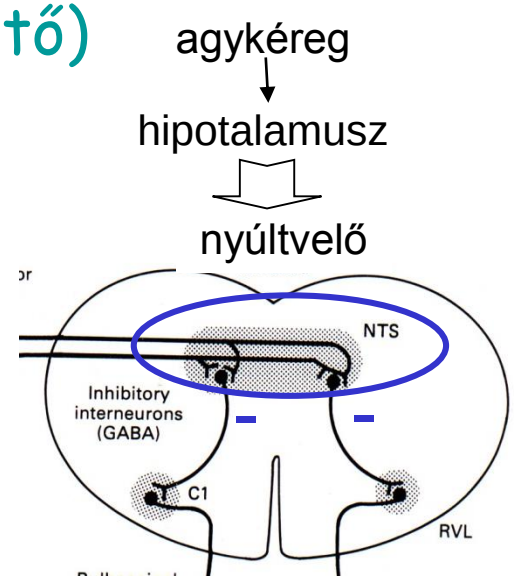
kimenet a végrehajtó szervek felé

- *szív: csökkent szívfrekvencia* (paraszimpatikus hatás gátlása)
- szív: megnövelt szívfrekvencia és kontraktilitás
- erek: vazokonstrikció (vérnyomás fokozódása)
- mellékvesevelő: adrenalin, noradrenalin termelés

A keringésszabályozási központ

- nyúltvelői „presszor" (vérnyomásemelő) központ
  - légzőközponttal együttműködés: belégzéskor a szimpatikus efferens aktivitás, artériás vérnyomás nő
  - szimpatikus preganglionáris beidegzés serkentése
    - mellékvese adrenalin-termelés fokozása
    - perifériás erek szűkítése, vérnyomás fokozása
    - szívműködés (kontrakció, frekvencia) fokozása

- nyúltvelői „depresszor" (vérnyomás-csökkentő) központ
  - presszor központ közvetlen gátlása, nincs spontán aktivitás
  - NTS: nucleus tractus solitarii



A keringés központi szabályozása 1.

a nyúltvelői keringésszabályozási központ bemenetei:

- felsőbb központok (limbikus kéreg, hipotalamusz, mesencephalon, formatio reticularis)
  - gyors szívverés, ájulás emóciók, fájdalom hatására
- kemoreceptorok: glomus caroticum és aorticum; nyúltvelő (ld. légzés)
  - normál körülmények mellett nem jelentős szerep
  - elsősorban hipoxiára (O_2 hiány) érzékenyek: vazokonstrikció, vérnyomásemelés
  - keringés lassulása, nagy vérveszteség is aktiválja
  - légzés-szabályozásban fontosak igazán
  - CO_2 szint emelkedés: perifériás közvetlen hatás vazodilatáció (kipirulás) de centrálisan vazokonstrikció: ellentétes, kiegyensúlyozó hatás

A keringés központi szabályozása 2.

<u>a nyúltvelői keringésszabályozási központ bemenetei:</u>

- baroreceptorok (vérnyomást érzékelő receptorok)

I. magas nyomású receptorzónák (sinus caroticum, aortaív)

- afferens axonok (IX, X. agyidegek) a nyúltvelőbe futnak
- vérnyomást 50 - 200 Hgmm között érzékelik, normál artériás vérnyomásnál is aktívak
- gyors vérnyomásnövekedés:

