

FIZJOLOGIA

WYKŁAD 7 UKŁAD ODDECHOWY

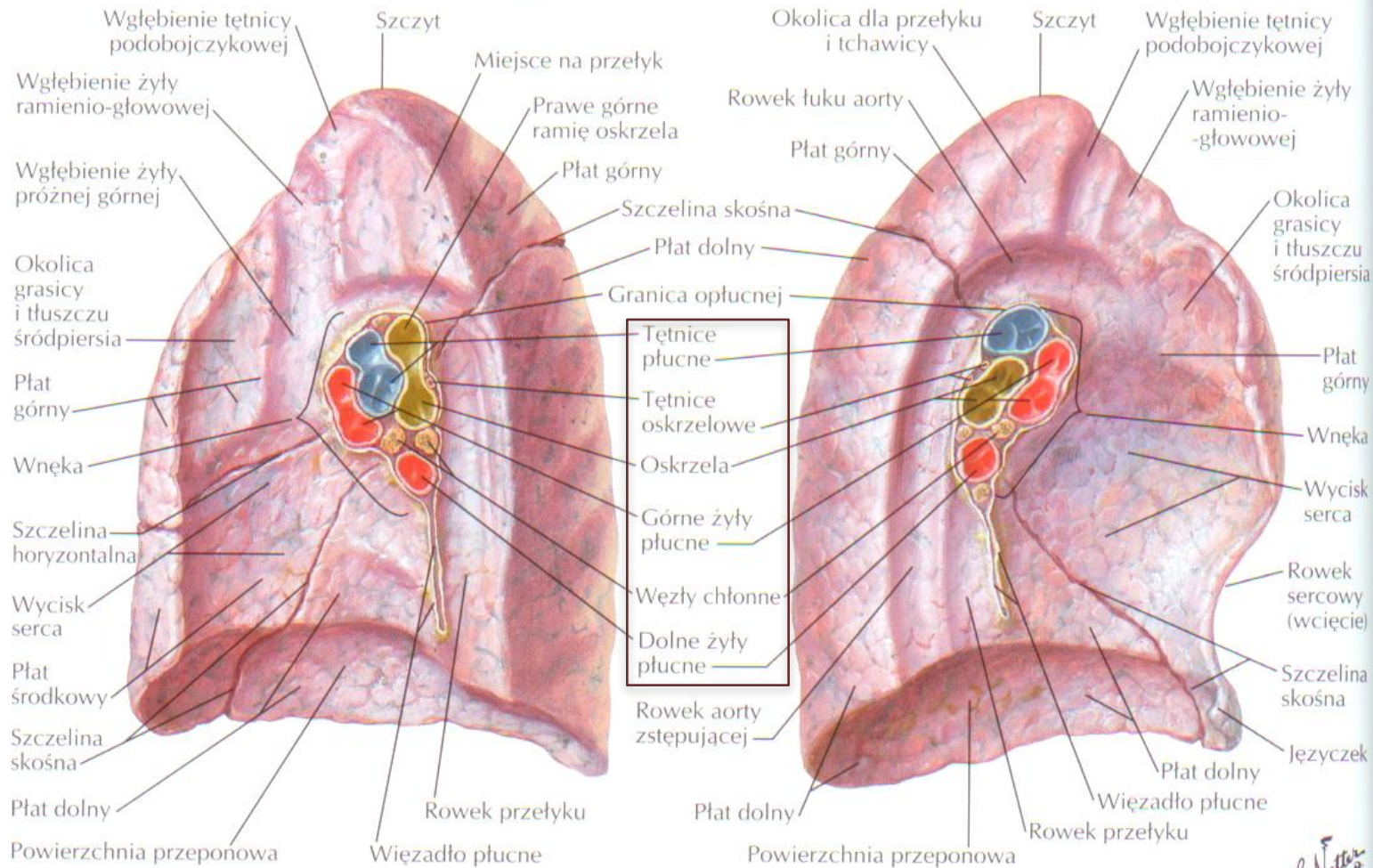
dr inż. Magda Przybyło

FIZJOLOGIA – WYKŁAD 7 – UKŁAD ODDECHOWY

Przyśrodkowa powierzchnia płuc

Wewnętrzna powierzchnia prawego płuca

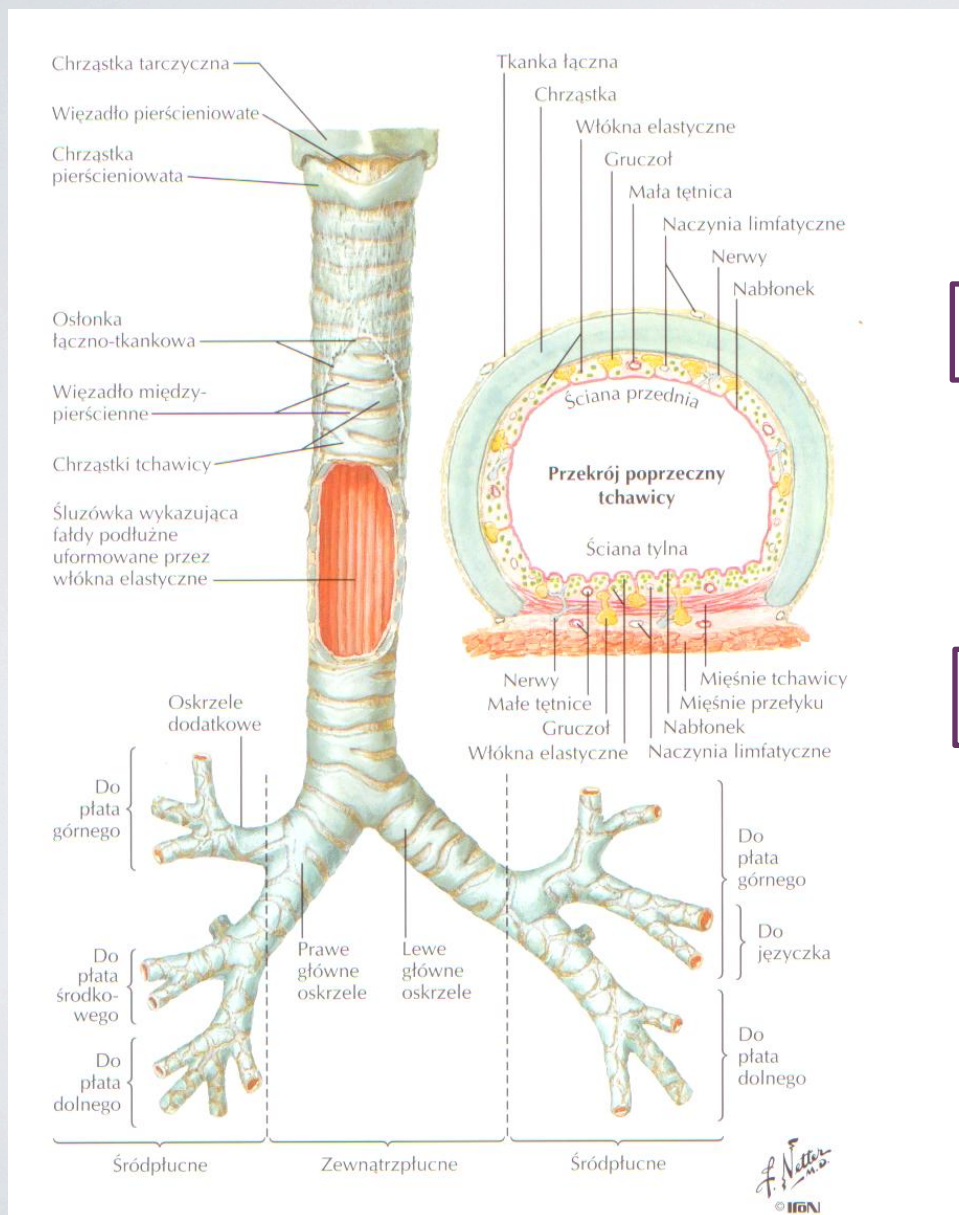
Wewnętrzna powierzchnia lewego płuca



Płuco prawe: 3 płaty

Płuco lewe: 2 płaty

Budowa tchawicy i oskrzeli głównych



Tchawica



Oskrzela pierwszorzędowe



Oskrzeliki



Przewody pęcherzykowe



Pęcherzyki płucne

Drogi oddechowe śródplucne

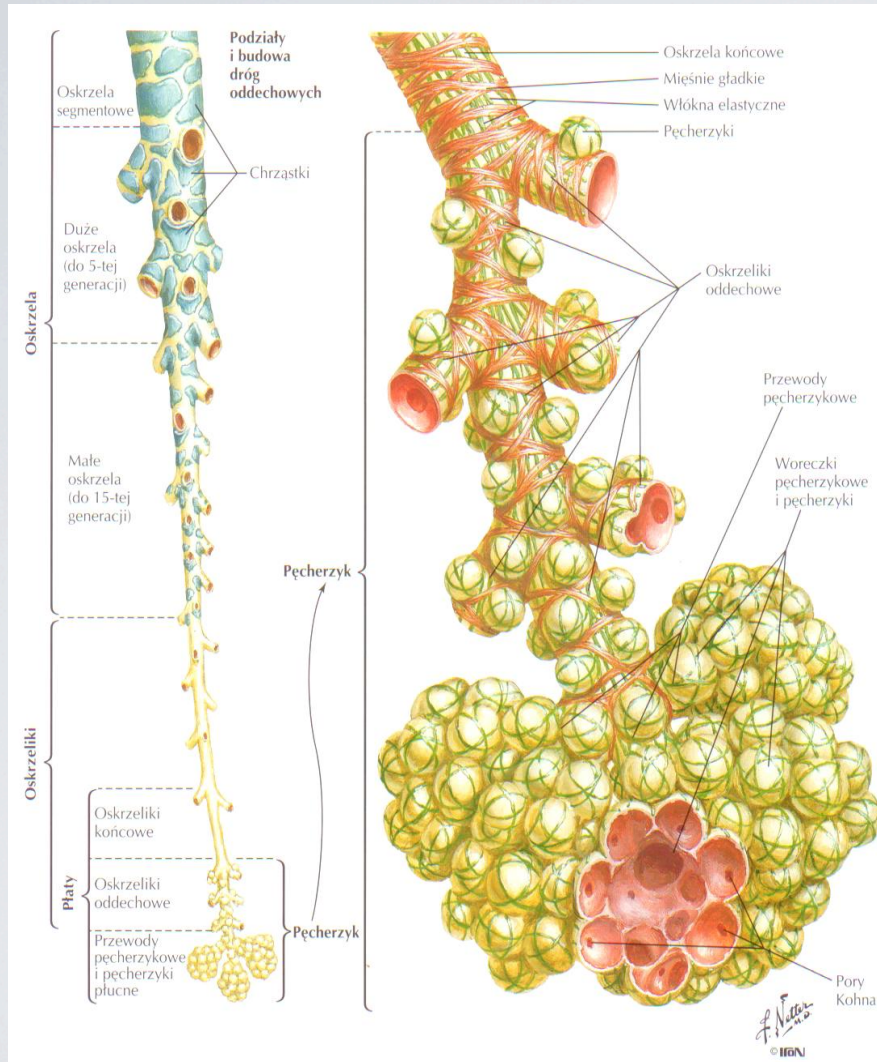
23 generacje dzielących się oskrzeli.

Wymiana gazów zaczyna się na odcinku oskrzelików oddechowych połączonych z pojedynczymi pęcherzykami.

Pełna wymiana gazowa odbywa się w obrębie przewodów pęcherzykowych, woreczków pęcherzykowych i samych pęcherzyków.

Ścianę pęcherzyków płucnych tworzy cienki nabłonek **jednowarstwowy płaski**

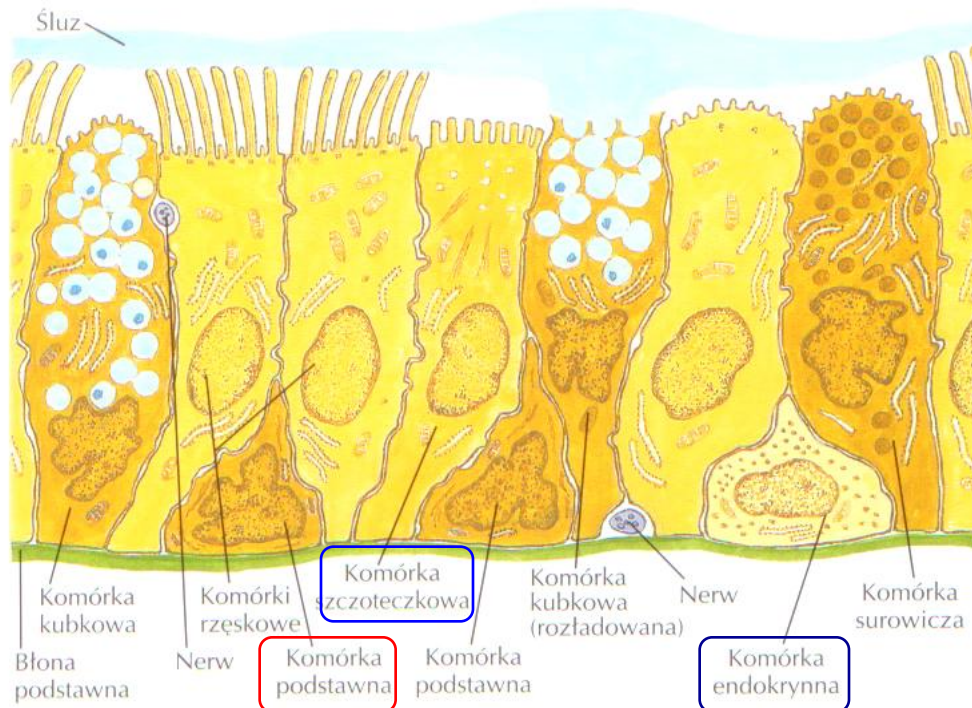
Liczbę pęcherzyków w płucach człowieka szacuje się na **300-500 milionów** a ich łączna powierzchnia wynosi **od 50 do 90 m²**.



Pęcherzyki płucne przylegają do siebie, w miejscach styku posiadają wspólny nabłonek **z porami Kohna** – przeciwdziałającymi **nierównej wentylacji**.

Histologiczna budowa tchawicy oraz oskrzeli i ich nabłonka

tchawica i oskrzela



Tchawica i duże oskrzela. Rzęskowe (gobletowe) komórki i komórki śluzowe z pojedynczymi komórkami surowiczymi i okazjonalnie występującymi komórkami szczoteczkowymi i jasnymi. Występuje tu też szereg komórek podstawy i pojedyncze komórki endokrynne

Komórki kubkowe – funkcja – wydzielanie śluzu

Śluz **zapobiega wysychaniu** powierzchni, jak i wychwytuje wdychane **substancje stałe**. Substancje stałe transportowane są na zewnątrz dróg oddechowych przy pomocy **brzeżka migawkowego**. (transport śluzowo-migawkowy).

Komórki podstawne – funkcja – pula regeneracyjna nabłonka.

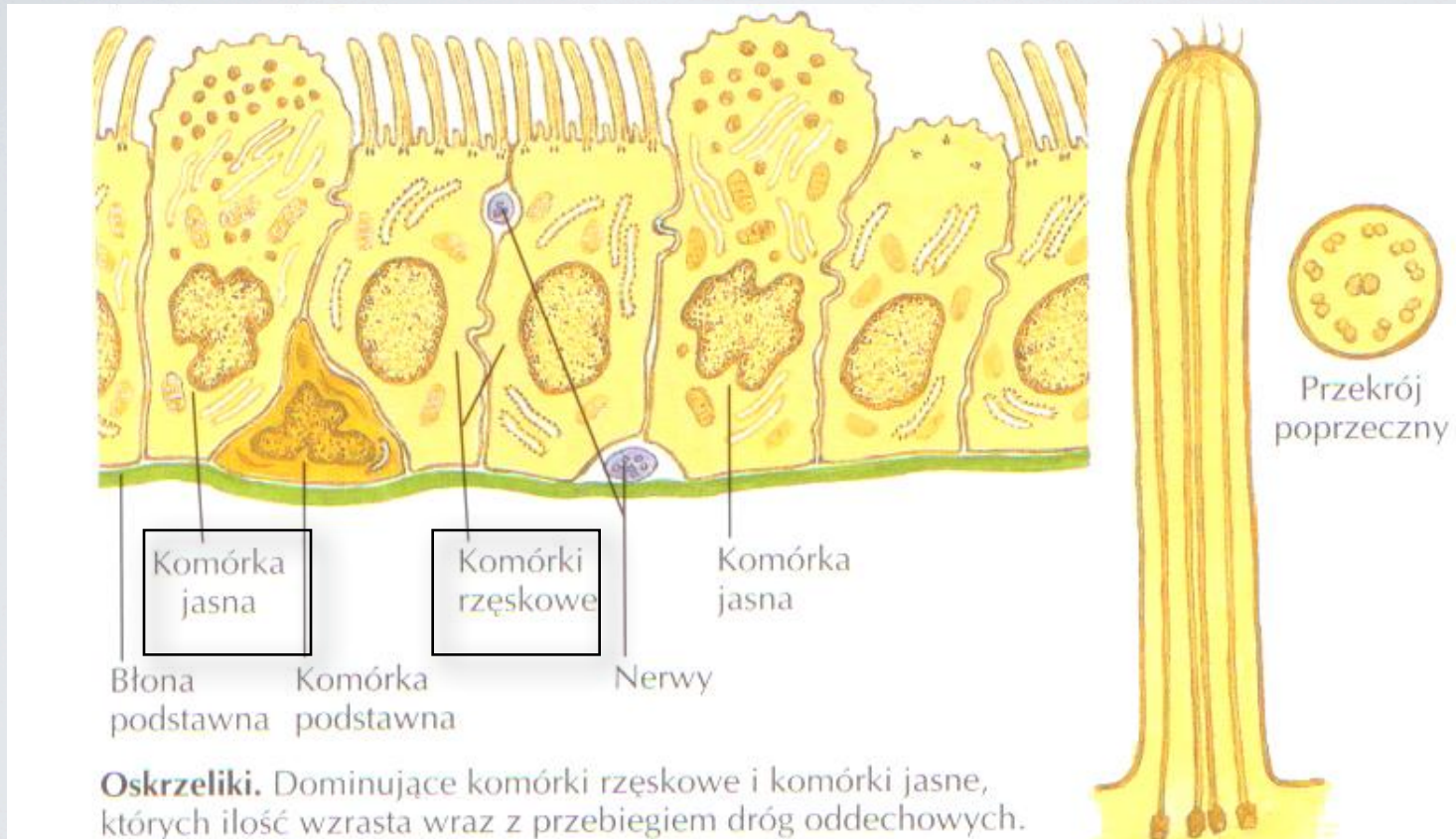
Komórki szczoteczkowe – przypuszczalna funkcja chemosensoryczna.

Komórki jasne – wydzielanie substancji o funkcji surfaktantu

Komórki endokrynne – parakrynne czynniki regulacyjne.

