

Ventilátory a biofyzika výmeny plynov počas UVP

P. Török, P. Čandík

KAIM VÚSCH a.s. a UPJŠ LF Košice.

UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH

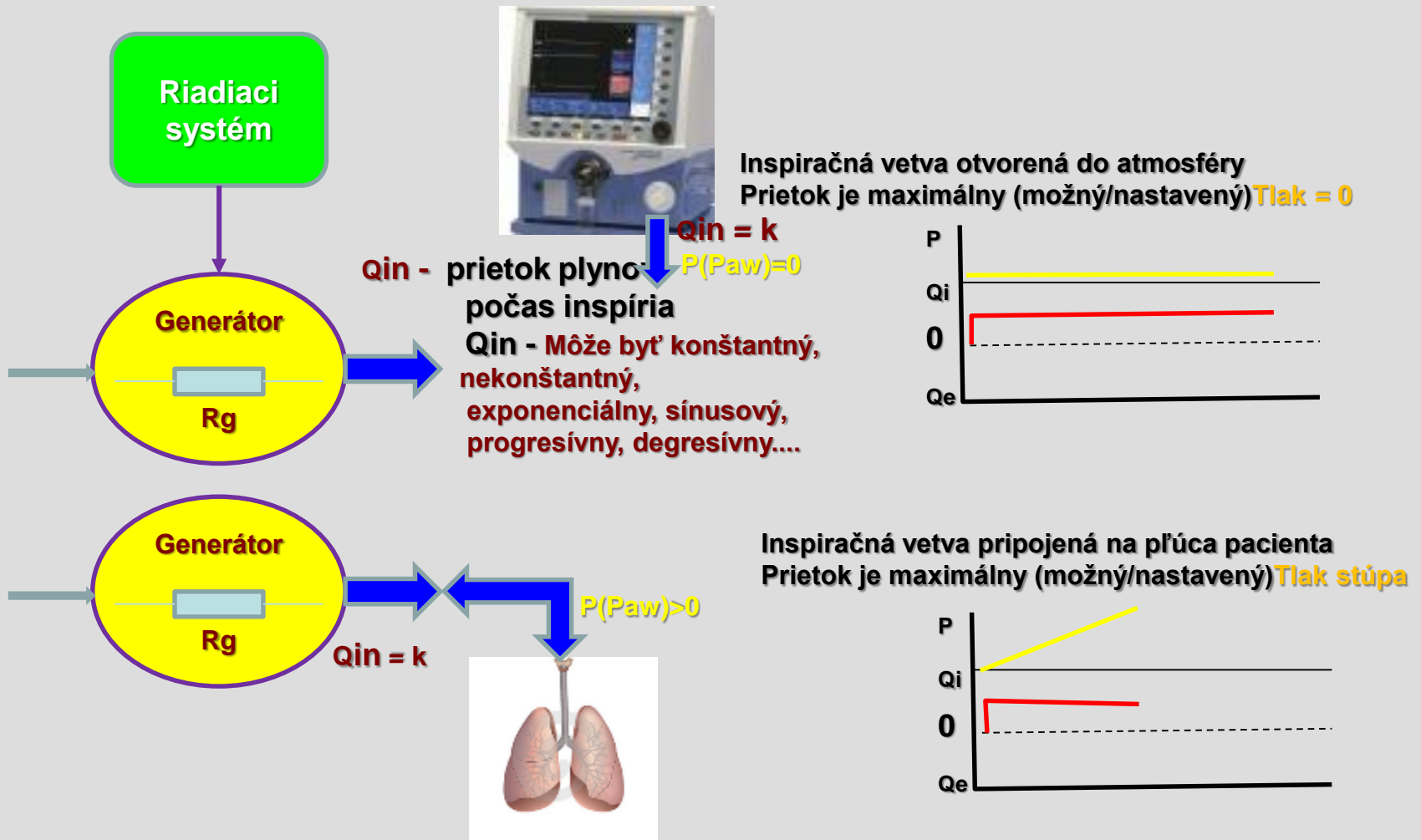


Východoslovenský ústav srdcových
a cievnych chorôb, a.s.

CEFA 2015 Košice



Generátor hybnej sily inspiračného plynu - prietok Q_{in} (V).



Každý ventilátor má generátor prietoku Q_{in} .

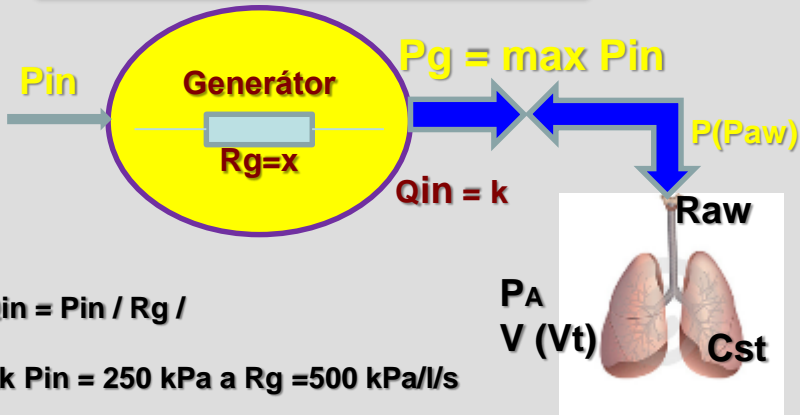
Pokiaľ nie je pripojená „záťaž“ (t.j. pľúca) vo forme R/C členu (odpor R, poddajnosť C), prietok generátorom bude maximálny (nastavený), ale tlak nikde nevzniká.

Tlak P (P_{aw} , P_a) vzniká prietokom – vtokom – určitého objemu plynov do pružnej kapacity (pľúc).

Objem V (V_T) je časovým integrálom prietoku.

Generátor prietoku a tlaku (riadenie objemom – volume control a riadenie tlakom – pressure control).

Generátor konštantného prietoku

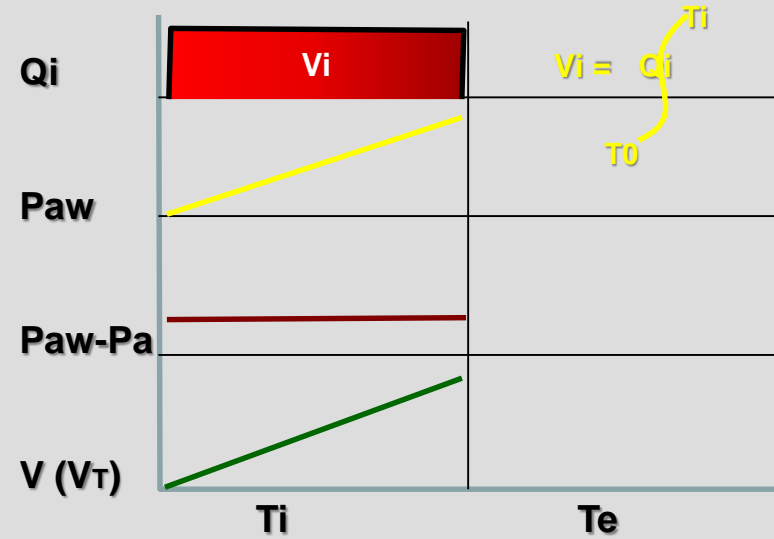


$$Q_{in} = P_{in} / R_g /$$

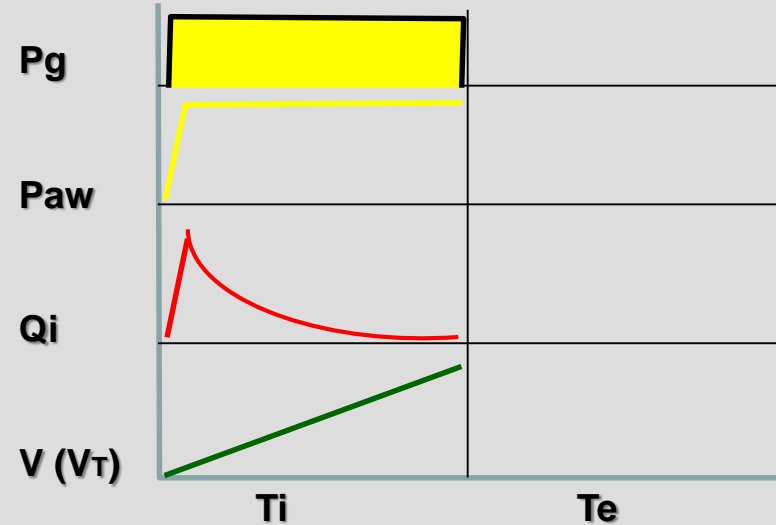
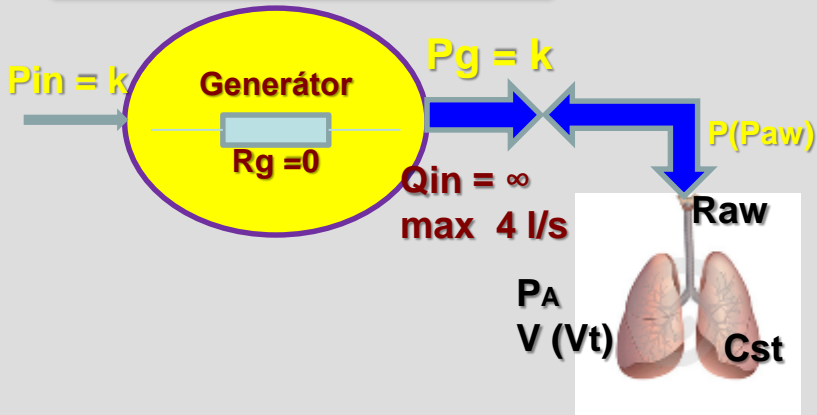
Ak $P_{in} = 250 \text{ kPa}$ a $R_g = 500 \text{ kPa/l/s}$

$$Q_{in} = 250/500 = 0,5 \text{ l/s}$$

Ak je $T_i = 1 \text{ sek}$, potom $V_{Ti} = 0,5 \text{ litra}$

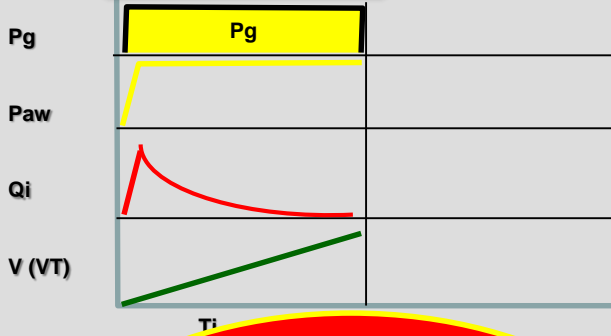


Generátor konštantného tlaku



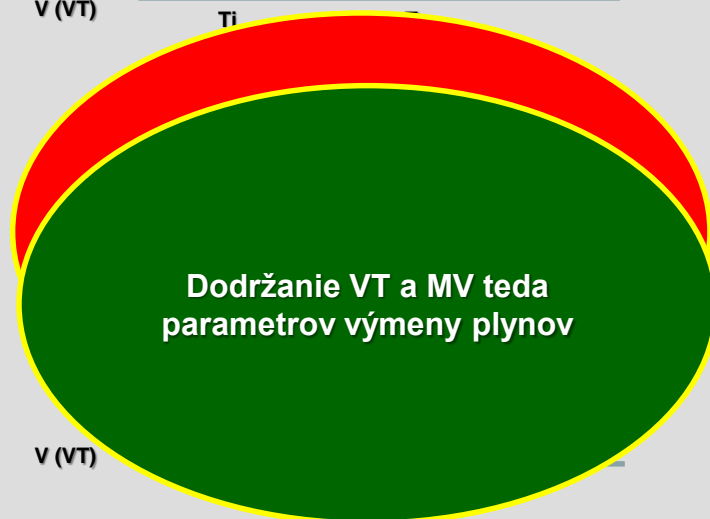
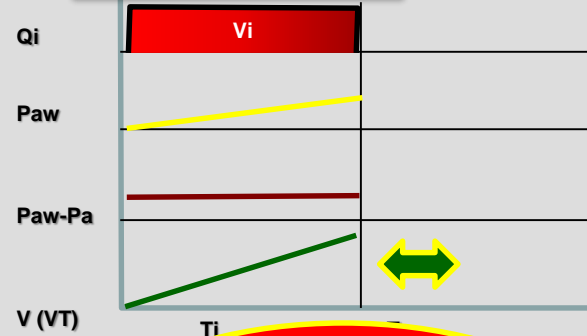
Generátor tlaku a prietoku – vplyv zmien pľúcnej mechaniky na výmenu plynov.

