

VYŠETŘENÍ V KARDIOLOGII

I. část

HEMODYNAMIKA

seminář z patologické fyziologie

Martin Vokurka

(poslední editace Petr Maršálek: 2015)

Oběhový systém přesouvá *objemy* (tekutinu) mezi jednotlivými různě oddělenými oddíly, přičemž při těchto přesunech je důležitá aktivita jedné části a poddajnost/odpor jiných částí. Mezi různými prostory mohou být bariéry. K přesunům jsou využity a při přesunech vznikají *tlaky*.

Hodnocení objemů a tlaků proto vypovídá o činnosti KVS.

KAZUISTIKA 1

Pacient(ka), 69 let

Příznaky: únava, nevykonnost, dušnost při námaze, která se zhoršuje, občas je i klidová a někdy noční

Přes den močí méně, v noci chodí močit několikrát

KAZUISTIKA 1

Pacient(ka), 69 let

Příznaky: **únava, nevykonnost**, dušnost při námaze, která se zhoršuje, občas je i klidová a někdy noční

Přes den močí méně, v noci chodí močit několikrát

Únava, nevýkonnost...

- Častý příznak s mnoha různými příčinami
- Častou příčinou je nedostatek kyslíku -
hypoxie

HLAVNÍ PŘÍČINY NEDOSTATKU KYSLÍKU

1. Nedostatek kyslíku či jeho nízký parciální tlak v okolí
2. Zhoršená funkce respiračního aparátu
(= **hypoxická hypoxie**)
„kyslík do krve – parciální tlak“
3. Nedostatek hemoglobinu – přenašeče kyslíku
(= **anemická, transportní hypoxie**)
„kyslík v krvi na přenašeč“
4. Poruchy krevního oběhu (= **cirkulační hypoxie**)
„kyslík krví k orgánům, do tkání“
5. Poruchy buněčného metabolismu (= **histotoxická hypoxie**)

HLAVNÍ PŘÍČINY NEDOSTATKU KYSLÍKU

1. Nedostatek kyslíku či jeho nízký parciální tlak v okolí
2. Zhoršená funkce respiračního aparátu
3. Poruchy krevního oběhu
4. Nedostatek hemoglobinu – přenašeče kyslíku

Stavy, kdy se tkáním nedostává dostatečné množství krve
(i kdyby v ní bylo krve dostatek)

Celkové poruchy – *pokles srdečního výdeje* (až šok)

Místní poruchy – např. embolie, trombóza...

ischemie – kromě nedostatku kyslíku vážne i přísun živin a
odsun zplodin

Srdeční výdej (SV) a srdeční index

množství krve přečerpané srdcem za časovou jednotku,
obvykle litry/ min

$$SV \text{ (srdeční výdej)} = SF \text{ (srdeční frekvence)} \times TO \text{ (tepový objem)}$$

Normální hodnoty: 4 až 7 l/ min

Srdeční index = $SV / \text{povrch těla}$; norm. hodnoty 2,8 až 4,2 l/ m²

Stanovení:

vyhrazeno větš. spec. kardiologickému vyšetření

- * termodiluce (standard) – Swanův-Ganzův katetr
- * Fickův princip
- * neinvazivní metody

KAZUISTIKA 1

SF 110/min  **tachykardie**

tachykardie je výrazem snahy srdce zvýšit čerpání krve (tj. **minutový srdeční výdej** = SV)

Ze SF nevíme, je-li SV normální, zvýšený či snížený, ale vidíme snahu jej zvýšit

-zvýšení skutečné (např. při sportu)

-zvýšení SV, který je nízký

Záleží i na objemu, který srdce při každém stahu vypudí

Další příznaky nízkého SV

- bledost, chladná akra, závratí až kolaps

(Fyziologická) Distribuce SV

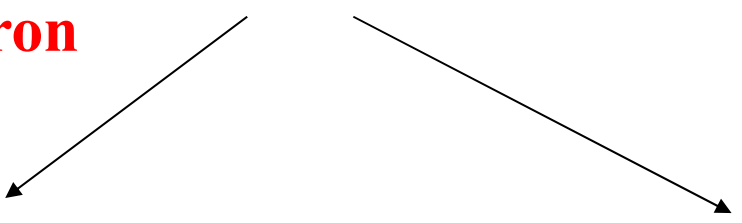
- Srdce 5%
Mozek 14%
Svaly 20%
Ledviny 22%
Játra 25%
Ostatní 14%

Bude-li SV **nízký** – zhoršená perfuze orgánů

-únava

-slabost

**-nízké prokrvení ledvin --- aktivace systému Renin
Angiotenzin Aldosteron**



ANGIOTENZIN II

vazokonstrikce

snížení GF

mitogenní účinky na srd. sval

ALDOSTERON

retence Na⁺
retence vody

KAZUISTIKA 1

Pacient(ka), 69 let

Příznaky: únava, nevykonnost, dušnost při námaze, která se zhoršuje, občas je i klidová a někdy noční

Přes den močí méně, v noci chodí močit několikrát

Prokrvení ledvin se snižuje s poklesem SV

O SV se dělí s ledvinami i další orgány

Tato distribuce je rozdílná ve dne (pohyb, svaly) a v noci

Ve dne pacient málo močí, v noci se ledviny prokrví více a množství vyloučené moči se zvyšuje
(**nykturie**)

Fickův princip

K měření spotřeby kyslíku či srdečního výdeje

celkové vychytání nebo uvolnění určité látky je funkcí krevního průtoku orgánem a A-V difference této látky. V případě plic je takovou látkou kyslík:

$$\text{spotřeba O}_2 = \frac{\text{průtok krve plicemi}}{\text{arteriální O}_2 - \text{venózní O}_2}$$

$$\text{SV} = \frac{\text{spotřeba O}_2}{\text{AV difference}}$$

Příklad:

1 litr arter. krve obsahuje cca 200 ml kyslíku, 1 litr smíšené ven. krve 150 ml.

AV difference je tudíž 50 ml/ litr krve. Tyto hodnoty lze získat katetrizací a měřením obsahu kyslíku.

Spotřeba kyslíku za 1 min je 250 ml (sledovat měřením nebo odhadnout, např. 3 ml O₂/ min/ kg či 125 ml/ min/ m²).

SV je v tomto případě 250/ 50, tj. 5 litrů za minutu.

Termodiluční metoda měření SV

- * založena na naředění indikátoru, kterým je chladná tekutina (fyziologický roztok)
- * známé množství indikátoru o známé teplotě nižší než teplota krve (obvykle kolem 0 °C) je injikováno do pravé síně
- * indikátor se mísí s krví a snižuje její teplotu
- * teplota je měřena stejným katetrem distálněji; změna teploty je sledována v závislosti na čase a plocha pod takto vzniklou křivkou slouží k výpočtu SV velikost plochy je nepřímo úměrná (inverzně proporční) SV

Výpočty provádí počítač

Termodiluční křivka

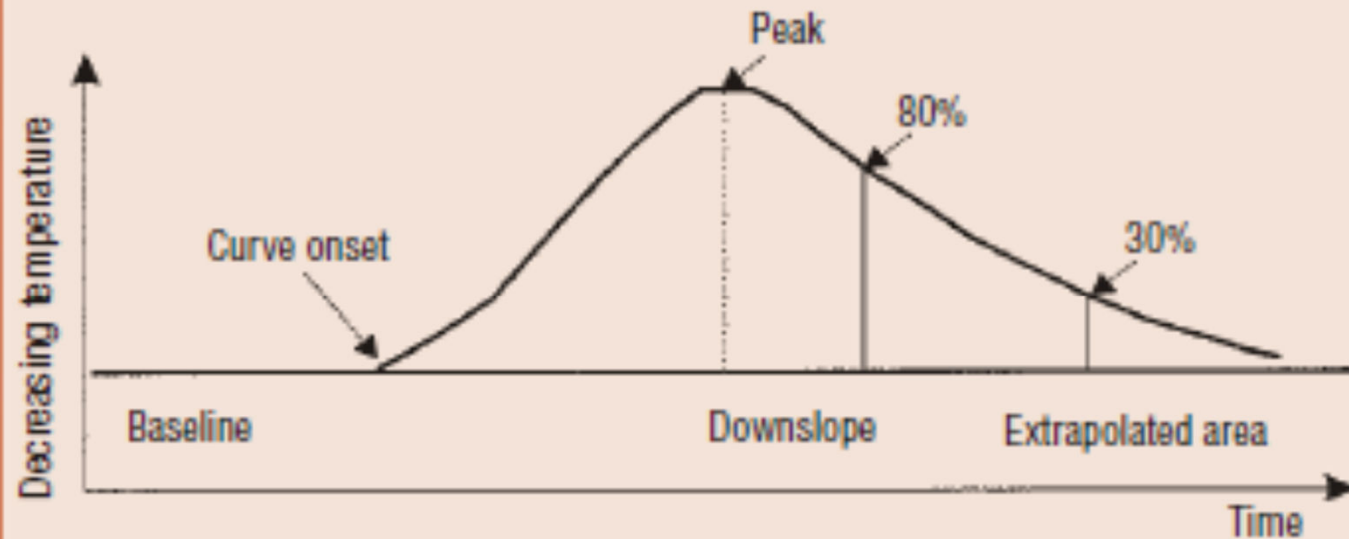
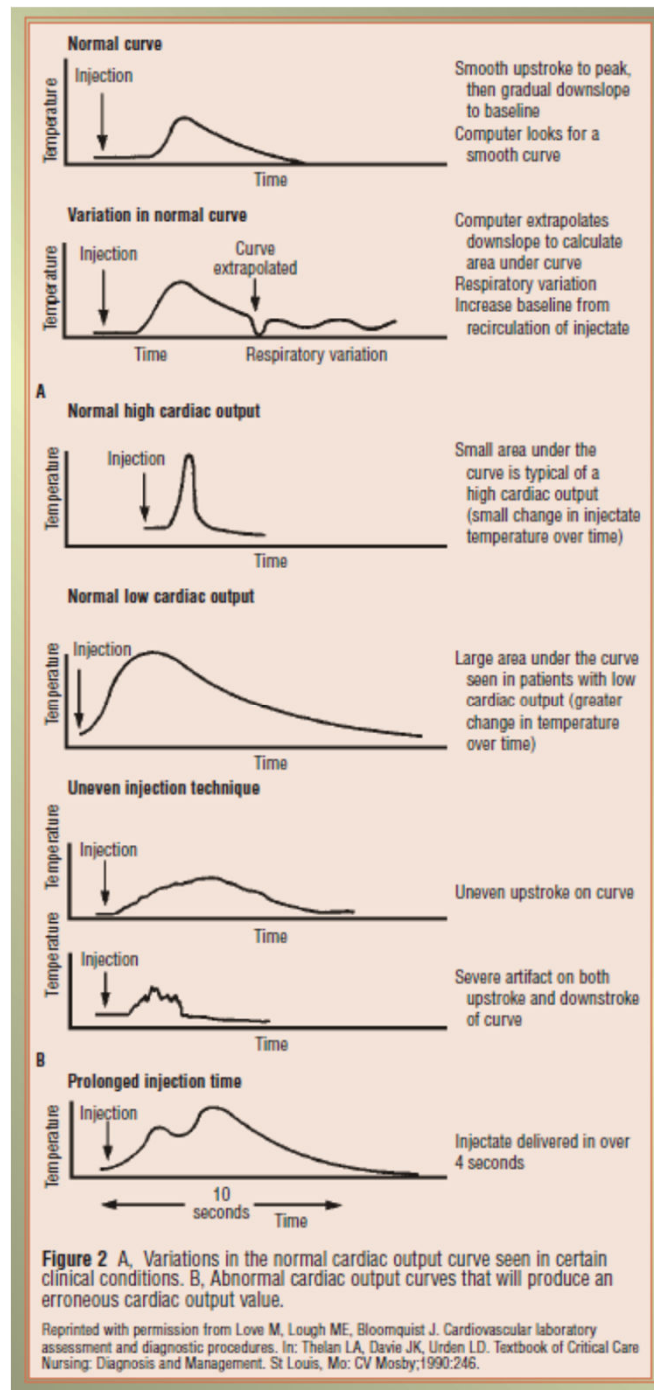


Figure 1 An ideal thermodilution curve. Administration of the injectate is characterized by a rapid upslope to a peak, a gradual downslope, and an exponential decay of the thermal signals. The cardiac output computer begins integration of the area under the thermodilution curve at the instant of injection and terminates integration when the exponential decay reaches a value of about 30%. The computer then extrapolates the exponential decay to baseline. In this way, any artifact introduced by recirculation of indicator is minimized.

normální SV

vysoký SV

nízký SV



Další metody měření SV

(běžně užívané/ standardizované projekce)

- ultrazvukové metody kombinované s „Dopplerem“

Regulace SV

- **tepová frekvence**
- **tepový objem:**
 1. **přetížení (preload)**, náplň komory
 - 2. kontraktilita**
 3. **dotížení (afterload)**

Možnosti zvýšení SV

- tepová frekvence – **tachykardie**
- tepový objem:
 1. předtížení (**preload**), náplň komory
 - 2. kontraktilita**
 3. dotížení (**afterload**)