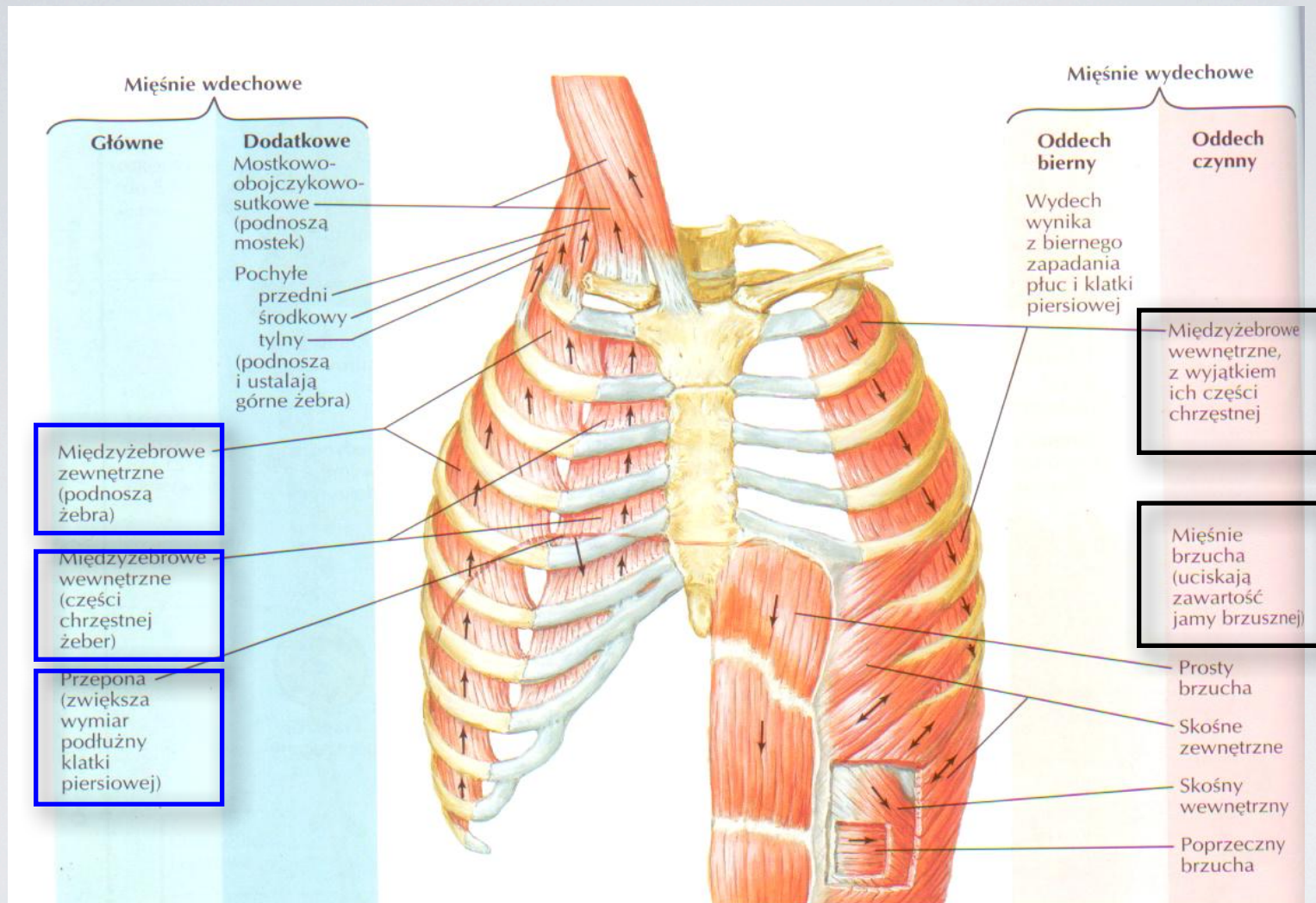
Histologiczna budowa tchawicy oraz oskrzeli i ich nabłonka

oskrzeliki



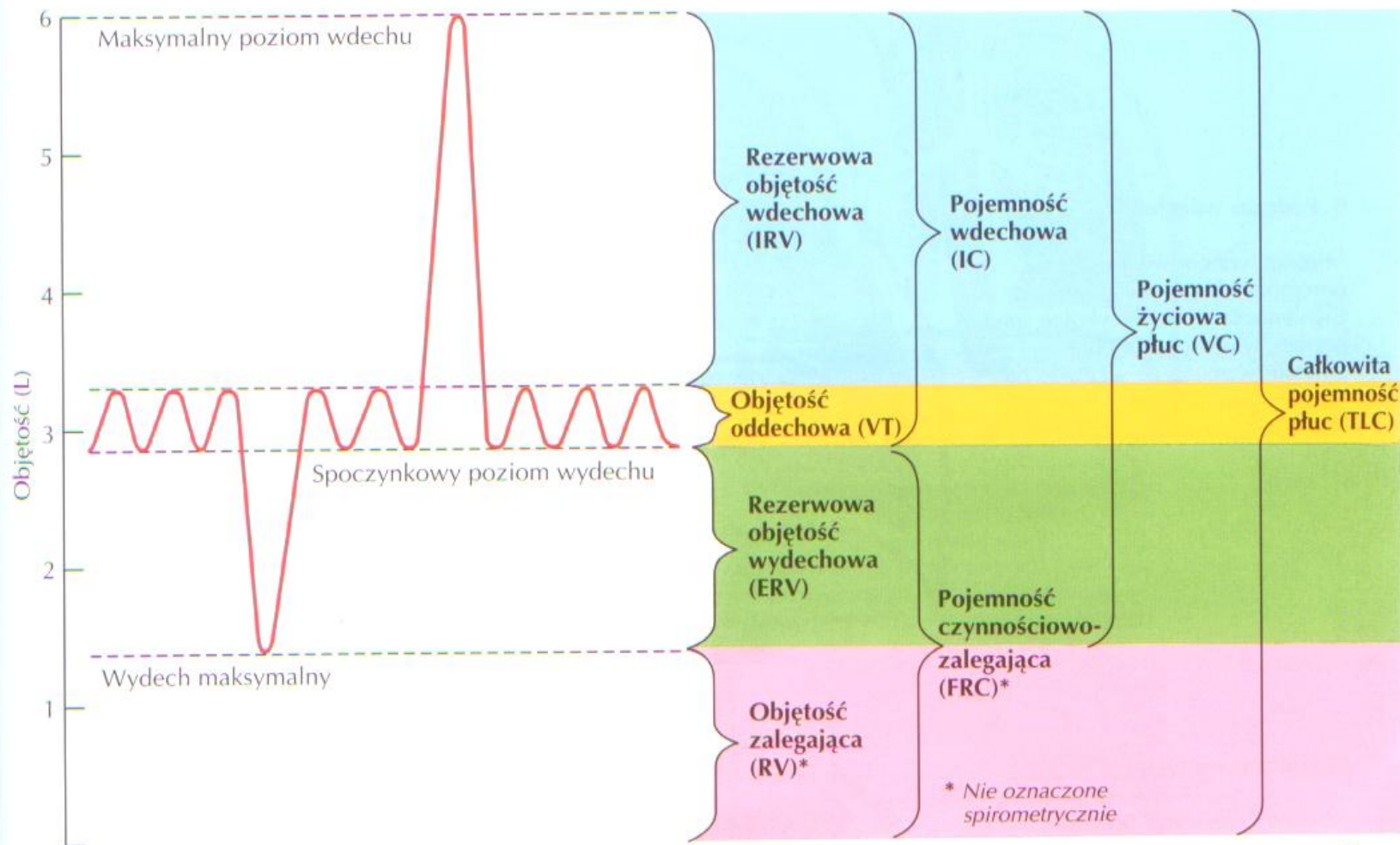
dominują komórki jasne i ręskowe

Mięśnie oddechowe



W stanie spoczynkowym skurcz przepony zapewnia 72% wdechu.
Wraz z wysiłkiem rośnie udział we wdechu innych mięśni.

Spirometria



Siły biorące udział w oddychaniu spoczynkowym

W spoczynku:

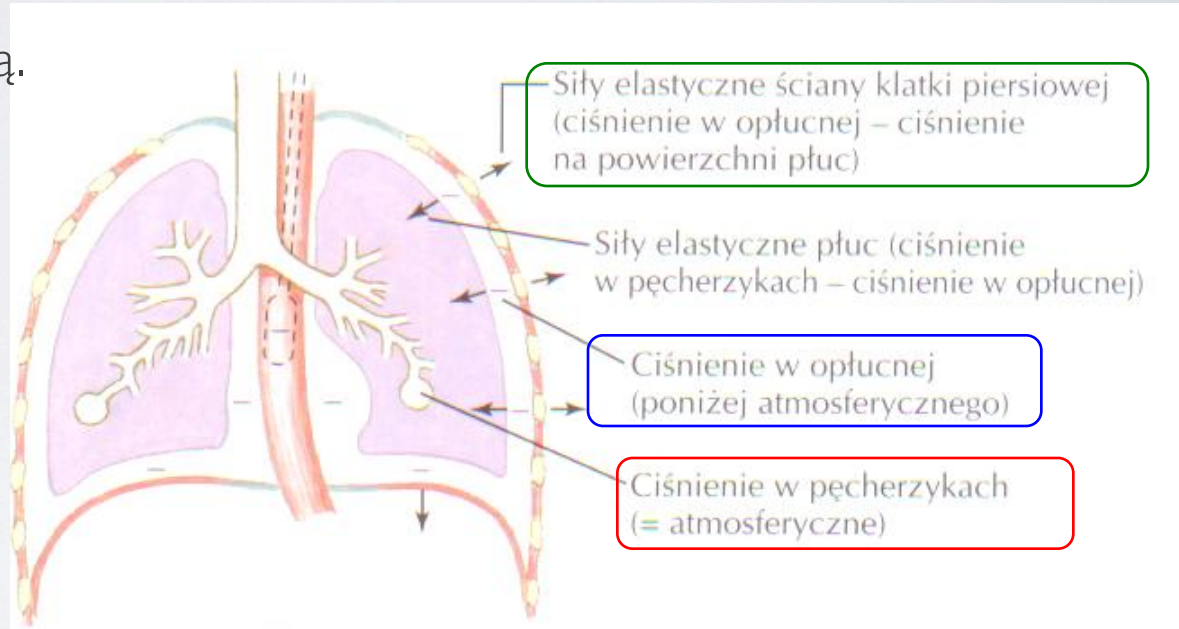
1. Mięśnie oddechowe nie pracują.

2. Siły elastyczne płuc i klatki piersiowej są równe, ale przeciwnie skierowane.

3. Ciśnienie w drzewie oskrzelowym jest równe atmosferycznemu.

4. $P_{\text{opłucnej}} < P_{\text{atm}}$

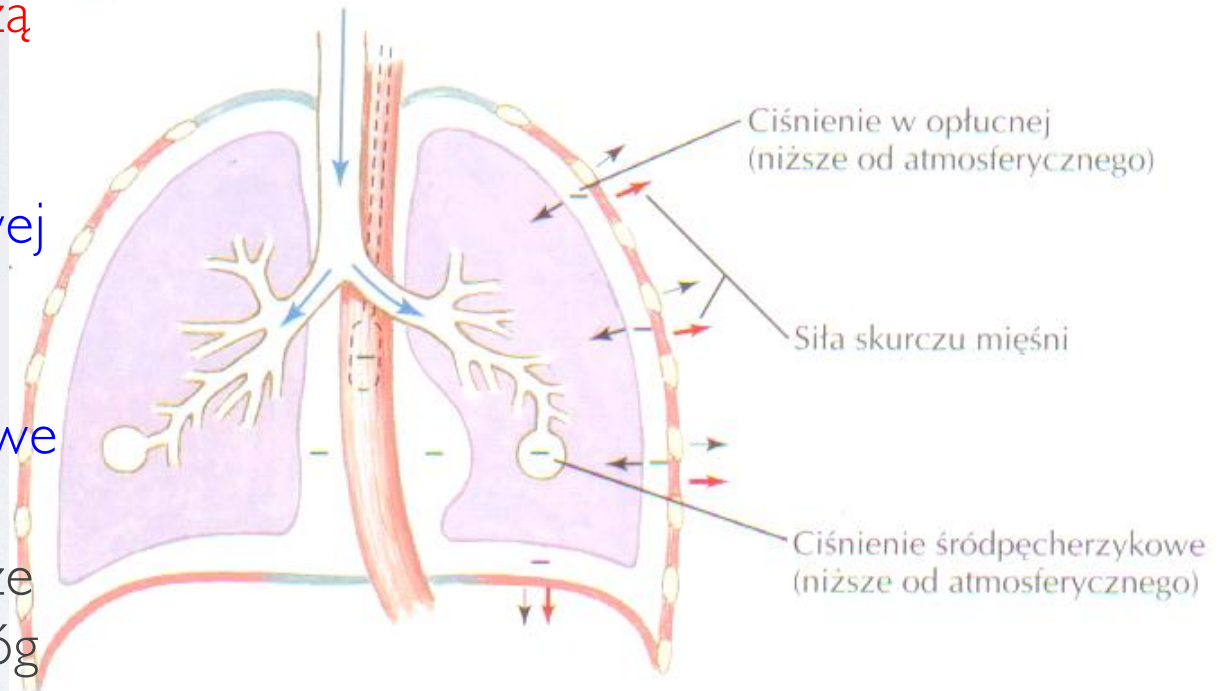
4. Nie ma przepływu powietrza



Siły biorące udział w oddychaniu spoczynkowym

Podczas wdechu:

1. Mięśnie wdechowe **kurczą się**.
2. Pojemność klatki piersiowej **wzrasta**.
3. Ciśnienie śródpięcherzykowe **spada** poniżej wartości ciśnienia atmosferycznego ze względu na poszerzenie dróg oddechowych.
4. Powietrze przemieszcza się do płuc



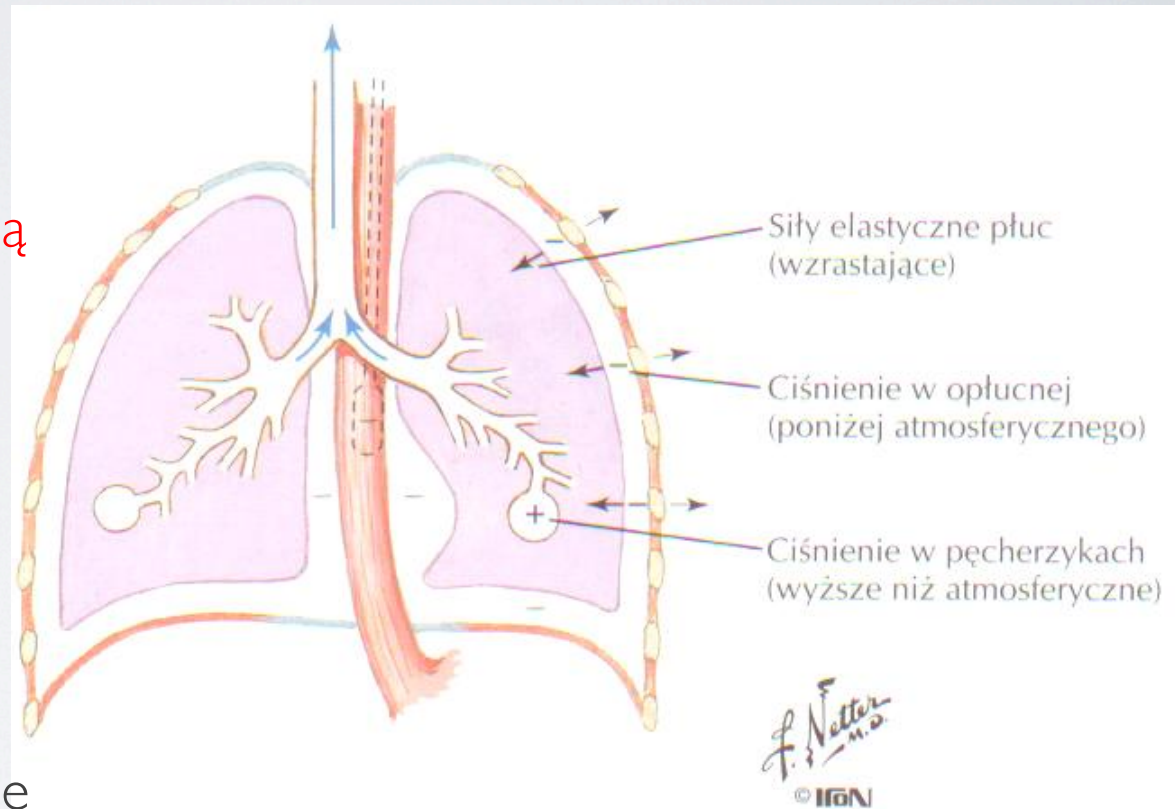
Siły biorące udział w oddychaniu spoczynkowym

Podczas wydechu:

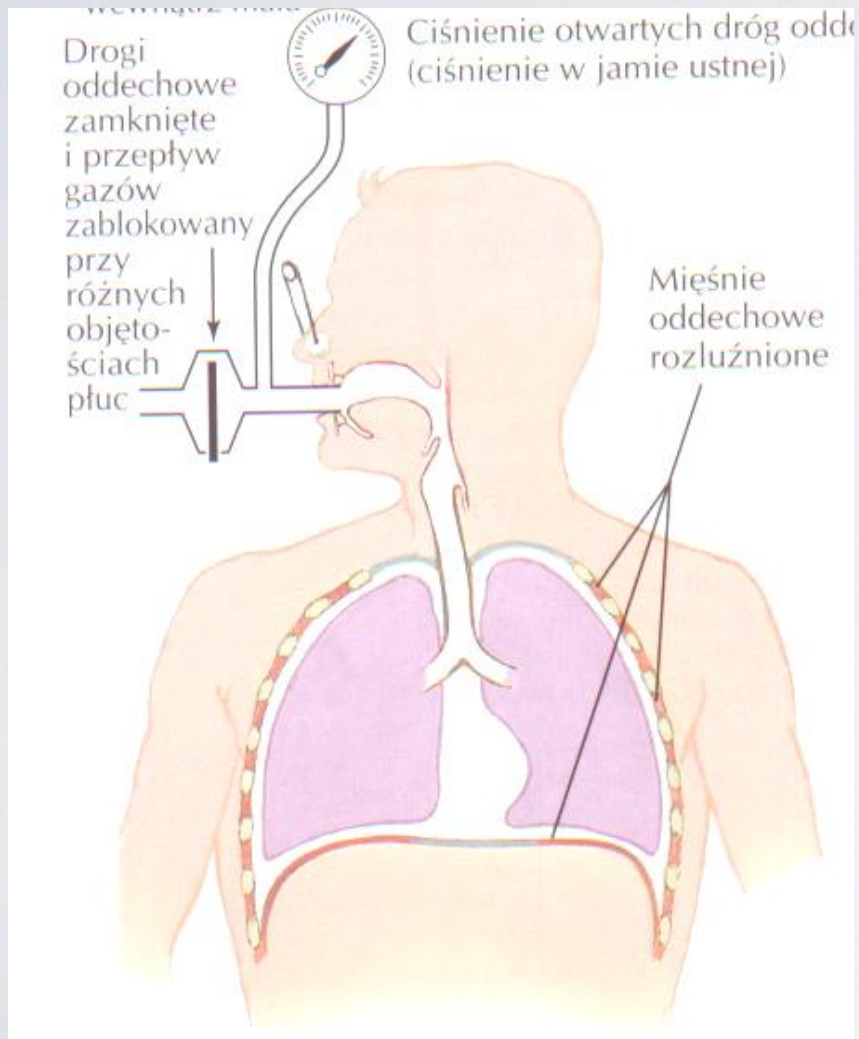
1. Mięśnie wdechowe **ulegają rozluźnieniu**

2. Siły elastyczne płuc powodują podniesienie ciśnienia gazów powyżej ciśnienia atmosferycznego

3. Powietrze przemieszcza się na zewnątrz.



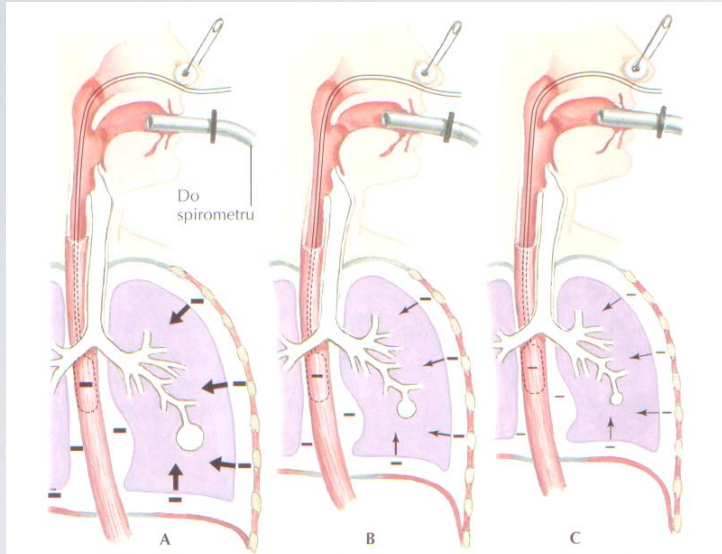
Spirometria - Pomiar oporów elastycznych płuc



Ciśnienie zmierzone w jamie ustnej jest równe ciśnieniu pęcherzykowemu, gdy przepływ powietrza jest zatrzymany.

Umożliwia to pomiar podatności układu oddechowego przy rozluźnionych mięśniach oddechowych.