Generátor tlaku



$R, C_{st} = \text{normal}$

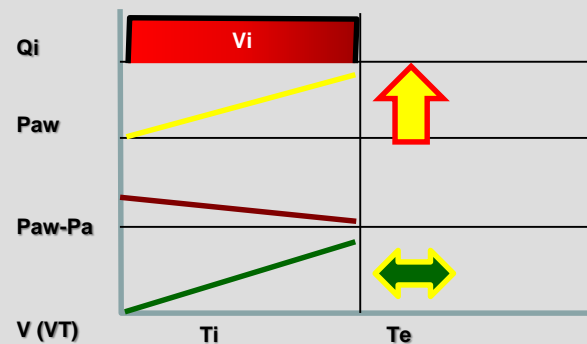
Generátor prietoku



$R = \text{normal}$
 $C_{st} = \frac{1}{2}$



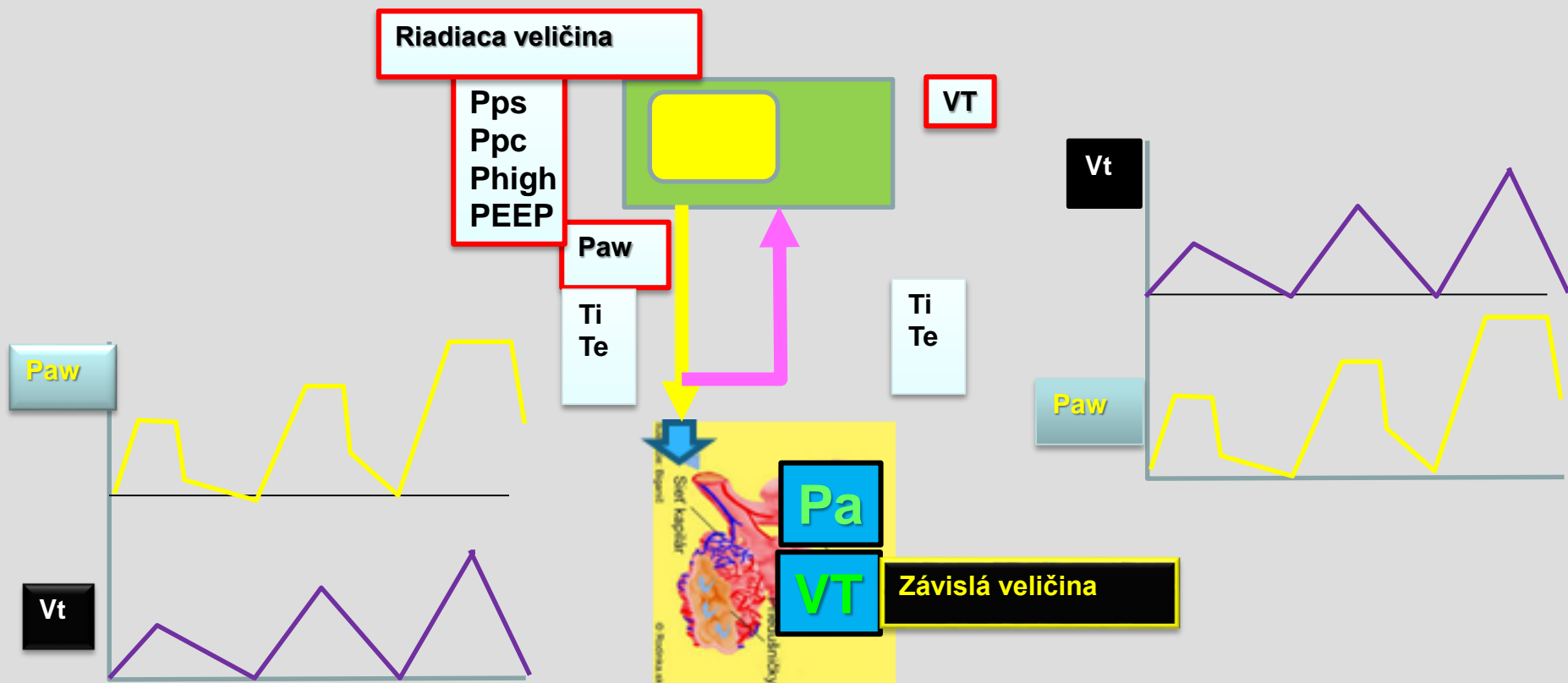
$R = 2x$
 $C_{st} = \text{normal}$



Riadenie ventilačných režimov

Tlakom riadené režimy

Objemom riadené režimy



Ak by sme definovali **ventilačný režim** ako **výrobcom prednastavený program**, ktorým na základe **povolených**-lekárom zadaných parametrov, v niektorých prípadoch modifikovaných dychovou aktivitou pacienta, ovládame prietok (tlak) pri vdychu, trvanie fáz dýchacích cyklov, ich aktivácie, smerujúcej z ventilátora do pacientových pľúc ako aj prietok (tlak) plynov pri výdychu z pľúc zvyčajne do atmosféry.

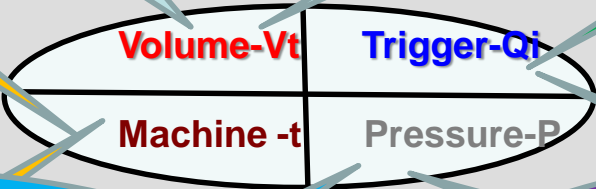


Potom musíme konštatovať, že **prednastavený program je barličkou**, ktorá dovoľuje lekárovi „niečo“ nastaviť tak, aby výmena plynov v pľúcach bola primeraná „potrebnej“ pre oxygenáciu a elimináciu CO₂.

Základné ventilačné režimy..... Ako vlastne vznikli ???

CMV



SCMV SIMV



PCV



SPCV PS /CPAP



Dual control
Volume control
pressure limited

APMV (automatic proportional minute ventilation)

To nie je režim, je to systém riadenia stojaci nad všetkými režimami

Computer assisted ventilation

Inteligentné riešenia s vyhodnotením ventilácie
a interakcie pľúca – ventilátor

Systém stojí nad jednotlivými režimami ako aj inými regulačnými systémami

Multilevel ventilation
(pressure control)

Multilevel ventilation
(pressure control +
pressure support)

Názvy ventilačných režimov – alebo čo je čo ???

1. «Controlled mandatory ventilation» (<<CMV»)
2. «Continuous mechanical ventilation» (<<CMV»)
3. «Controlled mechanical ventilation» (<<CMV»)
4. «Control mode»
5. «Continuous mandatory ventilation + assist»
6. «Assist control» (<<AO»)
7. «Assist/control» (<<A/O»)
8. «Assist-control ventilation» (<<ACV») (<<A-O»)
9. «Assisted mechanical ventilation» (<<AMV»)
10. «Volume controlled ventilation» (<<VCV»)
11. «Volume control» (<<VO»)
12. «Volume control assist control»
13. «Volume cycled assist control»
14. «Ventilation + patient trigger»
15. «Assist/control +pressure control»
16. «Pressure controlled ventilation» (<<PCV»)
17. «Pressure controlled ventilation + assist»
18. «Pressure control» (<<PC»)
19. «Pressure control assist control»
20. «Time cycled assist control»
21. «IPPV
22. «PSV
23. «CPAP
24. «PC CSV
25. « Dual control – DC-CSV
26. «ASB
27. « IMV
28. «SIMV
29. «VC IMV
30. «PC IMV

31. «VC IMV+PS
32. «PC IMV+PS
33. «DC IMV + CPAP
34. «BIPAP
35. « DuoPAP
36. «Bilavel
37. «Bivent
38. «2LV
39. «APRV
40. «BiPAP+PC
41. «BIPAP+PS
42. «BIPAP+AS
43. « MMV
44. «EMMV
45. «VV+
46. «VS
47. «VTP/S
48. «PRCV
49. «Auto-mode
50. «PAV
51. «PPS
52. «ASV
53. «APMV
54. 3LV, 4LV
55. HFM CPAP, Bubble CPAP
56. NAVA

Názvov režimov je podstatne viac, vybral som najčastejšie používané u známych výrobcov

KTO mi vie presne zdefinovať, čo znamenajú a ako riadia UVP jednotlivé „režimové názvy“ ???

1. Prietok plynov môže vzniknúť len v prípade, že existuje medzi dvomi koncami potrubia tlakový spád.

2. Plyn prúdi vždy z bodu s vyšším tlakom do bodu s tlakom nižším

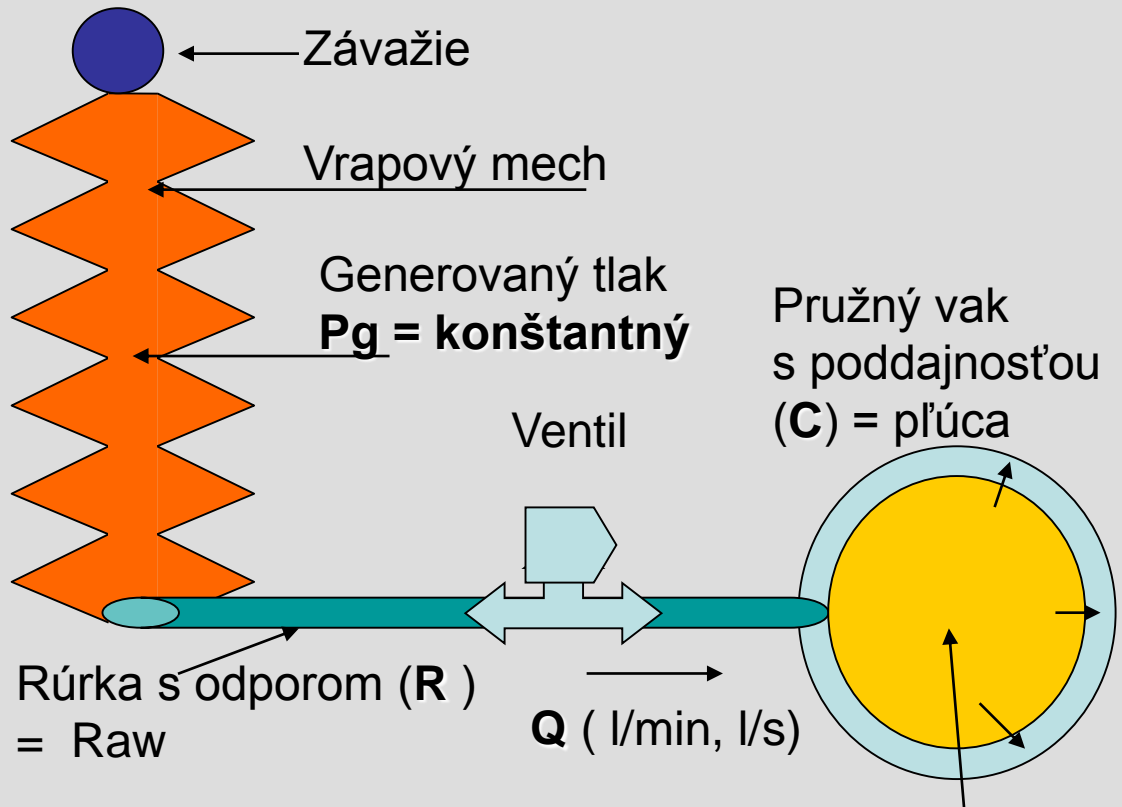
3. Odpor potrubia je priamo úmerný jeho dĺžke, hustote plynu a nepriamo úmerný štvorcu priemeru, t.j., čím je potrubie užšie a dlhšie má odpor vyšší.