Bude-li **SV nízký** – regulace (srdce a organismus) bude směřovat k opětovnému zvýšení SV

- SF - tachykardie

- TO:

1. předtížení (**preload**), náplň komory



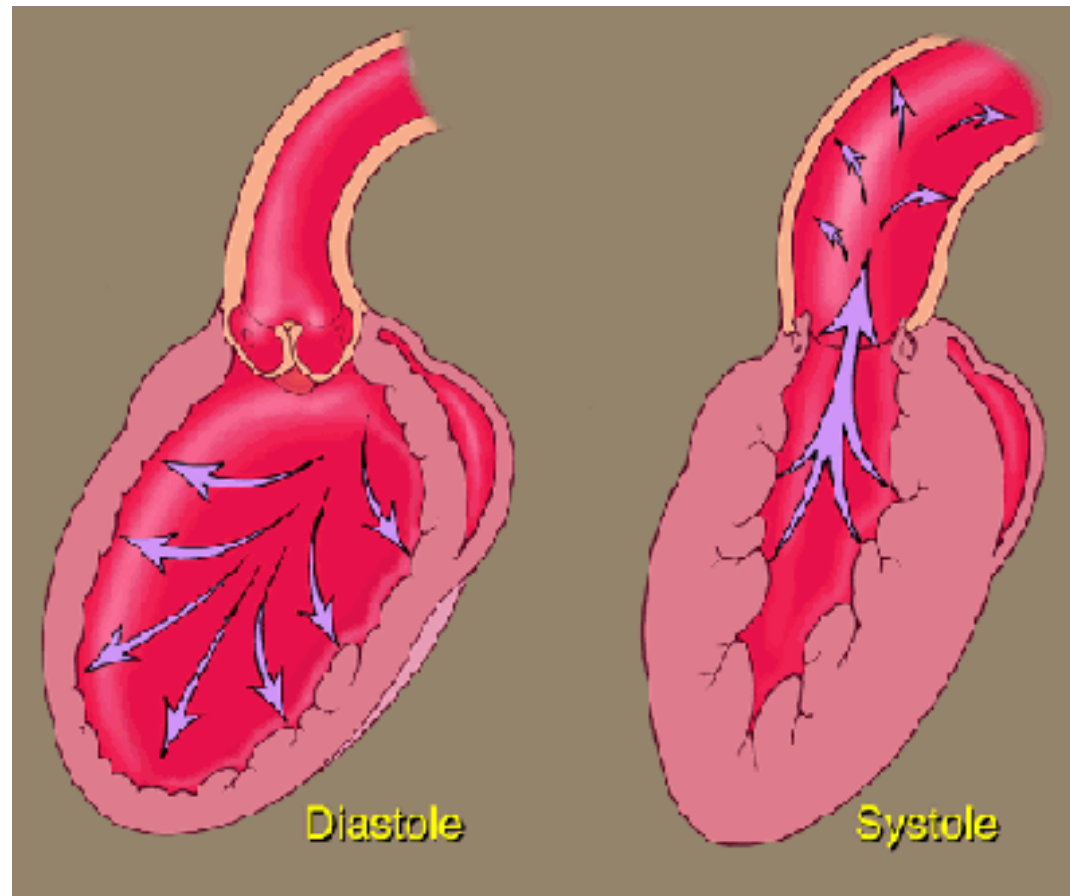
2. **kontraktilita** – sympatikus ji zvyšuje, ale někdy je její pokles vlastní příčinou poklesu SV

3. dotížení (**afterload**) – vyšší afterload SV snižuje

End-diastolický objem

- Objem srdeční komory na konci diastoly je důležitý pro roztažení komory (pre-load)
- zvyšuje tepový objem
- závisí na plnění komory, žilním návratu, množství krve v organismu, průchodnosti mitrální chlopně, délce diastoly (včetně pravidelnosti srdečního rytmu)

Enddiastolický a endsystolický objem



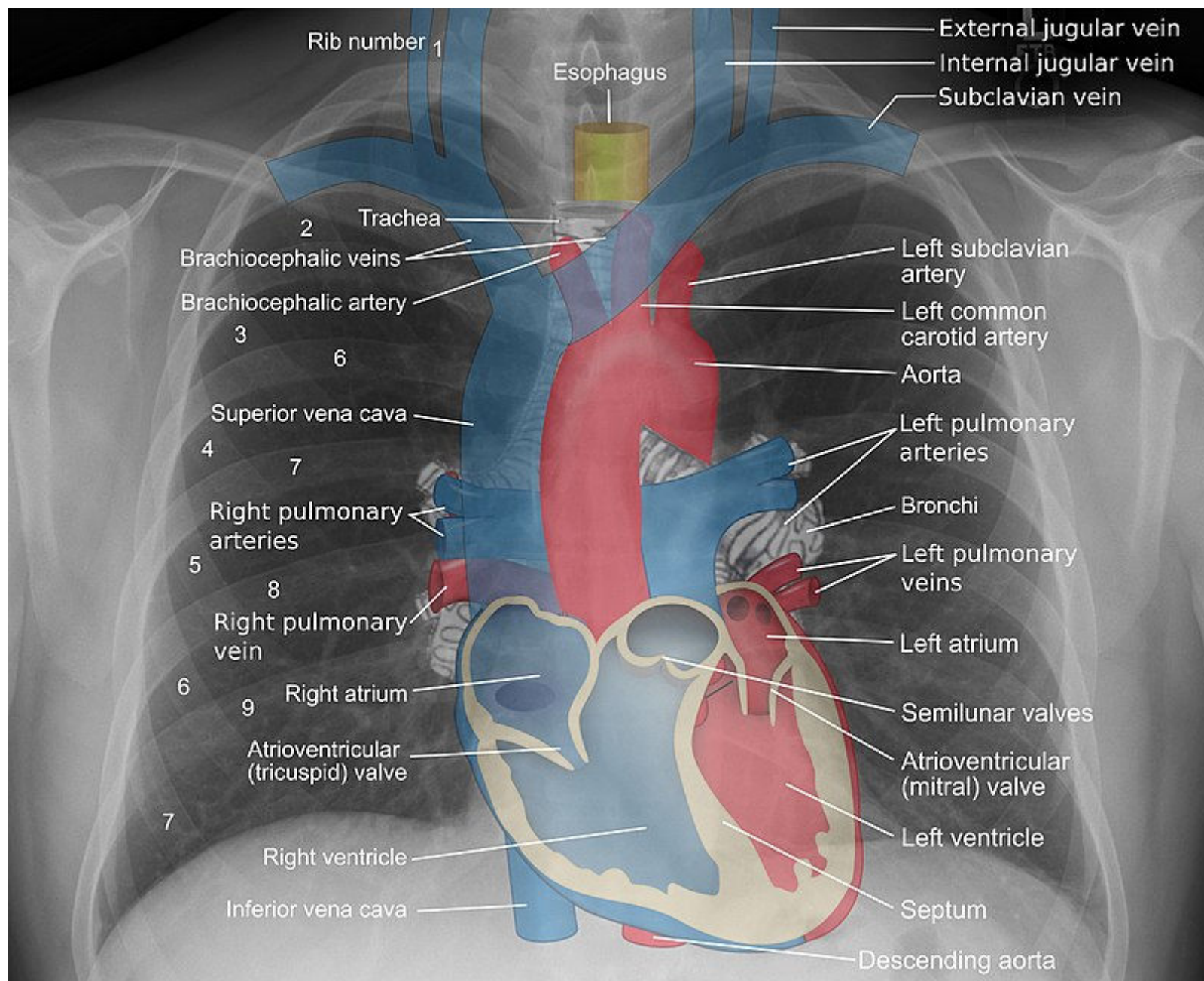
Zvýšený preload (Frank-Starlingův mechanismus)

- udrží TO, ale z většího objemu na konci diastoly --- **enddiastolický objem** (EDV)
- srdce se objemově zvětšuje --- **dilatace**
- při zvětšeném objemu v komoře stoupá i tlak - **enddiastolický (plnicí) tlak** (EDP)

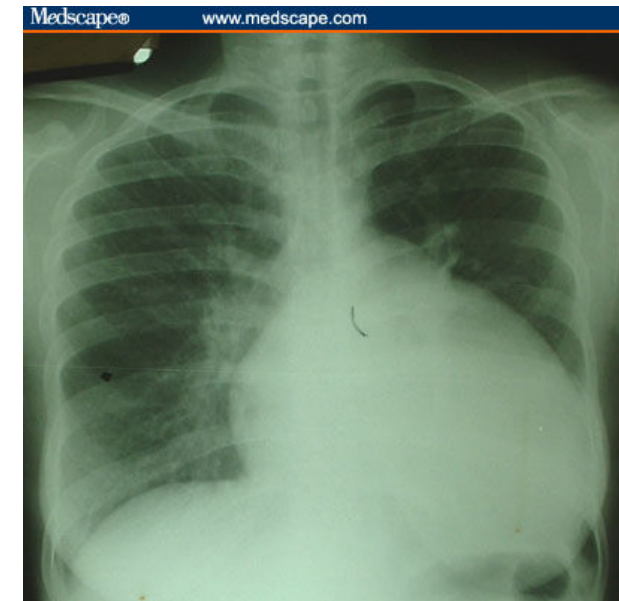
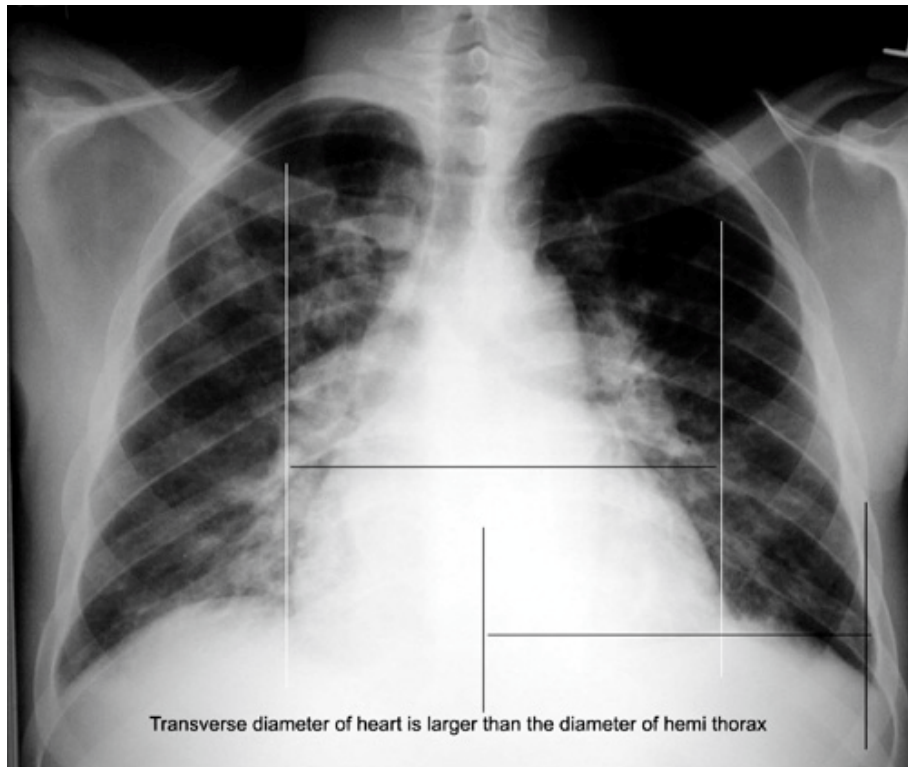
Dilatace srdce

- RTG hrudníku (KTI – kardiotorakální index)
 - echokardiografie
 - fyzikální vyšetření
-
- nepříznivě ovlivňuje napětí ve stěně, zvyšuje riziko arytmii, velká dilatace snižuje kontraktilita

RTG hrudníku



RTG hrudníku



Tepový objem

- $TO = EDV - ESV$

enddiastolický objem – endsystolický objem

Závisí kromě EDV i na síle (efektivitě) stahu
(kontraktilitě)

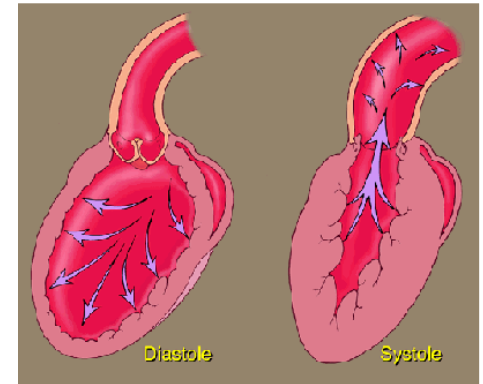
Tuto sílu lze zjistit poměrem mezi TO a EDV,
tj. jako ejekční frakci

Zvýšený preload (Frank-Starlingův mechanismus)

- srdce se objemově zvětšuje --- **dilatace**
- udrží TO, ale z většího objemu na konci diastoly --- **enddiastolický objem** (EDV)
- efektivita stahu je nižší, poměr TO/EDV se snižuje
- tento poměr se nazývá **ejekční frakce** a vyjadřuje systolickou funkci srdce
- při zvětšeném objemu v komoře stoupá i tlak - **enddiastolický (plnicí) tlak** (EDP)

