

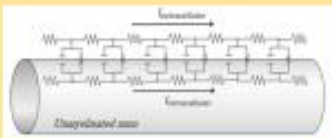
Patofyziologické principy oxygenoterapie a umělé plicní ventilace

MUDr. MSc. Michal Šitina, PhD.

Ústav patologické fyziologie, MUNI
Anesteziologicko-resuscitační klinika, FNUSA
Oddělení biostatistiky, ICRC-FNUSA



$$\lambda^2 \cdot \frac{\partial^2 V_m(x,t)}{\partial x^2} - \tau_m \cdot \frac{\partial V_m(x,t)}{\partial t} - V_m(x,t) = 0$$



```
for i in 1: 11, 2, 3, 4, 5:
    print(i*i, end=" ")
1 55 4 55 9 55 16 55 25 55
```

Ústav patologické
fyziologie**Co se naučíte?**

- ❖ matematický popis fyziologických systémů
- ❖ jeho analytické či numerické řešení
- ❖ analyzovat důsledky modelu za fyziologických a patologických okolností
- ❖ integrovat biologické znalosti s matematickým popisem

Co ještě?

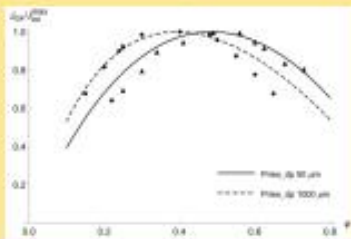
- ❖ trochu matematiky
- ❖ základy programovacího jazyka Python
- ❖ modelovací prostředí OpenModelica

Kdy?

- ❖ 1x týdně 2 hodiny
- ❖ jarní semestr
- ❖ 3 kredity

$$J_{ax} = k \Delta p \frac{\varphi}{\eta(\varphi)} \Rightarrow 0 = \left. \frac{\partial J_{ax}}{\partial \varphi} \right|_{\Delta p} = \frac{k' \Delta p}{\eta^2(\varphi)} (\eta(\varphi) - \varphi \eta'(\varphi))$$

$$\Rightarrow \varphi_{max} = \frac{\eta(\varphi_{max})}{\eta'(\varphi_{max})}$$

**Co budeme probírat? Např.**

- ❖ vlnová rovnice pro šíření tlakové vlny v tepnách
- ❖ teorie optimálního hematokritu
- ❖ akční potenciál jako vybíjení kondenzátoru
- ❖ šíření akčního potenciálu jako vlny
- ❖ metabolické reakce jako soustava algebraických rovnic
- ❖ kinetika množení bakterií
- ❖ modelování regulačních systémů
- ❖ pravděpodobnost chyby v eliminaci autoreaktivních T-lymfocytů v thymu
- ❖ rovnice pro saturační křivku hemoglobinu
- ❖ odvození obrazu EKG "ab initio" z Coulombova zákona

Co z matematiky?

- ❖ derivace, parciální derivace, integrály
- ❖ obyčejné diferenciální rovnice (DR)
- ❖ soustavy obyčejných DR
- ❖ představa o parciálních DR
- ❖ základy lineární algebry
- ❖ Fourierova transformace
- ❖ náhodné veličiny a pravděpodobnost

Zkouška? Ne! Projektová práce, např.

- ❖ Windkessel modely cévního řečiště
- ❖ matematický model dialýzy
- ❖ vliv koncentrace urey na koncentrační schopnost ledvin
- ❖ objasnění tzv. vazodilatační kaskády mozku při nitrolební hypertenzi
- ❖ model rozvoje rezistence bakterií na antibiotika
- ❖ kinetika genových mutací v průběhu evoluce
- ❖ Stewart-Fenclov přístup k acidobazické rovnováze

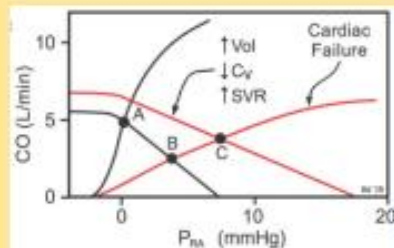
Matematická (pato)fyziologie

Kdy?

- ❖ 1x týdně 2 hodiny
- ❖ jarní semestr
- ❖ 3 kredity

Co budeme probírat? Např.

- ❖ vlnová rovnice pro šíření tlakové vlny v tepnách
- ❖ teorie optimálního hematokritu
- ❖ akční potenciál jako vybíjení kondenzátoru
- ❖ šíření akčního potenciálu jako vlny
- ❖ metabolické reakce jako soustava algebraických rovnic
- ❖ kinetika množení bakterií
- ❖ modelování regulačních systémů
- ❖ pravděpodobnost chyby v eliminaci autoreaktivních T-lymfocytů v thymu
- ❖ rovnice pro saturační křivku hemoglobinu
- ❖ odvození obrazu EKG "ab initio" z Coulombova zákona

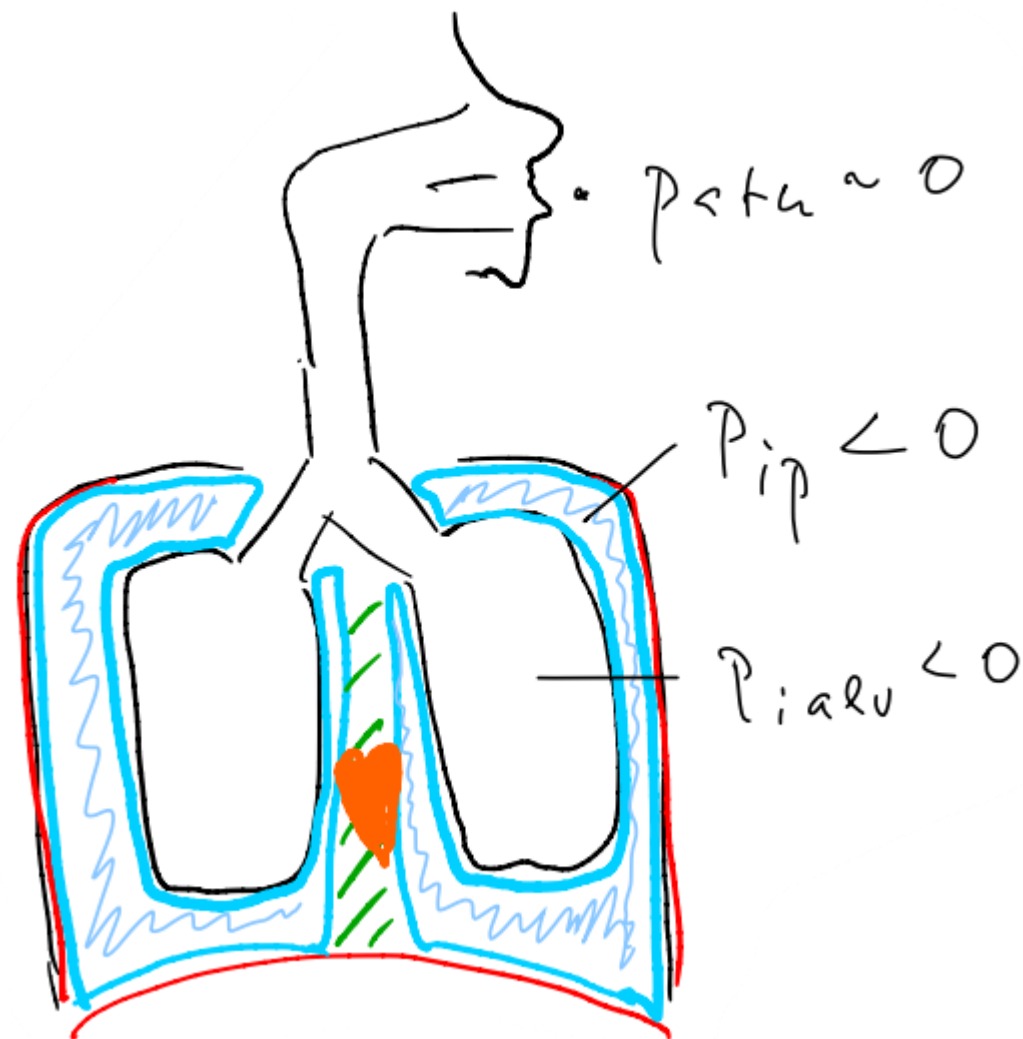


Obsah semináře

1. Připomenutí základů respirační fyziologie a patofyziologie
2. Oxygenoterapie
3. Umělá plicní ventilace (UPV)
4. Neinvazivní plicní ventilace (NIV)
5. Vysokodávkovaný kyslík (High-flow nasal oxygen, HFNO)
6. Extrakorporální membránová oxygenace (ECMO)
7. Apnoická ventilace

Mechanika spontánního dýchání

- tlak v oblasti rtů přibližně 0
- aktivní nádech
 - bránice, mezižeberní svaly
 - negativní intrapleurální tlak
- spontánní výdech
 - pozitivní intrapleurální tlak



Podstatné veličiny a termíny

- FiO_2 (21 %)
- PaO_2 (> 80 mmHg, hypoxémie vs. hypoxie)
- $PaCO_2$ (35-45 mmHg, hypo/normo/hyperkapnie)
- dechový objem (\approx 500 ml)
- dechová frekvence (\approx 12-16/min)
- anatomický mrtvý prostor (150 ml)