4. Prietok plynov je priamo úmerný tlakovému spádu na koncoch potrubia a nepriamo úmerný odporu potrubia

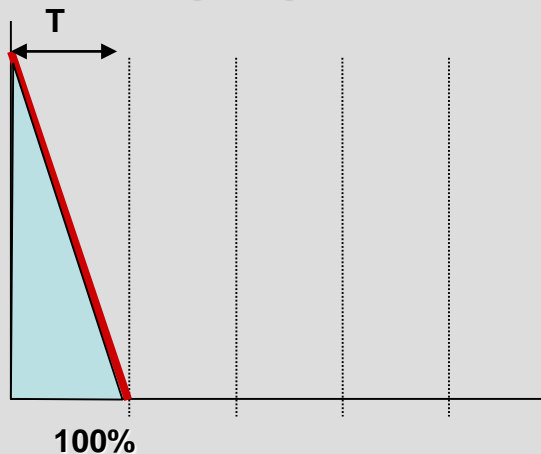
5. $\tau = R \cdot C$

6. Všeobecne počítá exponenciálnu rovnicu

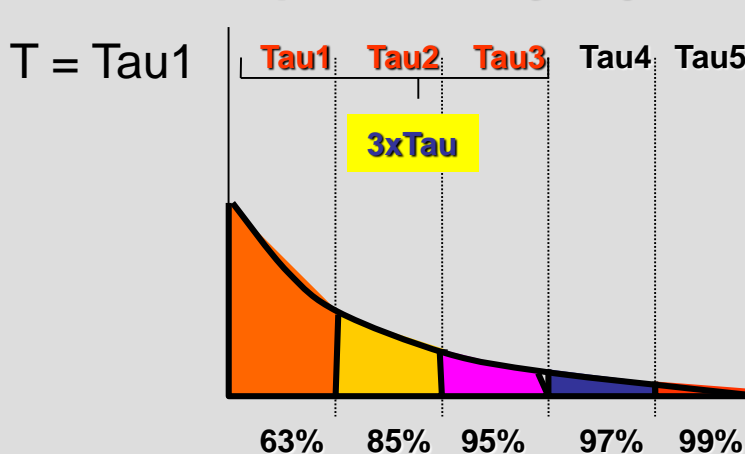
$$X = X_{\max} \cdot e^{-\frac{T}{\tau}}$$



Lineárny dej



Exponenciálny dej



Tlak vo vaku
 P_a = alveolárny tlak

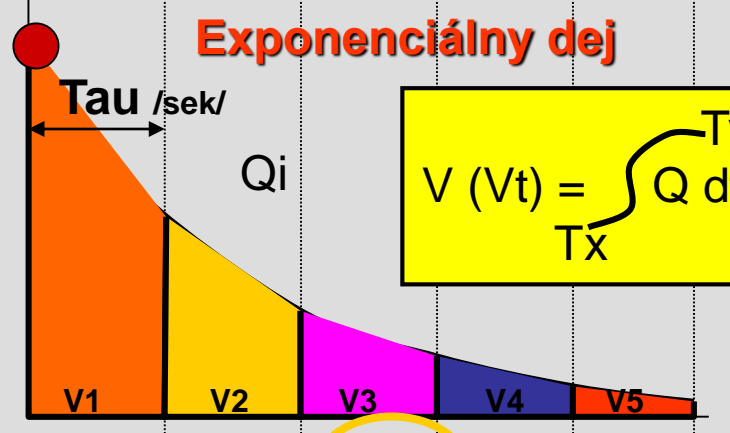
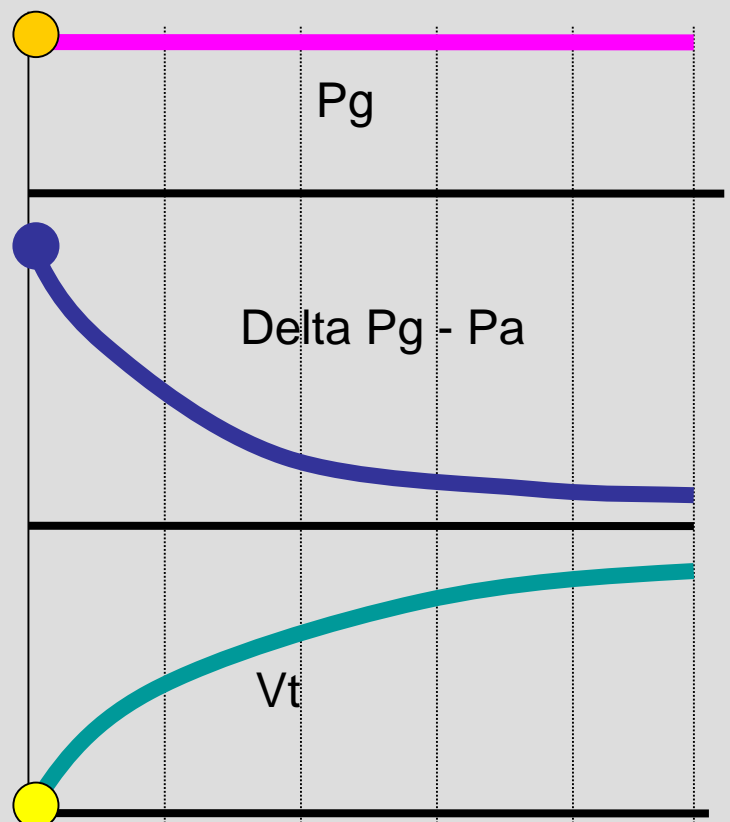
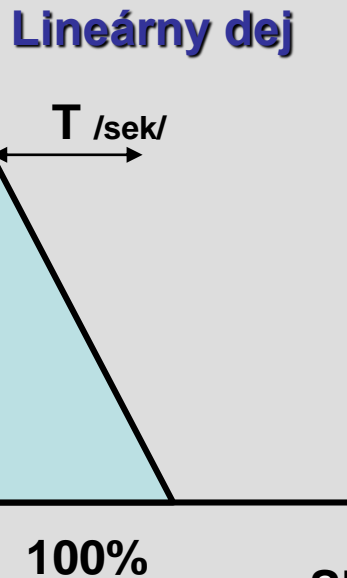
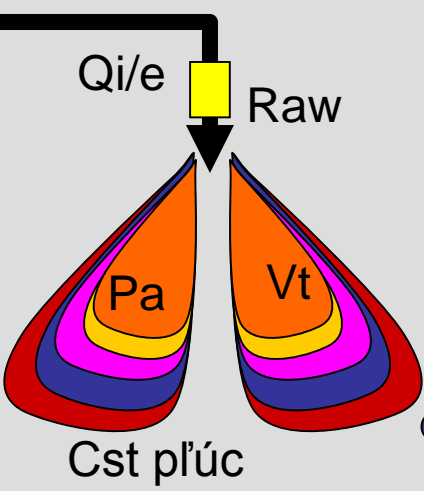
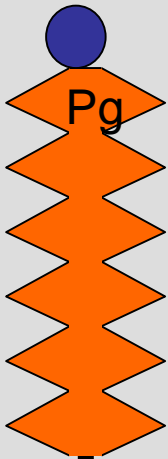
T – čas za ktorý reálne prebieha ten ktorý dej



Základné pojmy

Časová konštanta /Tau/ exponenciálneho deja je čas, za ktorý by v prípade **lineárneho deja** tento prebehol na 100%

Ak za čas $T = \text{Tau}$ prebehne **lineárny dej** na 100 %, tak **exponenciálny dej** prebehne na 63% z daného celku (100%)
 V našom príklade je to prietok plynov počas inspiria

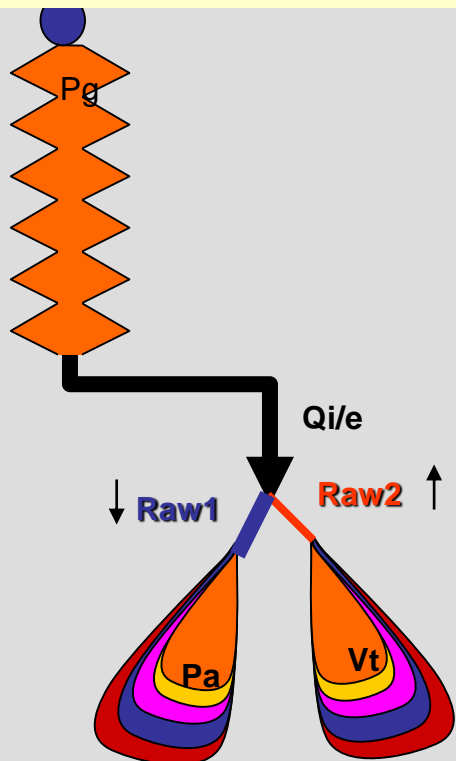


SUM Tau	63	85	95%	97	99%
	Tau1	Tau2	Tau3	Tau4	Tau5



Vplyv časovej konštanty na inšpírium.

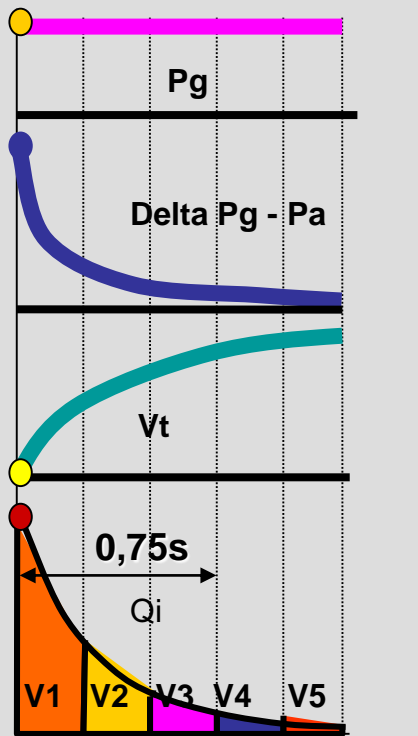
V pľúcach s kratšou časovou konštantou dôjde počas 0.75 sek k 95% naplneniu exponenciálneho deja.



Normal lungs Tau je kratšie
Obstructive lungs Tau je dlhšie

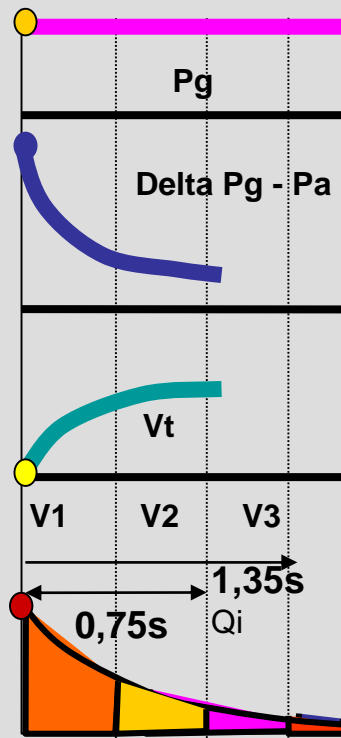
Cst pľúc = k

Normal lungs
Tau je kratšie



63 85 95% 97% 99%

Obstructive lungs
Tau je dlhšie



63 85 95%

Naproti tomu v pľúcach s dlhšou časovou konštantou dôjde k naplneniu exponenciálneho deja cca len na 75-80%