Ejekční frakce (EF)

$$EF = TO / EDV$$



TO – tepový objem

EDV – objem v komoře na konci diastoly (endiastolický volum)

Základní parametr pro posouzení *systolické funkce* srdce

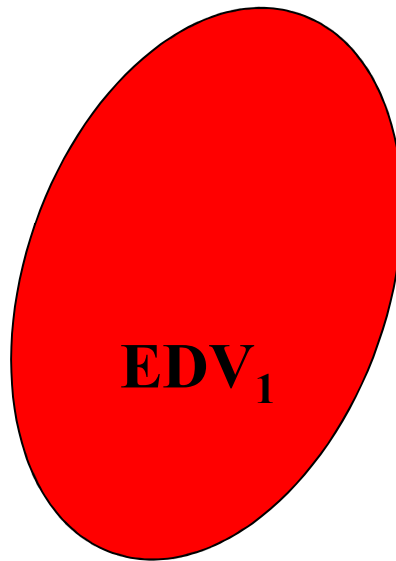
Normální hodnoty:

50–65 %

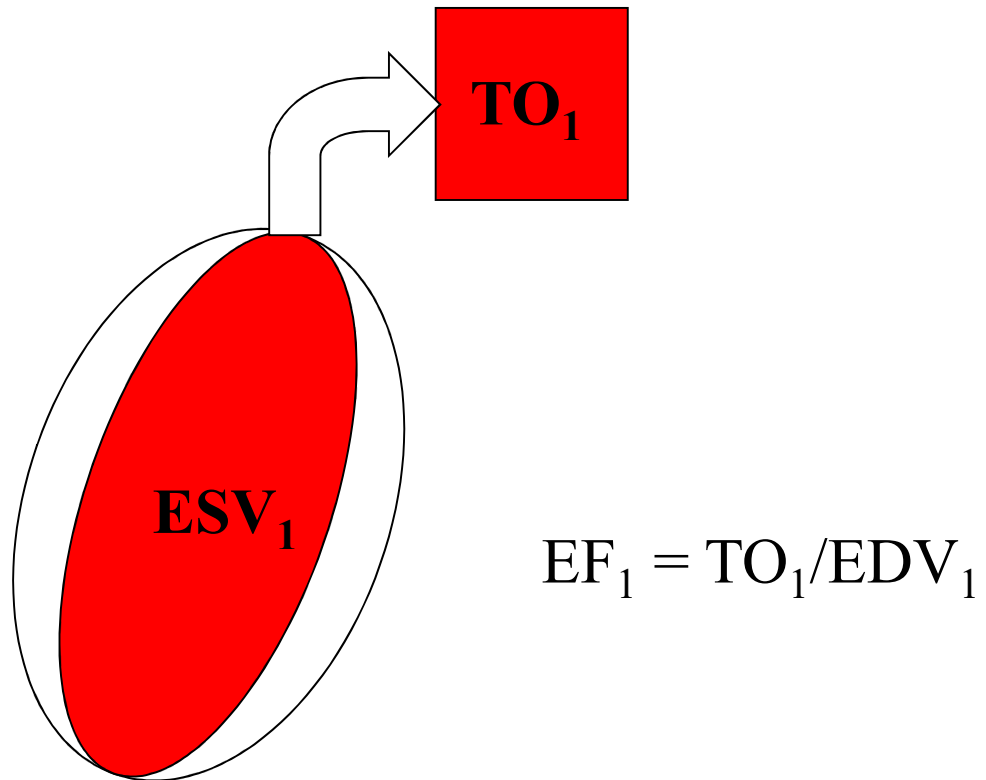
stoupá např. při sympatické stimulaci a jiným inotropním působením
40 % a méně u systolické dysfunkce

Stanovení:

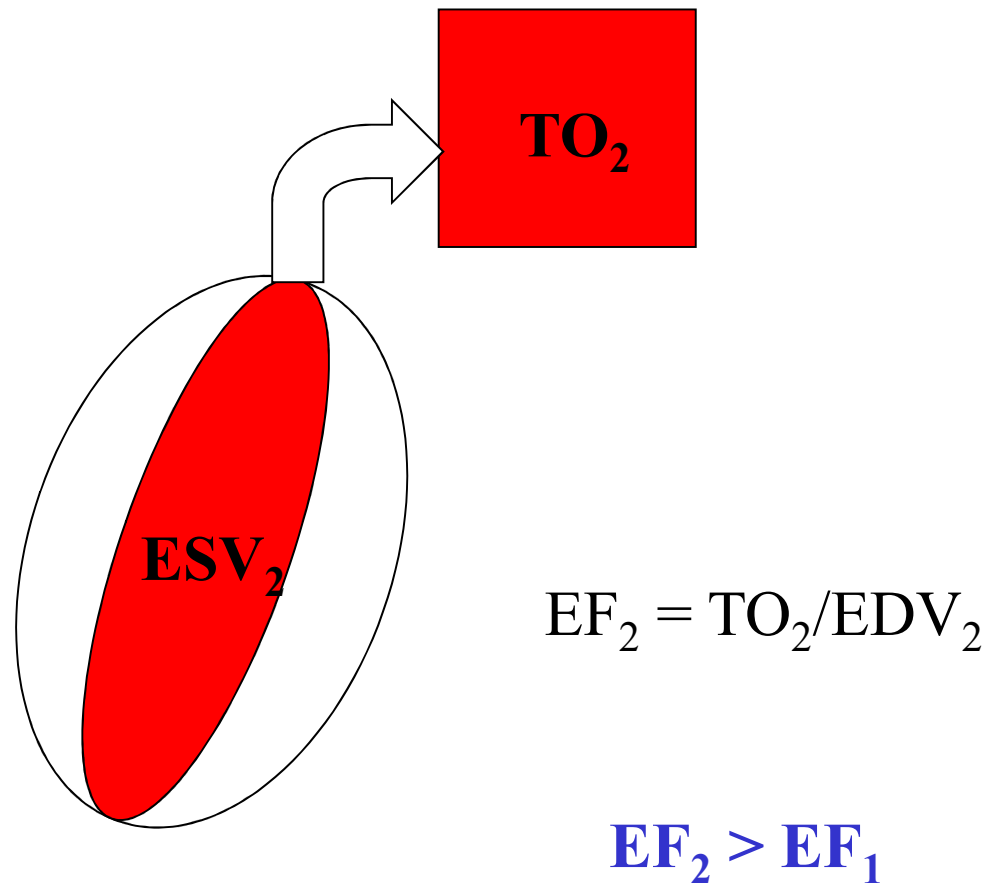
nejběžněji pomocí *echokardiografie*, ev. izotopové metody



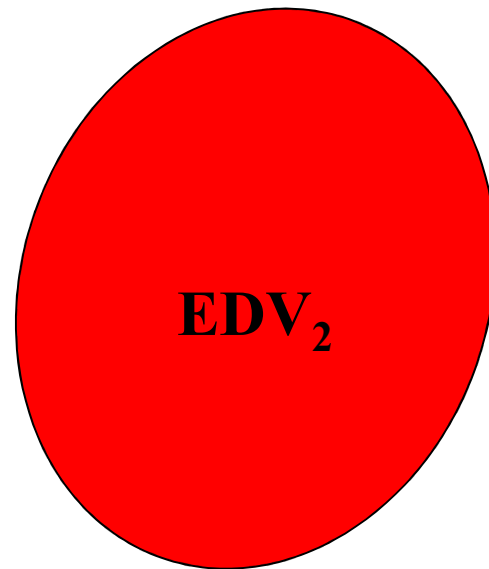
Konec diastoly 1



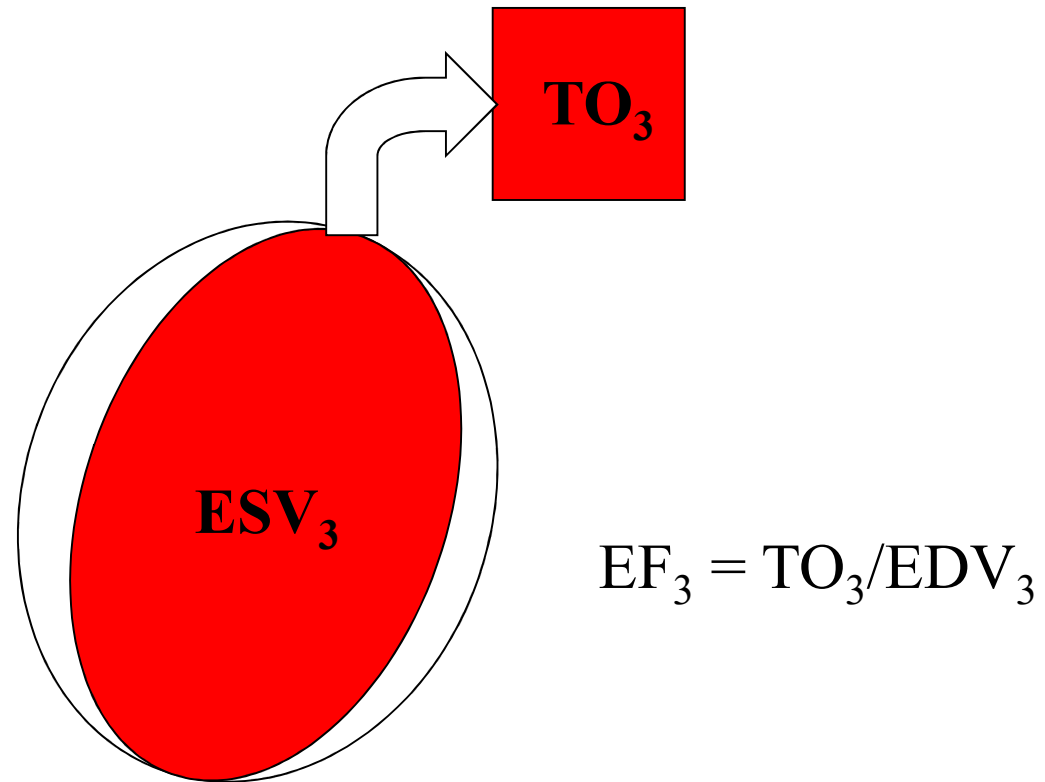
Konec systoly 1



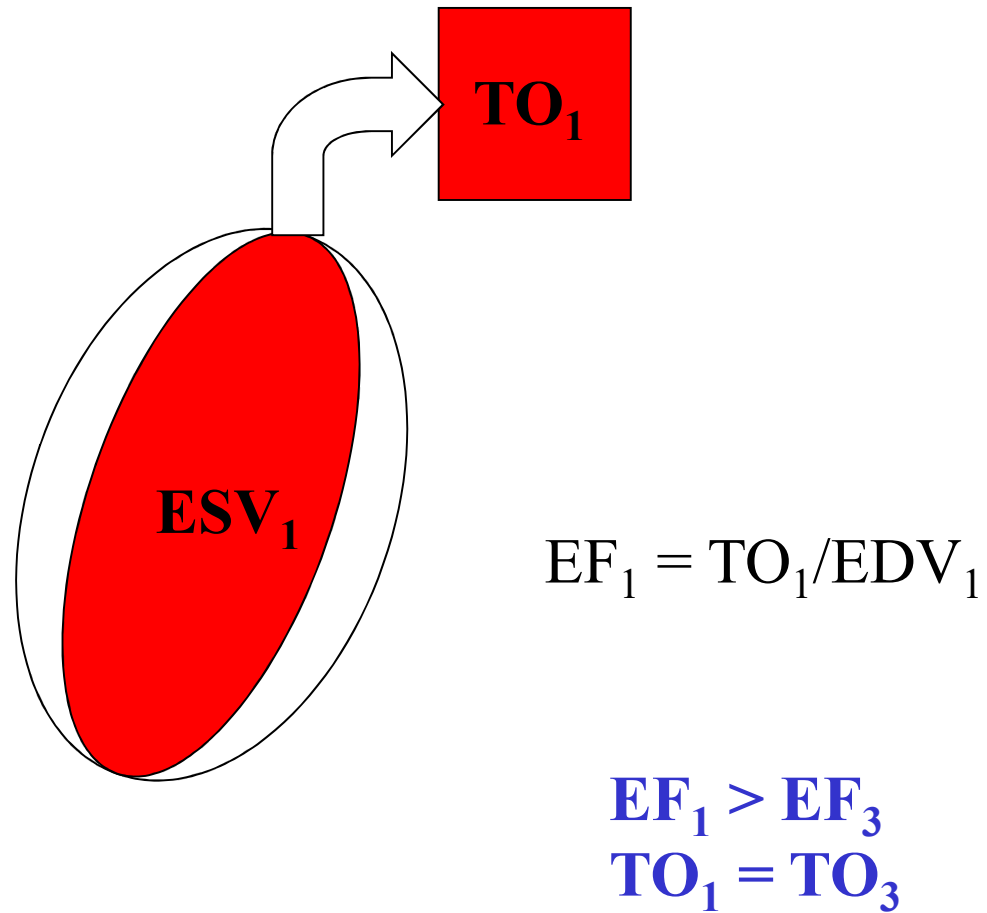
Konec systoly 2



Konec diastoly 2



Konec systoly 3



Konec systoly 1

Vypočtete a zhodnot'te EF

- Levá srdeční komora má na konci diastoly objem 145 mL. Srdeční výdej je 4,8 L/ min. Srdeční frekvence je 90/ min.