6 l
↓
4 l

Respirační insuficience

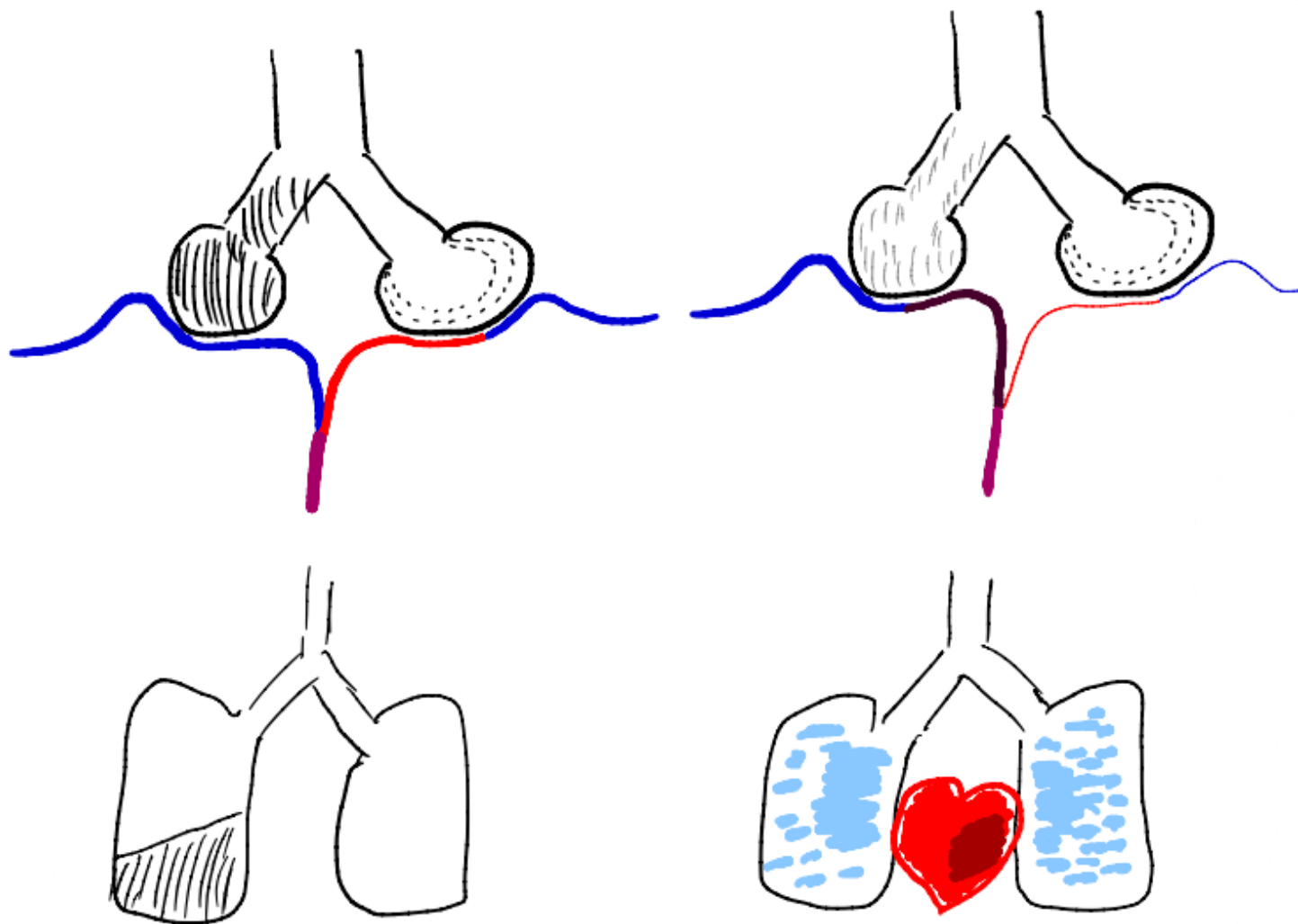
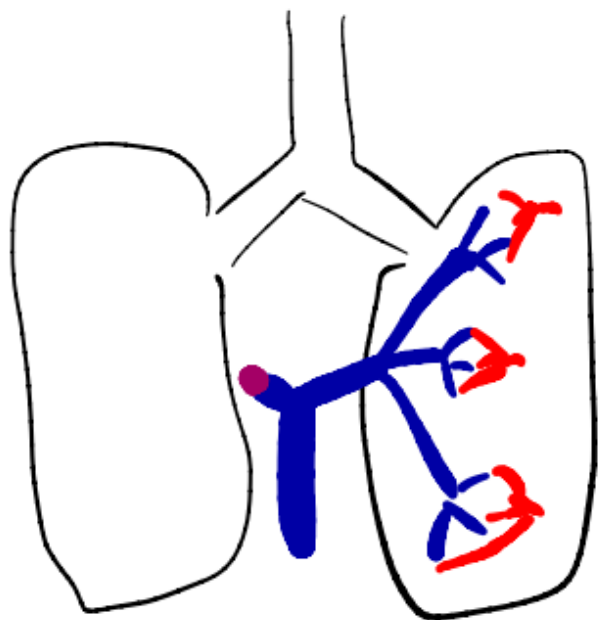
- 1. typu – oxygenační dysfunkce - hypoxémie bez hyperkapnie
- 2. typu – ventilační dysfunkce – hyperkapnie + hypoxémie

Mechanismy respirační insuficience

- alveolární hypoventilace
- porucha difuze přes alveolokapilární membránu
- intrapulmonální (či extrapulmonální) zkrat
- ventilačně-perfúzní nepoměr (V/Q mismatch)

Mechanismy respirační insuficience

- hypoventilace, difuze, zkrat, V/Q mismatch



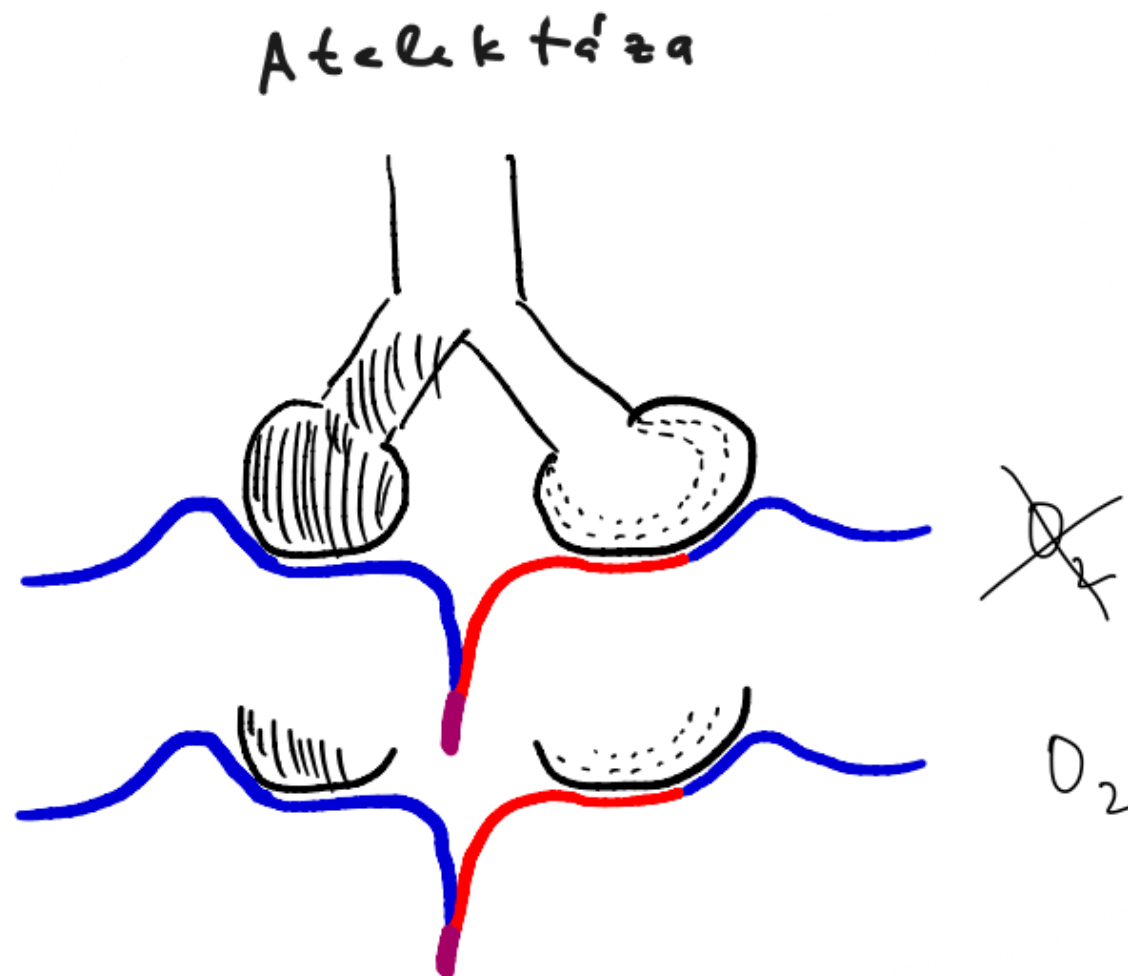
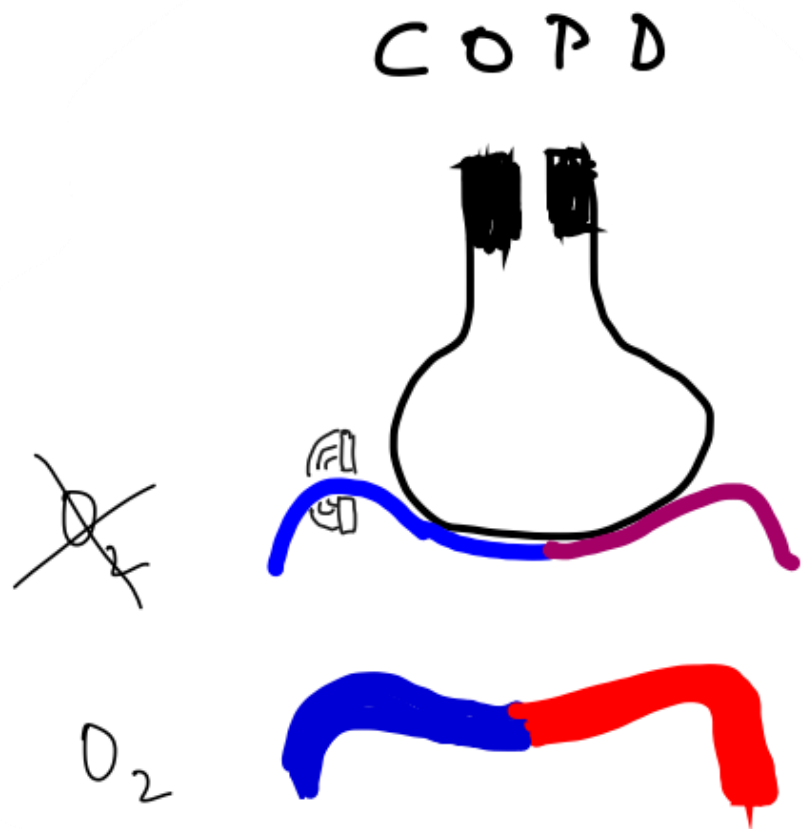
Oxygenoterapie