Tau = R * C
Raw1 = 0,5 kPa.l-1.s-1
Raw2 = 0,9 kPa.l-1.s-1
C = k = 0,5 l . kPa-1

Tau normálnych pľúc = 0,5 * 0,5 = 0,25 sek. 3Tau = 0,75s

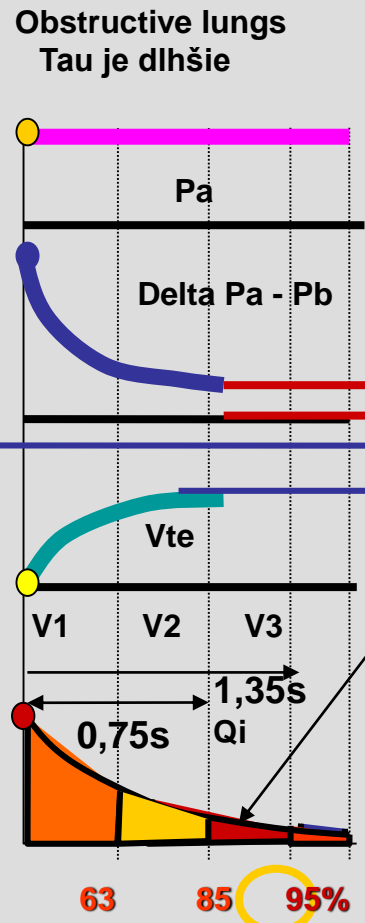
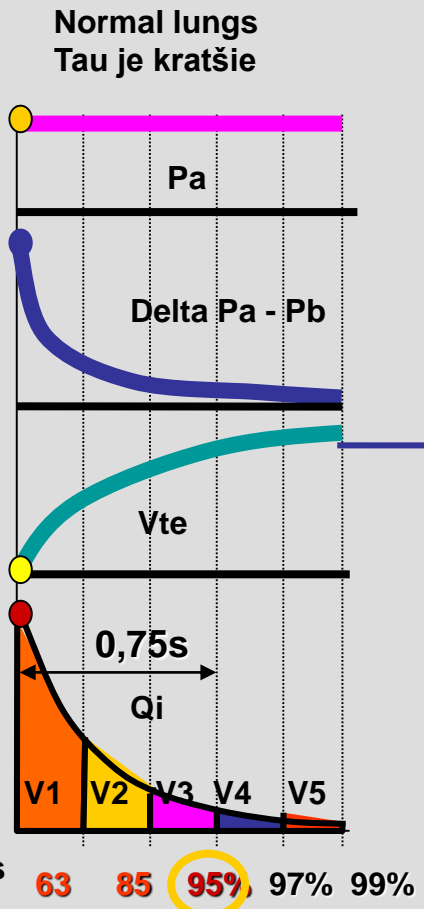
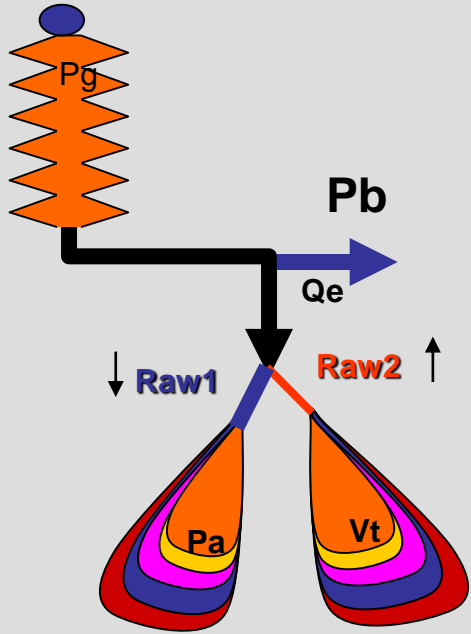
Tau obštrukčných pľúc = 0,5 * 0,9 = 0,45 sek. 3Tau = 1,35 s



Vplyv časovej konštanty na exspirium.

V pľúcach s kratšou časovou konštantou dôjde počas 0.75 sek k 95% naplneniu exponenciálneho deja.

V pľúcach s dlhšou časovou konštantou dôjde k naplneniu exponenciálneho deja cca len na 75-80%



AUTO PEEP

Trap VOLUME

Normal lungs Tau je kratšie
Obstructive lungs Tau je dlhšie

Cst pľúc = k

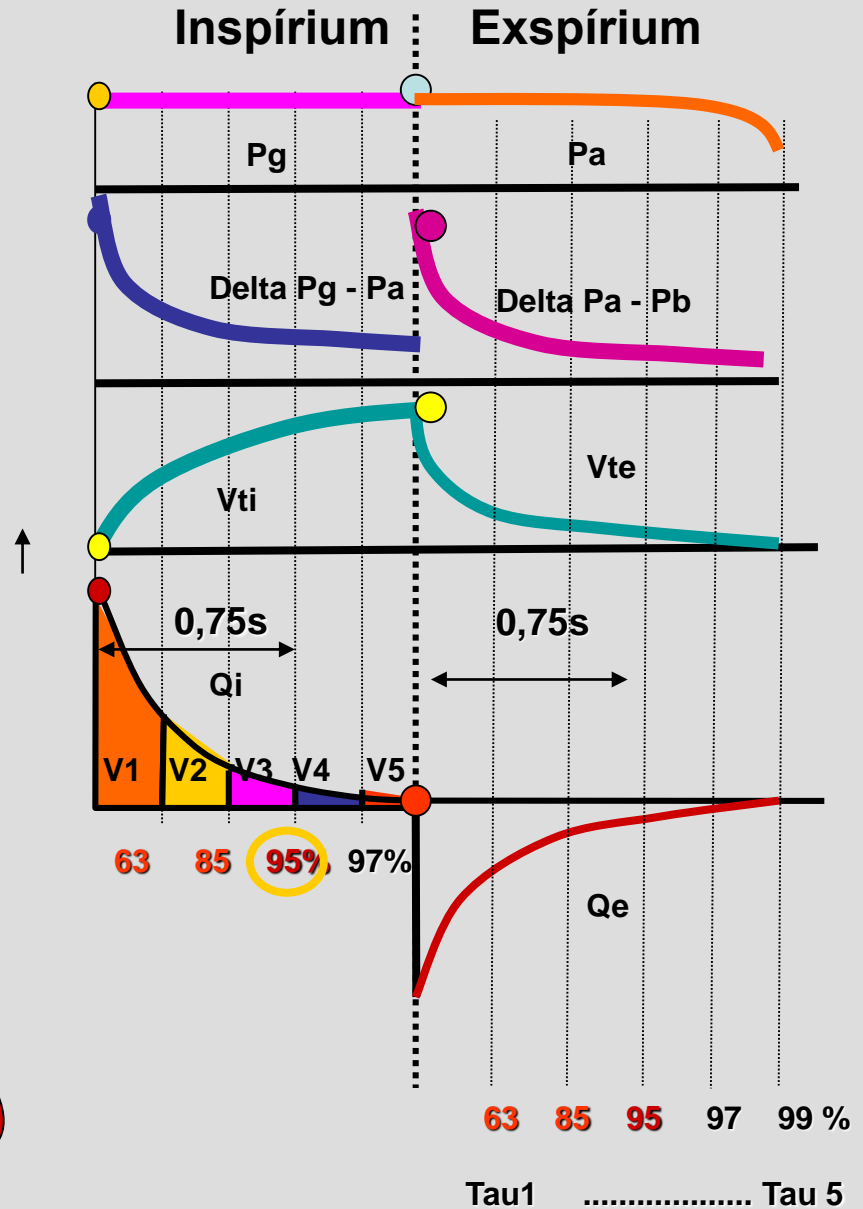
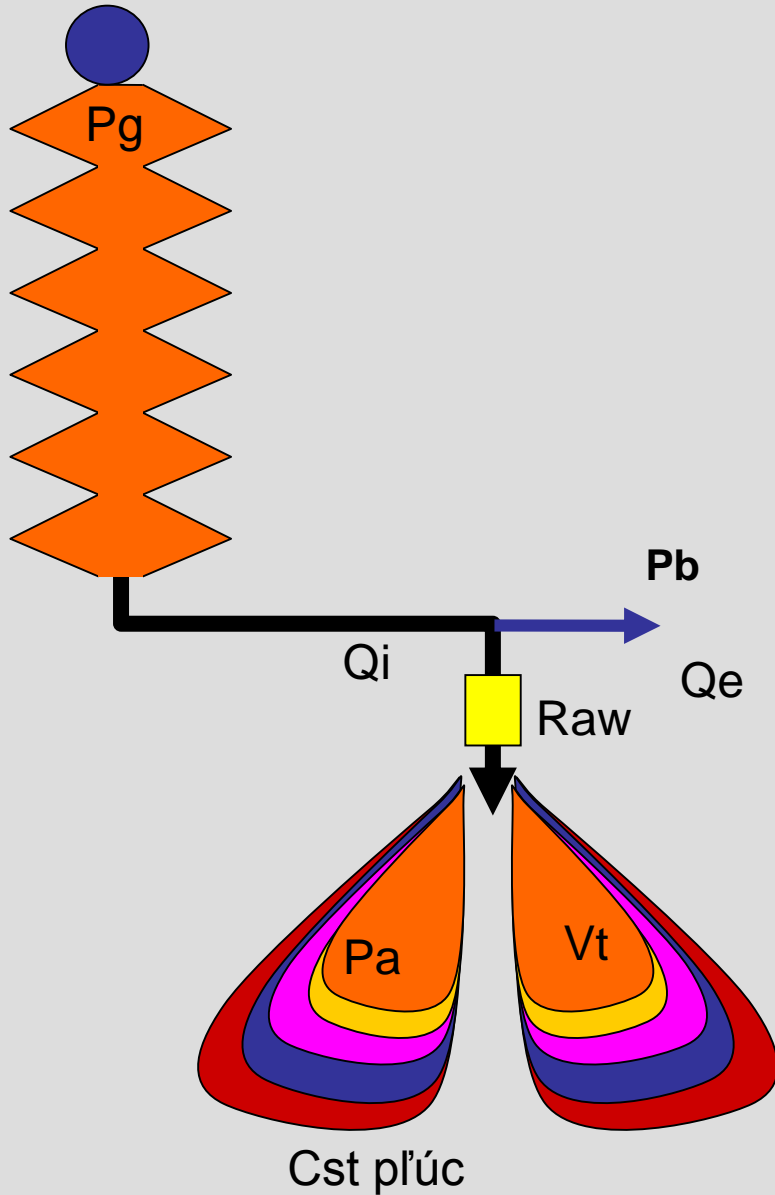
Tau = R*C
Raw1 = 0,5 kPa.l-1.s-1
Raw2 = 0,9 kPa.l-1.s-1
C = k = 0,5 l . kPa-1

Tau normálnych pľúc = 0,5 * 0,5 = 0,25 sek. 3Tau = 0,75s

Tau obštrukčných pľúc = 0,5 * 0,9 = 0,45 sek. 3Tau = 1,35 s

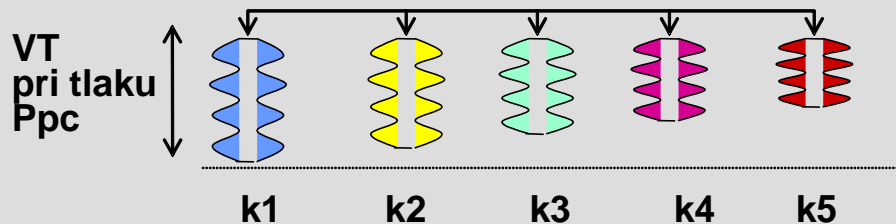


Vplyv časovej konštanty na inspírium a expírium pri generátore konštantného tlaku.