⇩

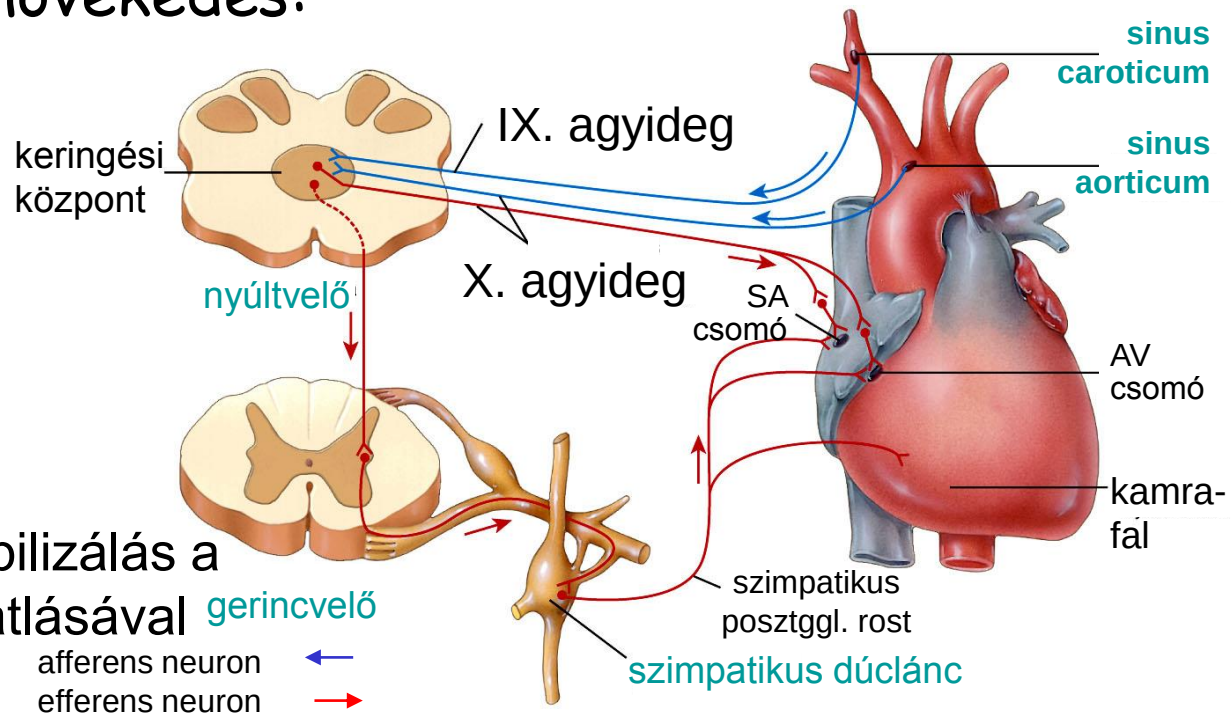
aktiváció, akciós potenciálsorozat

⇩

depresszor központ aktiválása, presszor központ gátlása

⇩

gyors vérnyomásstabilizálás a szimpatikus hatás gátlásával



A keringés központi szabályozása 3.

<u>a nyúltvelői keringésszabályozási központ bemenetei:</u>

- baroreceptorok (vérnyomást érzékelő receptorok)

II. alacsony nyomású receptorzónák (vena cava, a. és v. pulmonalis)

- pitvari receptorok a nagyerek beszájadzásánál

- falfeszülést érzékelik, térfogatnövekedésre aktiválódnak

⇩

depresszor központ serkentése, presszor központ gátlása

- ADH, renin és aldoszteron-termelés reflexes szabályozása: hosszú távú, térfogatreguláló hatás

A vérnyomás szabályozása (összefoglalás I.)

artériás vérnyomás ↓

↓

baroreceptorok kevésbé feszülnek

↓

IX, X. afferens agyidegek aktivitása ↓

↓

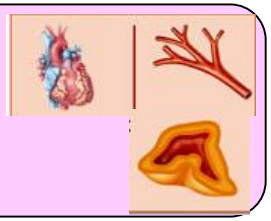
nyúltvelői depresszor központ serkentése ↓, presszor központ gátlása ↓