Pomiar oporów elastycznych płuc

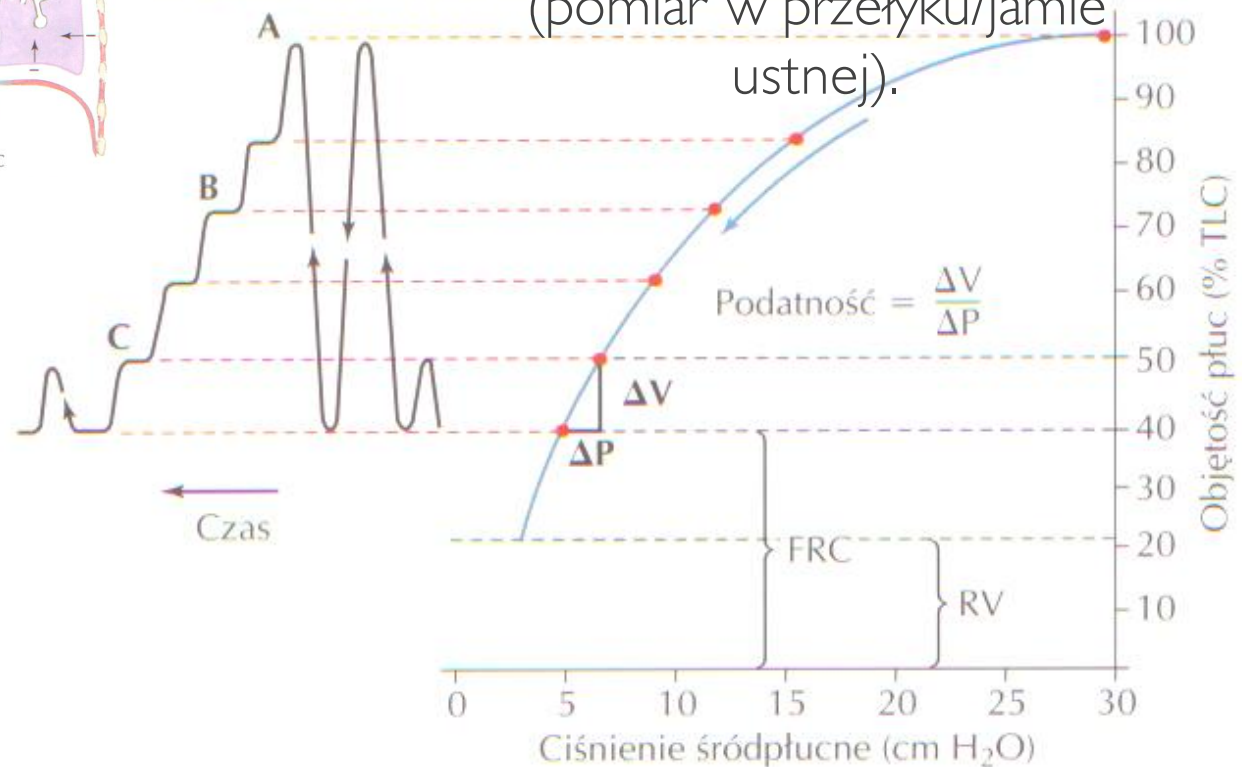


RV – pojemność zalegająca

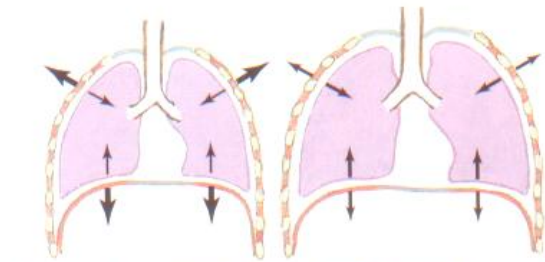
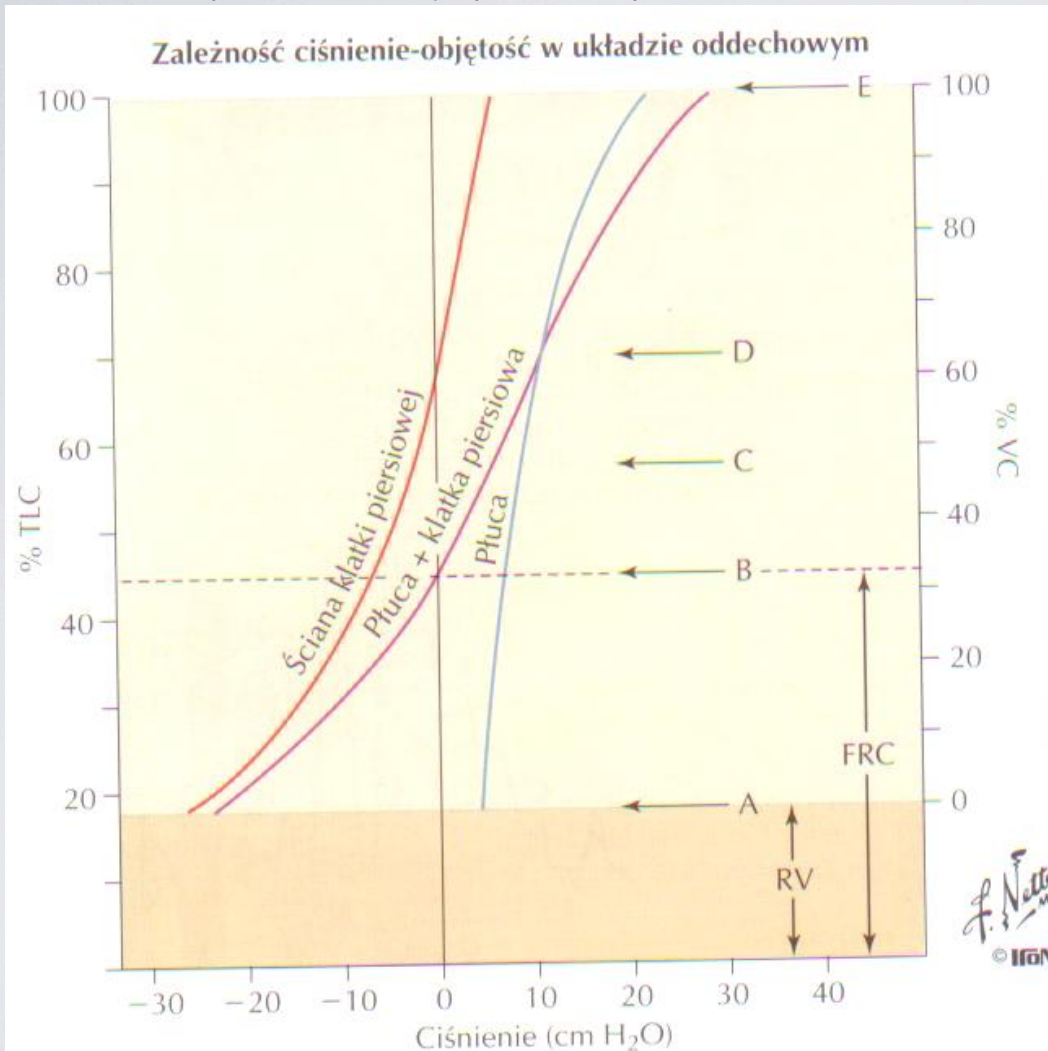
FRC – pojemność czynnościowo zalegająca

Pomiar w trakcie powolnego wydechu
poczynając od całkowitej objętości płuc (TLC)

Wydech przerywany celem pomiaru objętości płuc i ciśnienia śródplucnego (pomiar w przełyku/jamie ustnej).

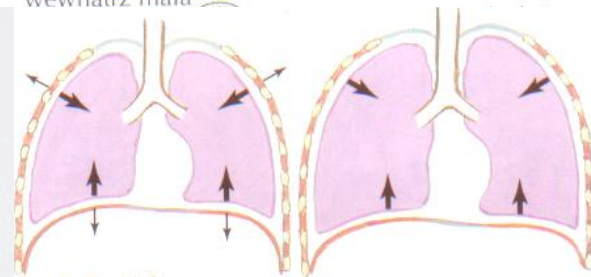


Elastyczne właściwości układu oddechowego – płuca i ściany klatki piersiowej (wdech)



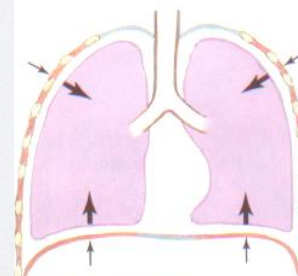
A. Objętość rezerwowa
Podatność klatki piersiowej z wektorem skierowanym na zewnątrz jest duża, a płuca z wektorem skierowanym do wewnątrz mała

B. Pojemność czynnościowo-zalegająca
Podatność klatki piersiowej i płuca są równe



C. Powiększona pojemność płuca
Podatność klatki piersiowej maleje, a płuca wzrasta

D. W okolicy 70% całkowitej pojemności płuca
Podatność ścian klatki piersiowej osiąga zero



E. Po osiągnięciu pojemności życiowej płuca
Elastyczność obydwóch: płuca i klatki piersiowej powoduje powstanie wspólnego wektora skierowanego do środka pobudzającego zmniejszenie objętości płuca

Podatność całego układu oddechowego jest algebraiczną sumą podatności płuca i ścian klatki piersiowej

Przepływ powietrza przez drogi oddechowe

liniowy - obwodowe drogi

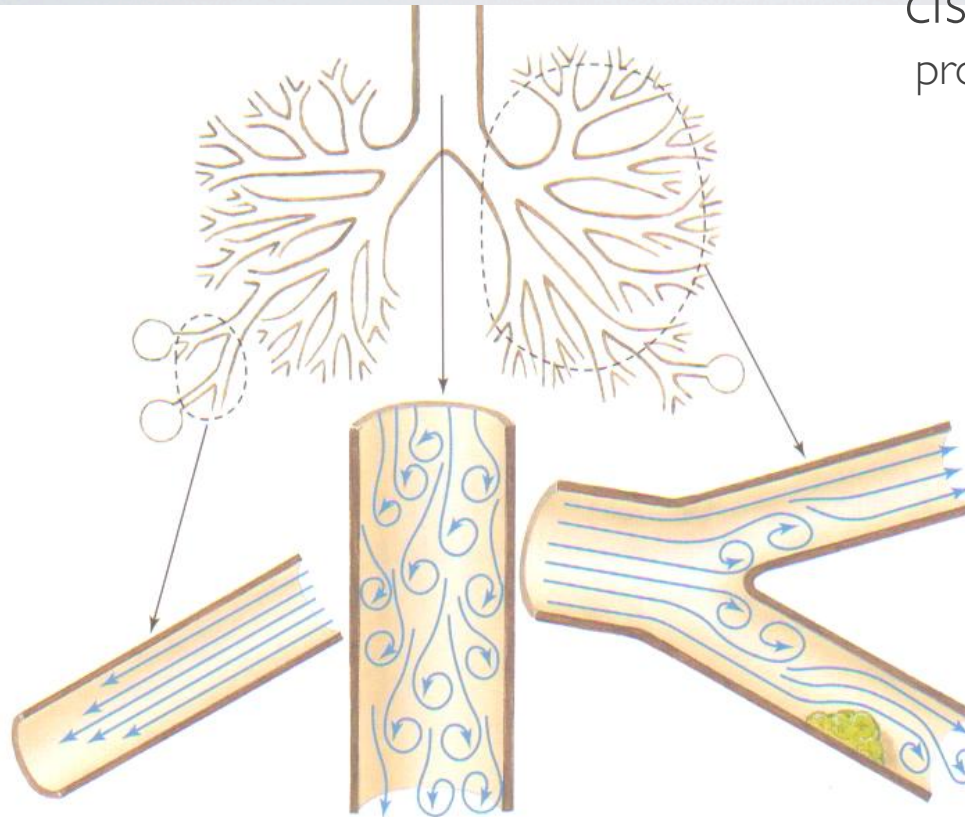
ciśnienie napędowe przepływu
proporcjonalne do lepkości gazu

turbulentny -
tchawica

ciśnienie napędowe przepływu
proporcjonalne do kwadratu
przepływu i zależy od gęstości
gazu

przejściowy-duże
gałęzie drzewa
oskrzelowego

ciśnienie napędowe przepływu
proporcjonalne do gęstości i
lepkości powietrza



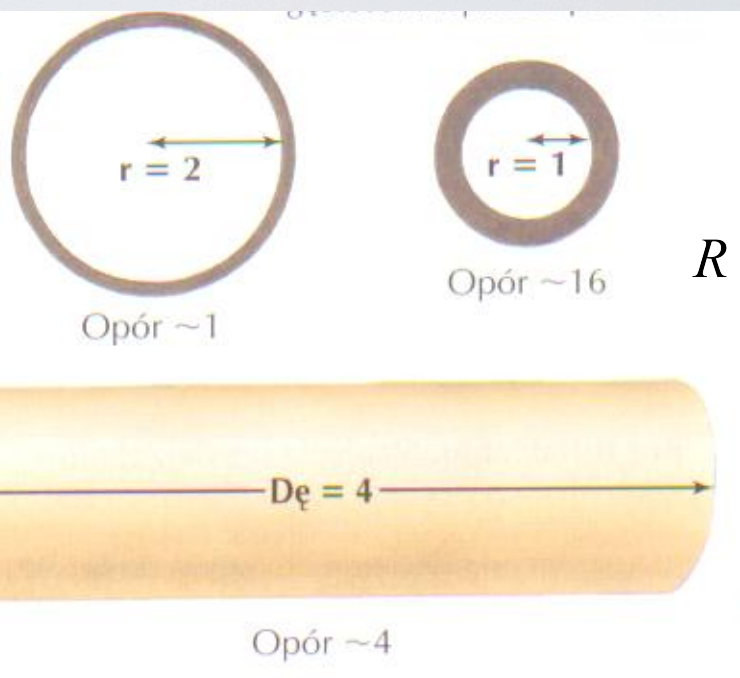
Przepływ liniowy obecny jest w obwodowych drogach oddechowych gdzie powietrze porusza się powoli. Ciśnienie napędowe przepływu jest proporcjonalne do lepkości gazu

Przepływ turbulentny występuje przy szybszym przepływie w tchawicy. Ciśnienie napędowe przepływu jest proporcjonalne do kwadratu przepływu i zależy od gęstości gazu

Przejściowy przepływ jest obecny w dużych gałęziach drzewa oskrzelowego. Ciśnienie napędowe przepływu jest proporcjonalne do obydwu: gęstości i lepkości powietrza

Przepływ powietrza przez drogi oddechowe
opór przepływu $1/r^4$ oraz wprost proporcjonalny do
długości przewodu

Prawo Poiseuille'a. Opór przepływu jest odwrotnie proporcjonalny do czwartej potęgi promienia przewodu, przez który zachodzi i wprost proporcjonalny do jego długości. Gdy przekrój spada o połowę opór rośnie 16 razy. Jeżeli ciśnienie przepływu jest stałe to przepływ w tej sytuacji spadnie do 1/16. Podwojenie długości jedynie podwoi opór. Jeżeli ciśnienie przepływu będzie stałe, to przepływ spadnie o połowę



$$R = \frac{\zeta \times L \times 8}{\delta \times r^4}$$

Przepływ laminarny – liczba Reynolds' a

$$R_e = \frac{u \times l}{\nu}$$

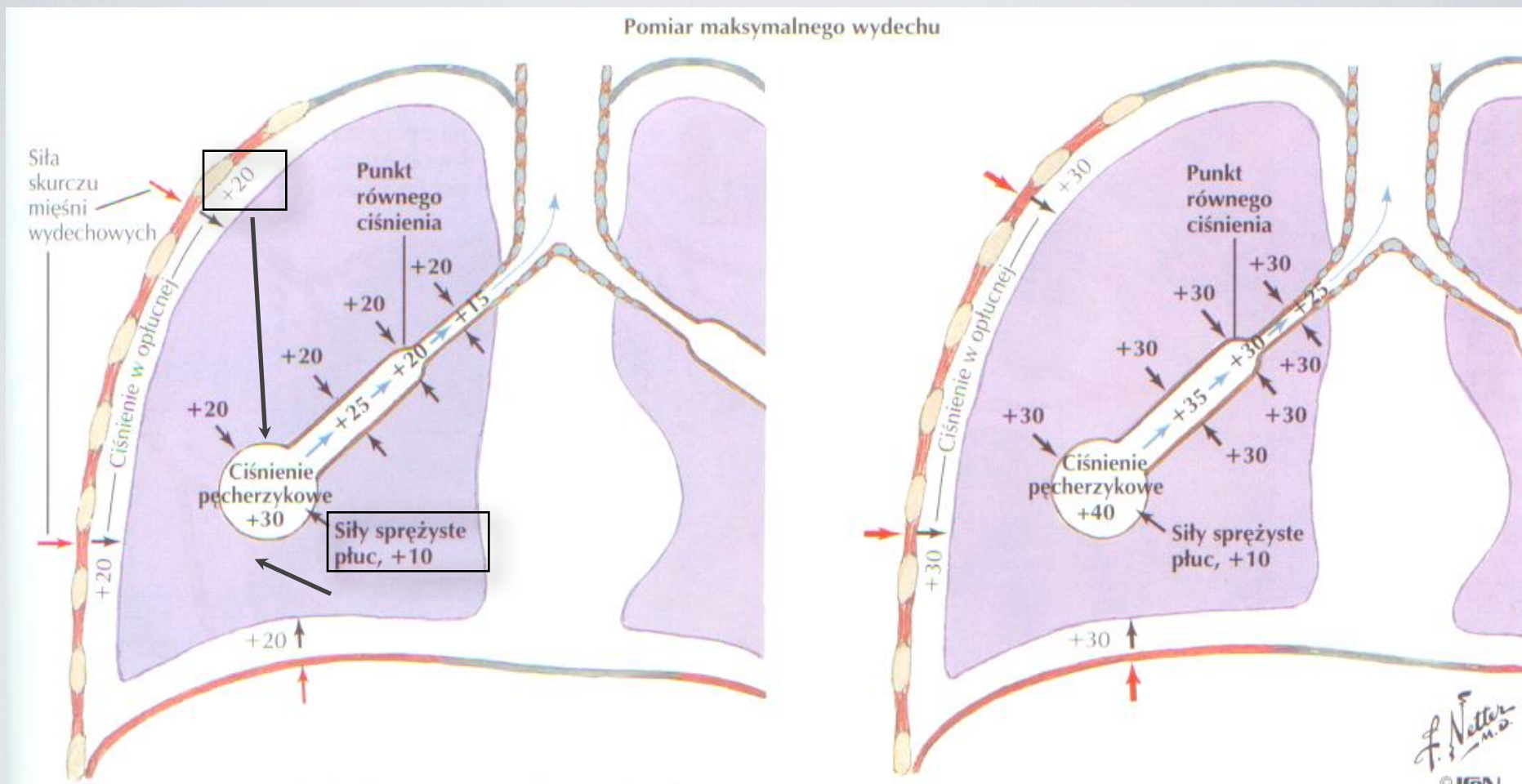
u – prędkość przepływu

l – długość naczynia

ν – lepkość kinematyczna

$R_e < 2400$ przepływ laminarny

Współzależność pomiędzy wentylacją i objętością płuc (wydech)

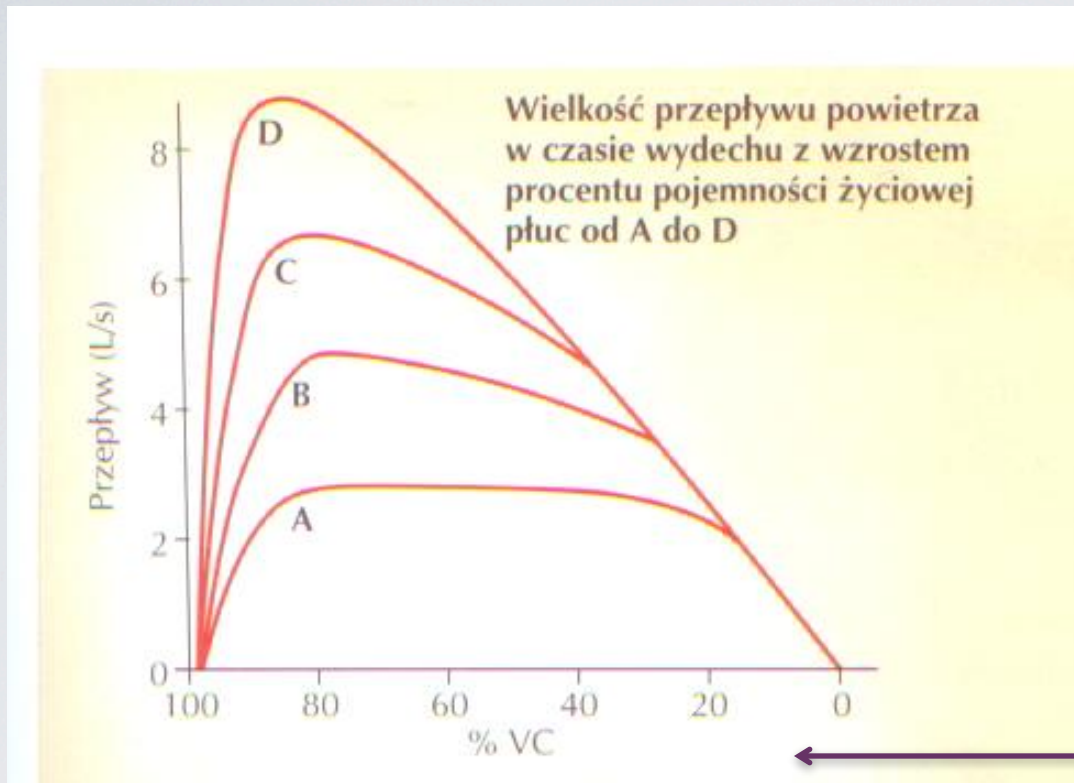


1) Skurcz mięśni oddechowych podnosi ciśnienie w opłucnej.

2) Ciśnienie w pęcherzykach płucnych jest sumą ciśnienia w opłucnej i sił elastycznych płuc.

3) Ciśnienie spada w miarę zbliżania się do jamy ustnej, wraz ze stałym spadkiem oporu układu

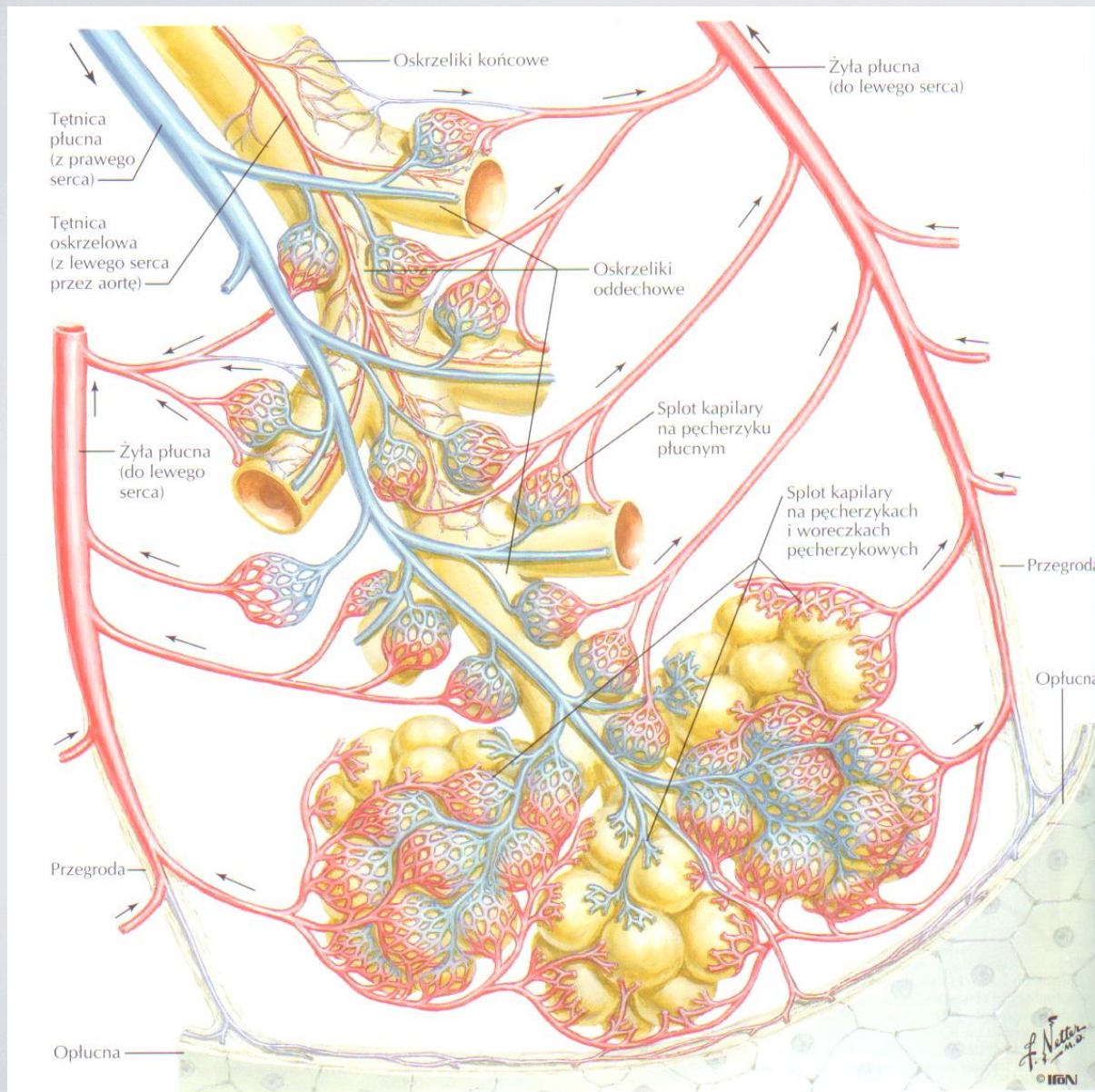
Współzależność pomiędzy wentylacją i objętością płuc



Przy małych objętościach płuc (A), przepływ osiąga maksimum, już przy małym wysiłku oddechowym

Przy dużej objętości płuc (D), przepływ powietrza wzrasta wraz ze wzrostem wysiłku oddechowego.