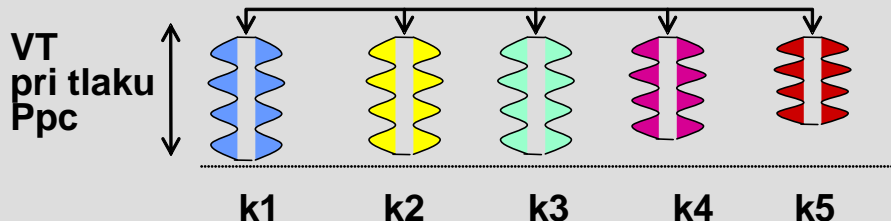


Multikompartmentné pľúca

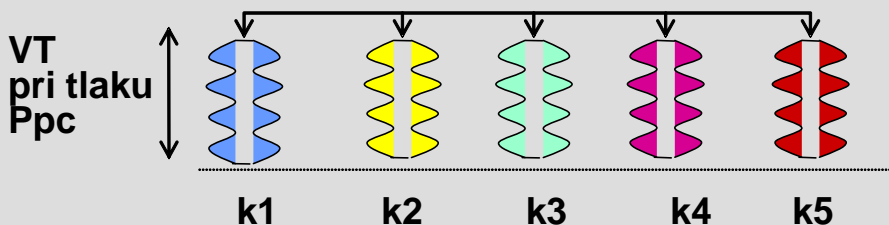
Vplyv Tau a pomeru Tau k Ti (Te) na plnenie kompartmentov



Ti = 1 sek



Ti = 2,5 sek



Ti = 4,5 sek

Kompartmenty	3*τ (sek)
K1	0,15
K2	0,3
K3	1,2
K4	3
K5	4,5

$$VT(k) = VT_{max} * (1 - e^{-\frac{Ti}{Tau}})$$

V prípade, že $3 * Tau$ kompartmentu je $\leq Ti$, bude plnenie kompartmentu minimálne 95%

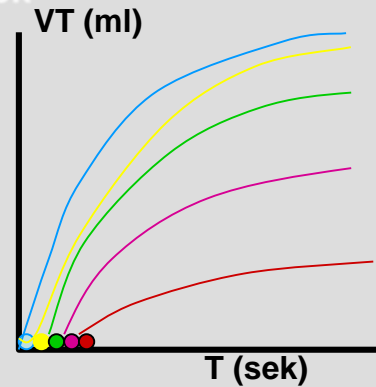
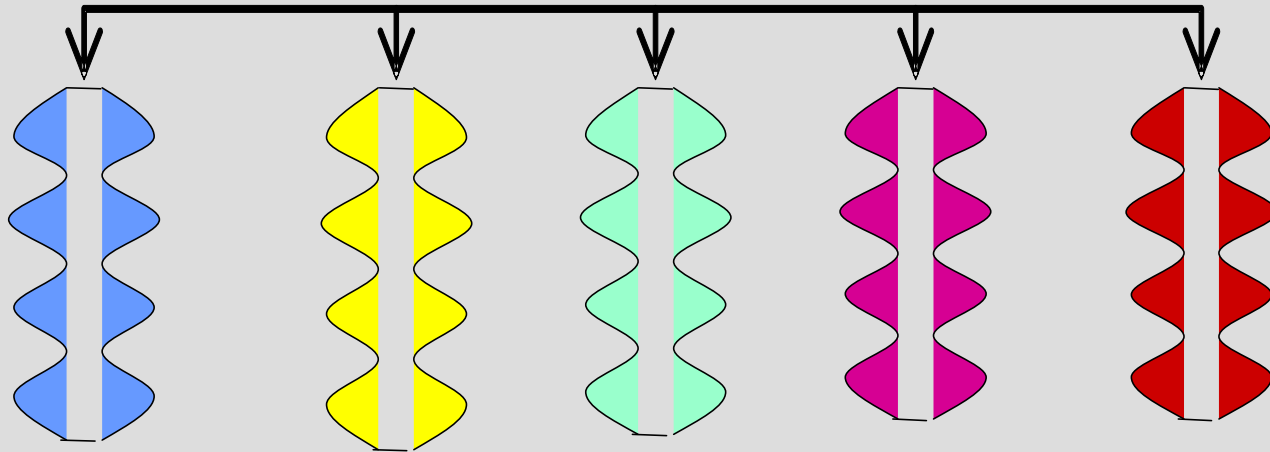
V prípade, že $3 * Tau$ kompartmentu je $> Ti$, bude plnenie kompartmentu Vždy menšie ako 95% a bude závislé od pomeru Ti ku Tau

Čím je pomer Ti ku Tau menší, tým menšie plnenie kompartmentu.

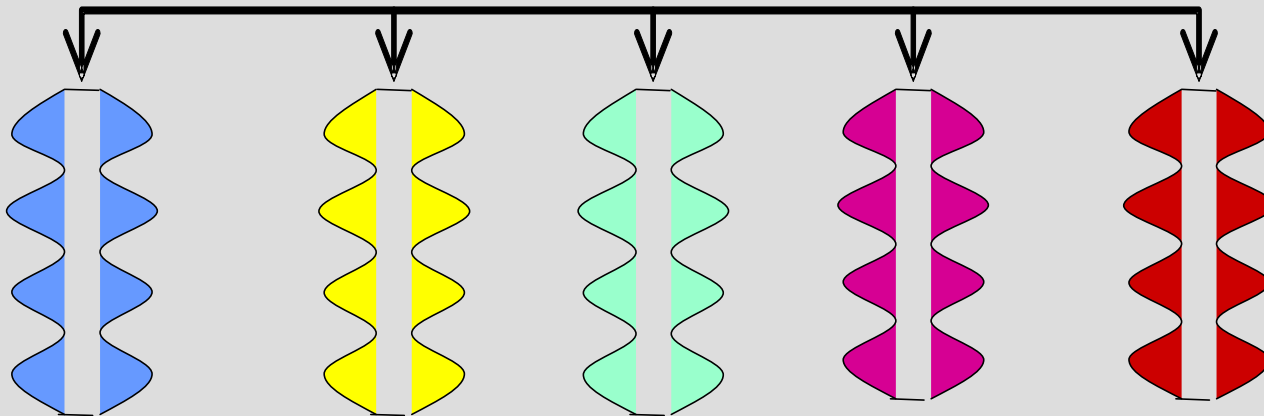


Plnenie a vyprázdňovanie kompartimentov pri rôznom T_i a T_e s konštantným P_{pc}

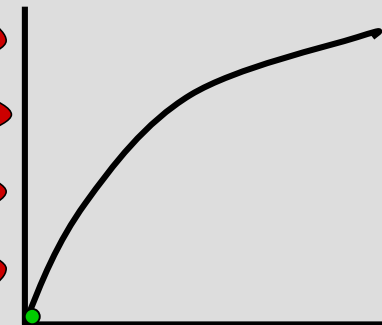
$\tau = 0,05$ $0,1$ $0,4$ 1 $1,2$ sek
 $3 \cdot \tau = 0,15$ $0,3$ $1,2$ 3 $3,6$ sek



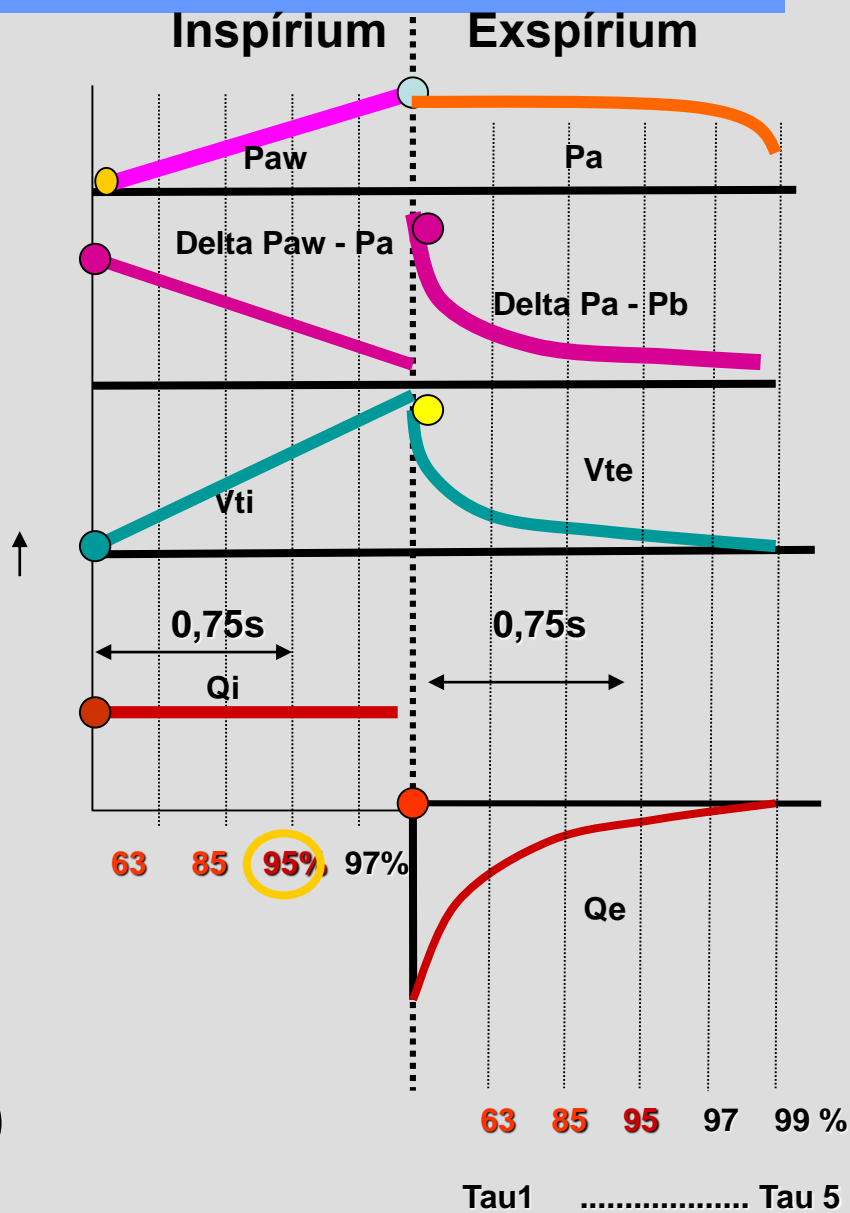
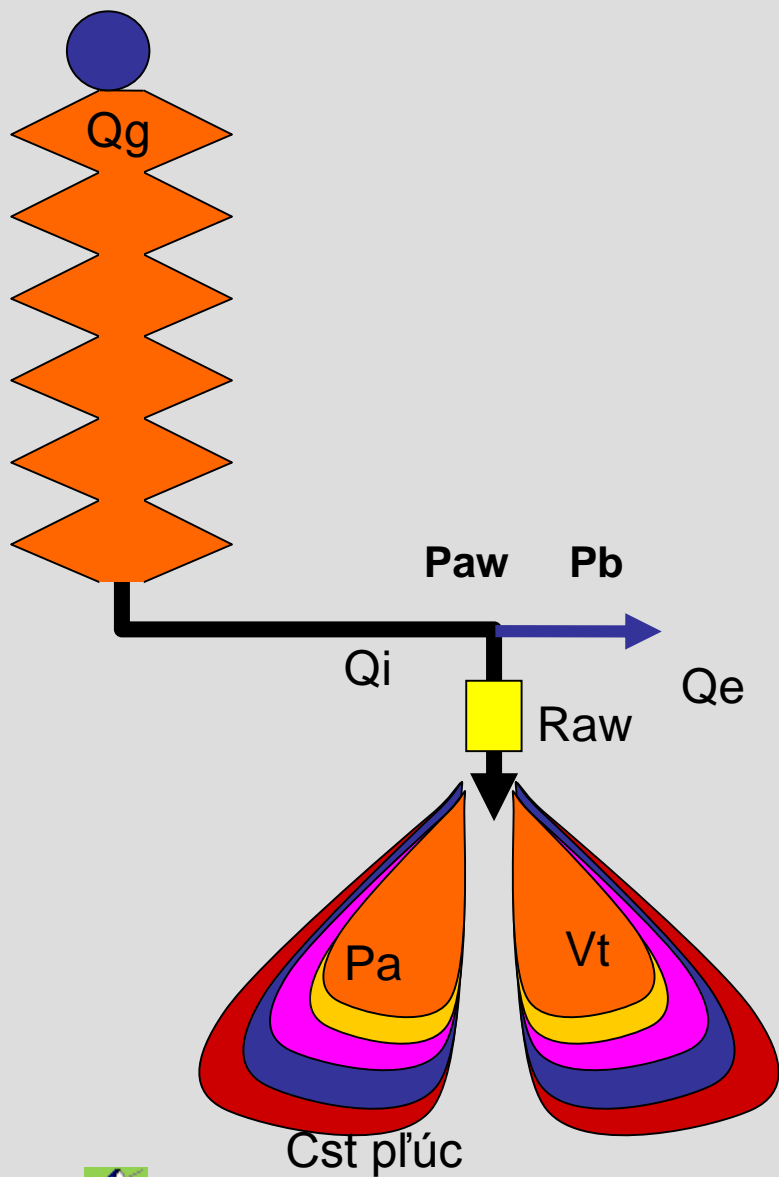
Ti = Te = 1 sek



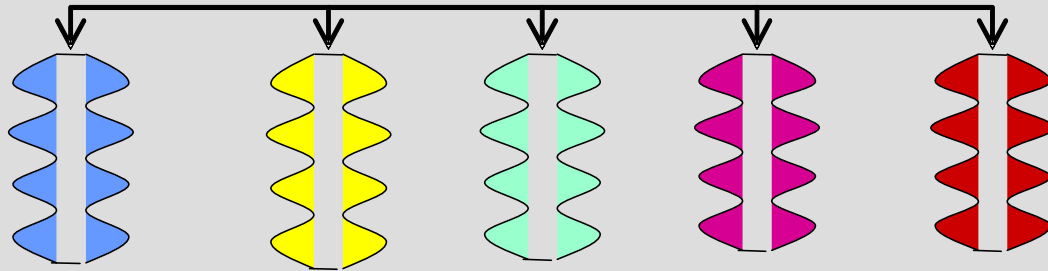
Ti = Te = 4 sek



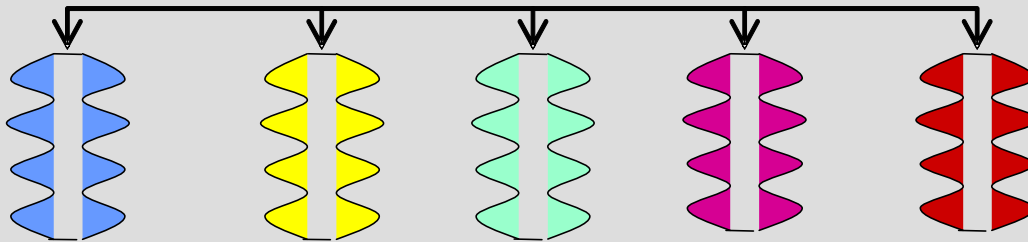
Vplyv časovej konštanty na inspírium a expírium pri generátore konštantného prietoku.