- podávání kyslíku
- princip: zvýšení FiO_2
- koriguje hypoxémii
- nekoriguje či dokonce zhoršuje hyperkapnii
- někdy je téměř bez efektu



Oxygenoterapie

- Proč zhoršuje hyperkapnií?
- Proč je někdy téměř bez efektu?



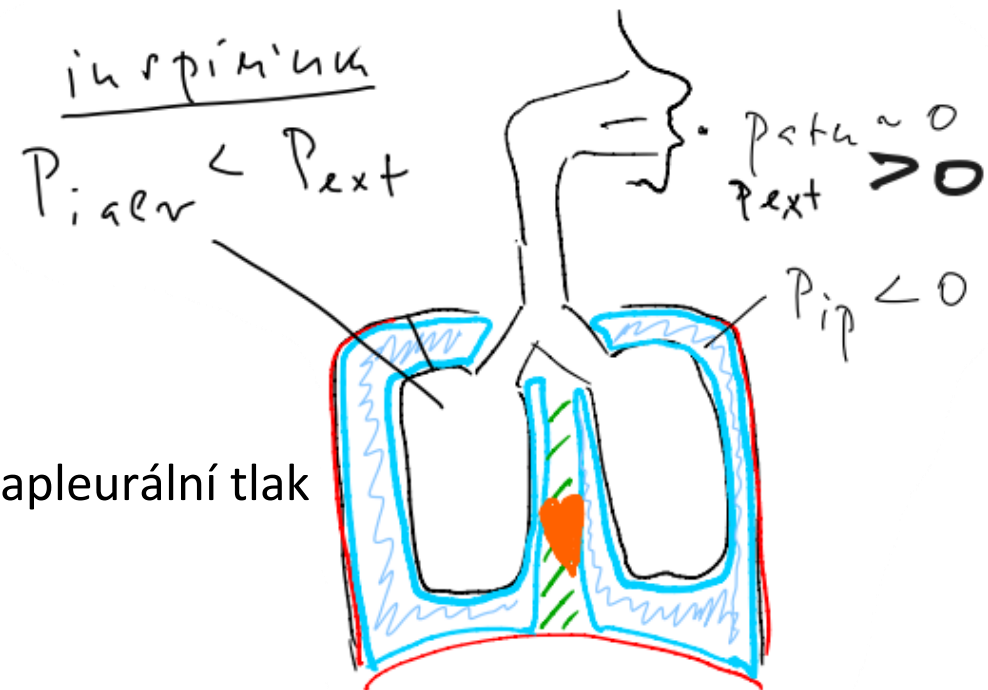
Umělá plicní ventilace

- ventilace pomocí ventilátoru, který zčásti nebo zcela přebírá dechovou činnost pacienta
- cíle
 - úprava oxygenace
 - úprava hyperkapnie
 - snížení dechové práce
 - oběhová stabilizace
 - ochrana dýchacích cest
 - provedení operace
 - ...

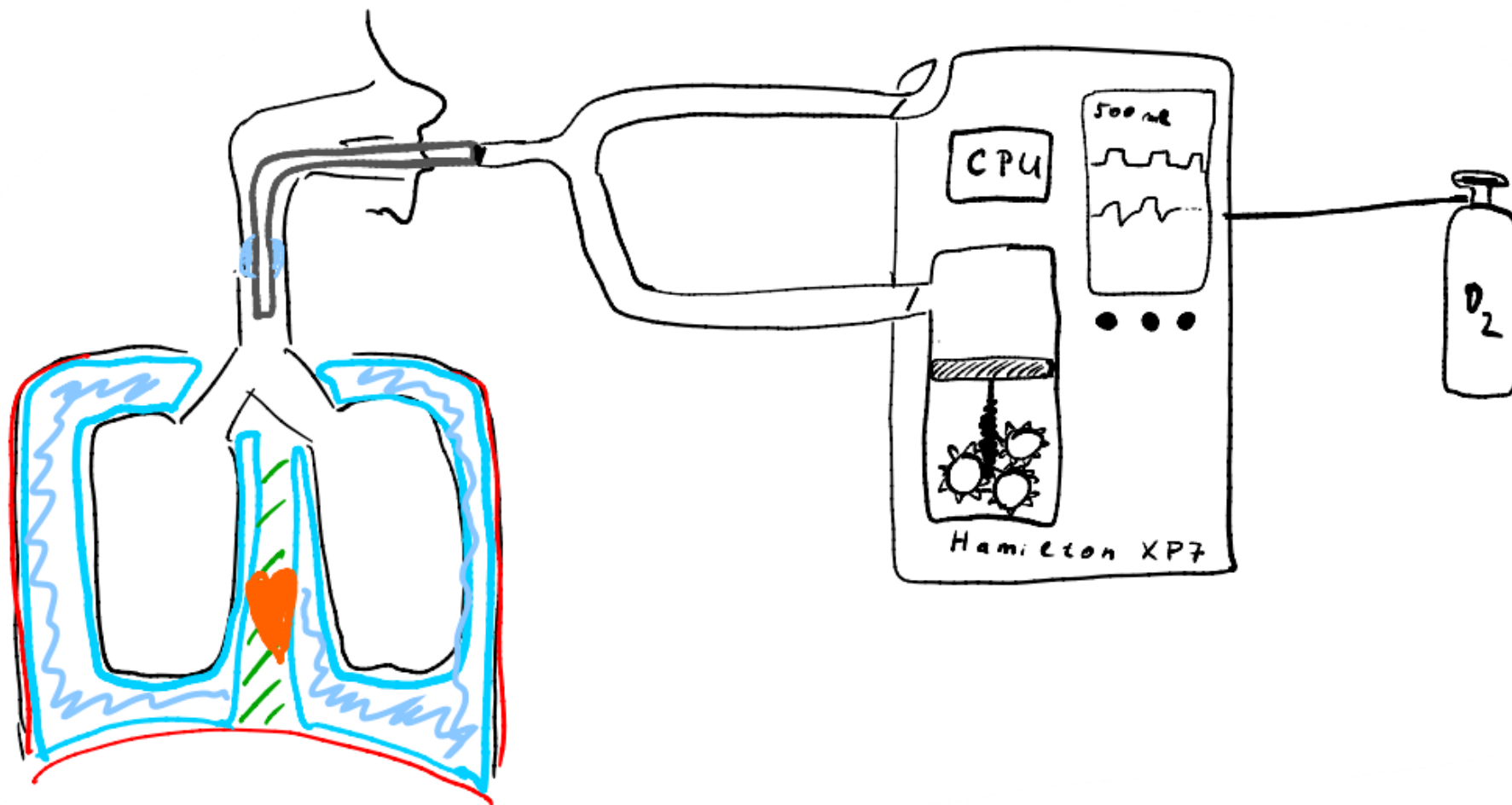


Princip umělé plicní ventilace

- aktivní inspirium
 - pozitivní tlak v dýchacích cestách, vyšší než intrapleurální tlak
- pasívní exspirium
 - jako u spontánního dýchání
- existuje řada způsobů (tzv. režimů) ventilace (ventilace objemově řízená, tlakově řízený, podpůrná, triggerovaná...)
- nevhodná ventilace může výrazně poškodit plíce (VILI, VALI, SILI)