↓

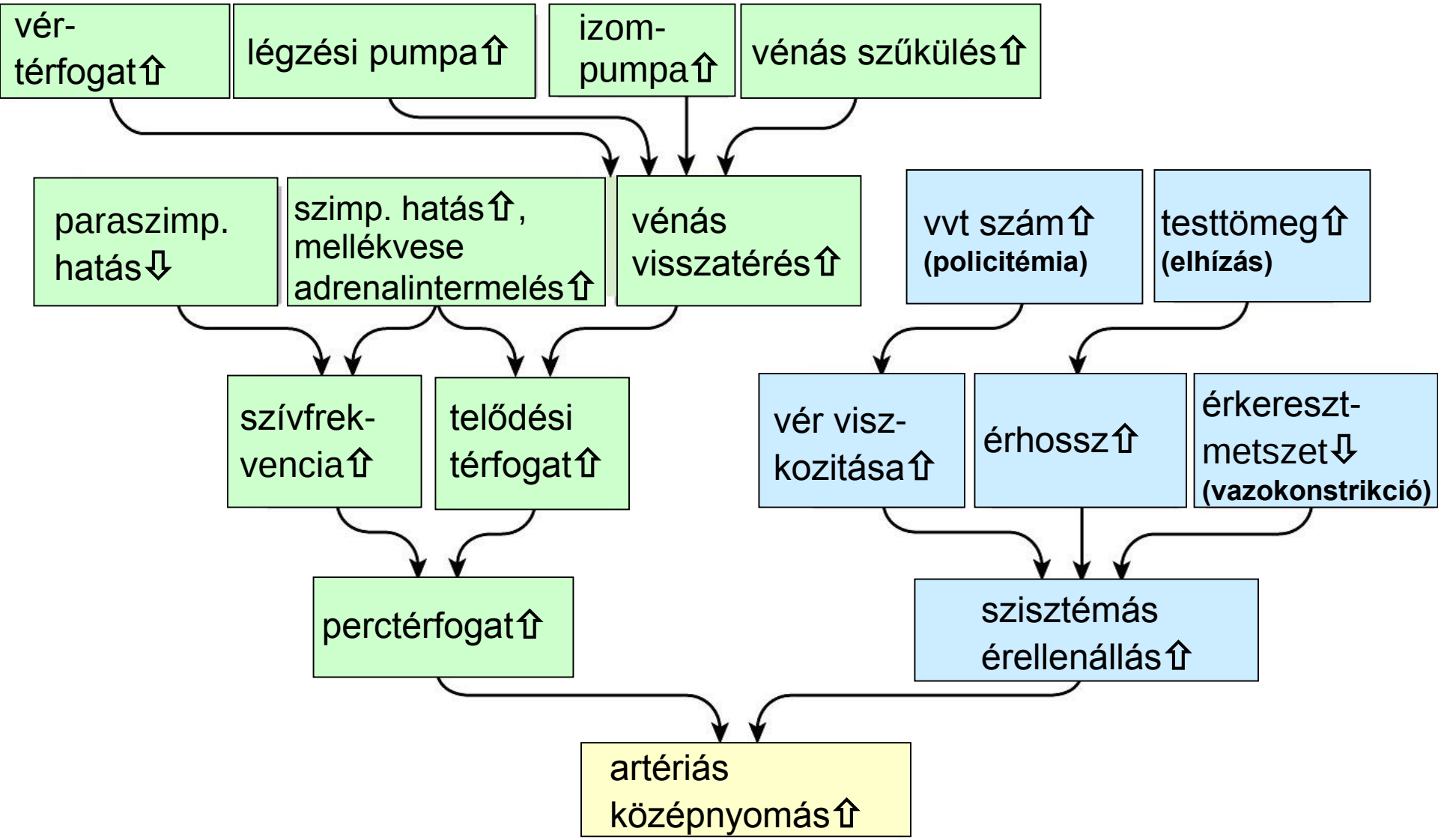
szimpatikus aktiváció ↑
paraszimpatikus hatás ↓

↓

perctérfogat ↑, perifériás ellenállás és vérnyomás ↑, adrenalin termelés ↑



+

homeosztázis (normál vérnyomás) visszaállítása

A vérnyomás szabályozása (összefoglalás II.)