Krążenie w obrębie płuc

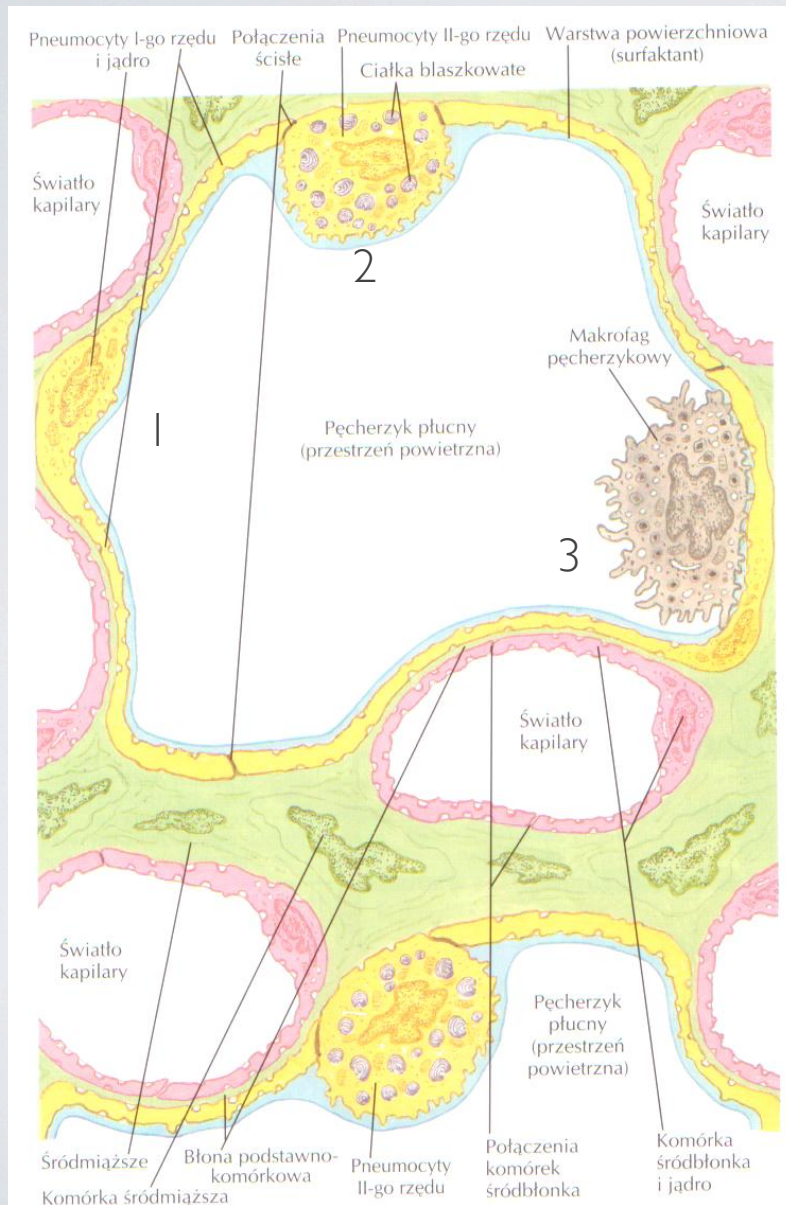


Krew z **prawej komory** serca dociera do płuc w **dużej ilości (5l/min)**, ale pod **małym ciśnieniem** napędowym (6mmHg) – wolny przepływ **laminarny**

Żyły płucne odprowadzają natlenioną krew tętniczą i doprowadzają **do lewego serca** by zaopatrzyć krążenie systemowe.

Żyły u dorosłego człowieka kapilary otaczające pęcherzyki płucne zawierają jednocześnie około 75ml krwi.

Budowa komórkowa pęcherzyków płucnych i kapilar



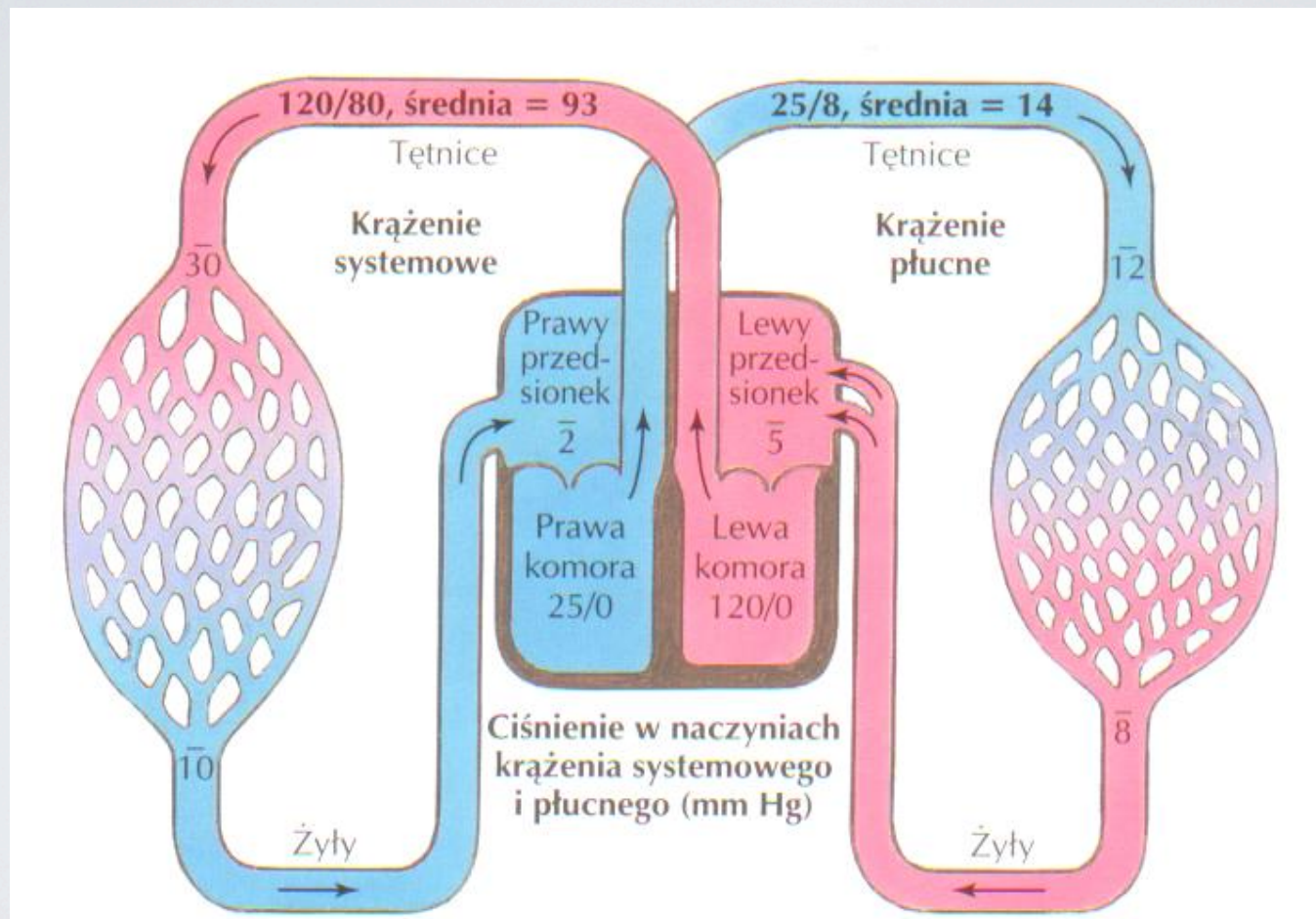
Udział w wymianie powietrza:

- Komórki pęcherzyków płucnych I typu
(1) **pneumocyty I rzędu**;
 - Błona podstawna;
- komórki ścian naczyń krwionośnych;

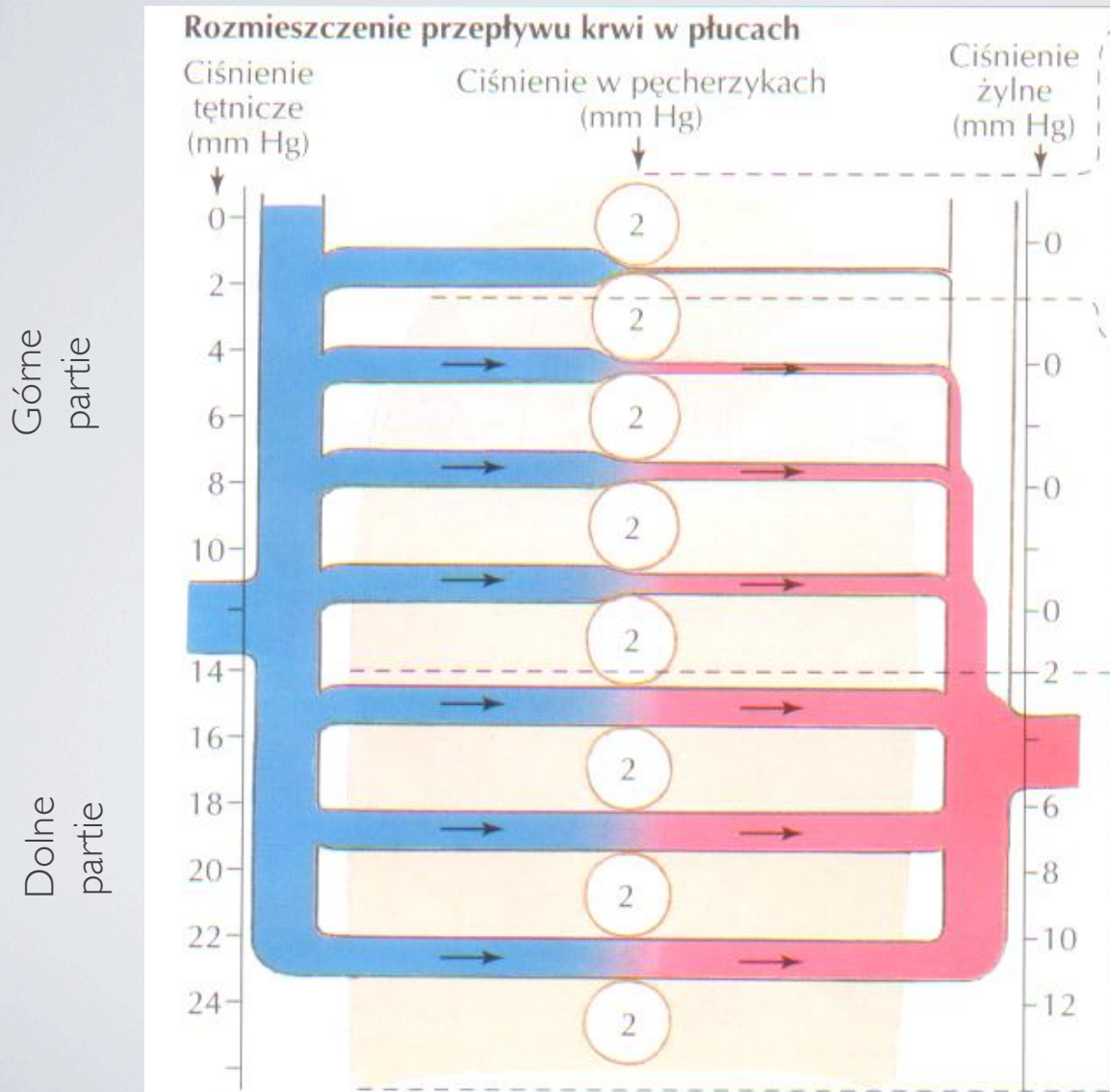
Komórki pęcherzyków płucnych II typu (2) **pneumocyty II rzędu** produkują surfaktant, będący składową cienkiej warstwy płynu na powierzchni pneumocytów

Makrofagi pęcherzykowe (3) migrują na zewnątrz kapilary i mogą być obecne w samych pęcherzykach płucnych. Pochłaniają wdychane pyły i bakterie.

Krążenie płucne



Krążenie płucne



Strefa 1. Ciśnienie powietrza w pęcherzykach płucnych jest wyższe od ciśnienia w tętnicach i przepływ krwi nie zachodzi.

Pojawia się jedynie w sytuacjach nadzwyczajnych, tj. gdy obniży się ciśnienie pęcherzykowe bądź podwyższy tętnicze

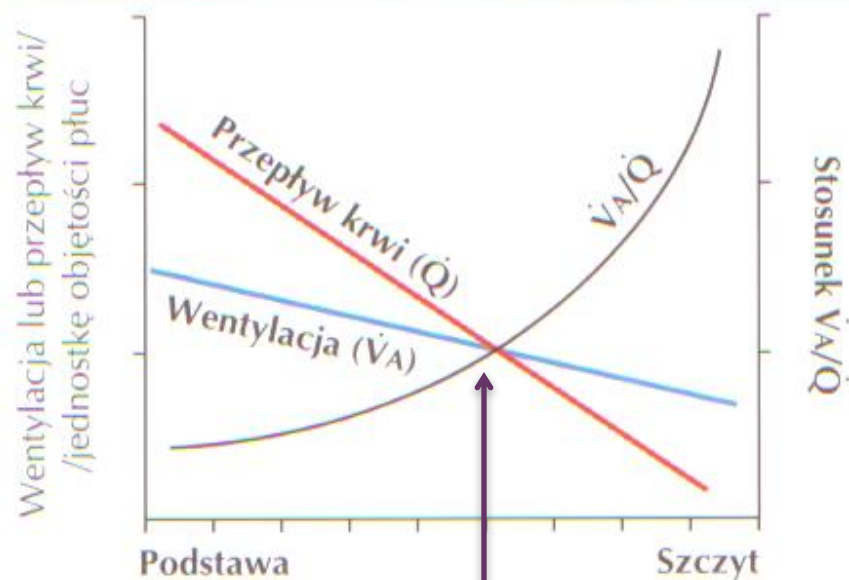
Strefa 2. Ciśnienie powietrza w pęcherzykach płucnych jest niższe od ciśnienia w tętnicach ale wyższe od ciśnienia w żyłach.

Przepływ wykazuje wahania w zależności od zmian ciśnienia w naczyniach jest większy w części dolnej strefy.

Strefa 3. Zarówno ciśnienie w tętnicach jak i w żyłach jest wyższe od pęcherzykowego.

Przepływ krwi zależy tylko od ciśnienia napędowego

Stosunek wentylacja/przepływ

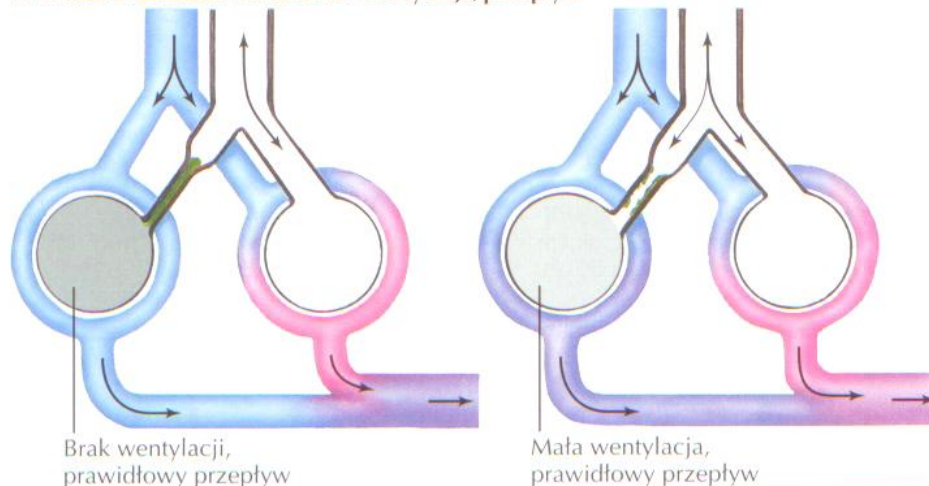


Warunki prawidłowe

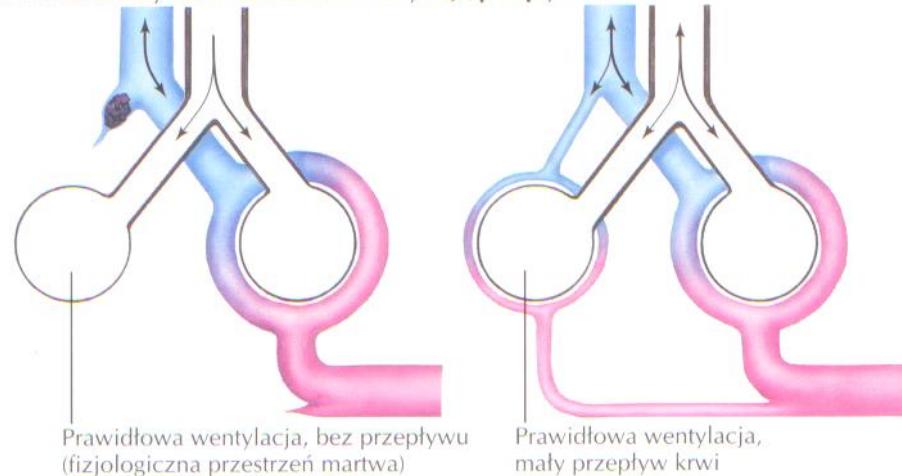
Zarówno wentylacja jak i przepływ zależą od sił przyciągania ziemskiego i maleją w kierunku od podstawy do szczytu płuca.

Spadek przepływu krwi jest gwałtowniejszy niż wentylacji i stąd stosunek wentylacji do przepływu wzrasta w kierunku szczytów płuca

A. Warunki z niskim stosunkiem wentylacja/przepływ

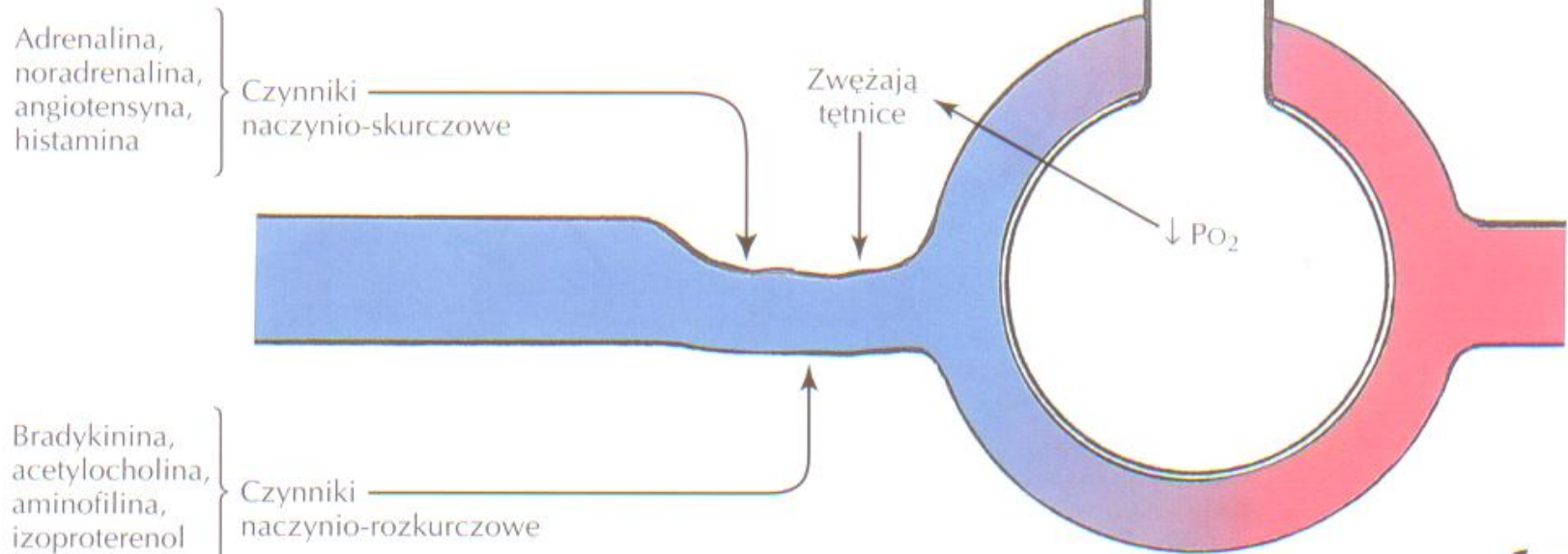


B. Warunki z wysokim stosunkiem wentylacja/przepływ



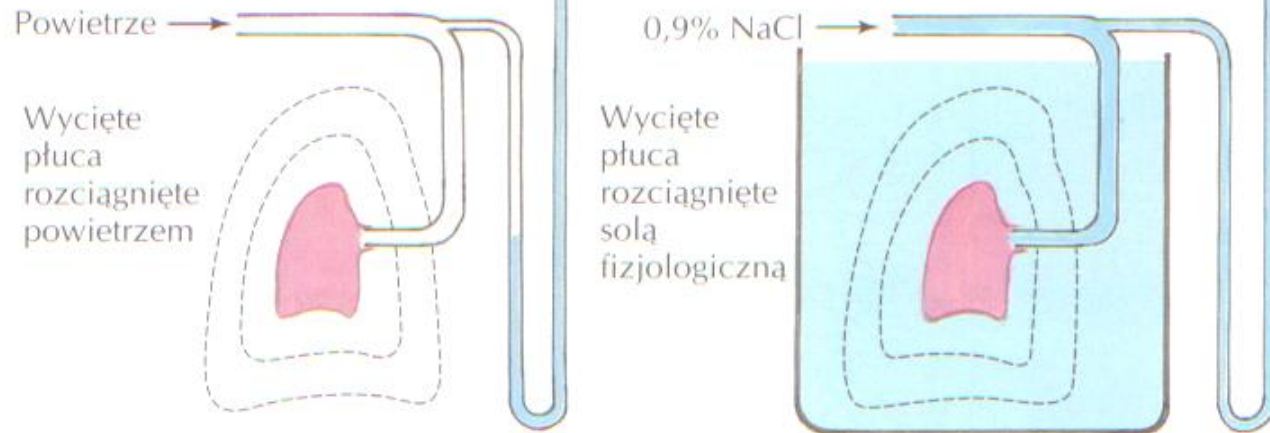
Opór naczyń płucnych

Wpływ substancji chemicznych i krwiopochodnych

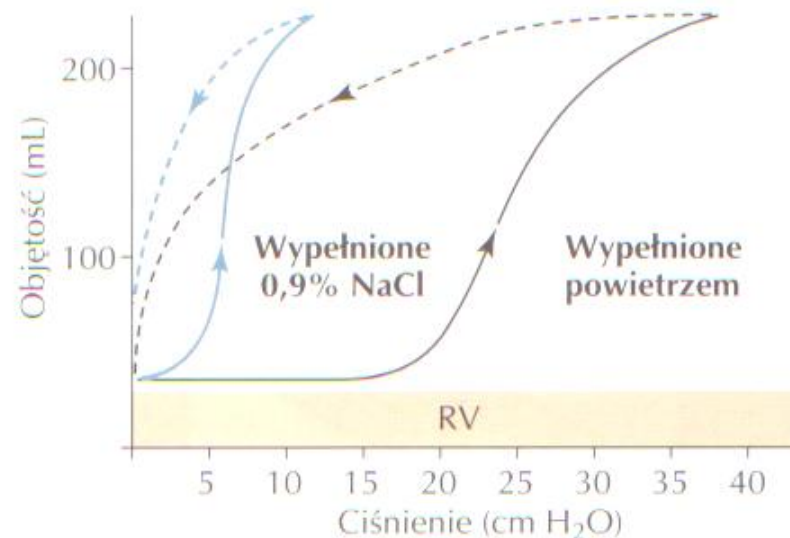


Siły napięcia powierzchniowego w płucach

Współzależność ciśnienia i objętości w płucach wypełnionych powietrzem lub solą fizjologiczną.