Princip umělé plicní ventilace



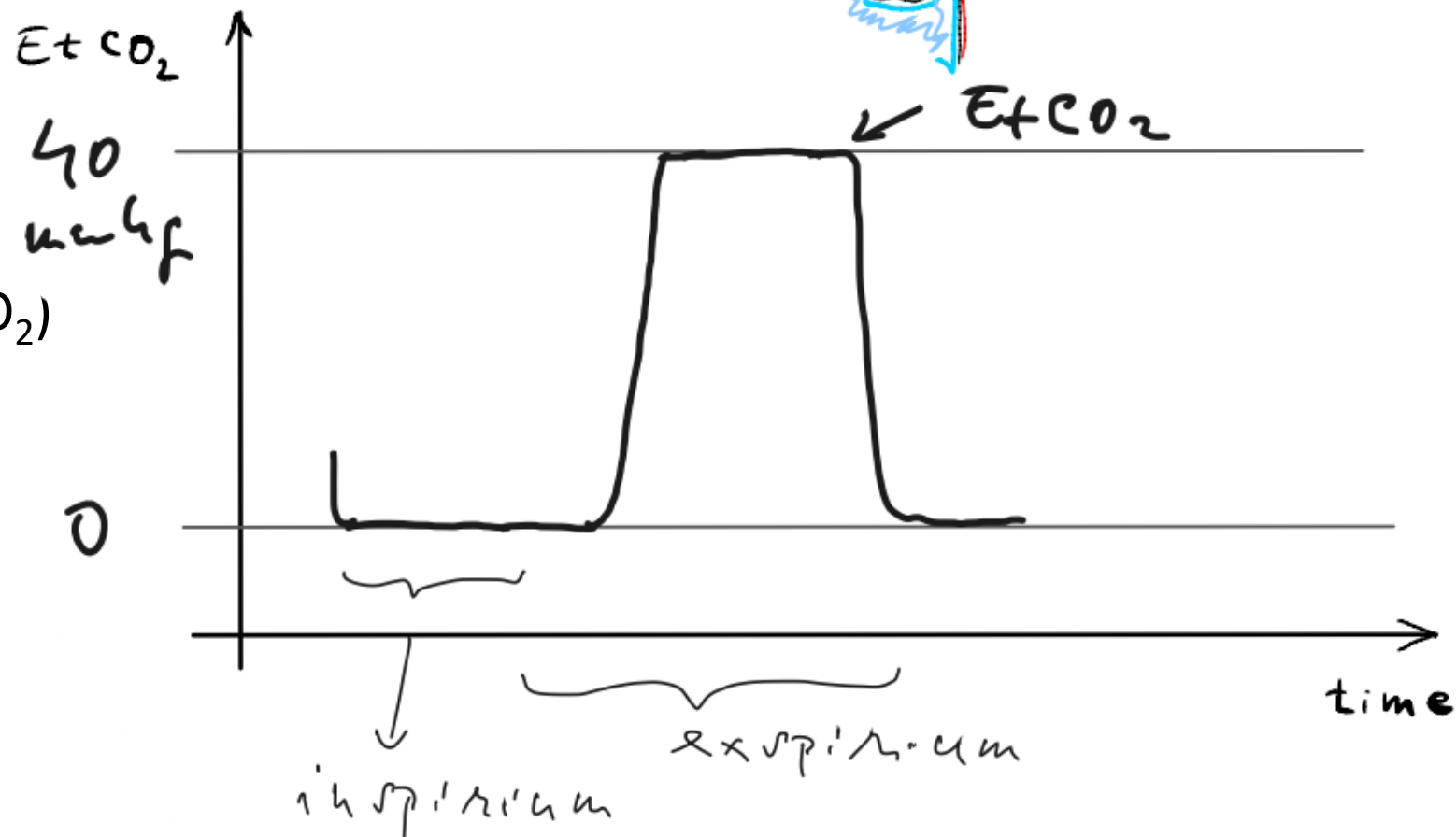
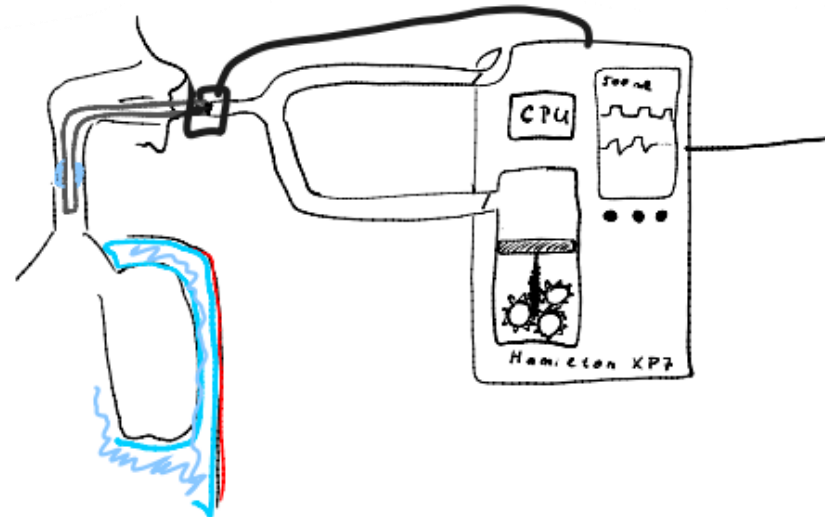
S čím můžeme u ventilátoru manipulovat?

- FiO_2
- PEEP (positive end-expiratory pressure)
- dechový objem
- vrcholový tlak
- dechová frekvence
- poměr trvání inspirium/expirium
- hladina triggerování
- ...

Co monitorujeme?

- SaO₂
- krevní plyny
- EtCO₂ (end-tidal CO₂)
- tlaky
- objemy
- průtoky
- odpovídající křivky
- ...

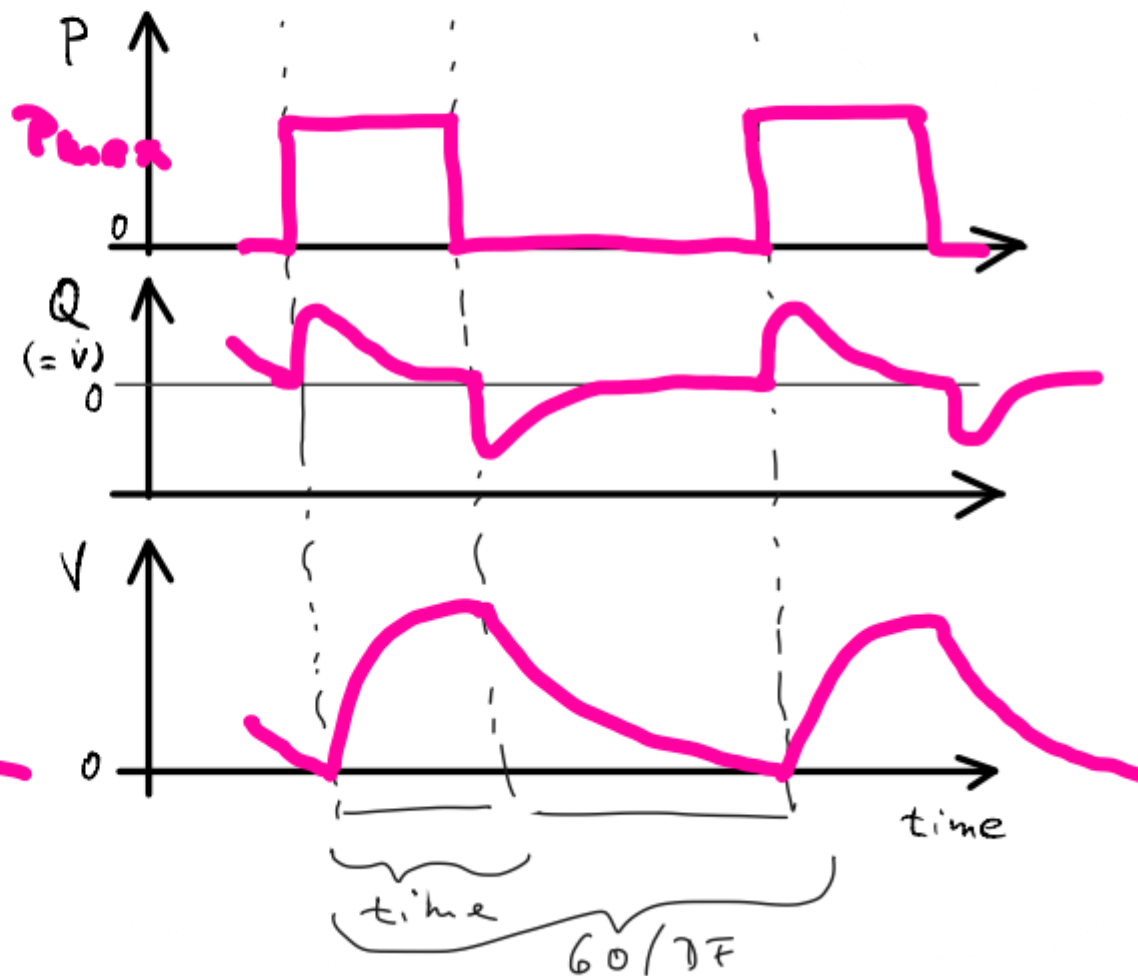
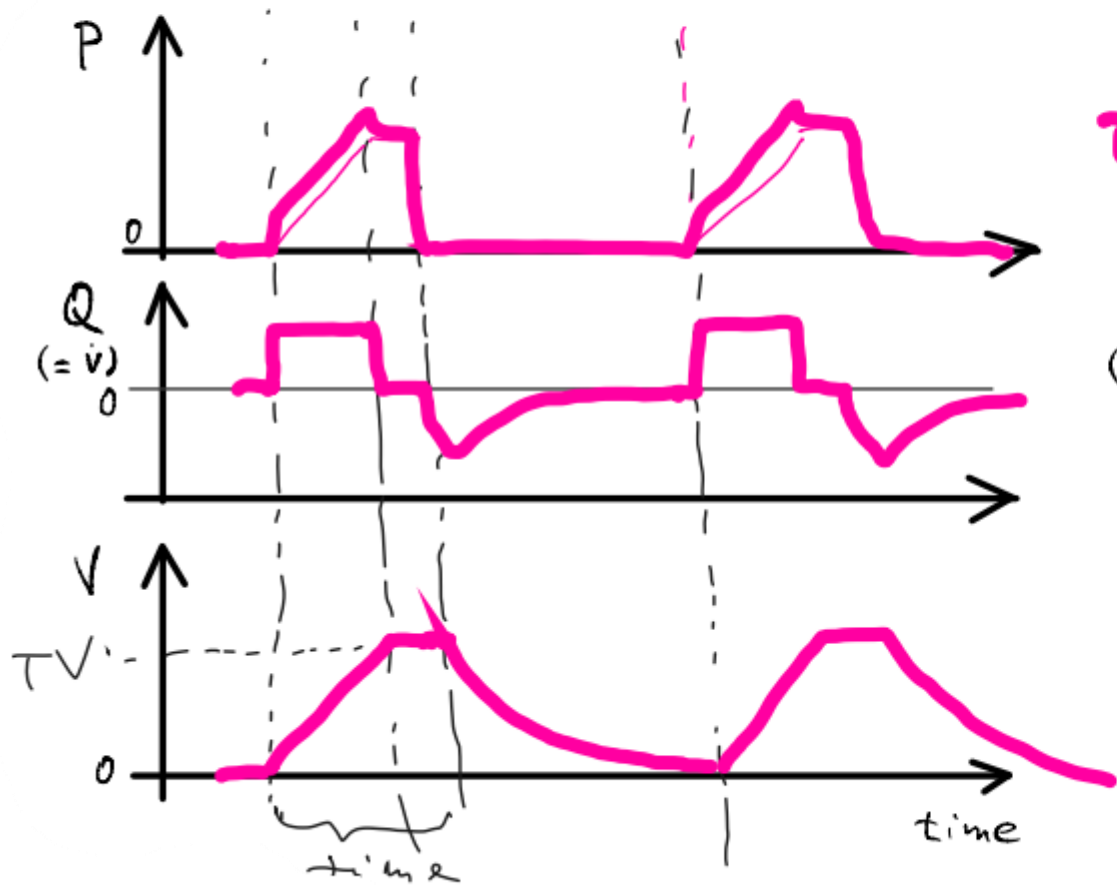
kapnometrie