Vypočtete a zhodnot'te EF

- $EDV = 145 \text{ ml}$
- $TO = ?$
- $SV = 4800 \text{ ml}$
- $SF = 90 / \text{min}$
- $TO = SV / SF = 4800 / 90 = 53,3 \text{ ml}$
- $EF = 53,3 / 145 = 0,37 \text{ (37 \%)}$

Zhodnot'te parametry

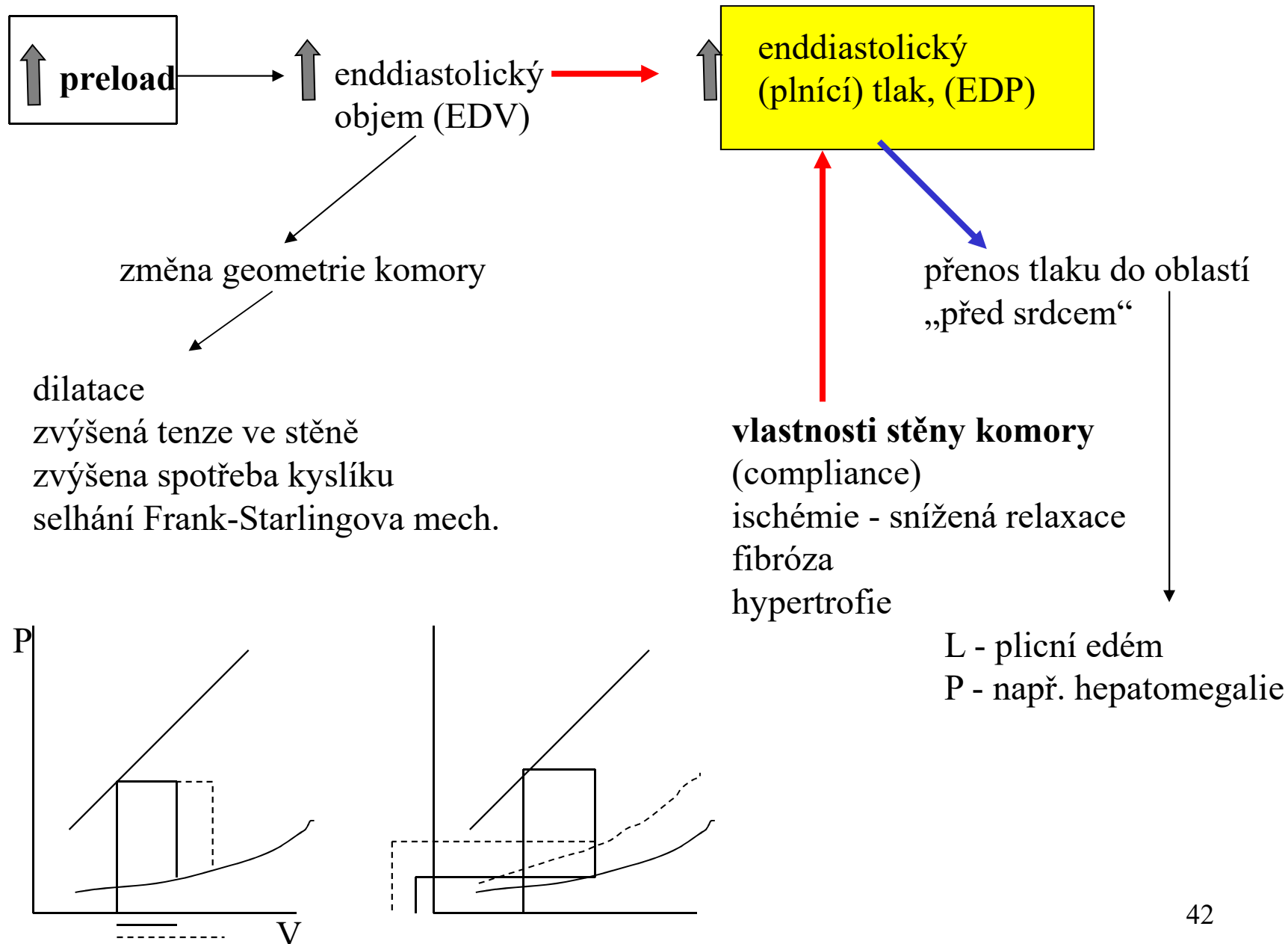
- Srdeční výdej je zhruba normální
- Mírná tachykardie
- Zvýšený preload
- Snížená EF

Snížená efektivita systoly je kompenzována zvyšováním preloadu a tachykardií

Plnicí (enddiastolický) tlak (EDP)

- závisí na
 1. objemu (EDV)
 2. vlastnostech komory – poddajnosti (compliance)

Compliance je snížena zejména při hypertrofii (zbytnění) srdce



Důsledky zvýšeného EDP v levé komoře

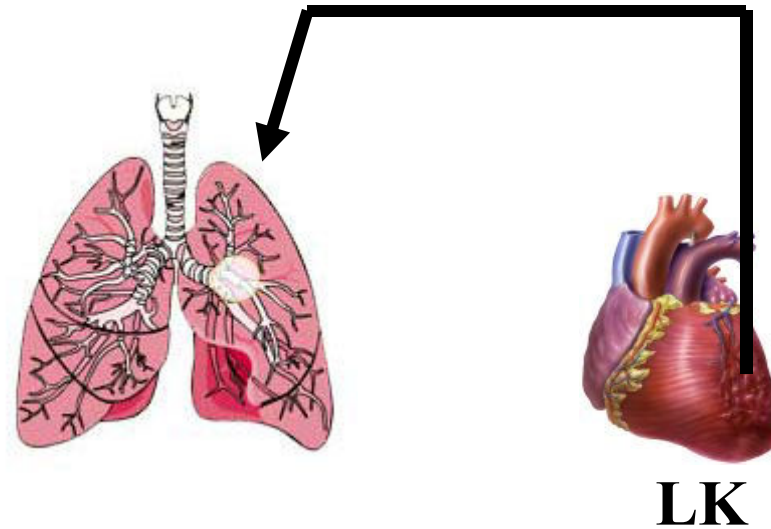
- tlak se propaguje (v diastole) z **levé** komory do levé síně, **plicních** žil a plicních kapilár
- způsobuje kongesci v **plicích**

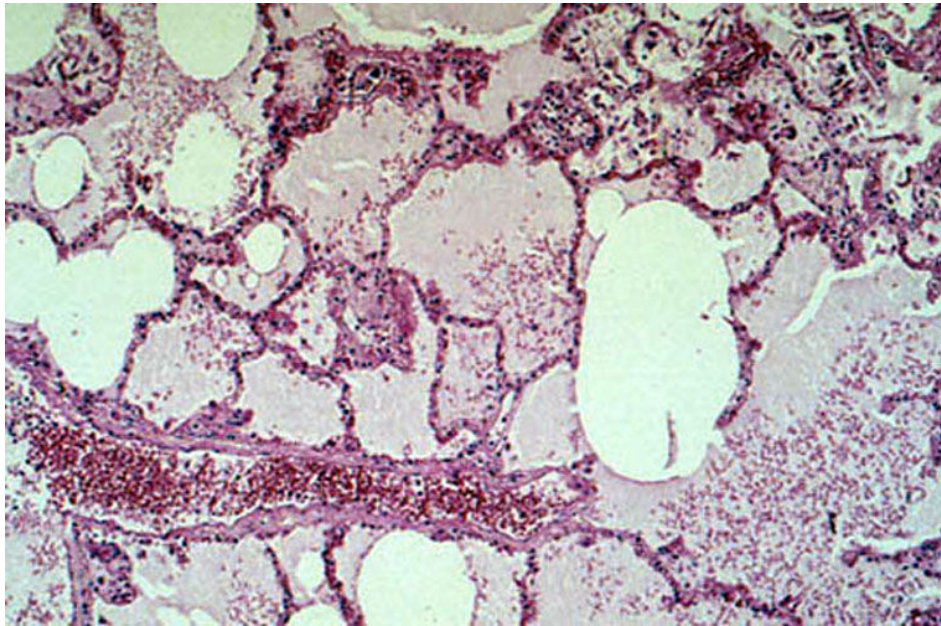
DUŠNOST

PLICNÍ EDÉM

Patrné:

- poslechem (chrůpky)
- RTG
- měření tlaku v zaklínění





KAZUISTIKA 1

Pacient(ka), 69 let

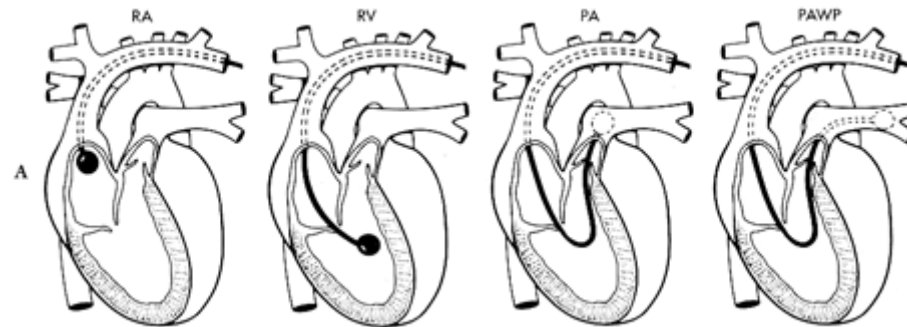
Příznaky: únava, nevykonnost, **dušnost při námaze, která se zhoršuje, občas je i klidová a někdy noční**

Přes den močí méně, v noci chodí močit několikrát

Srdeční katetrizace

- měření **tlaků** v jednotlivých oddílech srdce
 - * tlak v zaklínění - plicí (enddiastolický tlak)
 - * tlakové gradienty
- **odběr krve** k stanovení saturace kyslíkem
- stanovení **srdečního výdeje**
- odběr **bioptických** vzorků

Zavádění Swanova-Ganzova katetru
přes dutou žílu, pravou síň (RA),
pravou komoru (RV), do plicnice (PA)
až do pozice k měření tlaku v zaklínění
(PAWP)



Plnicí (enddiastolický) tlak

tlak v komoře na konci diastoly
souvisí s *náplní* (objemem, preloadem) a
vlastnostmi stěny (poddajností)

Normální hodnoty v LK: 6-12 mmHg

Stanovení:

měří se jako (plicní kapilární) *tlak v zaklínění* při pravostranné katetrizaci

PAWP – pulmonary artery wedge pressure *nebo*

PCWP – pulmonary capillary wedge pressure

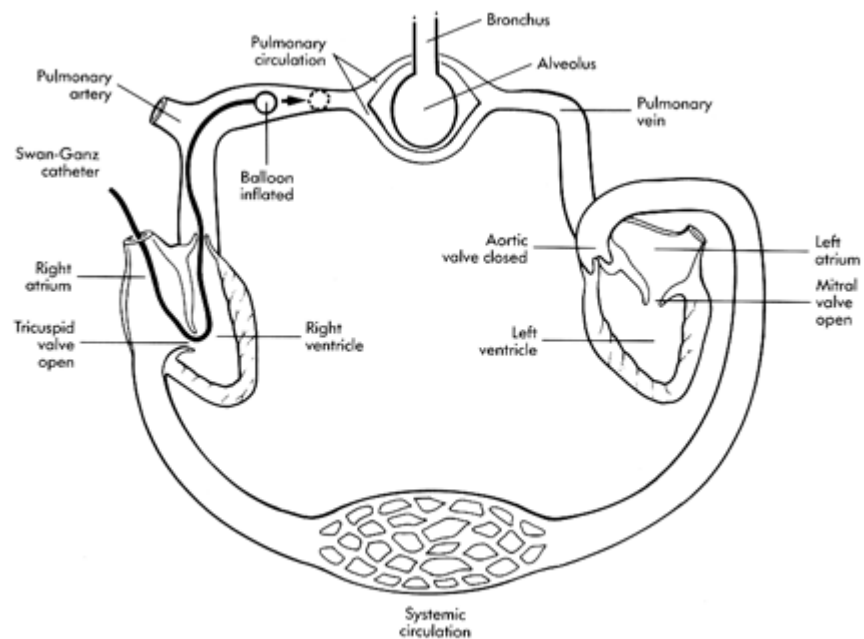
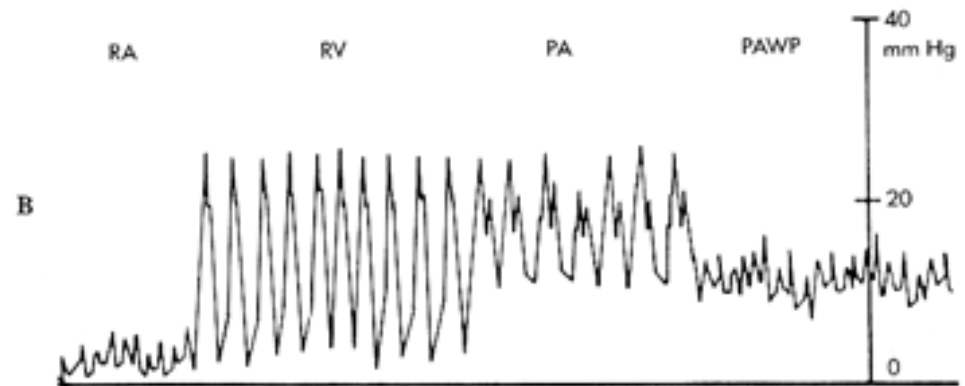
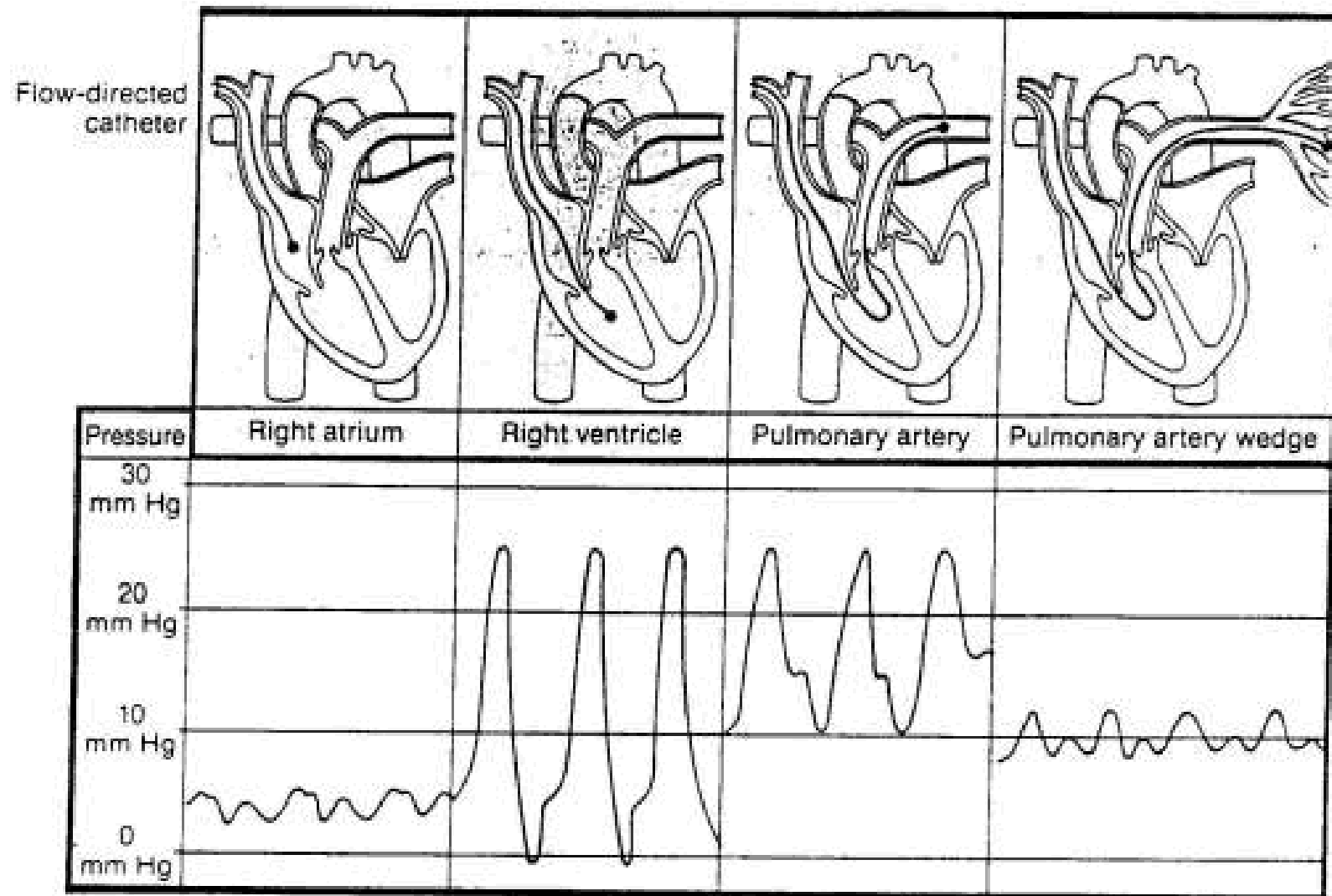


Schéma měření tlaku v zaklínění

Záznam tlaků při pravostranné katetrizaci
 Swanovým-Ganzovým katetrem
 pravá síň - RA, pravá komora (RV),
 plicnice (PA), tlak v zaklínění (PAWP)





SHRNUTÍ KAZUISTIKY 1

SF 110/min

dilatace srdce

zvýšení plnicího tlaku

známky městnání na plicích

snížený SV

Zkontrolovat, jakou má pacinet(ka) hladinu hemoglobinu
(anémie by příznaky ještě zhoršila)

KAZUISTIKA 1 – pokračování

Začaly se objevovat i velké otoky dolních končetin,
játra byla zvětšená a bolestivá

Zvýšená náplň krčních žil

Cyanóza (= modré zbravení kůže)

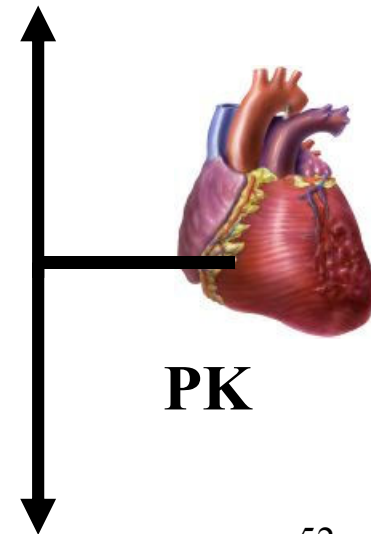
KAZUISTIKA 1 – pokračování

Začaly se objevovat i velké otoky dolních končetin,
játra byla zvětšená a bolestivá

Zvýšená náplň krčních žil

Cyanóza

Objevuje se selhávání pravé komory



Centrální žilní tlak (CŽT, central venous pressure CVP)

tlak v duté žíle či pravé síni

lze měřit při katetrizaci (Swanův-Ganzův katetr) nebo samostatně při zavedení katetru do centrální žíly (i např. při trvale zavedeném katetru pro dlouhodobou výživu)

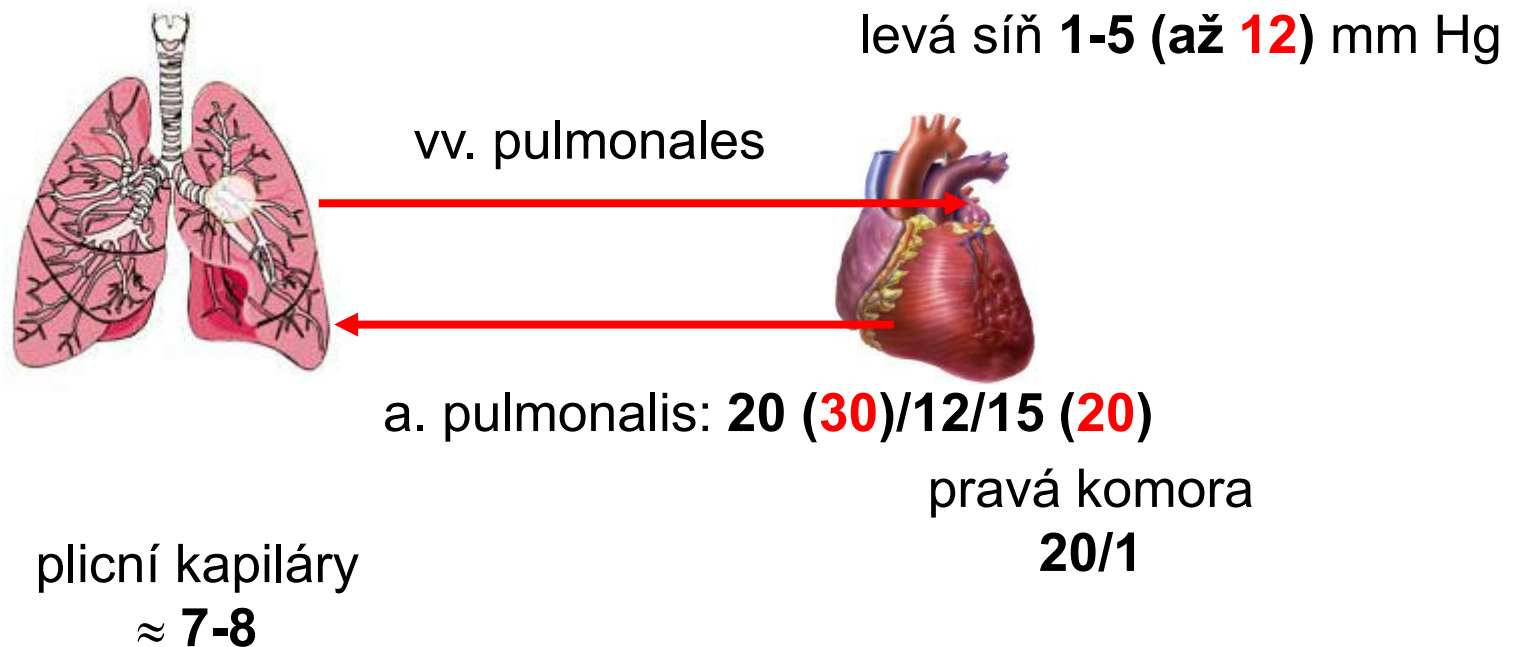
Norma: 2-8 mm Hg

Využívá se zejm. k monitorování *náplně cévního řečiště*

Zvýšen je rovněž při trikuspidální stenóze a zejména při *pravostranném srdečním selhání*

Tlaky v malém oběhu

systolický / diastolický / střední / **hraniční**



Tlaky v srdečních oddílech

- měřit při katetrizaci

1. absolutní hodnoty
2. tlakové gradienty (rozdíly tlaků mezi jednotlivými oddíly)

Tlaky (obecně)

-objem-compliance

*-odpor, volnost průtoku mezi jednotlivými oblastmi
(vazodilatace, vazokonstrikce, stenózy)*

-přenesené z jiných oblastí (např. městnání)