Płuca wypełnione płynem fizjologicznym wymagają niższego ciśnienia do osiągnięcia określonej objętości niż płuca wypełnione powietrzem na skutek eliminacji sił napięcia powierzchniowego.



Skład surfaktantu:

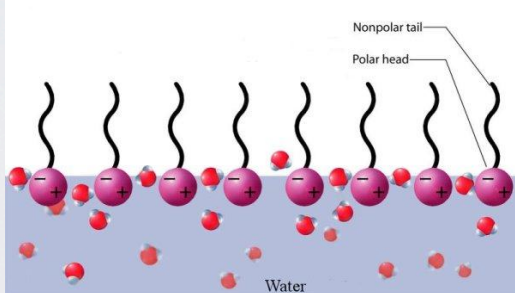
- DPPC (40%);
- PC (40%);
- białka związane z surfaktantem - apolipoproteiny A i B (5%)
- cholesterol;
- inne substancje.

Surfaktant

Pęcherzyki płucne - analogia do przypadku pęcherzyka powietrza w wodzie.
Interfaza powietrze-woda.

Prawo Laplace'a

Prawo Laplace'a: ciśnienie w obrębie kuli jest wprost proporcjonalne do napięcia powierzchniowego i odwrotnie proporcjonalne do promienia.



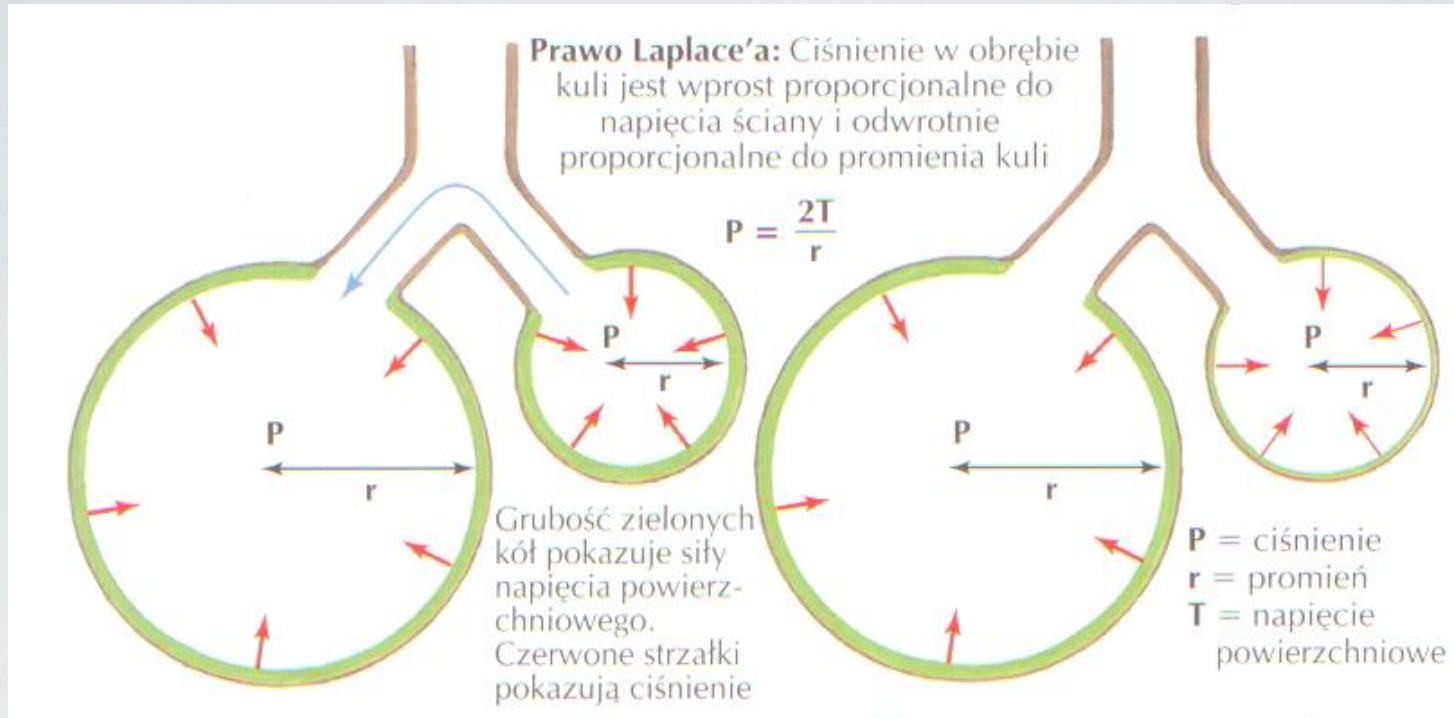
$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R}$$

Napięcie
powierzchniowe

Promień pęcherzyka

- Obniża napięcie powierzchniowe, powodując, iż niższe ciśnienie wystarczy do napełnienia pęcherzyków płucnych.
- Brak produkcji surfaktantu (częsty u noworodków) powoduje niewydolność

Siły napięcia powierzchniowego w płucach



Bez surfaktantu

Napięcie powierzchniowe w obydwu pęcherzykach płucnych jest takie samo.

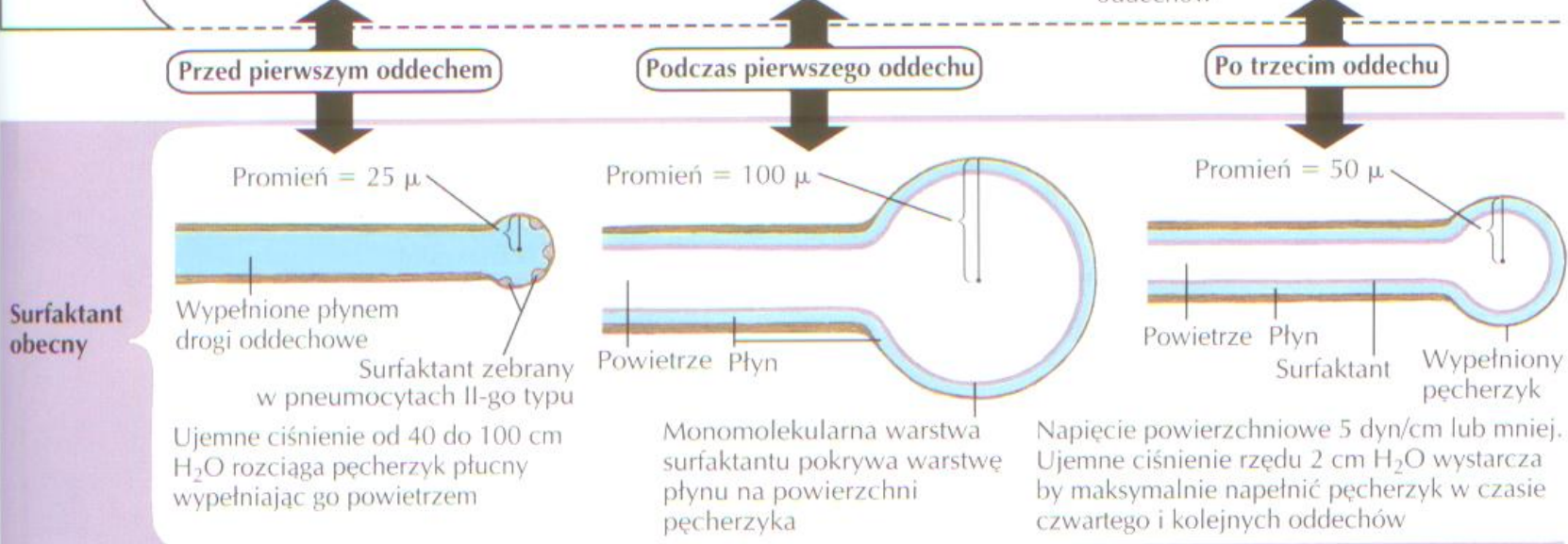
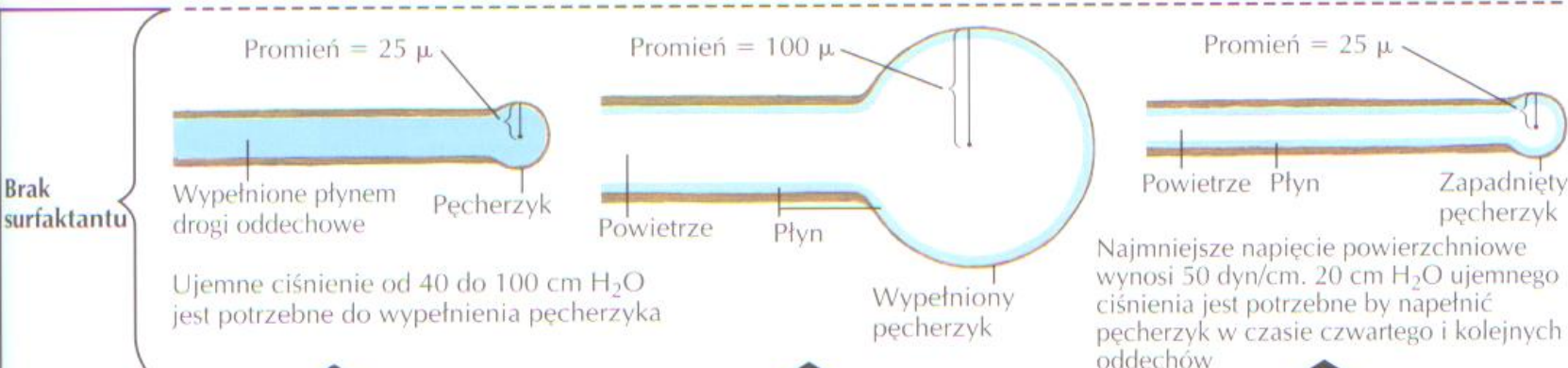
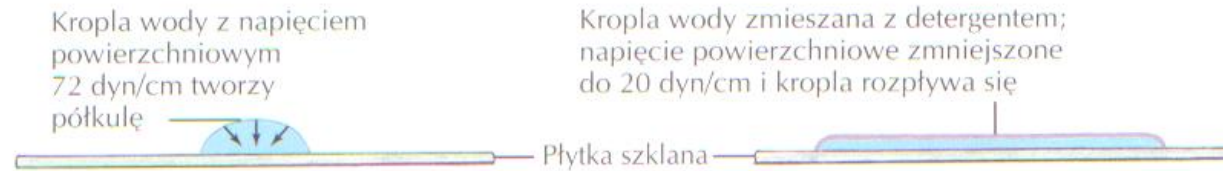
Większe ciśnienie jest wymagane do utrzymania w stanie otwartym drobnych pęcherzyków (małe r).

Z surfaktantem

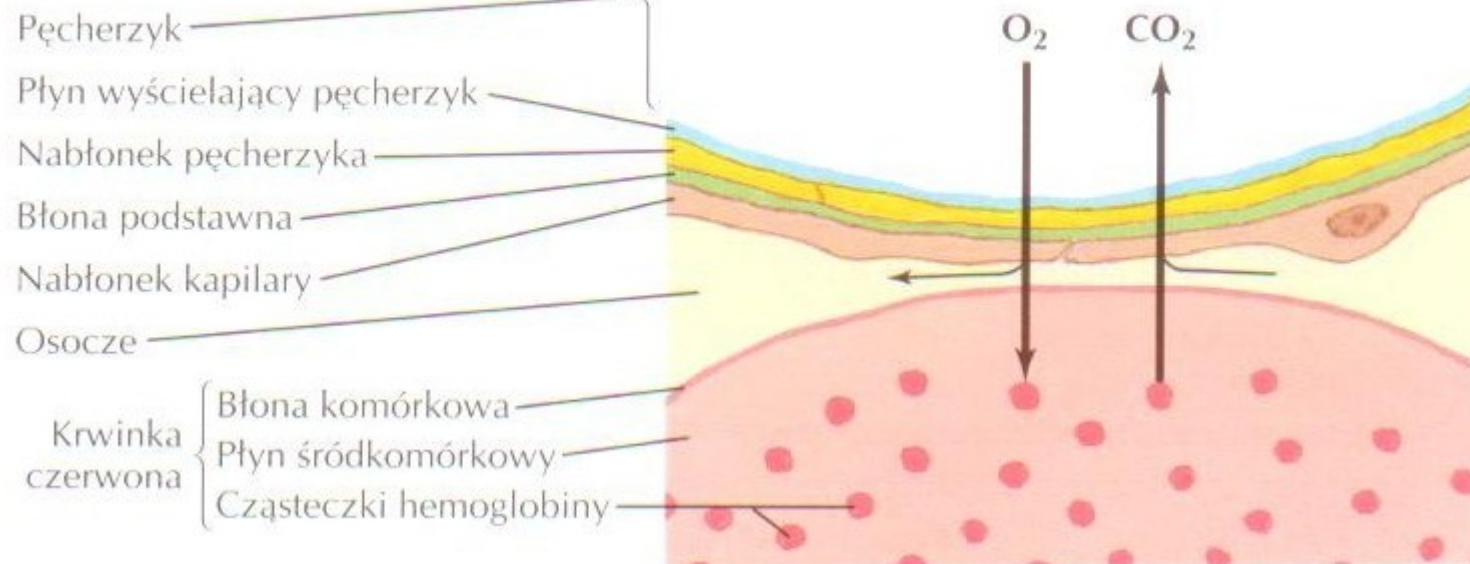
Napięcie powierzchniowe w małych pęcherzykach ulega zmniejszeniu. Surfaktant stabilizuje strukturę pęcherzyka.

Ciśnienie wymagane do utrzymania w stanie otwartym pęcherzyków jest porównywalne.

Wpływ surfaktantu



Drogi dyfuzji O_2 i CO_2



$$P_{O_2} = 150 \text{ mm Hg}$$

$$P_{CO_2} = 0 \text{ mm Hg}$$

Powietrze atmosferyczne
w górnych drogach
oddechowych

$$1 \text{ Tr} = 1 \text{ mm Hg} = 1/760 \text{ atm} = 133,3224 \text{ Pa}$$

W czasie przepływu krwi przez kapilary płucne O_2 dyfunduje z pęcherzyka płucnego do krwinki czerwonej, gdzie wiąże się z hemoglobiną. W tym samym czasie CO_2 dyfunduje z krwinki czerwonej do pęcherzyka płucnego.

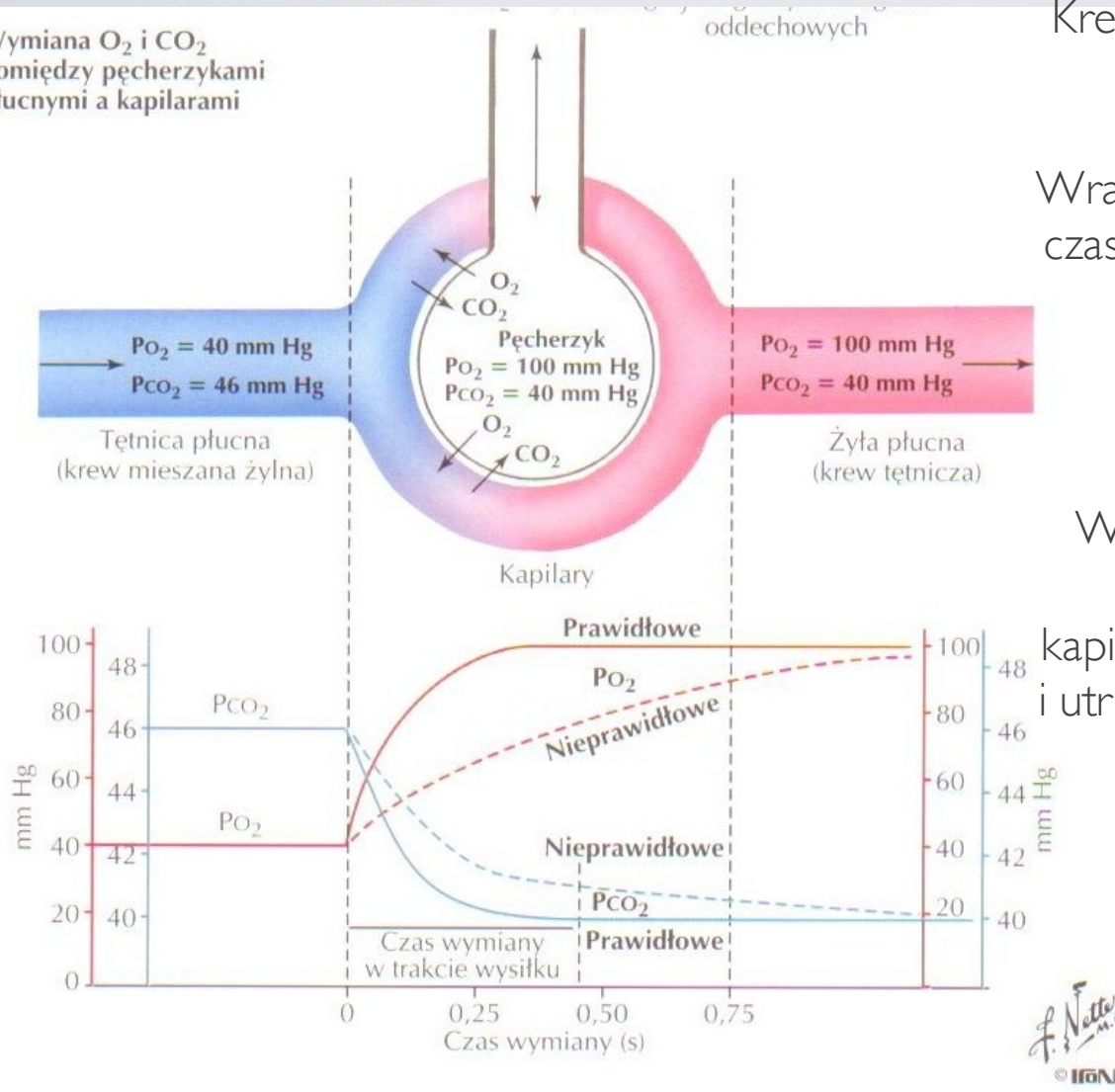
Wymiana O_2 i CO_2
pomiędzy pęcherzykami
płucnymi a kapilarami

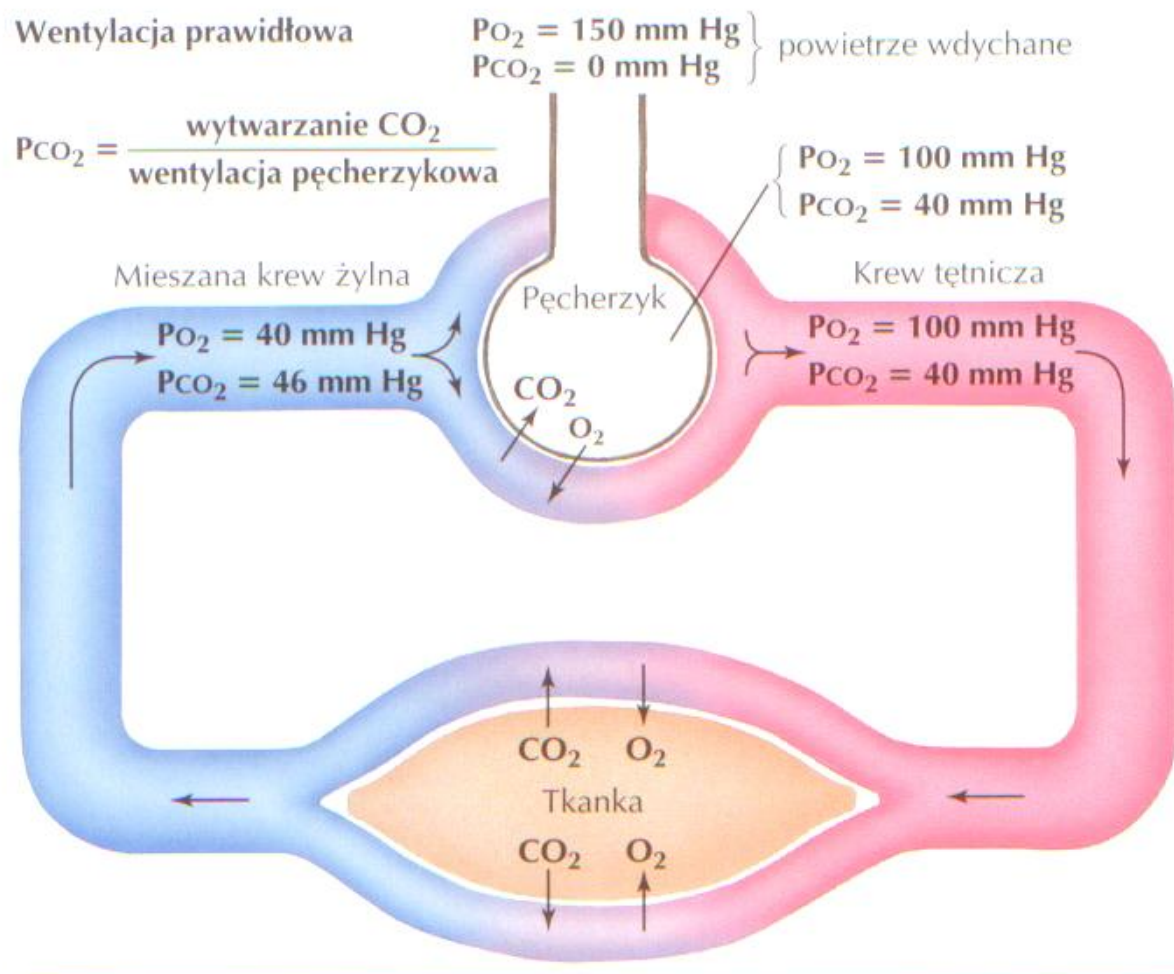
oddechowych

Krew przepływa przez kapilary płucne
w ciągu 0.75 sek.