Plnenie a vyprázdňovanie kompartimentov pri rôznom T_i a T_e s konštantným vysokým Q_i (VCV).



$T_i = T_e = 1 \text{ sek}$



$T_i = T_e = 4 \text{ sek}$



Základné závery vplyvu Tau dýchacích orgánov na výmenu plynov

1. Časová konštanta pľúc /dýchacích orgánov/ je určovaná odporom (R) dýchacích ciest a poddajnosťou pľúc (C).
2. Časové konštanty v jednotlivých kompartmentoch pľúc (a to aj zdravých) nie sú rovnaké. V patologicky zmenených pľúcach sú časové konštanty kompartmentov rozdielne až o niekoľko 100 %.
3. Jednotlivé kompartmenty pľúc sa počas inspíria plnia a počas expíria vyprázdňujú na základe fyziky prúdenia plynov a závisia od lokálnej časovej konštanty kompartmentu.
4. Plnenie a vyprázdňovanie kompartmentu sa deje v reálnom čase T_i , a T_e .
5. Naplnenie , alebo vyprázdnenie kompartmentu ako aj celých pľúc závisí od pomeru naprogramovaného času inspíria (expíria) T_i / T_e a časovej konštanty Tau.
6. Nehomogenita distribúcie plynov v pľúcach je závislá od záverov v bode 5.
7. Distribúcia plynov je smerovaná do kompartmentov s kratšou časovou konštantou.
8. Tau (τ) je konštantné pre laminárny prietok plynov v pľúcach s lineárnym priebehom odporov prietoku (R) a lineárnym priebehom hodnôt statickej poddajnosti pľúc (C).



Je to krásne čo sme si povedali, ale **len relatívna pravda**, či skôr **úplná lož u pacienta na UVP** (umelá ventilácia pľúc).

To čo sme si predviedli na predošlých obrázkoch je pravda, ale **skúste ventilovať pacienta bez** : endotracheálnej či tracheostomickej kanyly bez hadíc ventilátora, filtra, HME, z vlhčovača, expiračného ventilu, snímača prietoku..... a nakoniec aj samotného ventilátora....Atd' ????

Je to nemožné ! Pri použití klasického ventilátora (iné systémy nebudem rozoberať)

Nech máme akýkoľvek ventilátor, akékoľvek farebné, vyhrievané ,silikónové hadice, akýkoľvek zvlhčovač, snímač, expiračný ventil, zelené či biele filtre, ak chceme ventilovať musí byť pacient na ventilátor pripojený hadicami s ostatnými komponentmi a to zvyčajne ET či TS kanylou.

Všetky vyššie opísané komponenty ventilátora vytvárajú odpor prietoku plynov do, ako aj z pacientových pľúc a **tento odpor je:**

NELINEÁRNY, t.j. závislý na prietoku plynov. R stúpa so zvyšujúcim sa Q.

$$\tau = R \cdot C = 0,2 \cdot 0,5 = 0,1 \text{ sek} = 100 \text{ ms} - \text{pľúca samotné}$$

$$\tau = (R_{aw} + R_t + R_{i(e)} + R_{valve} + R_{sensor} + R_{filter}) \cdot C = 1,5 \cdot 0,5 = 0,75 \text{ sek} = 750 \text{ ms}$$

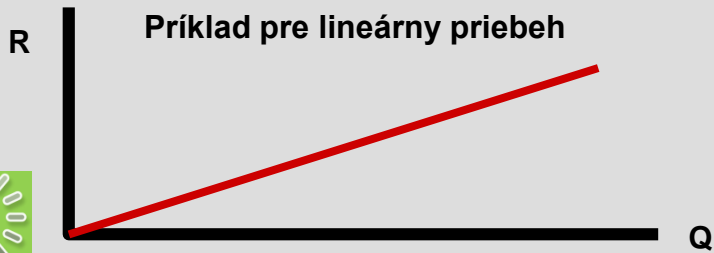
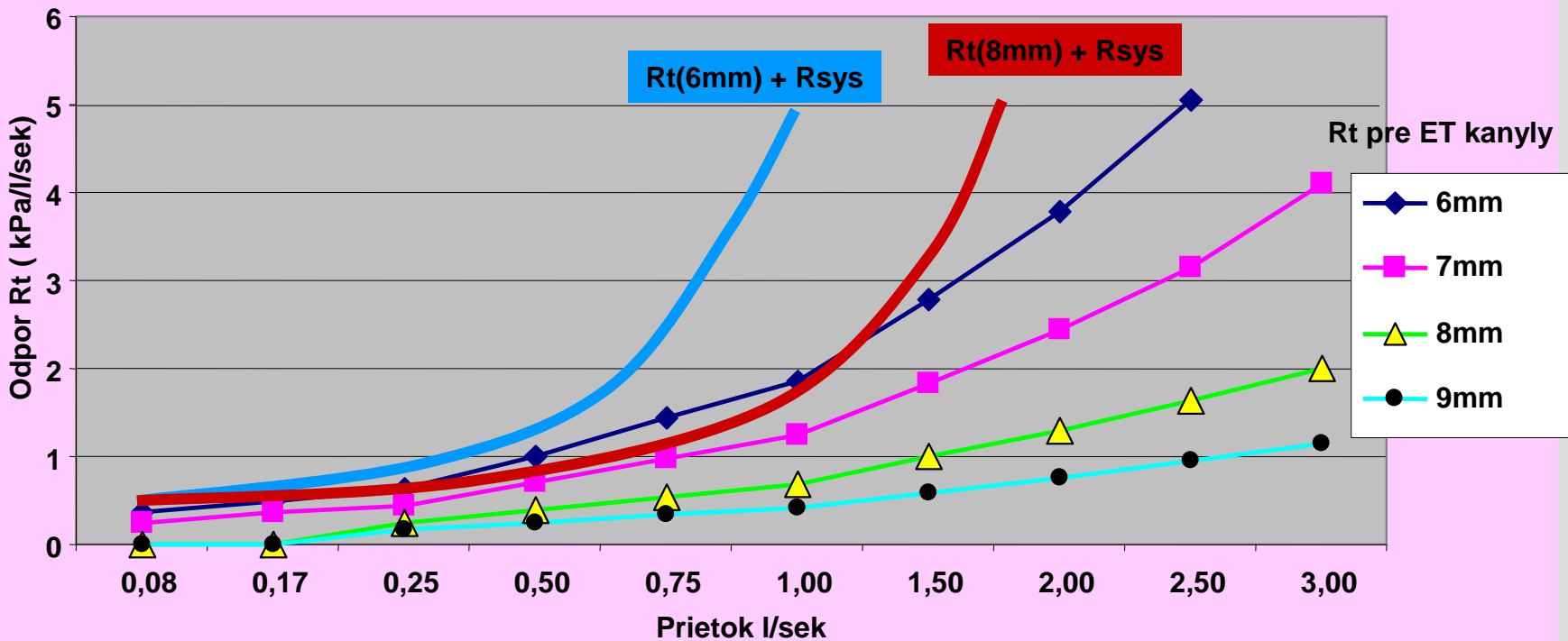
Ešte sme nič neurobili a v statickom stave - odrazu len pripojením na ventilátor je zmenená časová konštanta o 750% -- kde je teda reálne číslo ??? Teda „ τ “ ??



Nelineárnosť odporov ET kanýl a okruhu ventilátora

Odpory ET kanýl (R_t)

Pre priemery = 6, 7, 8, a 9 mm – samotné kanyly a s odporom exspiračného systému Resys.



Nie je Tau ako Tau

Ak si ľubovoľným spôsobom odmeriame odpor dýchacích ciest (R_{aw}) a statickú poddajnosť pľúc (C_{st}) môžeme vypočítať časovú konštantu pľúc (dýchacích orgánov).

$$\tau = R \cdot C.$$

V tomto prípade bude platiť (približne), **že všetky časové konštanty majú rovnakú hodnotu.**

$\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = k$ Tieto časové konštanty som nazval
„časová konštantá statická“ (τ_{st}).

V prípade, že u pacienta ventilujúceho na ventilátore a budeme iteračnou metódou merať reálne hodnoty časovej konštanty počas ventilačného cyklu, zistíme, **že časová konštantá sa mení na premennú** a že neplatí $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = k$.

Platí ale, že: $\tau_1 > \tau_2 > \tau_3 \neq k$ Tieto časové konštanty som nazval
„časová konštantá dynamická“ (τ_{dyn})

τ_{dyn} odráža reálnu hodnotu časovej konštanty systému – ventilátor a jeho komponenty + pacient a jeho mechanické vlastnosti pľúc



Meranie časových konštánt u pacienta napojeného na UVP Iteračný výpočet Tau na komplexe ventilátor + pacient.

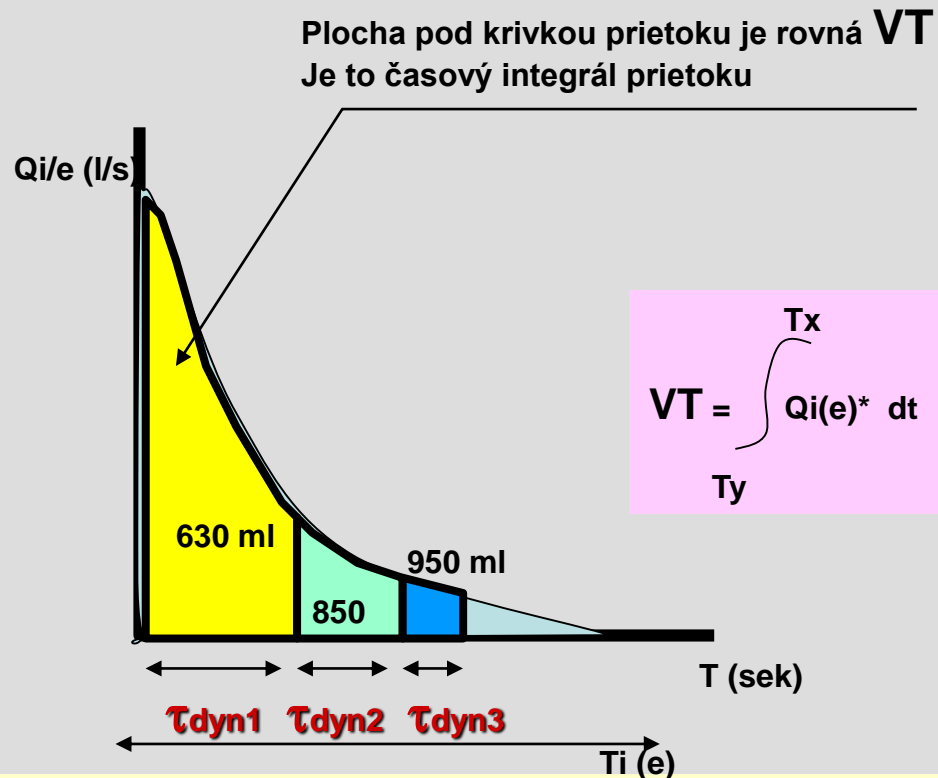
Príklad:

Nech zmerané $VT = 1$ liter za čas Ti/e

Potom počítač spätne hľadá objem VT
Na hodnote 63% z koncovej hodnoty
Na sumárnej hodnote 85% z koncovej hodnoty
A nakoniec na hodnote 95% z koncovej hodnoty

Hľadá teda spätne (iterácia) tejto hodnoty a odčítava čas, kedy bola dosiahnutá.
Čas dosiahnutia plnenia exponenciálnej funkcie je hľadaný čas časových konštánt

V našom príklade 630 ml, 850 ml, a 950 ml.