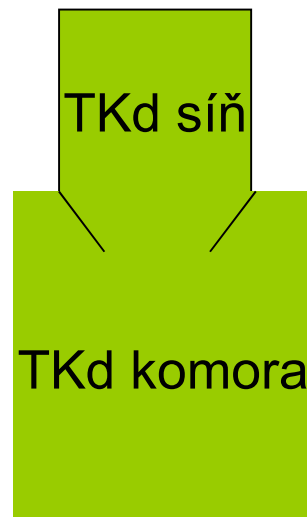
Diastola

tlaky mezi síní a komorou jsou stejné

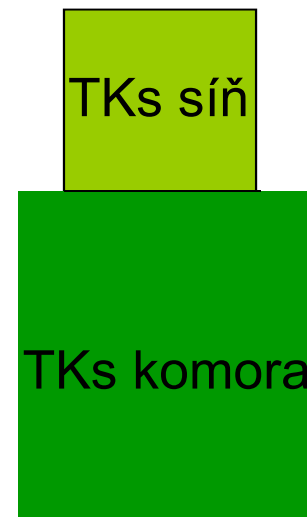
Systola

tlaky mezi komorou a tepnou jsou stejné

Tlaky v síni a komoře



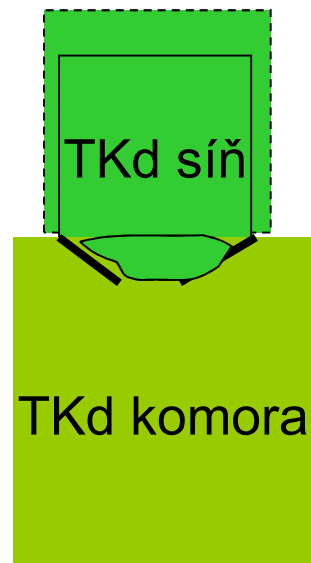
DIASTOLA



SYSTOLA

TKd síň = TKd komora

STENÓZA



DIASTOLA

TKd síň > TKd komora

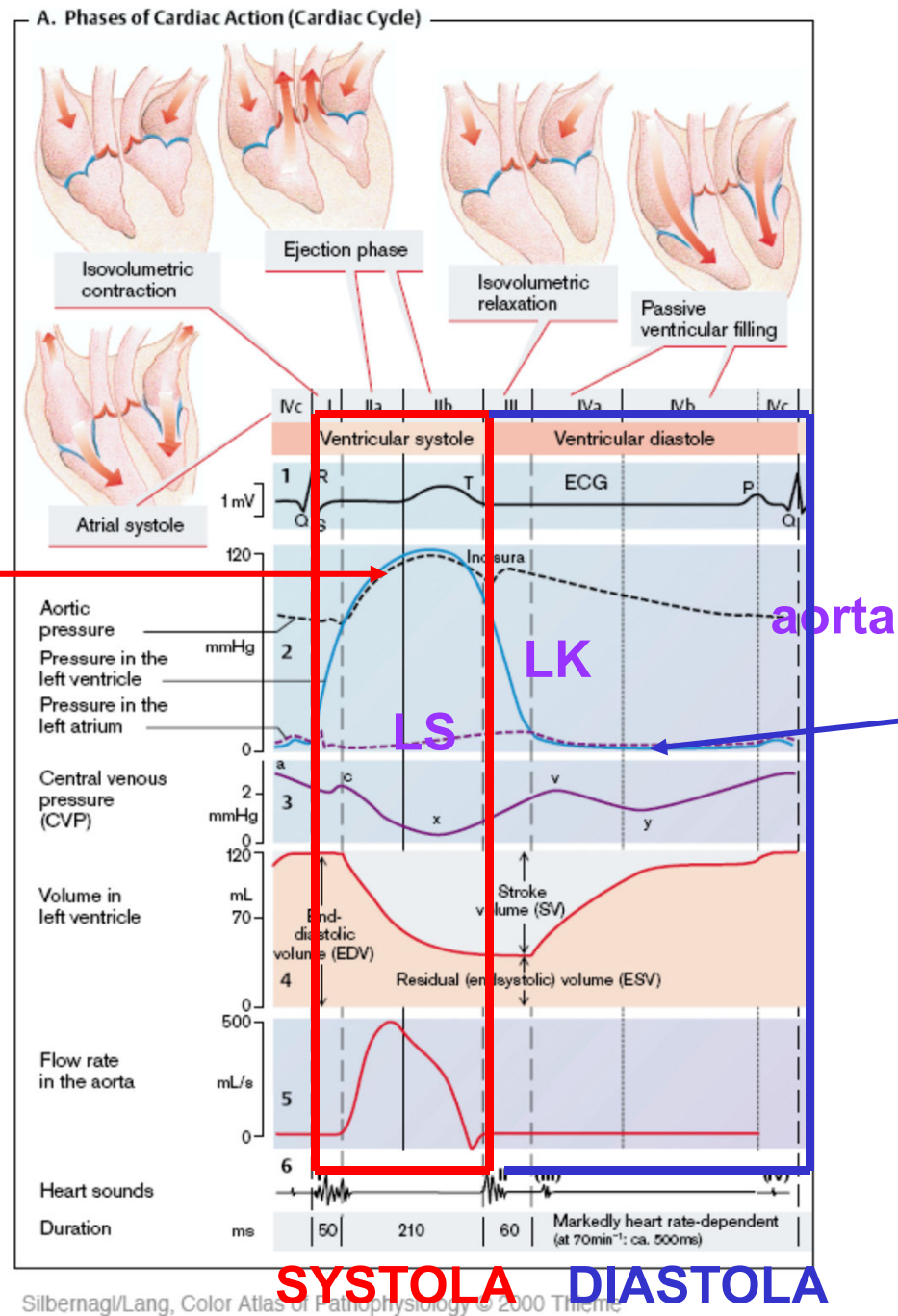
INSUFICIENCE



SYSTOLA

Wiggersův diagram

stejný tlak
komora-aorta
v systole

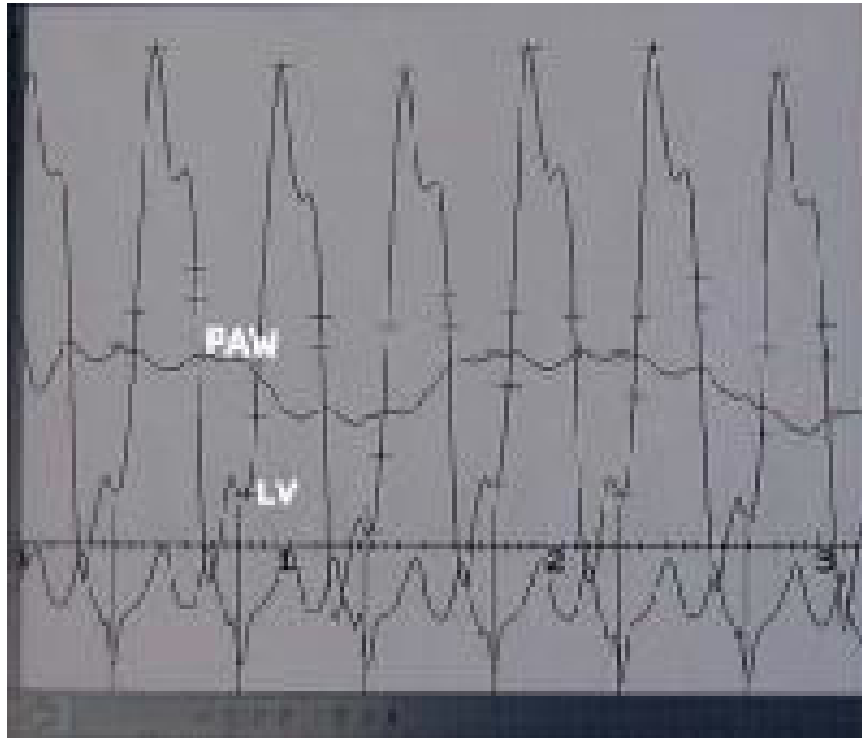


stejný tlak
komora-síň
v diastole

Simulátor

- <http://www.physiome.cz/atlas/cirkulace/05/SimpleUncontrolledSimulation.html>
- <http://physiome.cz/atlas/sim/SimulatorSrdceFaze/>

Příklady změn tlaků v cirkulaci při chlopenních vadách

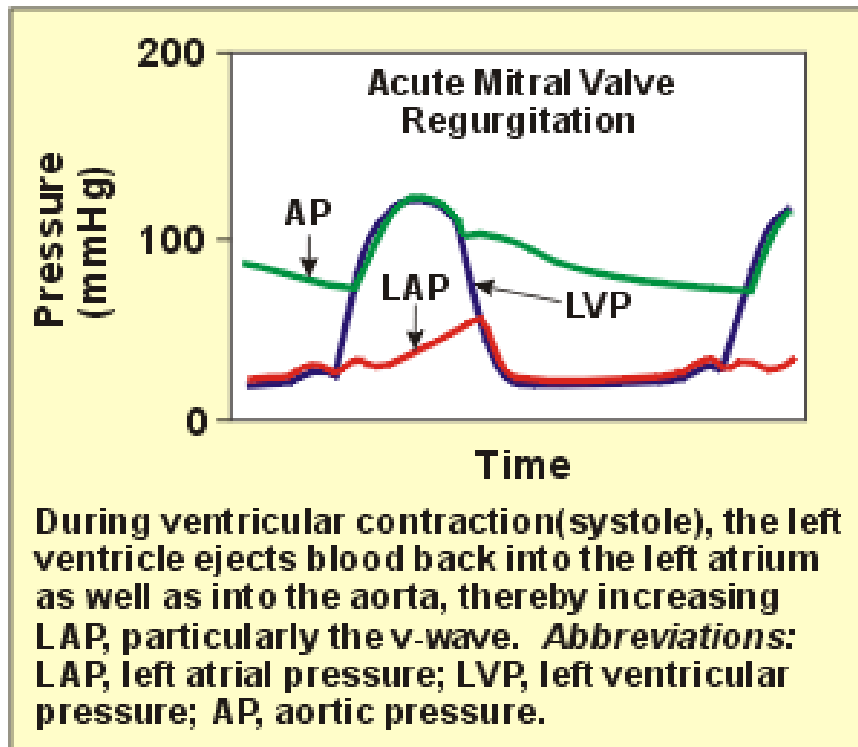


Mitrální stenóza

PAW je zvýšen (odráží tlak v LS), mezi tlakem v LS a diastolickým tlakem v LK je gradient

zvýšený tlak v LS zlepšuje diastolický průtok do LK, ale síň hypertrofuje atd.

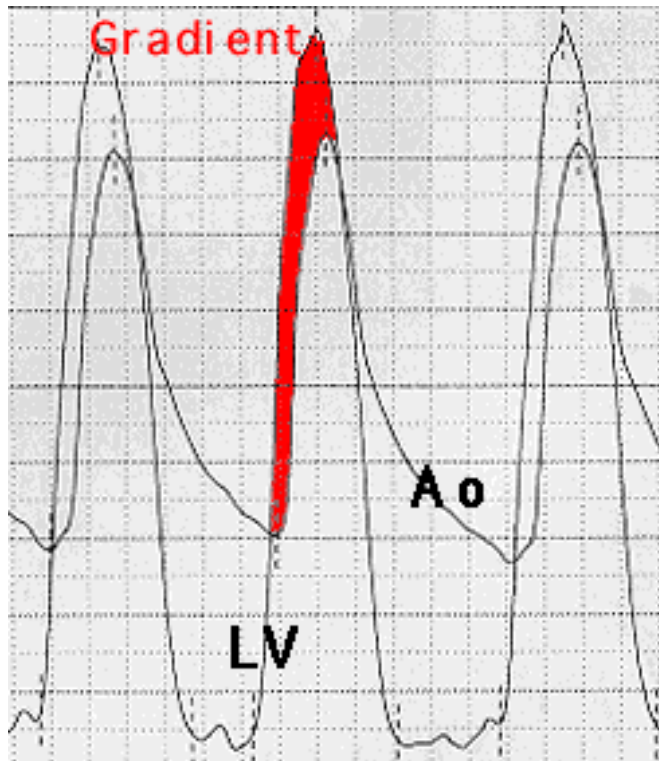
Zvýšený PAW může vést k plicnímu edému



Mitrální insuficience

dochází k výraznému vzestupu tlaku v LS při systole komory (návrat části krve nedomykavou chlopní)

výrazná dilatace LS

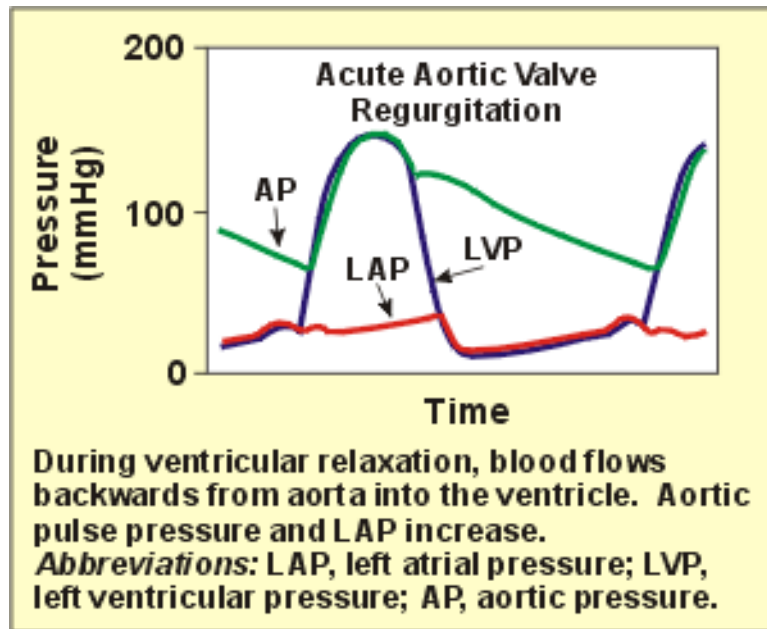


Aortální stenóza

v důsledku stenózy výrazně stoupá tlak v LK (LV) a převyšuje tlak v aortě (Ao)

vzniká tlakový gradient
(normálně se oba na vrcholu systoly rovnají)

LK výrazně hypertrofuje



Aortální insuficience

v důsledku zpětného toku klesá tlak aortě; kompenzatorně stoupá k udržení normálního středního tlaku systolický tlak

zvýšena tlaková amplituda

KAZUISTIKA 2

Pacient, 53 let

Příznaky:

náhle vzniklá silná bolest na hrudi s vyzařováním do levé
horní končetiny
úzkost, pocení

KAZUISTIKA 2

Podezření na *ischemickou chorobu srdeční* (ICHS)

Bolest vyvolána ischemií srdečního svalu

-bolest **přechodná** (v klidu ustoupí) – dočasná ischemie při větší námaze – *angina pectoris*

-bolest **trvalá**, silná, vznikající i v klidu – trvalá a úplná ! ischemie vedoucí k nekróze – *infarkt myokardu*

KAZUISTIKA 2

Vyšetřit zdali dochází k **poškození** myokardu:

- ischemizaci myokardu
- nekróze myokardu
- stanovit příčinu ischemie (stav koronárních tepen)

Zhodnotit i dopad na **funkci** myokardu:

- funkce jako *pumpy*
- elektrickou* stabilitu

Laboratorní vyšetření

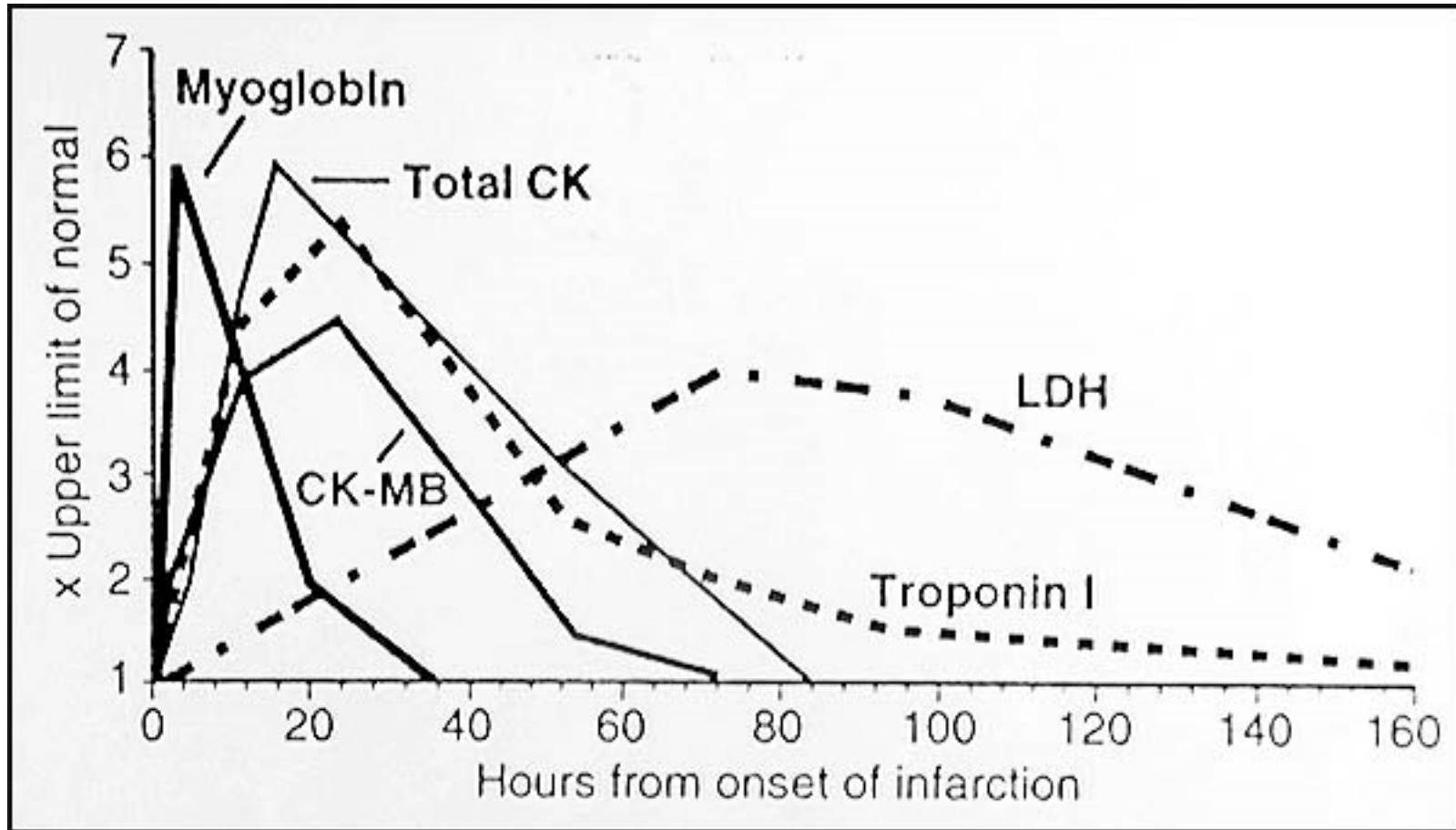
Diagnostika akutního *infarktu myokardu*:

(průkaz nekrotické tkáně a reakce organismu na ni)

- CK-MB,
- AST,
- LD,
- myoglobin,
- troponiny,
- leukocyty,
- FW

BNP (brain natriuretic peptide) při *srdečním selhání*

Biochemická dg. akutního IM

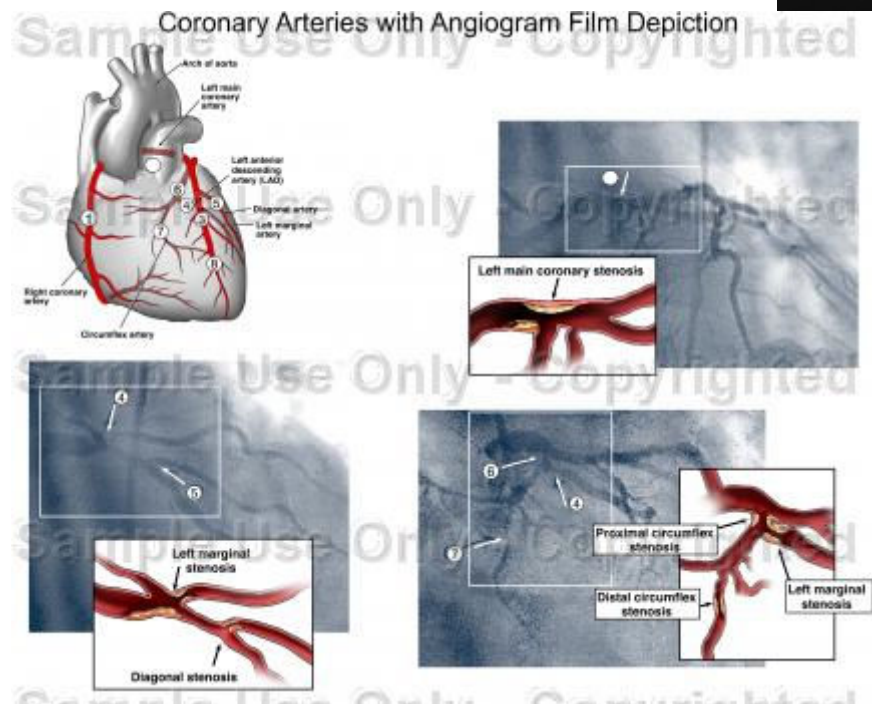
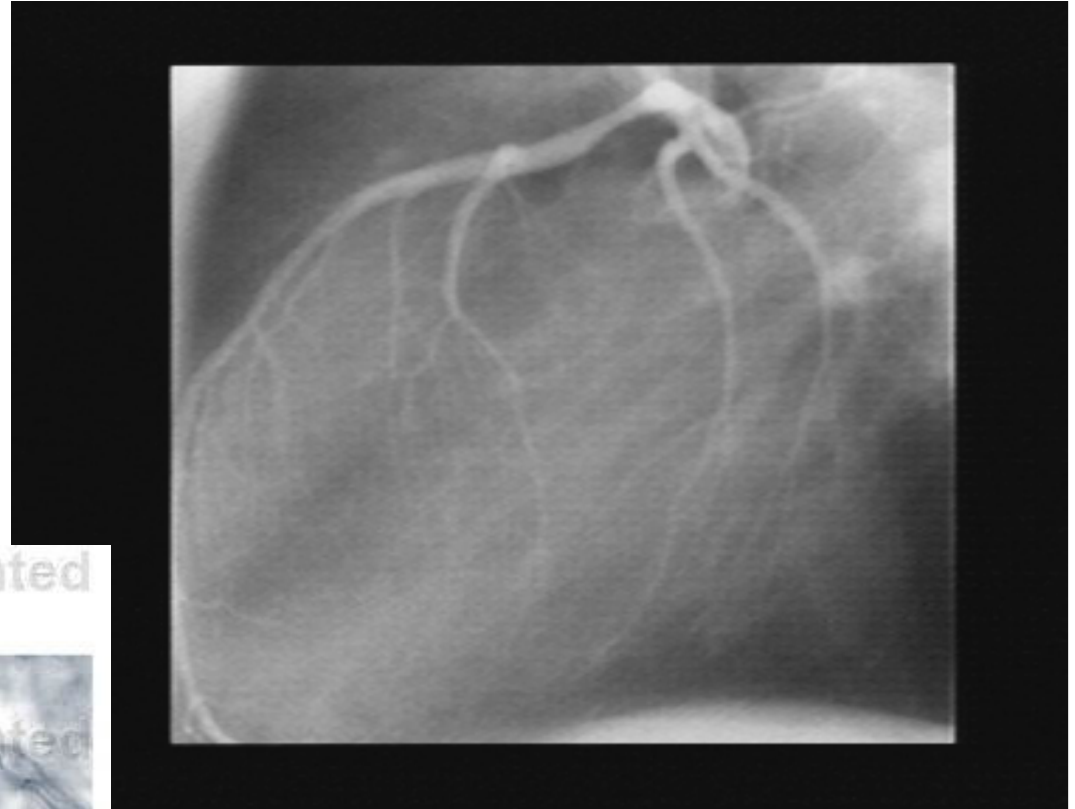


ČASNOST

PŘETRVÁVÁNÍ

SPECIFIČNOST

Koronarografie



Vyšetření POŠKOZENÍ × FUNKCE

Akutní *infarkt myokardu*:

je poškození (nekróza) srdečního svalu
může či nemusí výrazně ovlivňovat funkci srdce jako
pumpy

Srdeční selhání

vyšetření hemodynamiky a z jejích poruch vyplývajících
příznaků

Tyto rozdíly platí obecně i u jiných systémů !!

Vyšetřovací metody

- neinvazivní: např. ekg, echo..,
- invazivní: katetrizace

- klidové
- zátěžové

Zátěžové testy

- zrychlení srdeční frekvence a zvýšení nároků myokardu (event. i organismu) na kyslík
- fyzická aktivita (šlapání na kole, chůze...)
- farmakologicky navozená tachykardie

Ergometrie/ spiro-ergometrie



Přehled vyšetřovacích metod

klinické vyšetření, srdeční frekvence, TK, poslech...

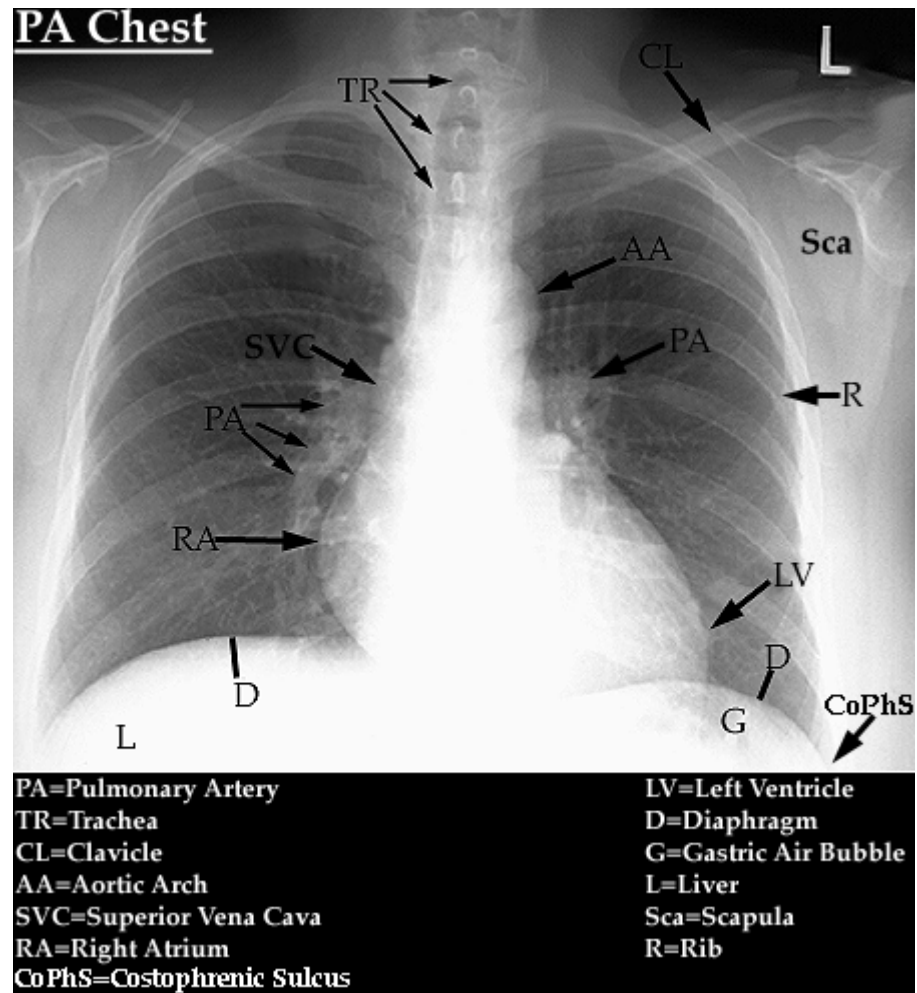
EKG, Holterovo monitorování

RTG hrudníku

srdeční stín – velikost a tvar (excentrická hypertrofie, dilatace – *srdeční selhání, chlopenní vady*)

náplň v malém oběhu (*městnání při selhávání LK*)

kalifikace, zejm. aorty, chlopní (*ateroskleróza, pozánětlivé chlopenní vady*)



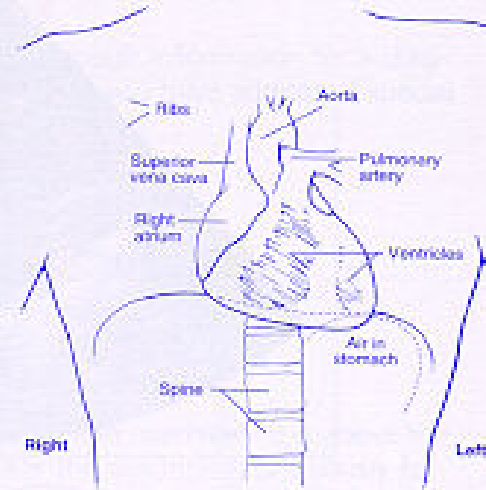
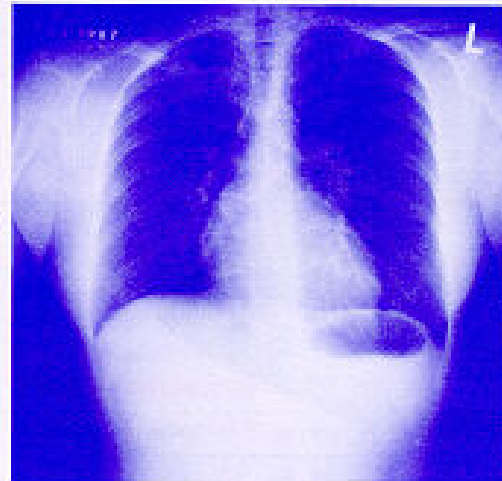


Figure 2.a Chest X-ray
Notice the position of the heart and its major vessels in the normal x-ray shown above.