$\Delta F, TV, time$
Objemově řízená ventilace (CMV)

Křivky UPV

$\Delta F, time, P_{max}$
Tlakově řízená ventilace (PCV)

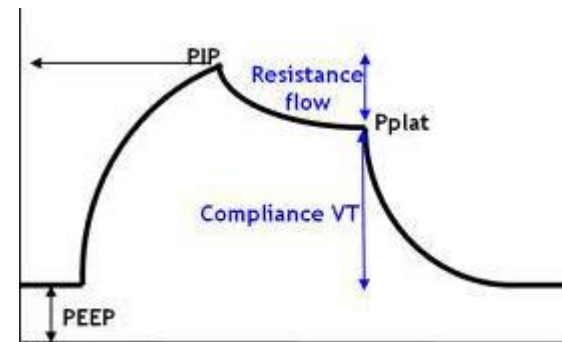


PEEP (positive end-expiratory pressure)

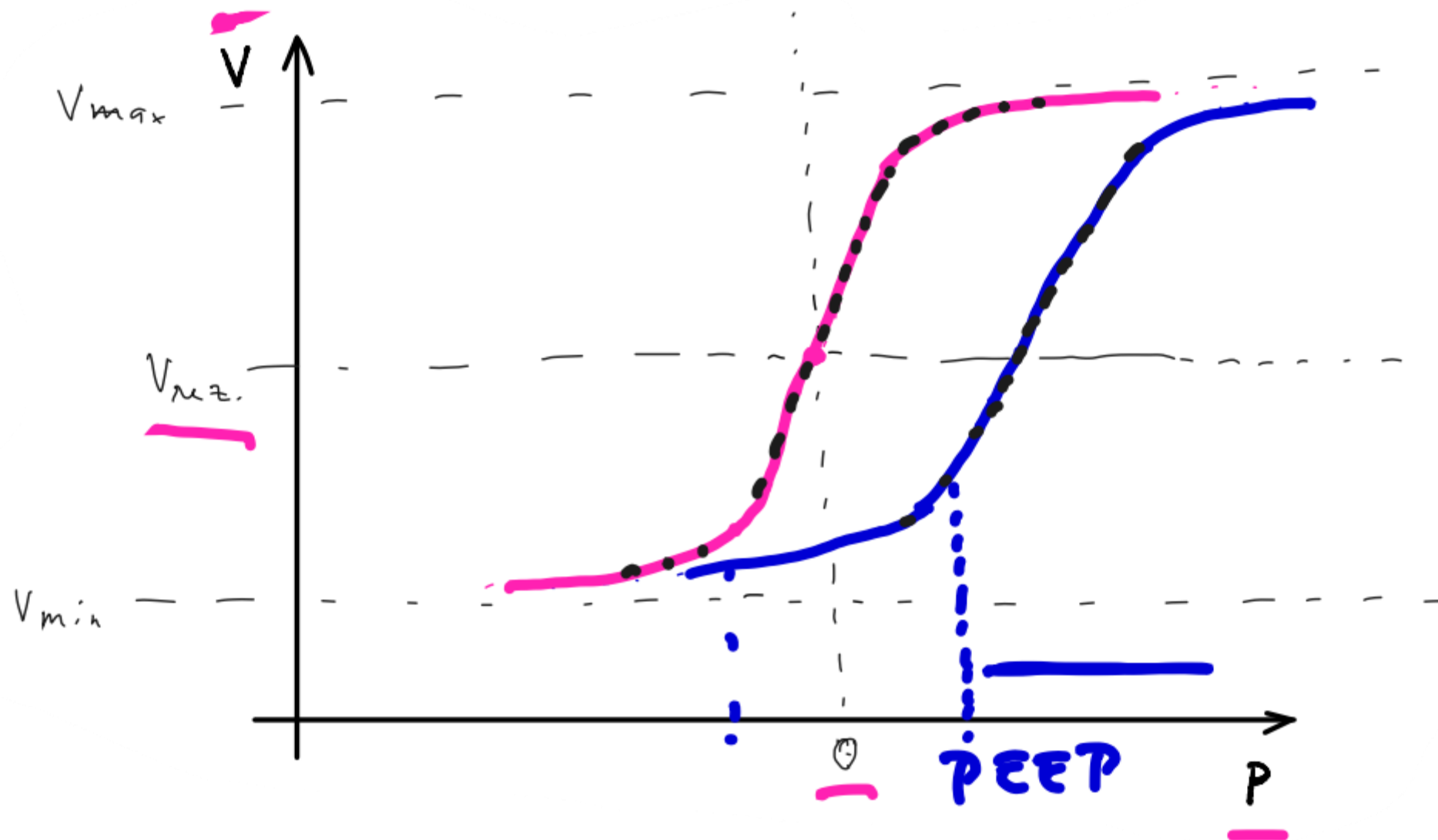
- nejnižší tlak v dýchacích cestách
- zabraňuje kolabování alveolů (tzv. atelektázám)
- udržuje rozepjaté bronchy

- příliš nízké i příliš vysoké hodnoty škodí
- nutné najít optimum

- výrazně ovlivňuje kardiovaskulární systém



p-V křivka a PEEP



Ovlivnění kardiovaskulárního systému

- snižuje přítok krve k srdci a tím minutový srdeční výdej
- ovlivňuje plicní hypertenzi a tím funkci pravé komory
- může pomoci selhávající levé komoře
- snižuje spotřebu kyslíku v dýchacích svalech

Ovlivnění ostatních systémů

- výrazně ovlivňuje acidobazickou rovnováhu (CO₂)
- snižuje prokrvení ledvin a zvyšuje retenci tekutin
- zvyšuje nitrobřišní tlak a snižuje prokrvení splanchniku
- může zvýšit nitrolební tlak
- „motor“ multiorgánového selhání

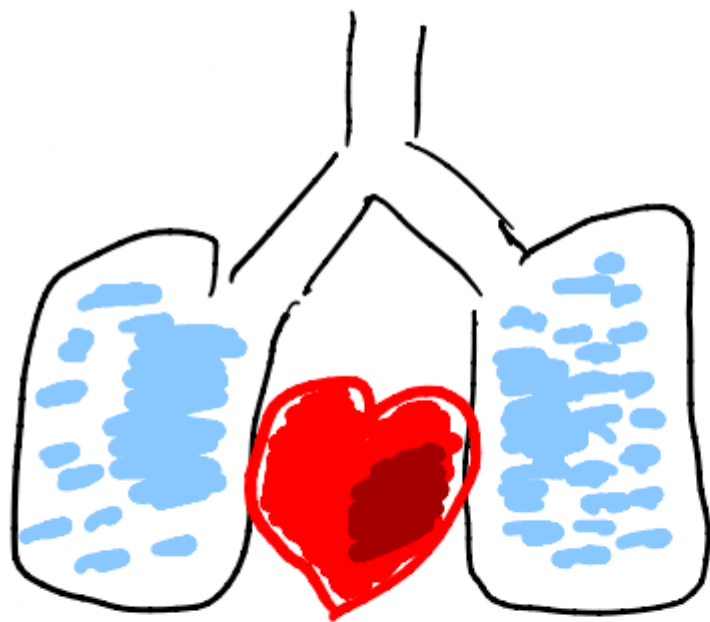
Jak UPV poškozují plíce (VILI, VALI, SILI)?