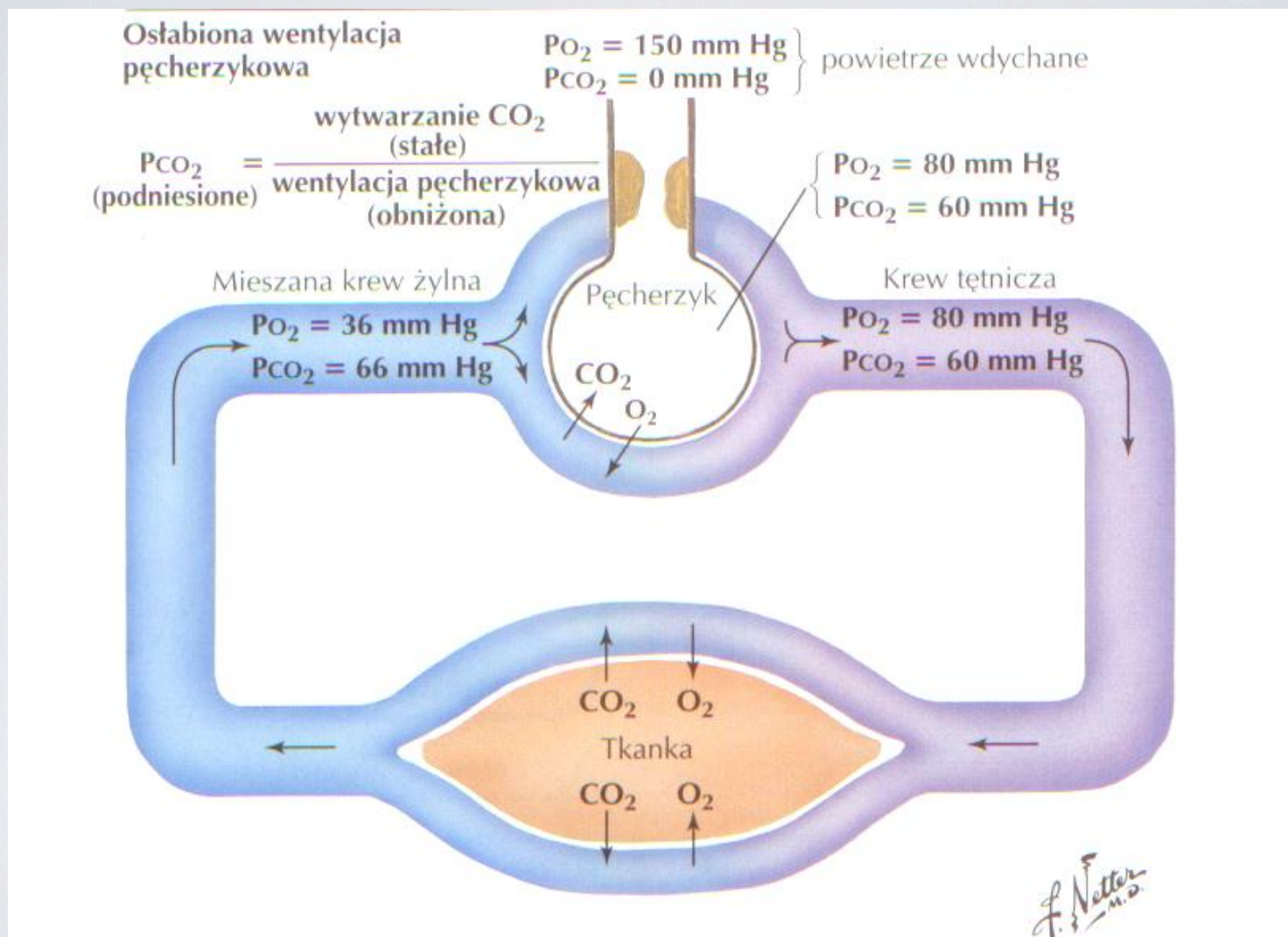
Wraz ze wzrostem wyrzutu sercowego
czas wymiany gazowej ulega skróceniu.
(0.5 sek)

W czasie niektórych chorób rośnie
grubość ściany pęcherzykowo-
kapilarnej, co hamuje wymianę gazową
i utrudnia pełne wysycenie krwi tlenem
i usunięciem CO_2 w czasie
wymaganym dla tej wymiany
(przerywana)

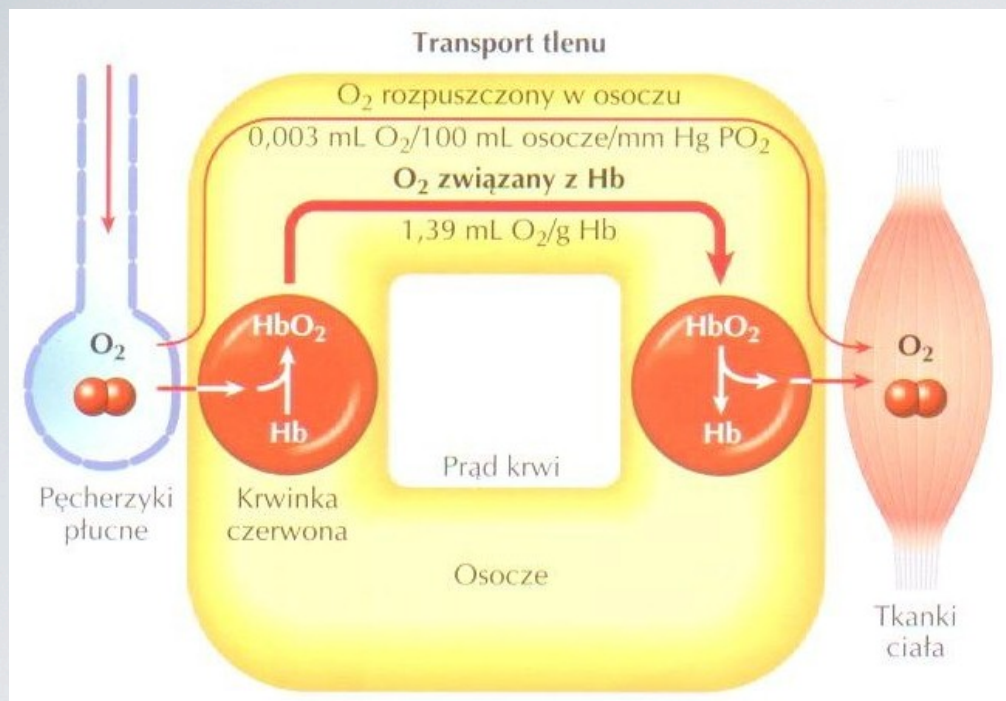




Hypowentylacja pęcherzykowa, tutaj jako częściowa blokada dróg oddechowych, obniża w pęcherzyku P_{O_2} i podnosi P_{CO_2} .



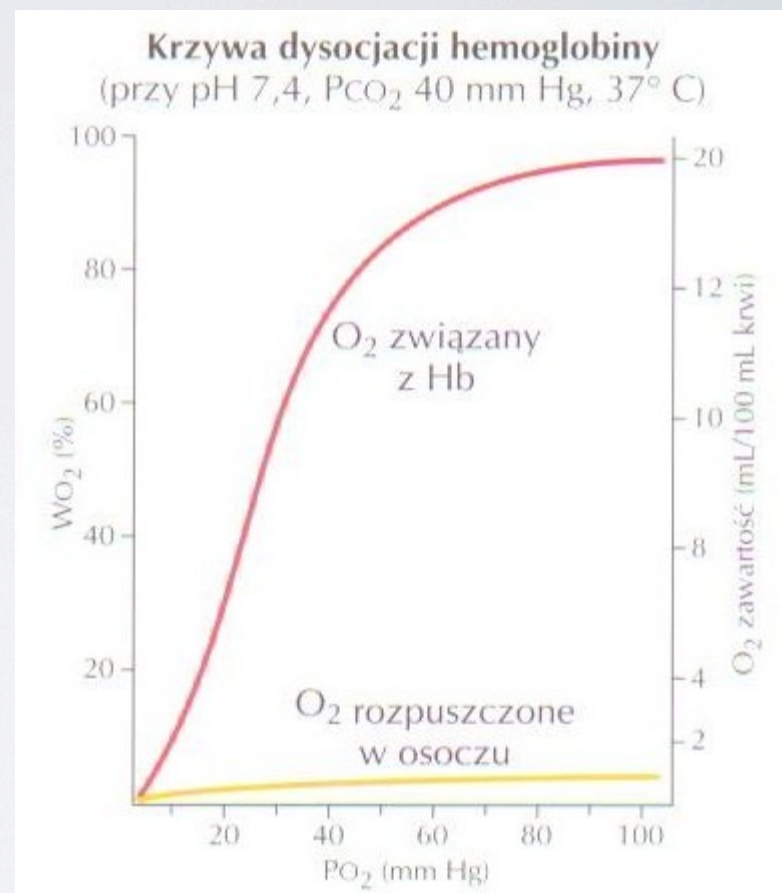
W efekcie w tętnicach PO_2 obniża się (hypoksja), a P_{CO_2} wzrasta (hyperkapnia)

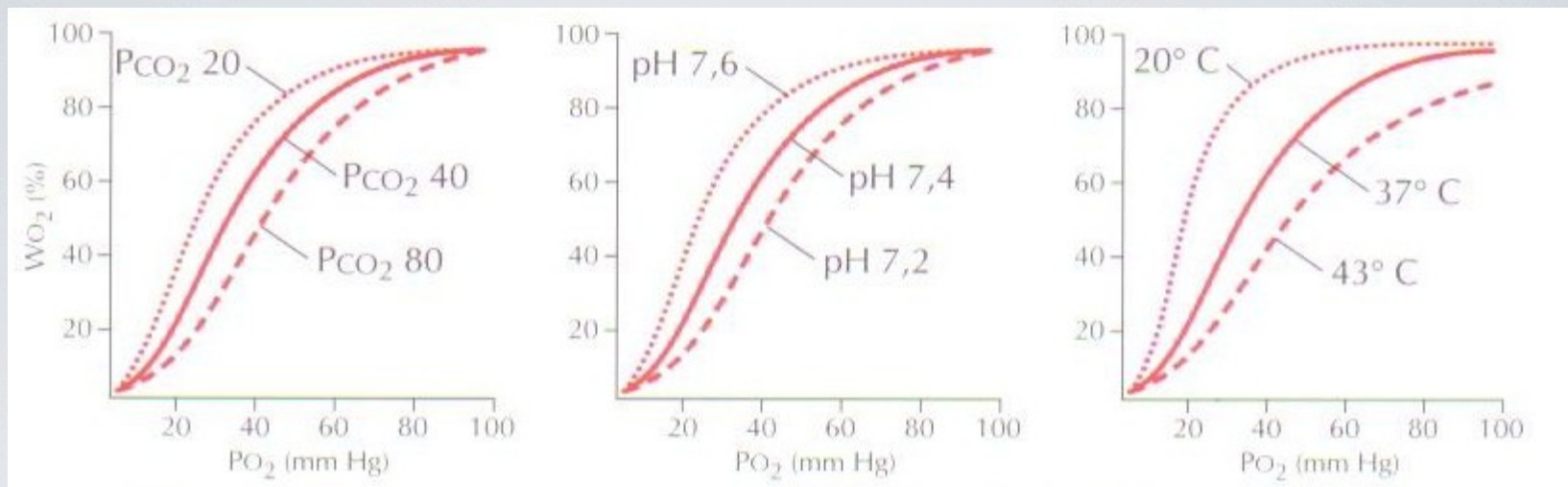


W czasie każdego wdechu O₂ i C O₂ ulegają wymianie przez przestrzeń pęcherzykowo-łośniczkową.

Prawie wszystkie cząsteczki O₂ transportowane do tkanek są związane z hemoglobina (Hb);

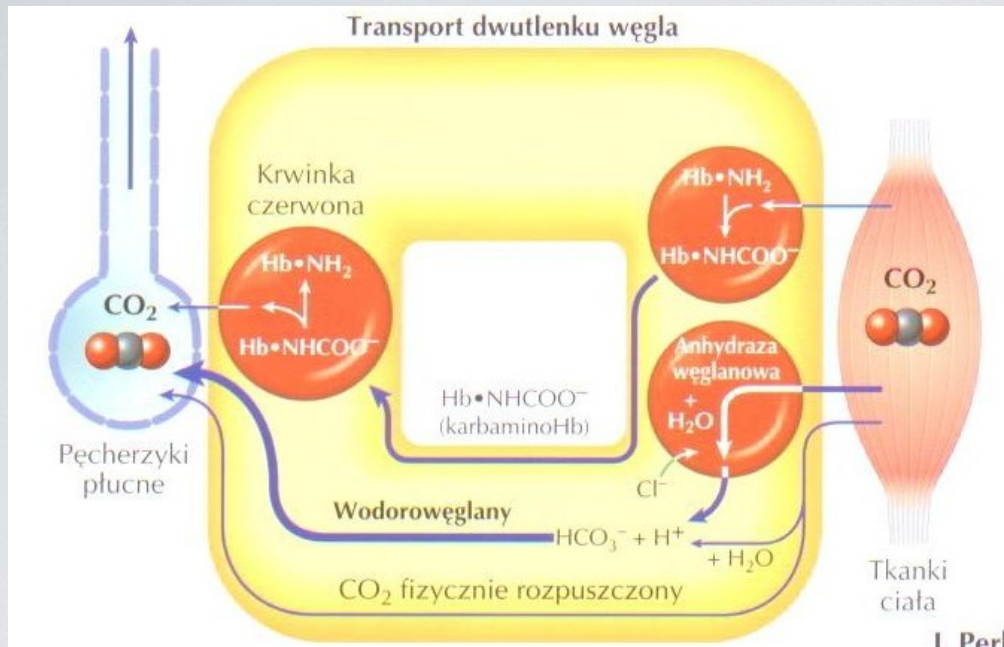
Krzywa: wiązanie O₂ do Hb jest zależna od ciśnienia parcjalnego tlenu (PO₂). Procent wysycenia Hb (W O₂) wynosi 97,5%, gdy PO₂) wynosi 100 mmHg.





Pokazano wpływ CO_2 , pH i temperatury na krzywą dysocjacji hemoglobiny.

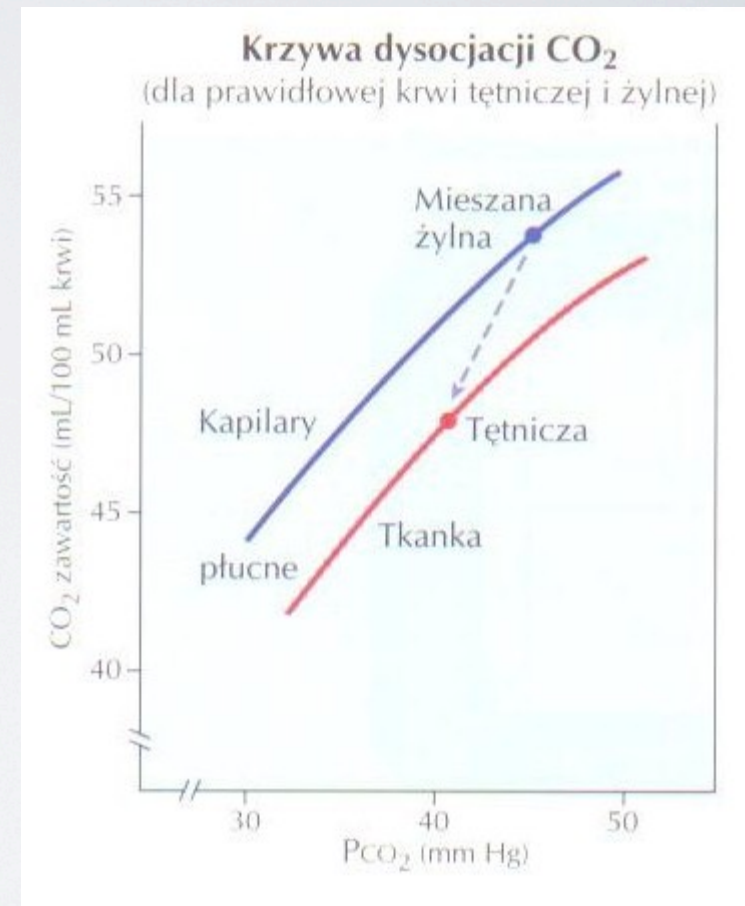
Hyperkarpia prowadzi do słabszego wysycenia hemoglobiny tlenem, który przemieszczony zostaje do tkanek, podobny efekt obserwowany jest przy spadku pH i podwyższonej temperatury.



CO_2 z tkanek w większej ilości transportowany jest w formie HCO_3^- .

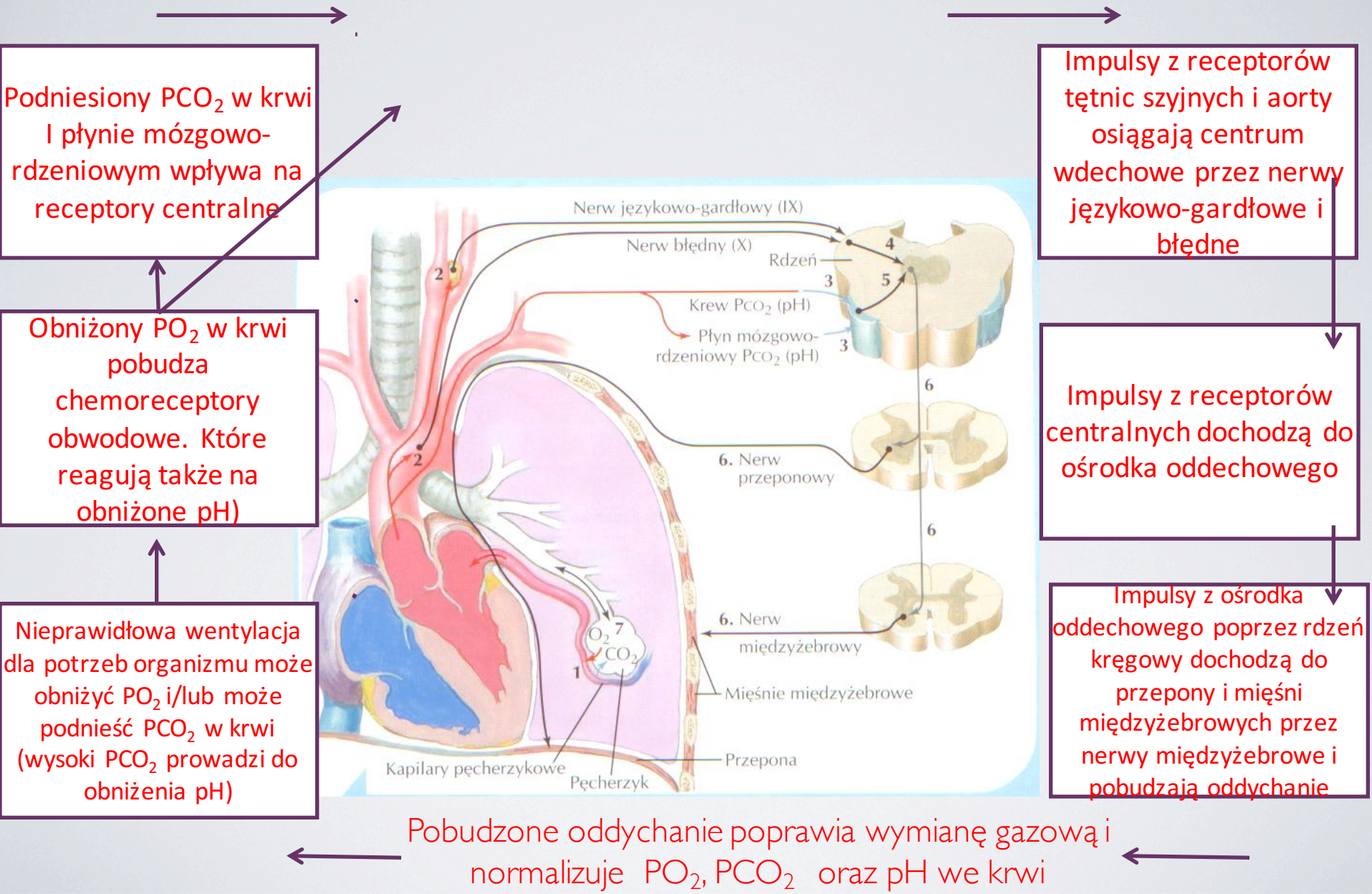
Niewielka ilość CO_2 transportowana jest jako rozpuszczalna fizycznie, a część jako karbaminohemoglobina.