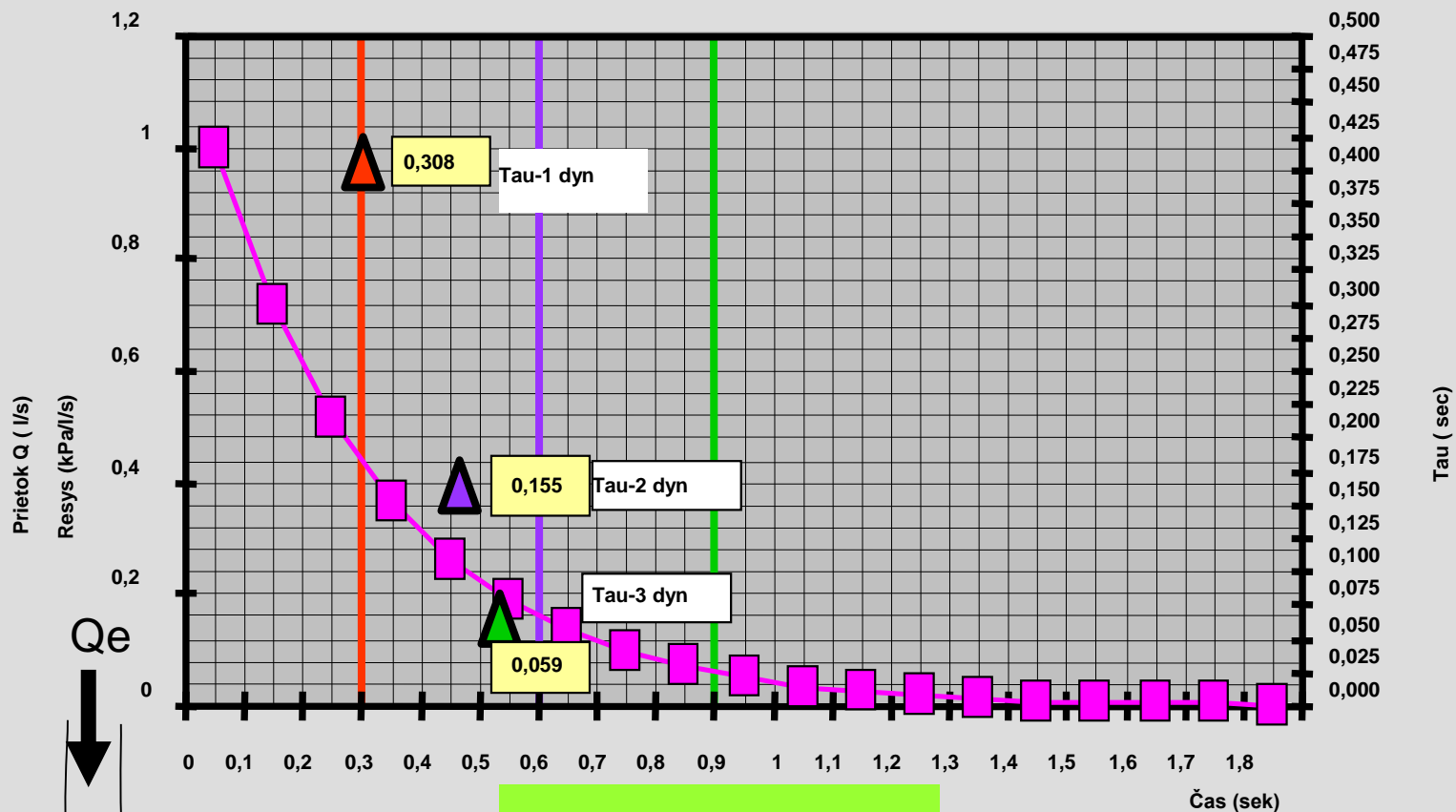
Vyššie uvedeným spôsobom sa v reálnom čase merajú dynamické časové konštanty u pacienta, ktorý je pripojený na ventilátor

Takto zmeraná hodnota **T_{dyn}** predstavuje časovú konštantu komplexu

ventilátora s jeho komponentami a ET(TS) kanylou a **pacientových pľúc** s určitými mechanickými vlastnosťami v reálnom čase.



Statická a dynamická časová konštanta



Q_e



R_t

$$\tau_{st} = R \cdot C = 0,1 \text{ sek}$$

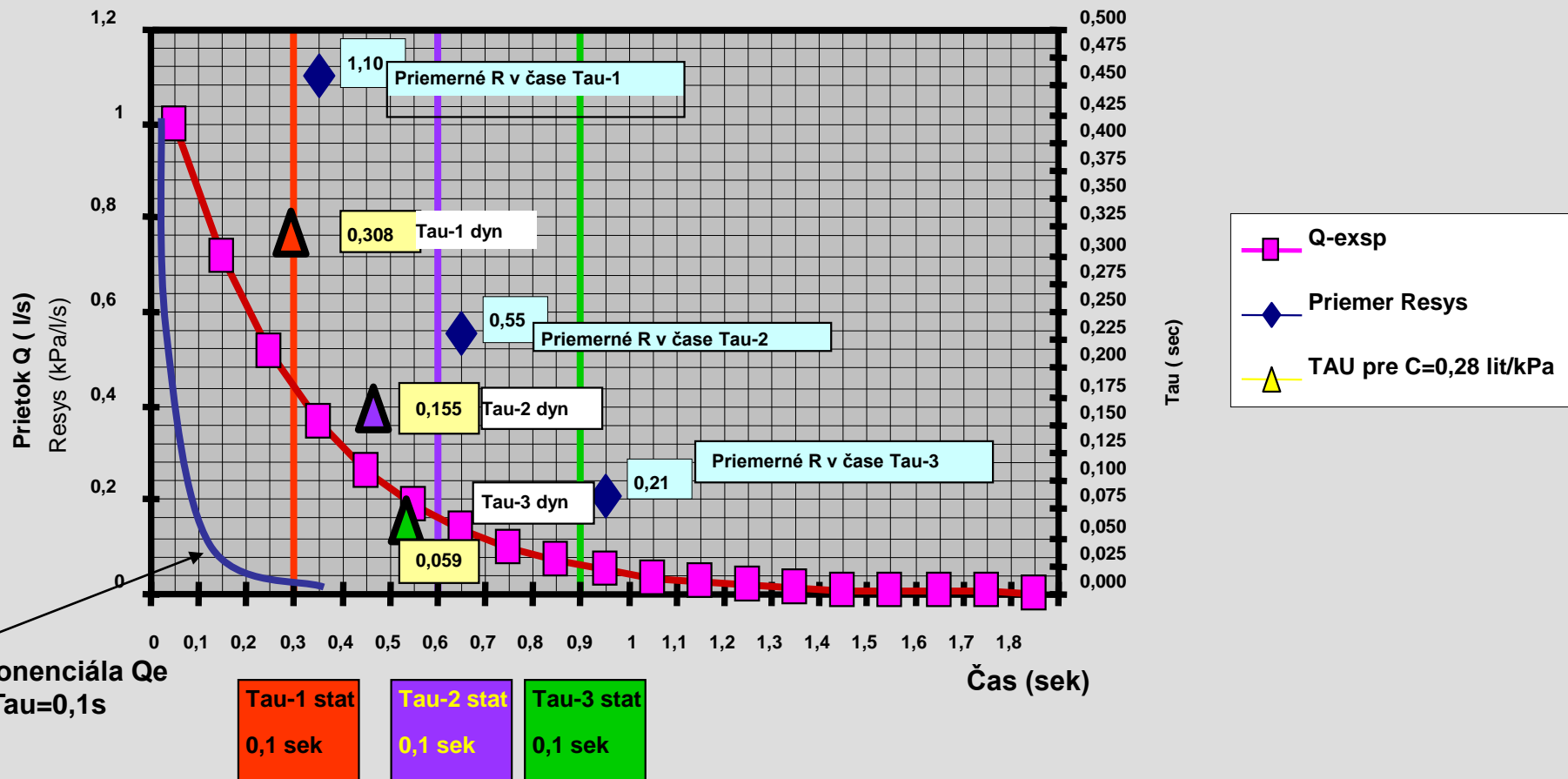
Q_e l*s-1	R_t kPa*l-1*s-1	τ_{dyn}
0,8	1,1	0,31
0,38	0,55	0,155
0,21	0,21	0,059

Pojem dynamické Tau (τ_{dyn})



Zmeny dynamickej časovej konštanty -Tau počas expíria a ich závislosť na zmene expiračného prietoku (Q-exsp) a odpore expiračného systému (REsys).

Matematický model pre modelovanú poddajnosť Cst = 0,28 lit. / kPa. ET kanyla 7 mm.



Rt (priemerné) pri Qi= 0,2 l/sek = 0,35 kPa*l-1*s-1

Cst = 0,28 l*kPa-1

Taustat = R*C = 0,35 * 0,28 = 0,10 sek.



Meranie – výsledky a fikcie pri UVP

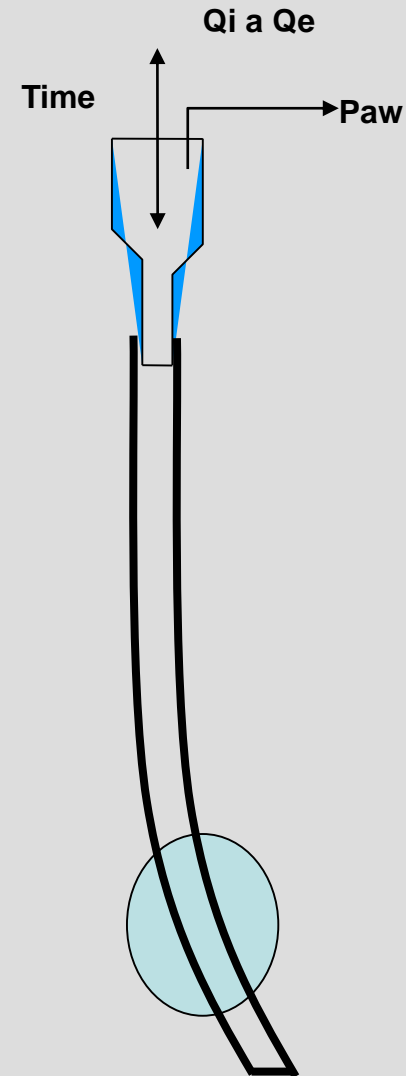
1. Počas UVP je pacient pripojený na ventilátor jediným otvorom a to prípojkou ET resp. TS rúrky zavedenej do trachey.
2. Týmto jediným otvorom prúdi plyn do pacientových pľúc ako aj z nich von
3. Ventilátor na obrazovke zobrazuje dobrých 15 či 20 parametrov, ktoré sa považujú za merané.

FIKCIA !!! , marketing ?

Ventilátor a jeho technologické súčasti sú schopné odmerať:

1. Prietok plynov počas inšpiria a expíria (Q_i a Q_e)
2. Tlak pred ET, TS kanylou (Paw)
3. Čas inšpiria, a expíria , vrátane Tau dyn (t)

Všetky ostatné parametre sú vypočítavané s akou takou presnosťou.