- přílišné rozepjetí trhá plicní struktury
 - sekundární zánětlivá reakce, podpora fibrotizace
 - zvýšená permeabilita pro bakterie
 - motor multiorgánové dysfunkce
 - baby lung koncept - ARDS
- riziko perforace plíce v oslabeném místě
 - pneumothorax, pneumomediastinum
- střížné síly na rozhraní ventilovaných a neventilovaných oblastí plic
- eliminace přirozených imunitních bariér
 - ventilátorová pneumonie (VAP vs. HAP vs. CAP)
- rizika spojená s intubací a zajištěním dýchacích cest
- podpora rozvoje svalové slabosti kriticky nemocných
- nutnost sedace

Příklady použití UPV v klinických situacích

- Plicní edém při akutním infarktu myokardu
- Akutní exacerbace CHOPN
- Intubace a UPV u polytraumatu
- Masívní plicní embolie
- ARDS – COVID-19 pneumonie

Plicní edém při akutním infarktu myokardu



30%
170 l/min

60% → 70%
3F 45 l/min



OTI → KP V

PEEP ~ 15 cmH₂O

↓ duch. práce = 0

~~2F O₂~~

→ stabilizace

O_2 6l/min

Akutní exacerbace CHOPN

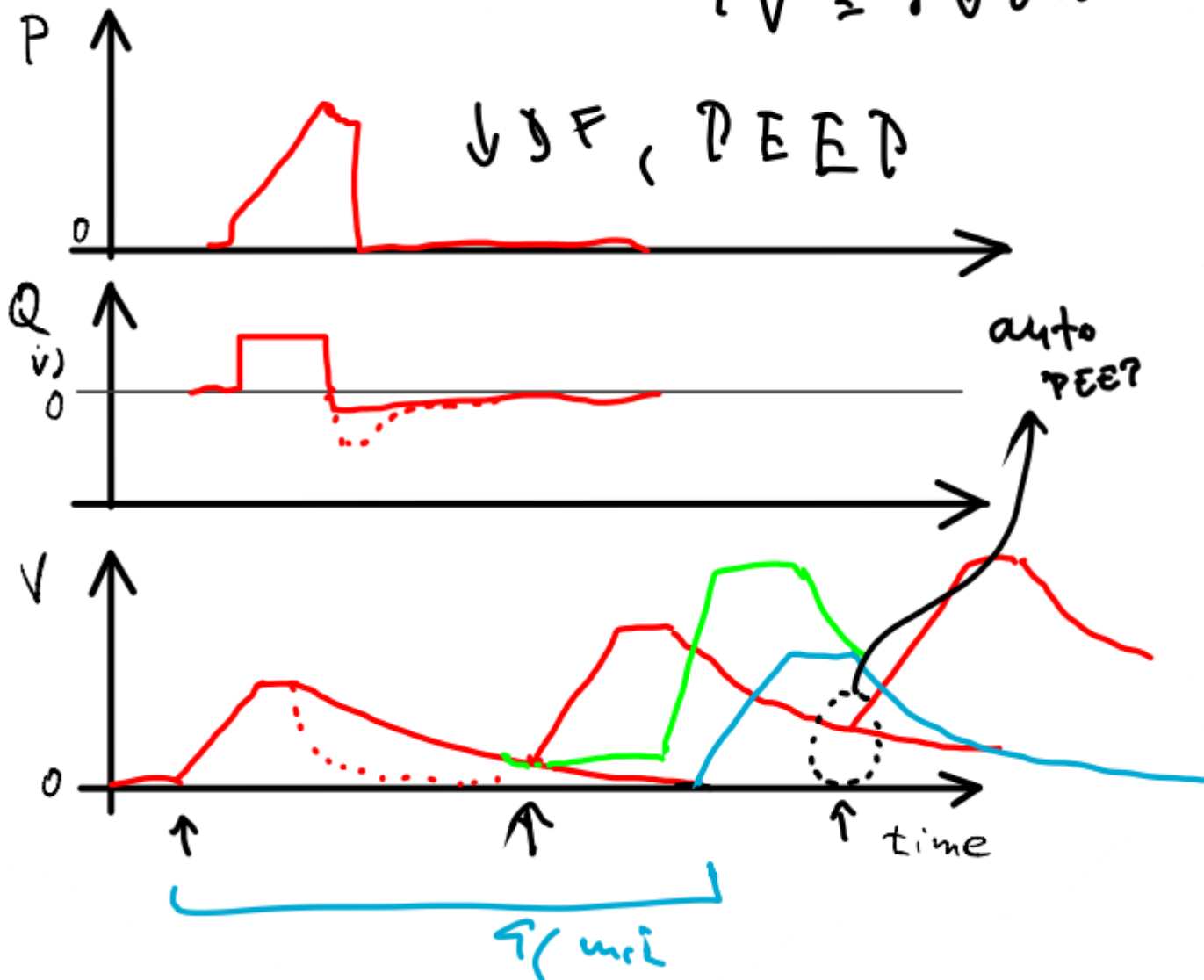
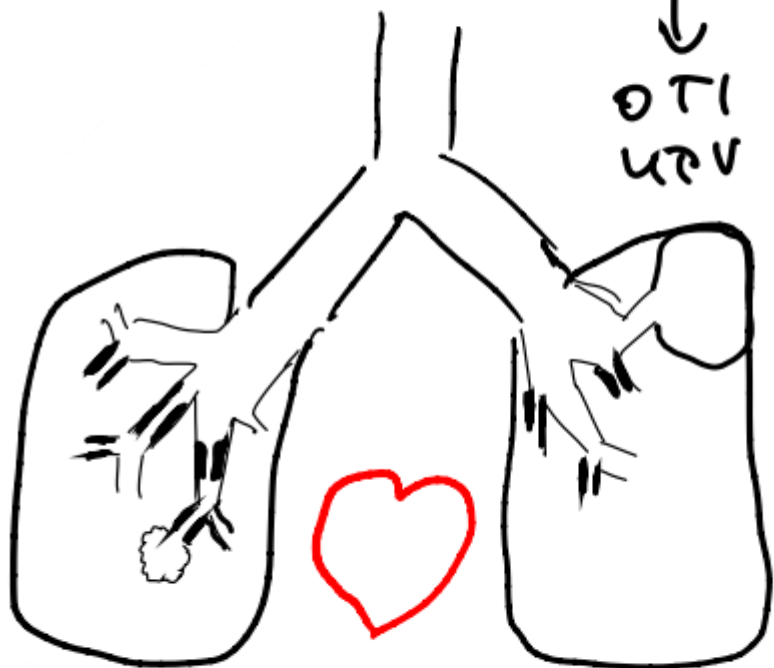
DF