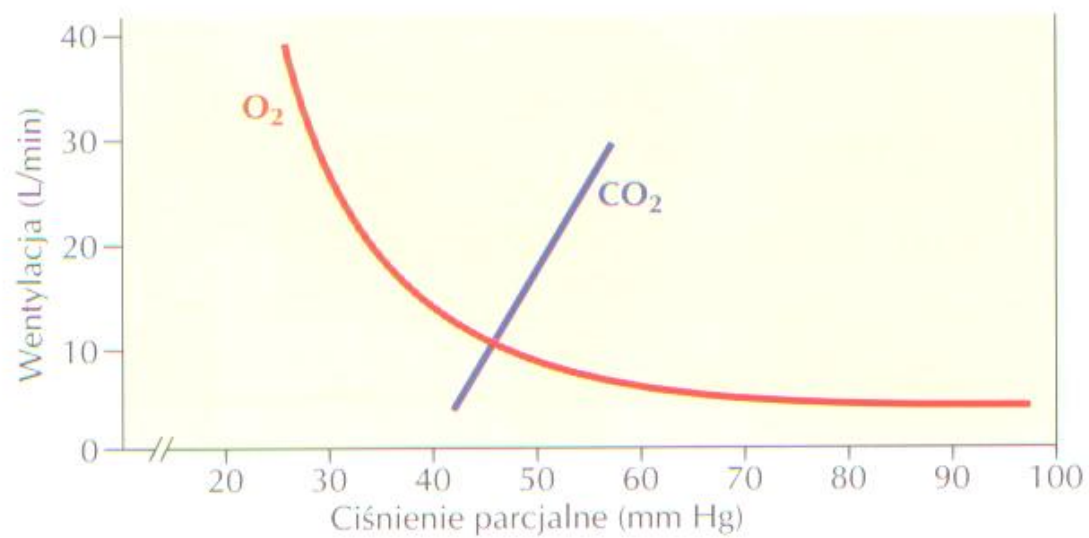
Zmiany wysycenia hemoglobiny CO_2 są znacznie mniejsze, gdyż mieszczą się w zakresie 5 mmHg

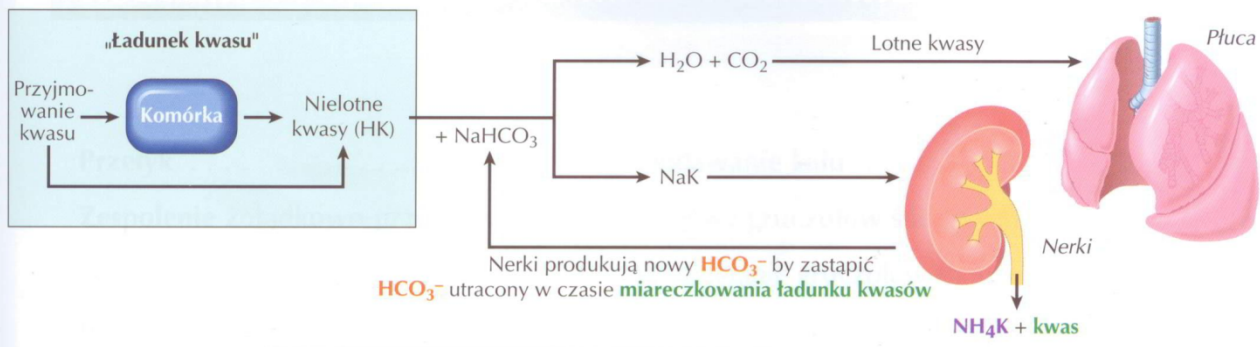


Chemiczna kontrola oddychania (mechanizm zwrotnej regulacji)

9



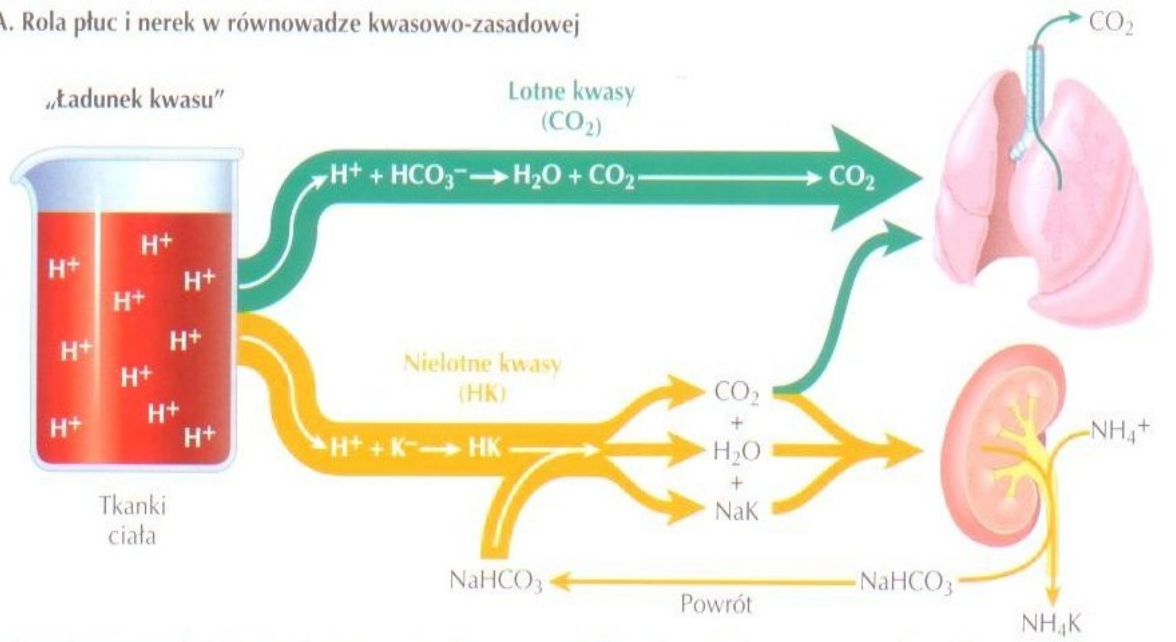




Wydalenie kwasów „netto” (NAE) = $(U_{TA} \times V) + (U_{NH_4} \times V) + (U_{HCO_3^-} \times V)$

Zarówno płuca jak i nerki biorą udział w równowadze kwasowo – zasadowej

A. Rola płuc i nerek w równowadze kwasowo-zasadowej

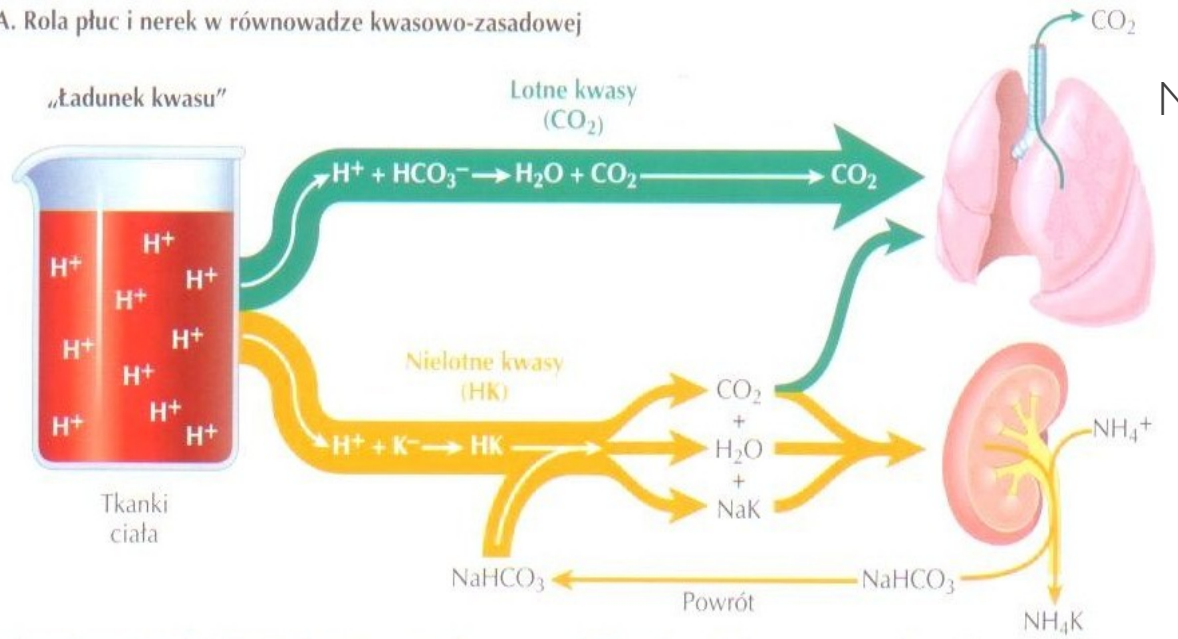


Dieta i metabolizm dostarczają kwasów.

CO₂ jako lotny kwas wydany jest przez płuca

Produkowany jest w przemianach węglowodanów oraz tłuszczów

A. Rola płuc i nerek w równowadze kwasowo-zasadowej



Nielotne kwasy buforowane są przez HCO_3^- w płynie zewnątrzkomórkowym

Nerki wydalać zbuforowane kwasy odtwarzają zużyty HCO_3^- w procesie wydalenia anionu kwasu wraz z NH_4^+

Nerki wydalać zbuforowane kwasy i odtwarzają zużyty HCO_3^- w procesie wydalenia anionu kwasu wraz z NH_4^+

Nerki wydalać także H^+ , który wpływa na ilość HCO_3^- w przestrzeni zewnątrzkomórkowej

Płuca wydalać lotne kwasy w procesie hyperwentylacji (proces szybki) Nerki regulują równowagę k-z w godzinach a nawet dniach

Zaburzenia metaboliczne

D. Zaburzenia równowagi kwasowo-zasadowej

Zaburzenie	pH	1° zmiana	Mechanizmy obronne
Kwasica metaboliczna	↓	↓ [HCO_3^-]	Bufory, ↓ PCO_2 , ↑ HK
Alkaloz metaboliczna	↑	↑ [HCO_3^-]	Bufory, ↑ PCO_2 , ↓ HK
Kwasica oddechowa	↓	↑ PCO_2	Bufory & ↑ HK
Alkaloz oddechowa	↑	↓ PCO_2	Bufory & ↓ HK

płuca

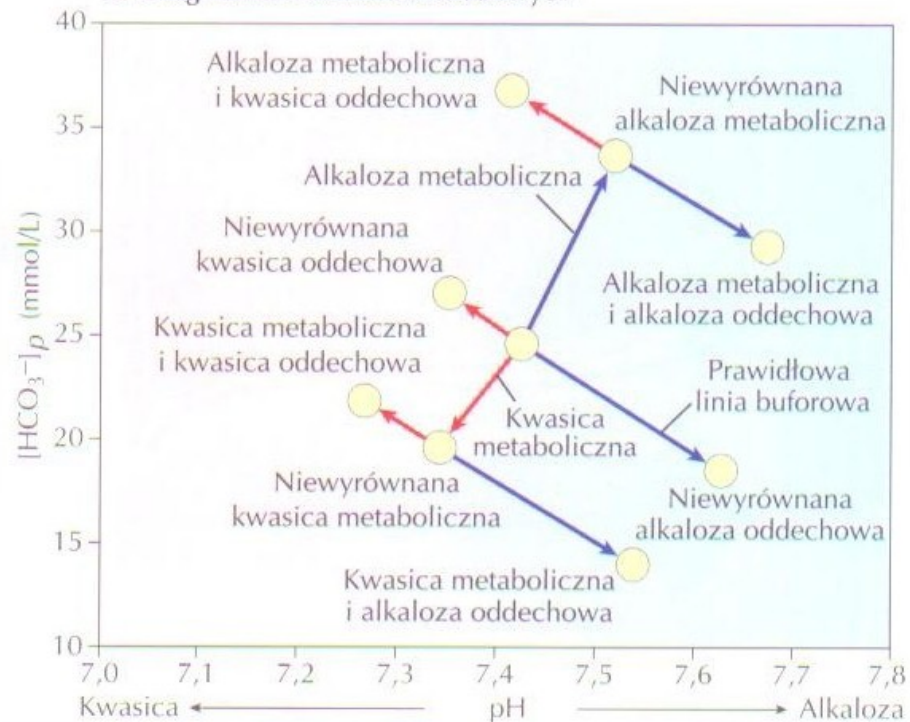
nerki

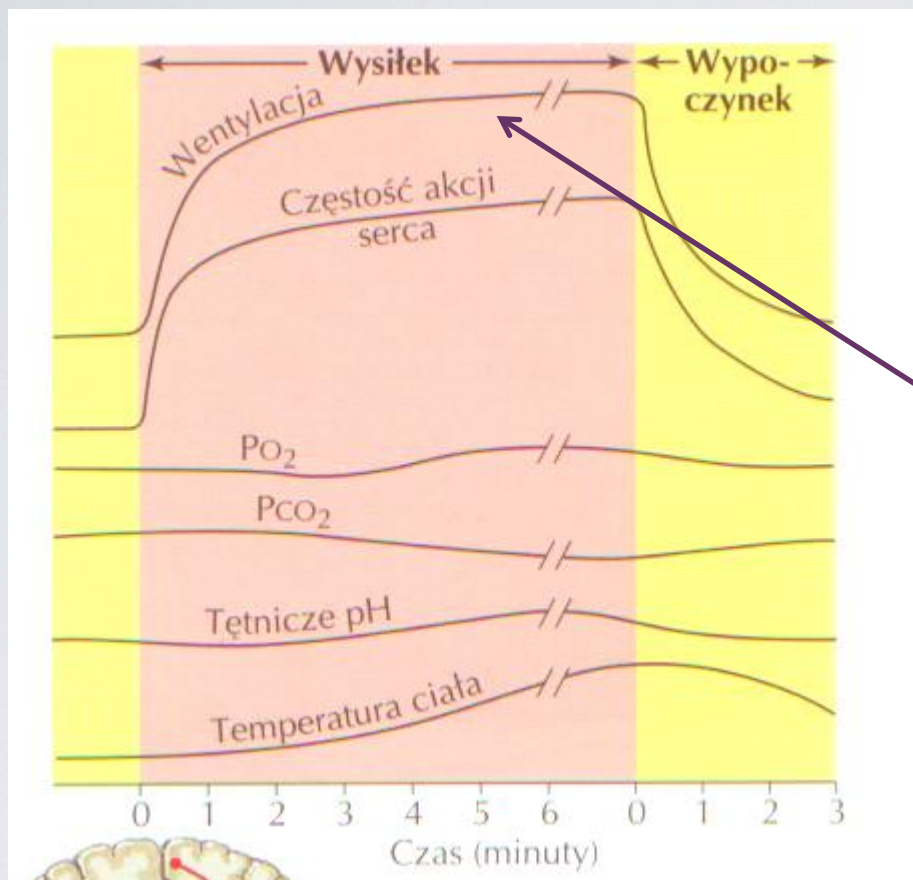
Zaburzenia oddechowe

B. Powstawanie metaboliczne kwasów i zasad

Źródło pokarmowe	Kwas/zasada	Ilość (mEq/dzień)
Wodorowęglany Tłuszcz	$\rightarrow \text{CO}_2$	15 - 20,000
Aminokwasy		
Siarczany	H_2SO_4	100 (kwas)
Kationy	HCl	
Aniony	HCO_3^-	
Jony organiczne	HCO_3^-	60 (zasada)
Fosforany	H_2PO_4^-	30 (kwas)
Całkowite		70 (kwas)
1 mEq/kg/dzień powstawania nietłotnego kwasu		

C. Drogi zmian kwasowo-zasadowych

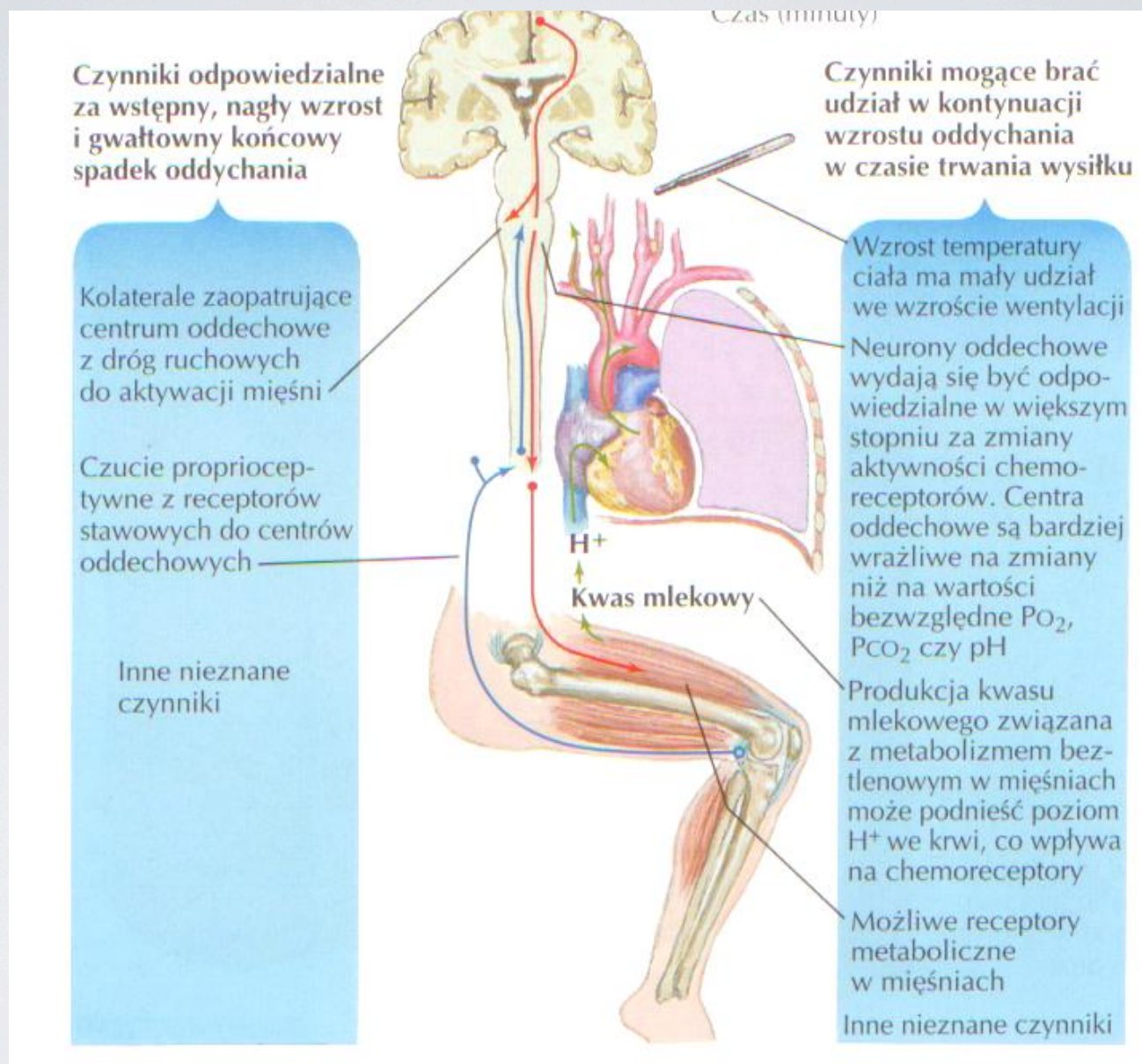




Wysiłek fizyczny zwiększa zapotrzebowanie na tlen i zwiększa wydalanie CO₂

Wzrost wentylacji

Wzrasta częstość akcji serca – wzrasta wyrzut sercowy



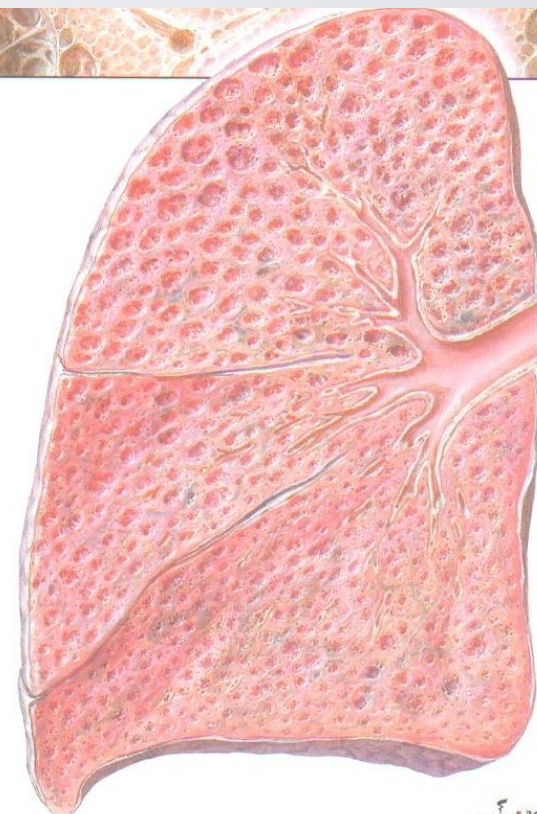
**Rozedma
śródpęcherzykowa
(śródpłacikowa)**