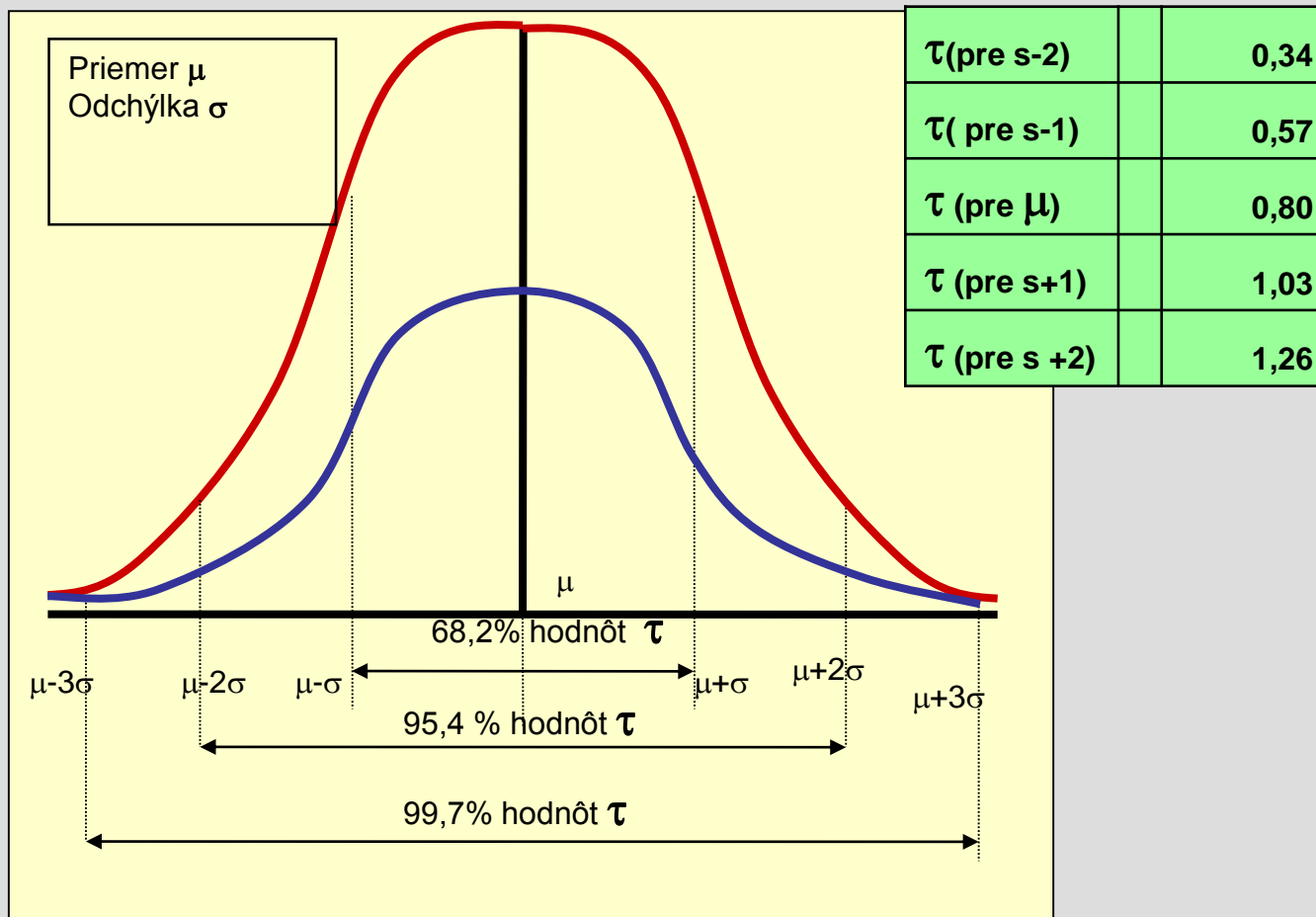


Meranie – výsledky a fikcie pri UVP II.

Ako bolo na predošlom obr. znázornené, môžeme reálne merať len tri veličiny a len na jednom otvore ET kanyly. Čo sa deje v pľúcach môžeme len tušiť.

Čo meriame či vypočítavame z hľadiska celých pľúc je PRIEMERNÁ HODNOTA

Ako každá hodnota fyzikálneho systému, ktorý je nehomogénny má svoj rozptyl- idealizovaný Gaussovým rozdelením.



Ako k ničomu nevedie merané τ_{dyn} **ako jednotlivá hodnota ?**

$$\tau = R_{\text{sys}} * C_{\text{st}} = 0,5 * 0,5 = 0,25 \text{ sek}$$

$$\tau = R_{\text{sys}} * C_{\text{st}} = 0,25 * 1,0 = 0,25 \text{ sek}$$

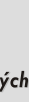
$$\tau = R_{\text{sys}} * C_{\text{st}} = 1,0 * 0,25 = 0,25 \text{ sek}$$

Vyššie uvedený príklad je typický:

Ak sme simulovali C a R na hodnote 0,5 tau je 0,25 s

Ak sa poddajnosť zlepši (zvýši) a odpor zníži, tau je znovu 0,25s

Ak sa poddajnosť zníži a odpor zvýši, tau je znovu 0,25 sek



1. Zmena chápania dejov pri UVP

Pochopenie **funkcie časovej konštanty** počas výmen plynov v pľúcach dodáva našim predstavám

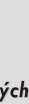
ŠTVRTÝ ROZMER = ČAS

VT v ml (litroch) je trojrozmerný objem, ale VT sa nedostane do/z pľúc v nekonečne krátkom čase = „teraz“, ale dostane sa do/z pľúc za nejaký čas T_i/e .

Distribúcia plynov v pľúcach je určovaná **pomerom T_i/τ_{dyn} toho ktorého kompartmentu**

Prakticky všetky merané i vypočítavané veličiny sa menia v čase a po uplynutí zvoleného (programovaného) času sa dosiahne koncová hodnota = na displeji VT, P_{awmax} , PEEP...

Funkcia časovej konštanty nám umožňuje pochopiť **deje meniace sa v čase** pri výmene plynov v pľúcach



1. Úplne nový spôsob on line monitorovania mechanických vlastností pľúc.

Monitorovanie v reálnom čase (každý dychový cyklus)

Monitorovanie v každom ventilačnom režime, bez nutnosti prerušiť proces UVP.

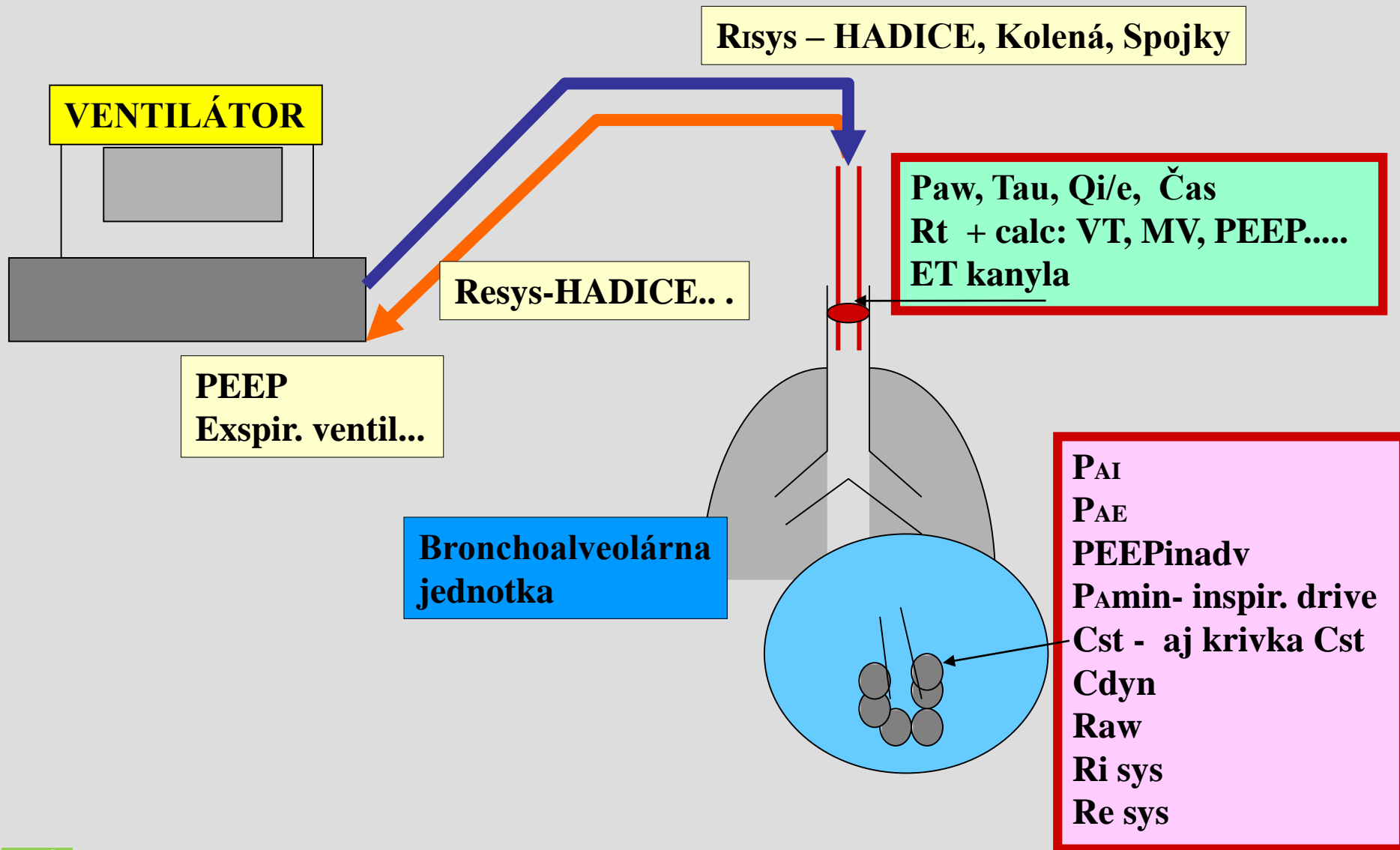
Multiparametrický monitoring umožňujúci podstatne precíznejšiu diagnostiku

Spätná kontrola výpočtov.

Realizácia nových grafických i analógových diagnostických údajov



Meranie – na čo je teda dobré poznať τ_{dyn} III.



1. Možnosť optimalizácie parametrov nastavenia ventilátora.

Nastavenie optimálnej frekvencie a pomeru $T_i:T_e$

Nastavenie „optimálnej minútovej ventilácie“ a dychového objemu z pohľadu znižovania špičkových alveolárnych tlakov – **protektívnosť UVP**

Pomocou diagnostiky nastavenie a optimalizácia PEEP a **recruitmentu**

Kontrola PEEPi , kontrola **alveolárnych inspiračných tlakov** – „**inspiračného drajvu**“ **pri asistovanom dýchaní**

Realizácia nových diagnostických procesov ako napríklad **WAI** – **waening ability indexu**



Záverom.....na čo je teda dobré poznať τ_{dyn} ???.

Ak platí že:

Optimálnu UVP je teda možné charakterizovať ako súbor metód, postupov a technických pomôcok, ktoré umožňujú zabezpečiť oxygenáciu venózne krvi, ako aj elimináciu oxidu uhličitého z krvi v pľúcach v prípade, že dýchacie orgány, vrátane regulačných systémov nie sú schopné tieto funkcie plniť z dôvodov priameho, či nepriameho poškodenia alebo zámerného, zvyčajne jatrogénneho vyradenia z funkcie.

UVP by na základe vhodnej priamej diagnostiky pľúcnej mechaniky, ako aj **nepriamej diagnostiky** (napr: transport O₂, hemodynamika) mala byť **optimalizovaná tak, aby sa v čo najmenej miere prejavovali adverzné účinky na organizmus pacienta.**

Potom:

Poznanie základných **biofyzikálnych procesov výmeny plynov v pľúcach**, ktorých neoddeliteľným **základným prvkom** je τ_{st} (statická časová konštanta) dýchacích orgánov, zakladá aj **sekundárne poznanie výmeny plynov v pľúcach počas umelej ventilácie** so **základným prvkom** ktorým je dynamická časová konštanta τ_{dyn} .



Ďakujem za trpezlivosť

(C) 2015