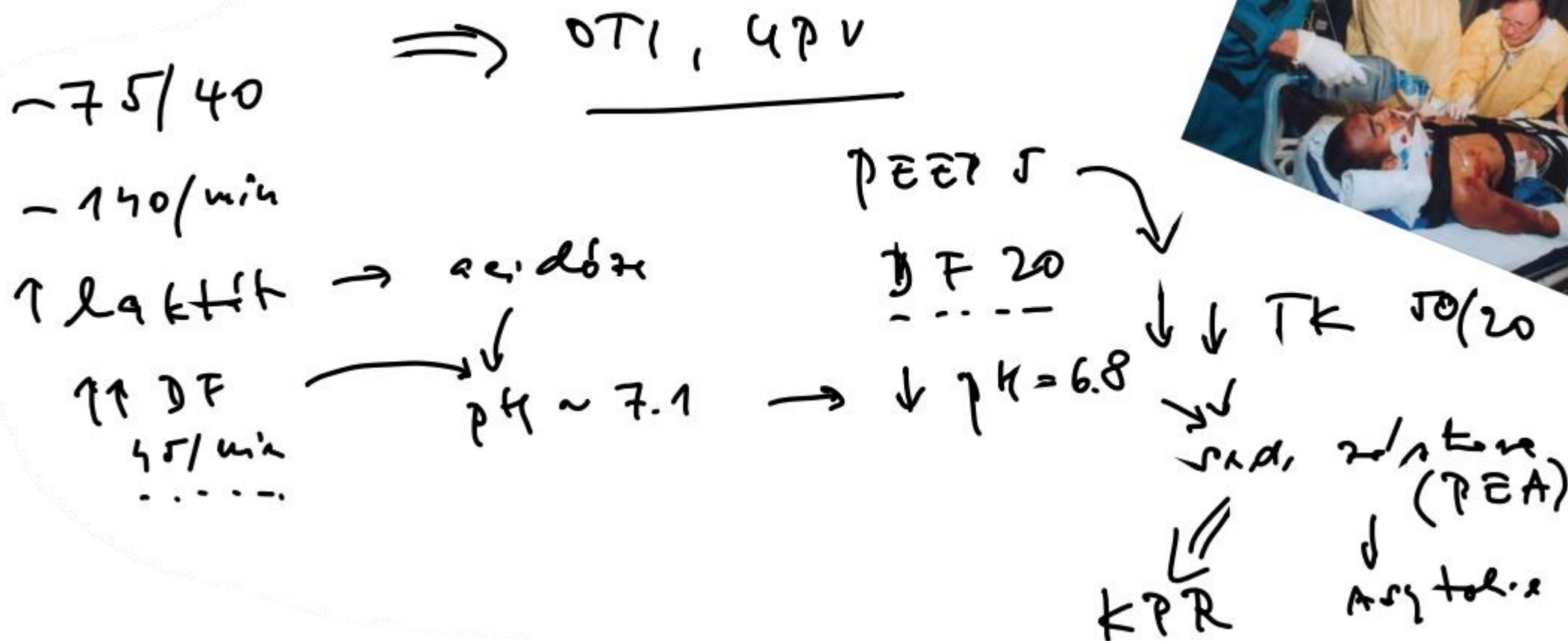
$TV = 500ml$

85%

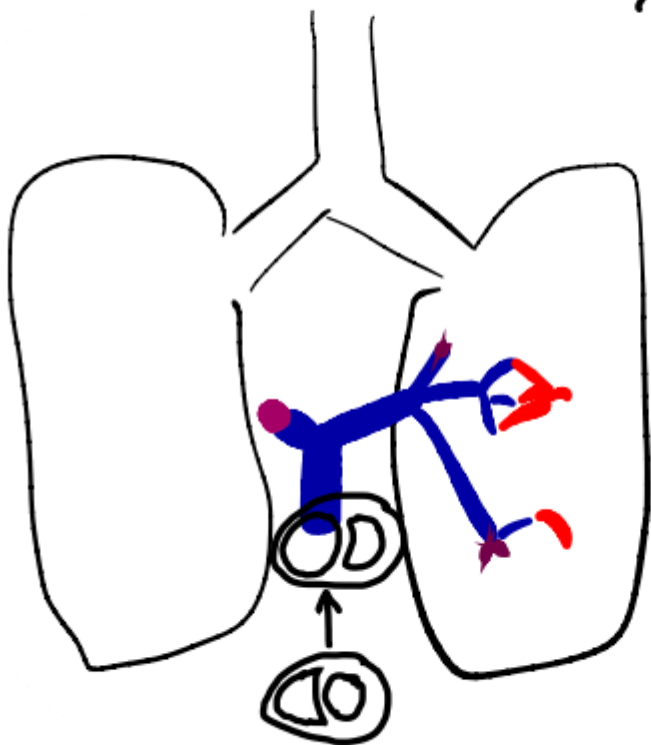
$\uparrow CO_2 \rightarrow$ koma


\downarrow
OTI
KPV





Masívní plicní embolie

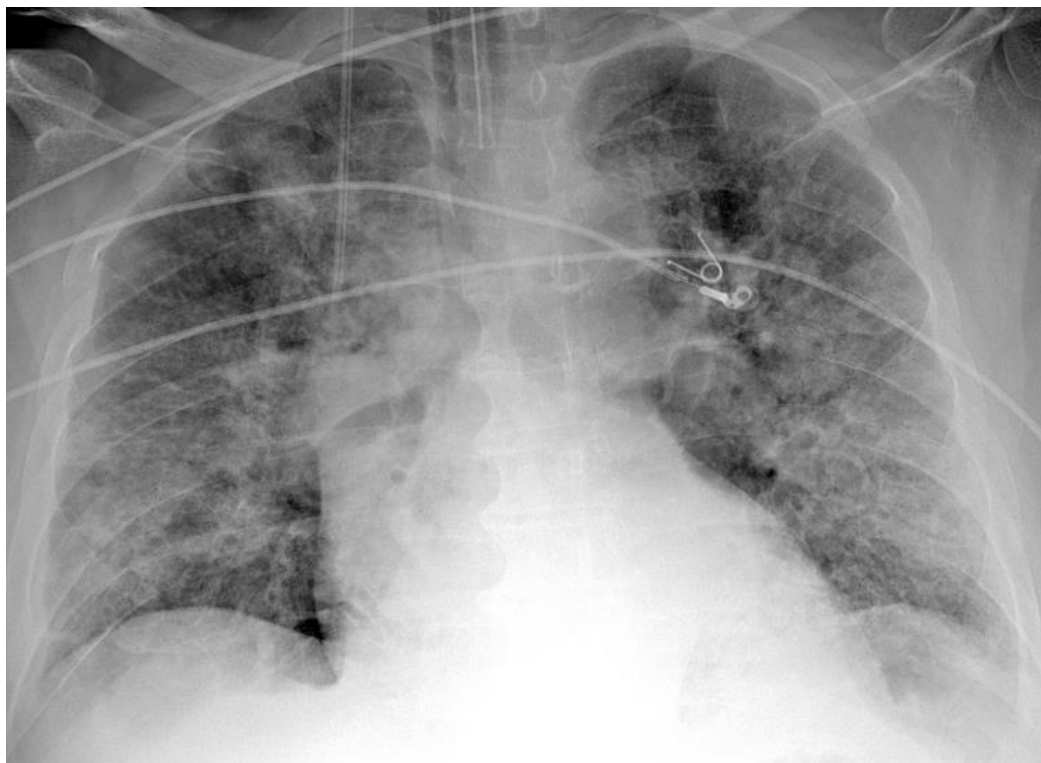


↑↑↑ pr. aritm.
 OTI, 47V
 PEEP ↓

 ↓ PEEP

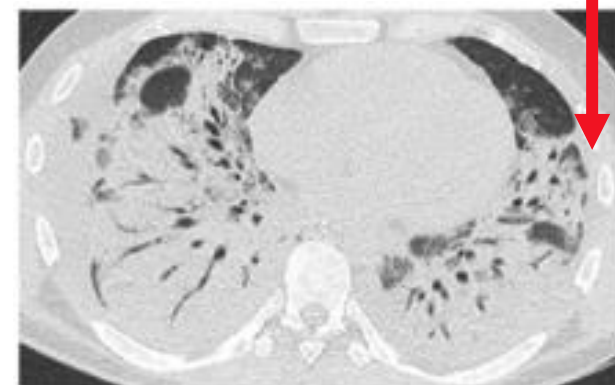
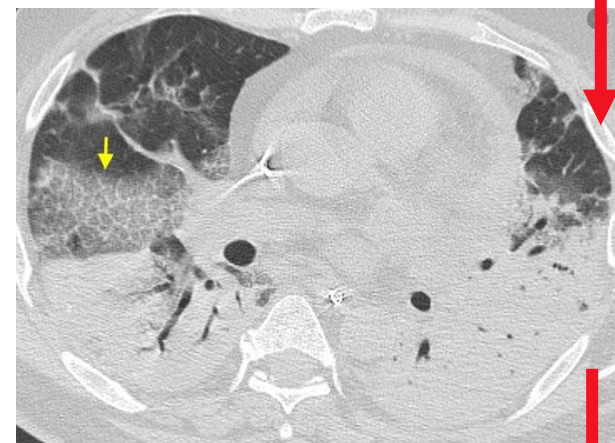
↑↑
 → fl. hypertenz
 ↓ ak. selhání
 ↑ K
 ↓ SpO_2 70%
 ↓ TK = 80/40

ARDS – COVID-19 pneumonie

- protektivní ventilace
- permissivní hyperkapnie ($\text{pH} > 7.2$)
- pronační poloha



OTI, 4 PV
↓ DV
↑ DF
peak P < 28
c-h₂O
PEEP 12-15



Neinvazivní plicní ventilace

- jako UPV, ale
 - pacient není (výrazněji) analgosedován
 - nejsou zajištěny dýchací cesty
- nelze použít příliš vysoký PEEP ani inflační tlaky
- spíše krátkodobé či opakované užití
- typické indikace
 - Akutní exacerbace CHOPN
 - Mírnější kardiogenní plicní edém
 - Intermittentní podpora po extubaci



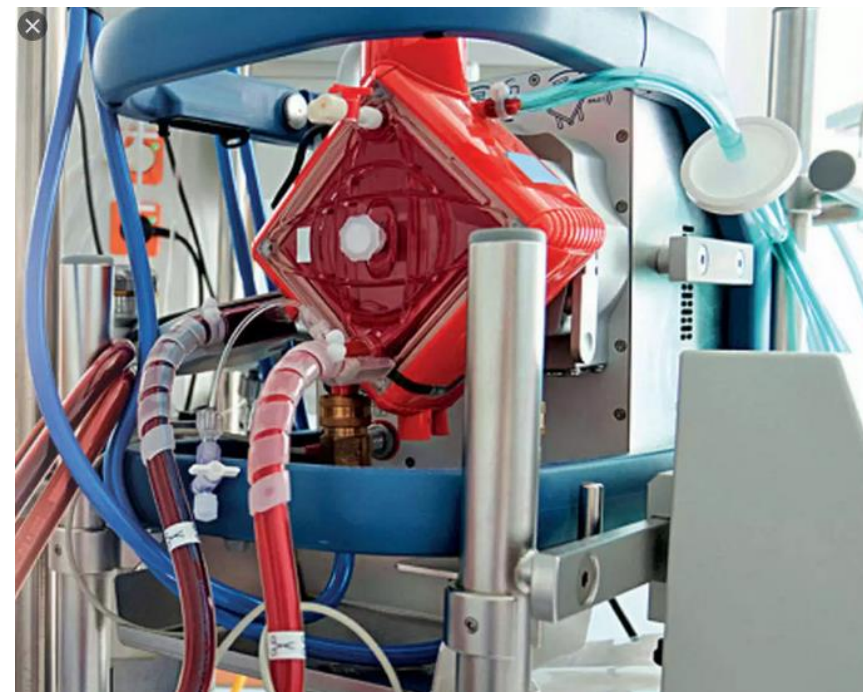
High-flow nasal oxygen (HFNO)