Figure 2.b
Compare this x-ray of an abnormally enlarged heart with the one above.

Echokardiografie (jednorozměrná, dvourozměrná)

rozměry a pohyblivost určitých oblastí srdce (*tloušťka stěn a pohyblivost stěn myokardu, chopně, papilární svaly, velikost dutin srdce, perikard*)

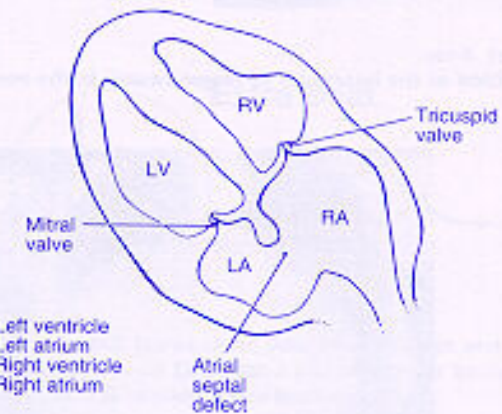
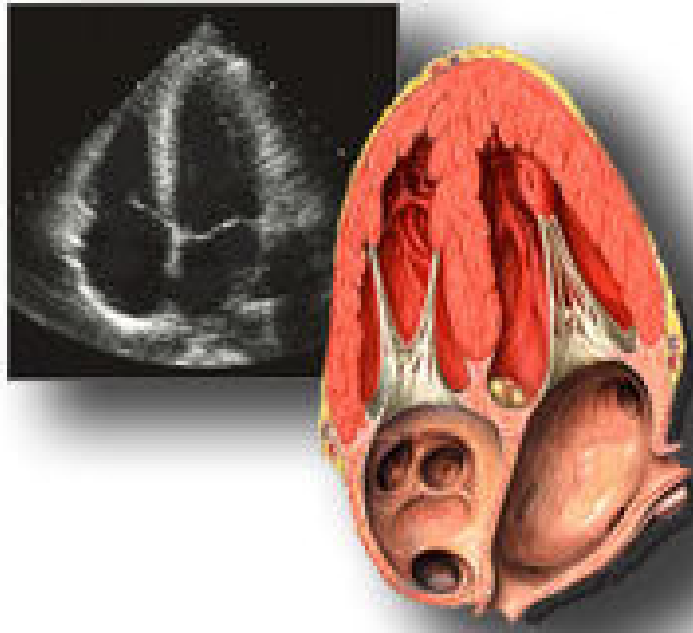
mechanické projevy ischemie: sledování kontraktility stěn myokardu – segmentární poruchy kinetiky (segmenty odpovídají oblastem zásobeným určitou větví koronárních tepen)

hypokineze, akineze, dyskineze

Dopplerovská echokardiografie

proudění krve v srdci, směr, rychlost, charakter proudění tlakové gradienty

EF (ejekční frakce), MSV (minutový srdeční výdej)

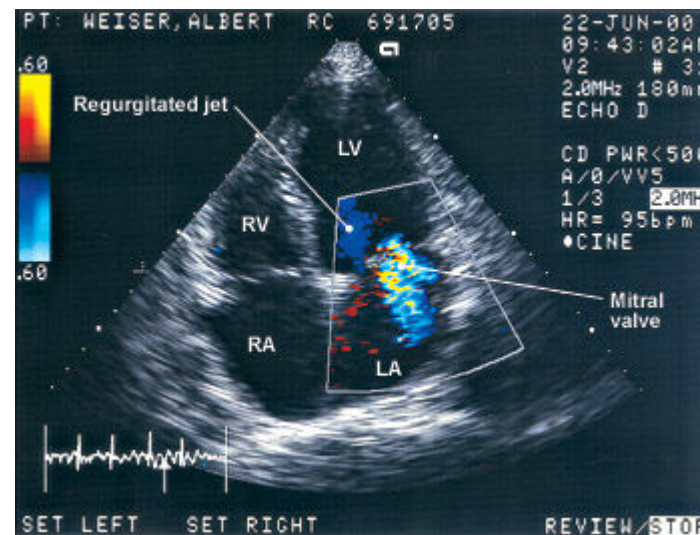
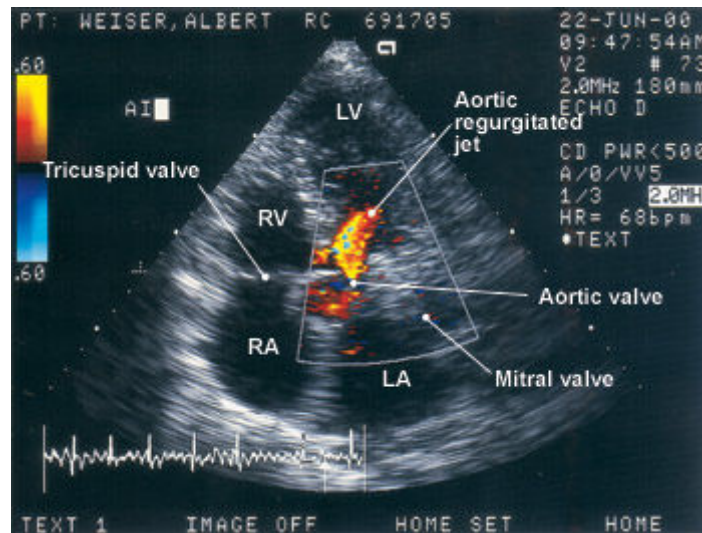


LV = Left ventricle
 LA = Left atrium
 RV = Right ventricle
 RA = Right atrium

Figure 3. Echocardiogram

Notice the difference between an echocardiogram and the chest x-ray above. An echo shows the internal chambers of the heart. The heart in this picture has an atrial septal defect (hole between the two upper chambers). The image is upside down, so the abnormality appears to be in the lower half of the heart.

Aortální insuficience (regurgitace)



Mitrální insuficience (regurgitace)

Invazivní vyšetřování – katetrizace

- * měření tlaků – tlak v zaklínění, tlaky v jednotlivých srdečních oddílech

Swanův-Ganzův plovoucí katetr (PCW)

- * odběr vzorků krve k vyšetření saturace kyslíkem

- * měření SV

- * biopsie

Izotopová vyšetření

Perfúzní thaliový scan (Tl^{201})

kinetika obdobná draslíku, vstup do buněk (ischemické oblasti jsou méně perfundované)

diagnostika ischemie, možné i po zátěži

Izotopová ventrikulografie

Zobrazovací metody

CT (počítačová tomografie)

MRI (magnetická rezonance)

PET (pozitronová emisní tomografie) – hodnocení metabolismu myokardu

Zátěžové testy v kardiologii

Některé poruchy se v kardiologii projeví až při zátěži

Zátěž:

- zvyšuje spotřebu kyslíku v organismu**
- zvyšuje nárok na oběh**
- zvyšuje nárok na srdeční frekvenci (tachykardie)**

Nemocné srdce nemusí zvládat

Při tachykardii se zkracuje diastola !!

- zkracuje se doba plnění komor**
- zkracuje se doba pro prokrvení myokardu koronárními tepnami**

Ergometrie

klinické a elektrické projevy ischemie - diagnóza nebo stanovení funkční kapacity
EKG, puls, TK, klinické projevy

Zátěžová echokardiografie

ICHS – při méně jasných stavech jako doplněk dg. procesu, u již známé nemoci k zjištění rozsahu funkčního poškození neischemické nemoci – chlopenní vady, srdeční selhání...

Zátěžový thaliový scan

Zátěž:

obv. od 25–75 W stupňování o 25 i více W, cca
do 150–300 W

(150 W dobrý výkon, 50 W výrazně omezuje
běžný život)

* farmakologické:

vazodilatační – dipyridamol, adenosin

sympatomimetika – dobutamin, arbutamin

* stimulační – jícnová stimulace

Spotřeba kyslíku

klidová – cca 3,5 ml/kg/min = **MET** (metabolická jednotka, metabolický ekvivalent)

maximální – **maximální aerobní kapacita (VO_2max)**:
limitována schopností oběhového systému, je ovlivněna
tréninkem, věkem, pohlavím, nemocí
mladí muži cca 12 MET, ženy cca 10 MET
do 25% lehká zátěž

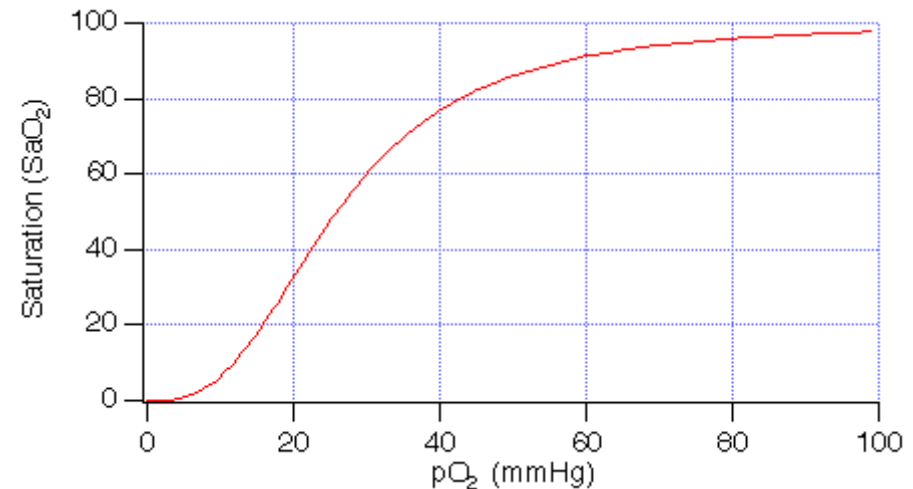
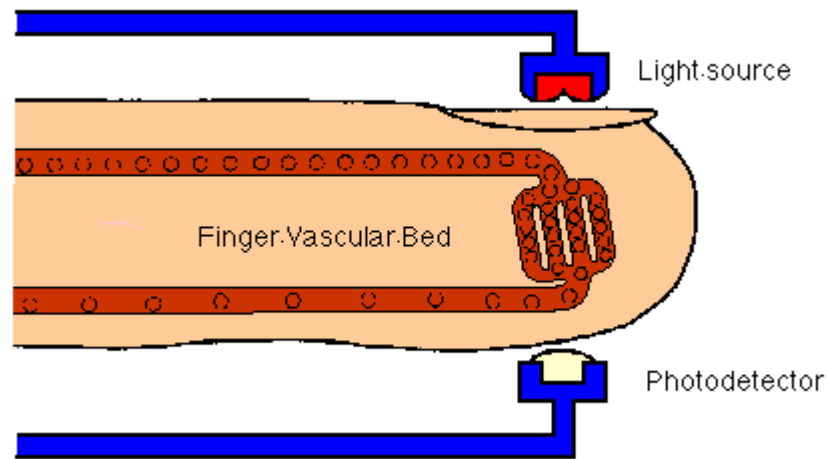
anaerobní práh – stav, kdy dochází k rovnováze mezi
tvorbou a odbouráváním laktátu (u zdravých netrénovaných
50-60% VO_2max)

Tab. 2.2.3 Fyziologické hodnoty VO_2 max. pro různé věkové skupiny (ml/kg/min)

věk	muži	ženy
20-29	$43 \pm 7,2$ 12 METs	$36 \pm 6,9$ 10 METs
30-39	$42 \pm 7,0$ 12 METs	$34 \pm 6,2$ 10 METs
40-49	$40 \pm 7,2$ 11 METs	$32 \pm 6,2$ 9 METs
50-59	$36 \pm 7,1$ 10 METs	$29 \pm 5,4$ 8 METs
60-69	$33 \pm 7,3$ 9 METs	$27 \pm 4,7$ 8 METs
70-79	$29 \pm 7,3$ 8 METs	$27 \pm 5,8$ 8 METs

Pulsní oxymetrie

měření saturace arteriální krve (S_aO_2) neinvazivní metodou, zejm.
opticky
detektor se umístí na obv. prst



Měření kyslíkové spotřeby

- není běžně měřeno
- má význam k zjištění tolerance zátěže u nemocných, ale třeba i u sportovců

Složitost spočívá v nutnosti analyzovat obsah kyslíku

Stupňovaná fyzická zátěž + měření kyslíku

$$VO_2 = VE \times (FiO_2 - FeO_2)$$

VE – minutová ventilace

Fi – inspirační frakce

Fe – expirační frakce