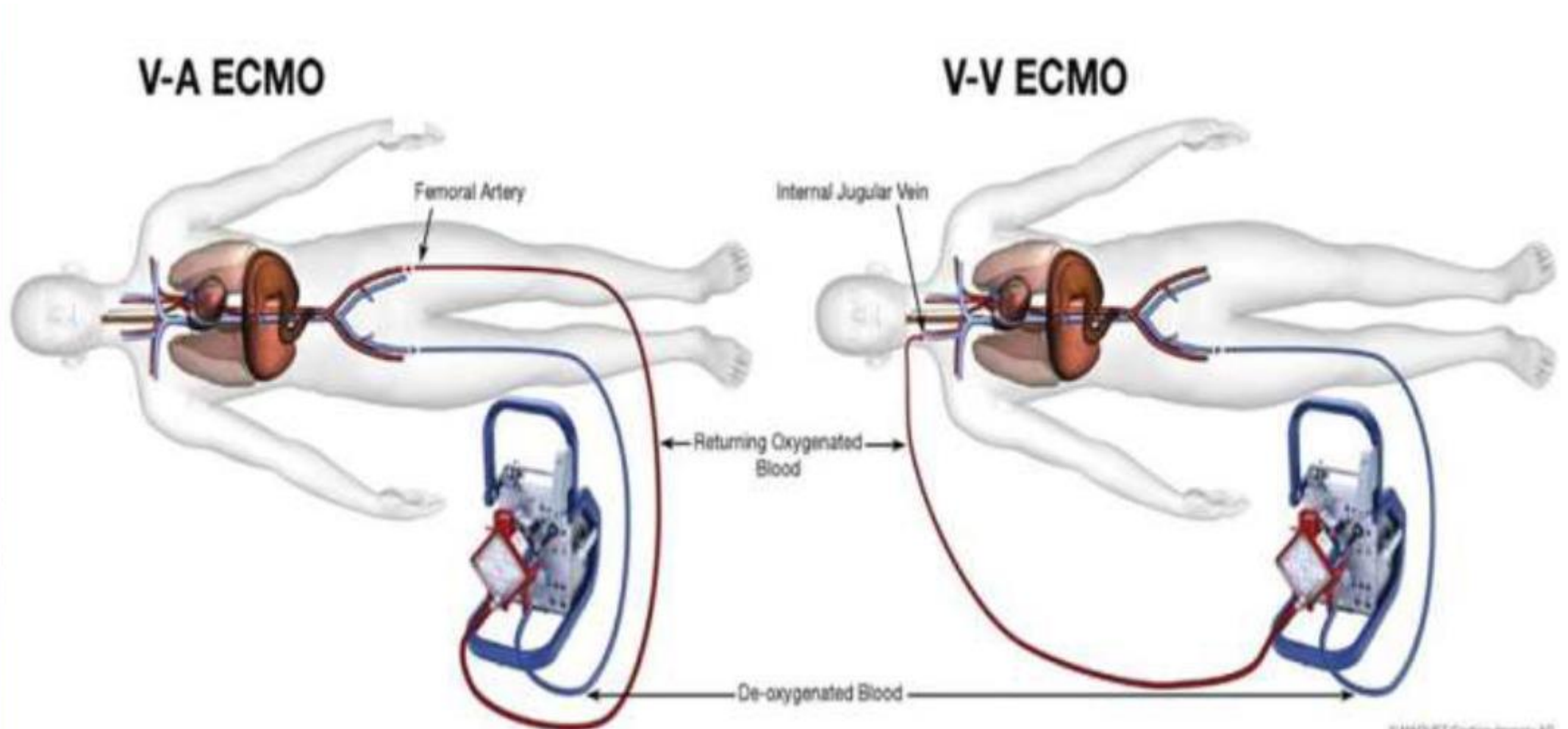
- jako kyslíkové brýle, ale
 - zvlhčený kyslík až 60 l/min
 - FiO_2 až 100 %
- vysoký průtok plynu vytváří přetlak v horních cestách dýchací a tím PEEP 2-4 cmH_2O
- lépe tolerované než NIV
- podobné indikace jako NIV
 - středně těžká forma COVID-19 pneumonie
 - akutní exacerbace CHOPN
 - mírnější kardiogenní plicní edém
 - podpora po extubaci



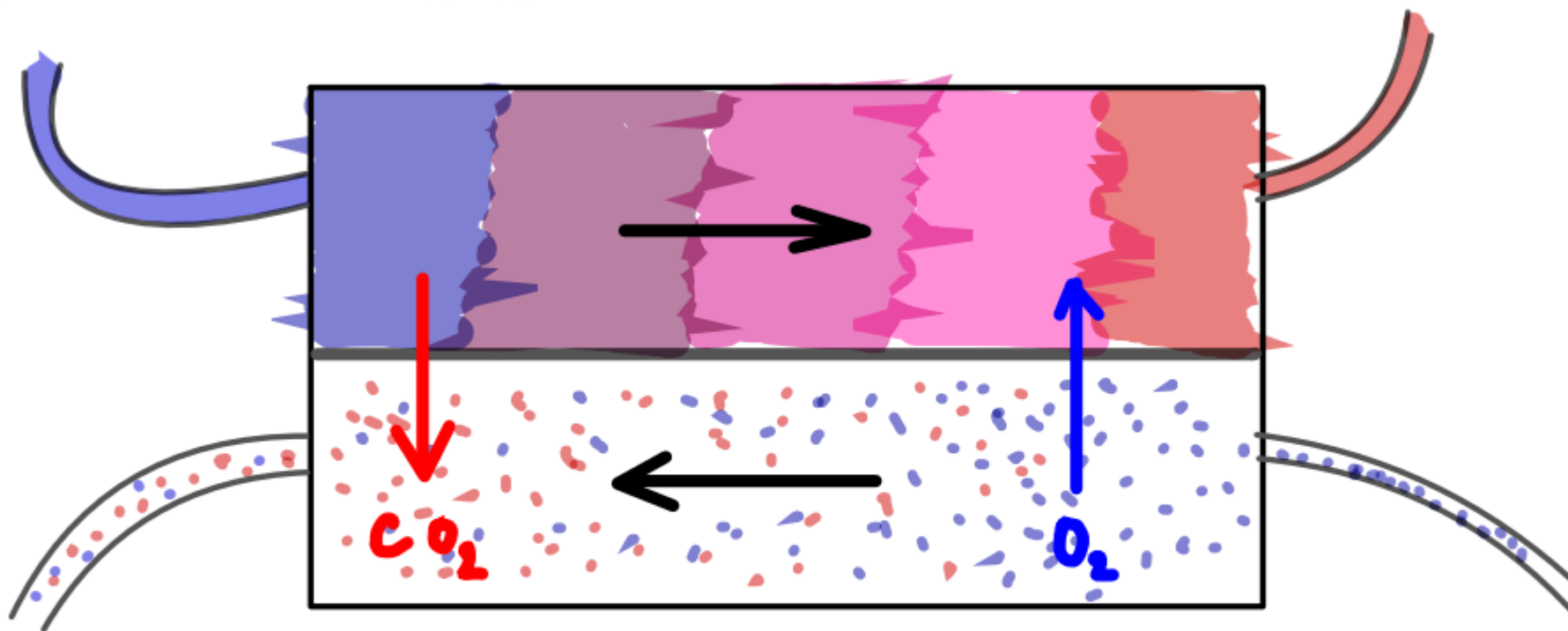
Extrakorporální membránová oxygenace (ECMO)

- mimotělní oběh
- úplná náhrada funkce plic (tzv. VV-ECMO) nebo srdce a plic (tzv. VA-ECMO)
- základem konstrukce jsou pumpa a oxygenátor
- v oxygenátoru se přes membránu stýká krev a vzduch/kyslík
- Indikace
 - rozumná šance na vyřešení základního problému (např. vyléčení COVID pneumonie) nebo bridge-to-transplantation



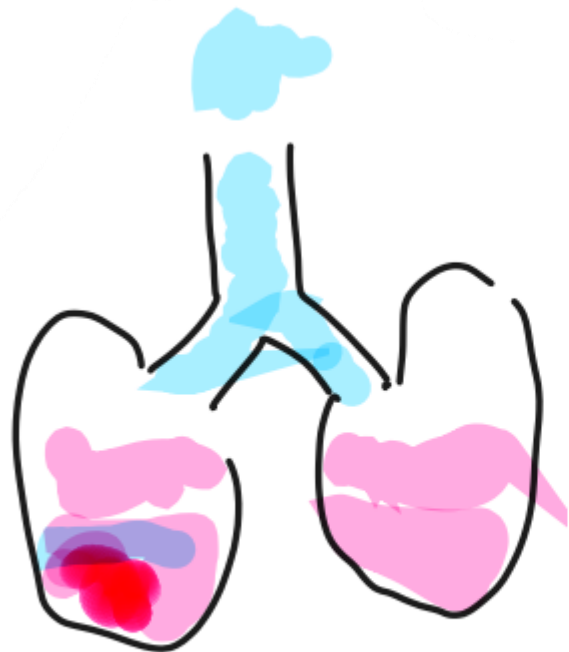


Princip membránového oxygenátoru



Apnoická ventilace

- Protimluv?
- Pacienta necháte dýchat kyslík maskou, vytvoříte mu zásobu kyslíku v plicích, za stálého podávání kyslíku jej uvedete do celkové anestezie a svalově zrelaxujete, takže nedýchá, ale nadále mu podáváte kyslík
- zásoba kyslíku v plicích (5 l) by při spotřebě 250 ml O₂/min stačila maximálně na 20 min
- Jak dlouho bude trvat, než tomuto nedýchajícímu pacientovi začne klesat saturace? Až 60 minut!!
- Jak je to možné?



$$RQ = 0.8$$
$$5 \rightarrow 4$$

Život ohrožující respirační onemocnění

Kardiogenní plicní edém

Nekardiální plicní edém – ARDS

Těžká pneumonie

Exacerbace CHOPN/astmatu

Tenzní pneumothorax

Obstrukce horních cest dýchacích

Alergický otok

Laryngitida

Epiglottitida

Aspirace

Masívní plicní embolie

Porucha vědomí se sekundární asfyxií

Akutní neuromuskulární poruchy

Myasthenia gravis

Syndrom Guillain-Barré

Trauma hrudníku

Kontuze plic

Bloková zlomenina žeber

Masívní hemothorax

Masívní hemoptýza

Další systematické čtení

- Pavel Dostál: Umělá plicní ventilace, 4. vydání, Maxdorf, 2017
- Petr Ošťádal: ECMO, 2. vydání, Maxdorf, 2018