*Obraz
powiększony.
Rozciągnięte,
komunikujące się
ze sobą podobne
do woreczków
miejsca
w centralnej
części płacika
pierwotnego płuca*

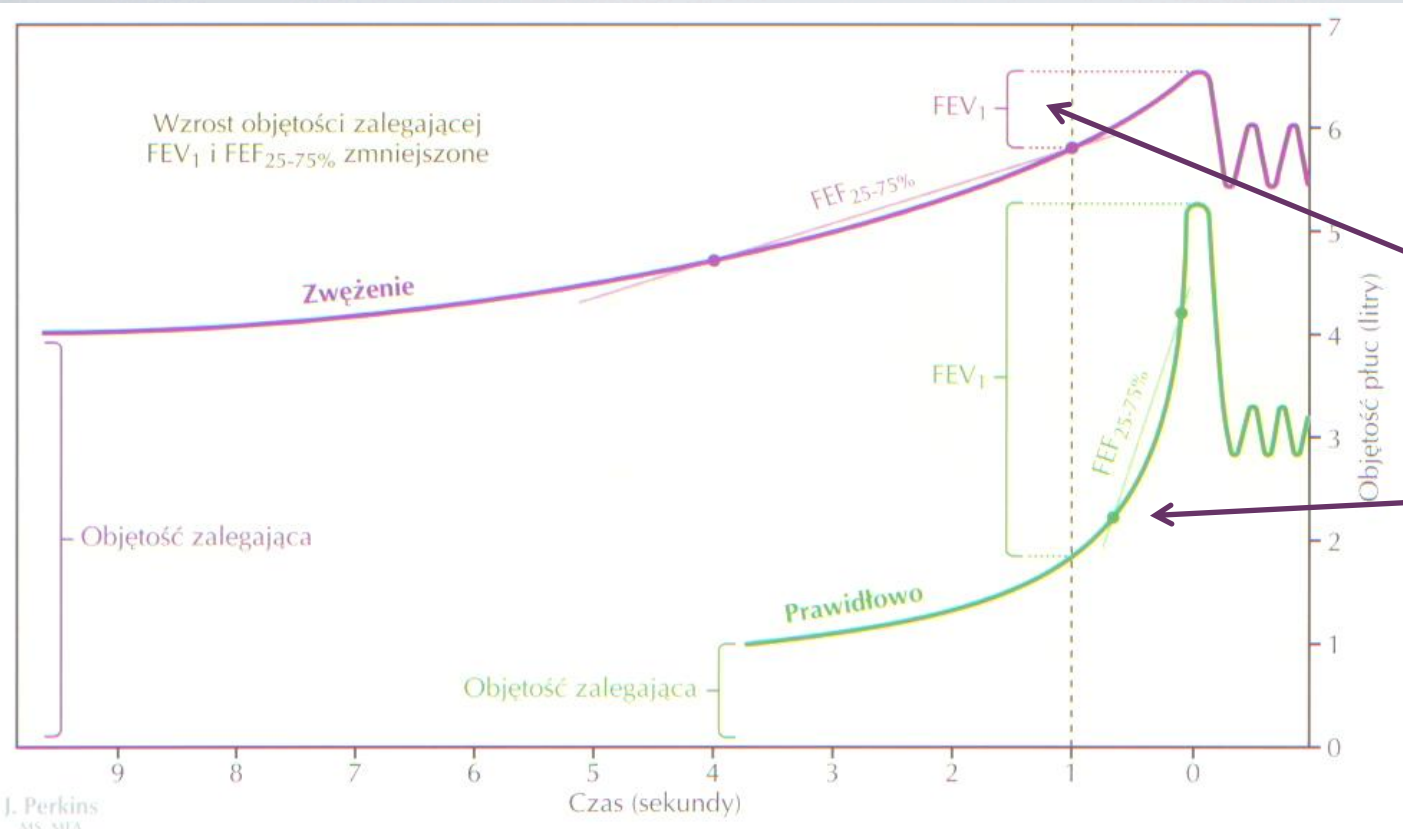


Obraz mikroskopowy płuca u człowieka ze
śródpęcherzykową rozedmą płuca

Pęknięte ściany pęcherzyków płucnych
Poszerzone przestrzenie powietrzne



*Przekrój płuca.
Zmiany w płacikach
pierwotnych mocniej
zaznaczone w górnych
częściach płuca*



FEV₁ – natężenie
wydechu
pierwszosekundowego
FEF – czas natężonego
przepływu powietrza
mierzony w połowie
wydechu

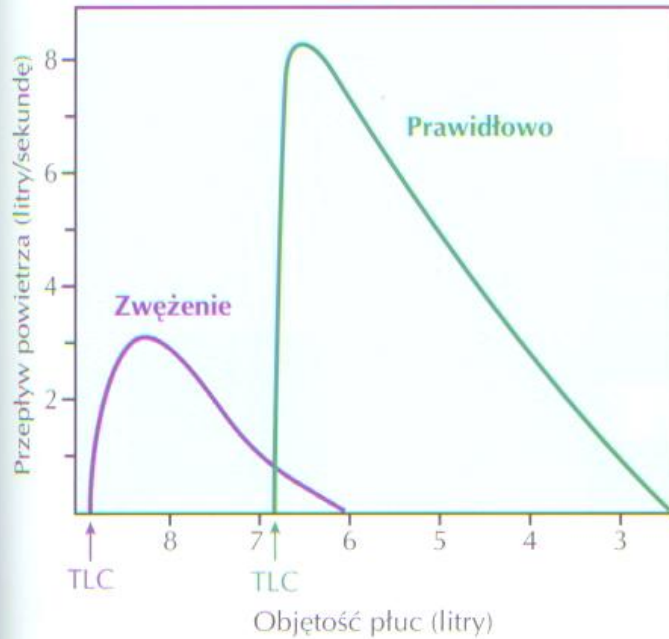
Proces zapalny niszczy tkankę łączną płuc,
włókna elastyczne biorące udział w
oporach elastycznych płuc.

Obturacyjne choroby płuc:
-Spłycenie oddechu
-Zatkanie dróg oddechowych

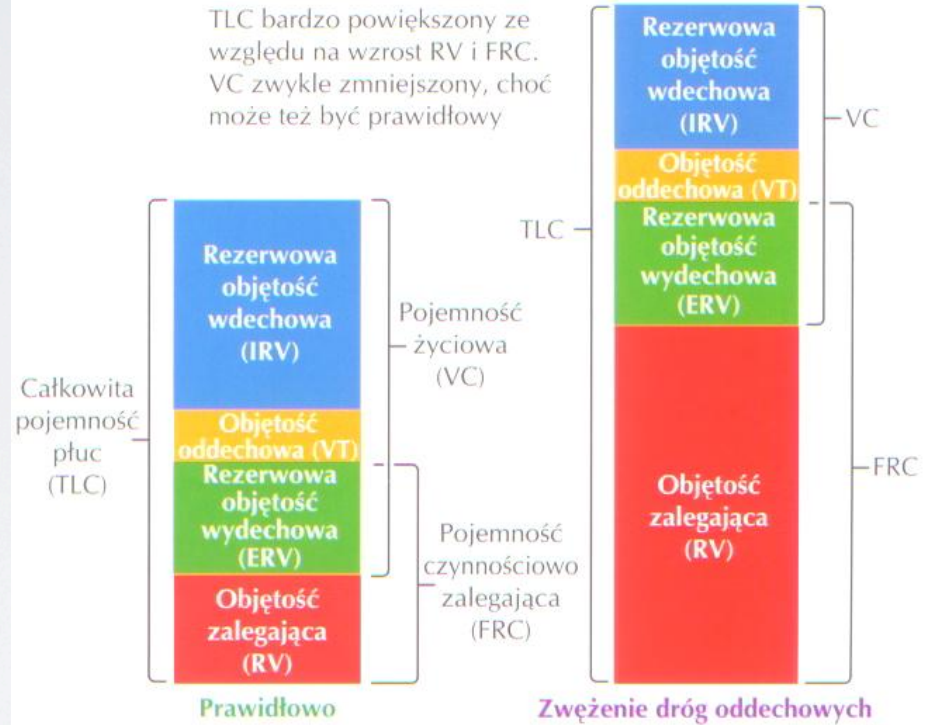
Zapadnięcie płuc
dynamiczna kompresja

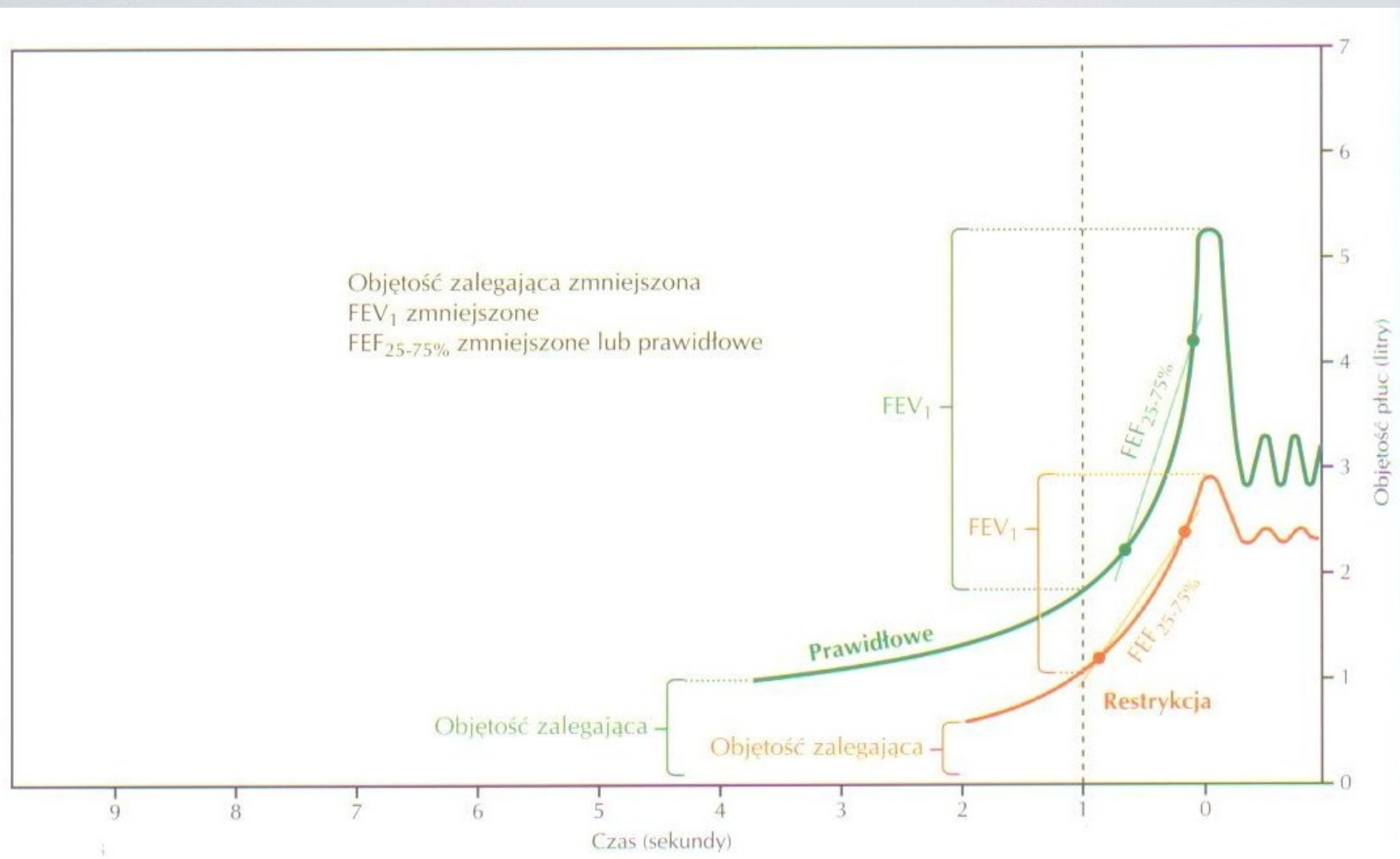
Chroniczny bronchit, rozdema płuc, astma

Krzywe przepływ/objętość
w czasie maksymalnego wydechu



TLC bardzo powiększony ze względu na wzrost RV i FRC. VC zwykle zmniejszony, choć może też być prawidłowy



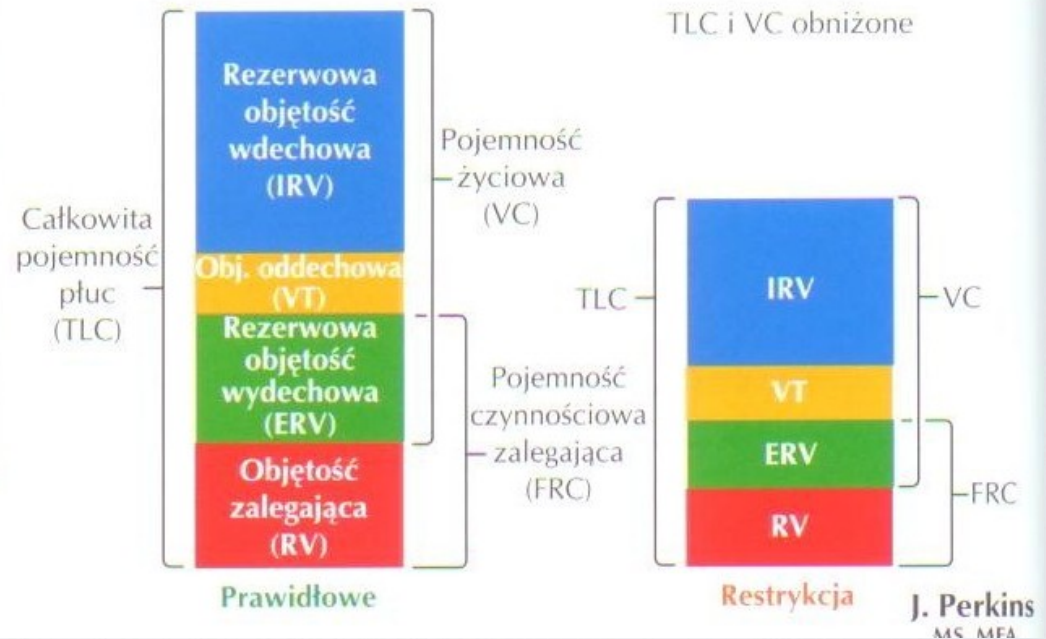
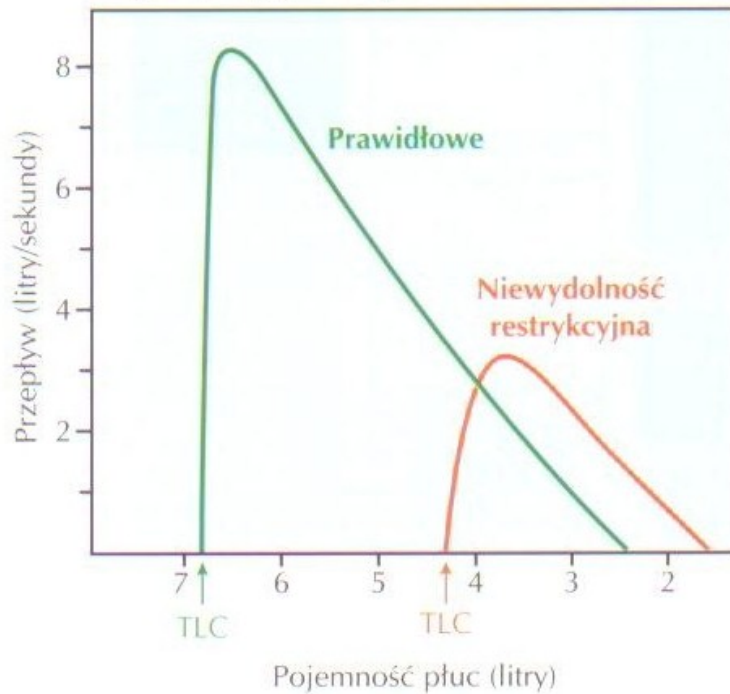


Choroby restrykcyjne płuc – zaburzenia powiązane ze wzrostem tkanki łącznej zrębu płuc

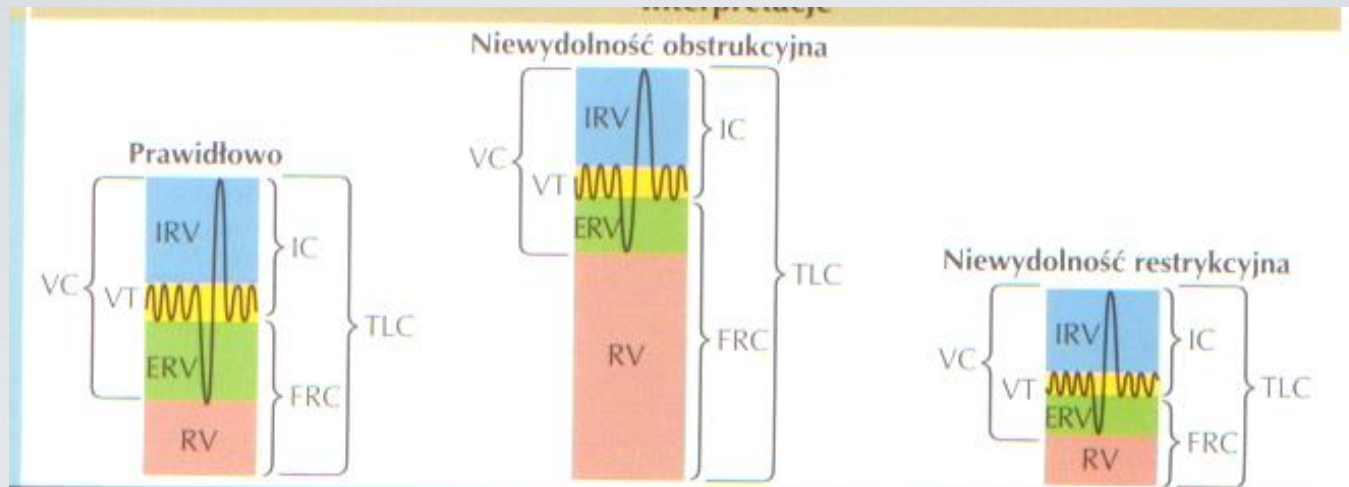
Fibroza płuc, pogrubienie ścianki
 pęcherzyków płucnych

Obniżona podatność – utrudnione rozciąganie

Krzywa przepływ/objętość w czasie maksymalnego wydechu



Obniżone objętości płuc

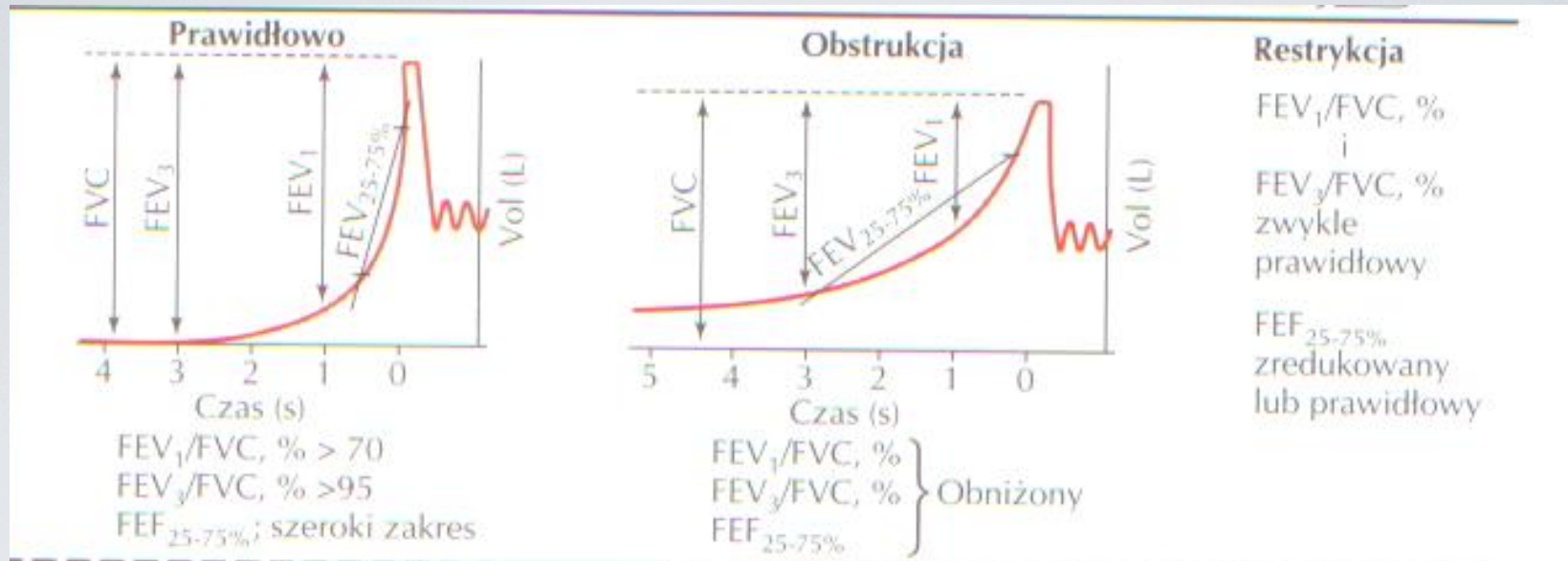


Objętość i pojemność płuc

Pojemność życiowa	VC	SPIROMETR
Pojemność wdechowa	IC	
Objętość rezerwowa wydechowa	ERV	
Objętość oddechowa	VT	

Rejestruje ilość i prędkość powietrza wydychanego i wdychanego

Pojemność naczyniowo-zalegająca	FRC	Przestrzeń helowa lub pletyzmograf FRC-ERV VC+RV lub FRC + IC
Objętość zalegająca	RV	
Pojemność całkowita płuc	TLC	



Przepływ w czasie wydechu

Natężony wydech

1 sekundowy

FEV₁

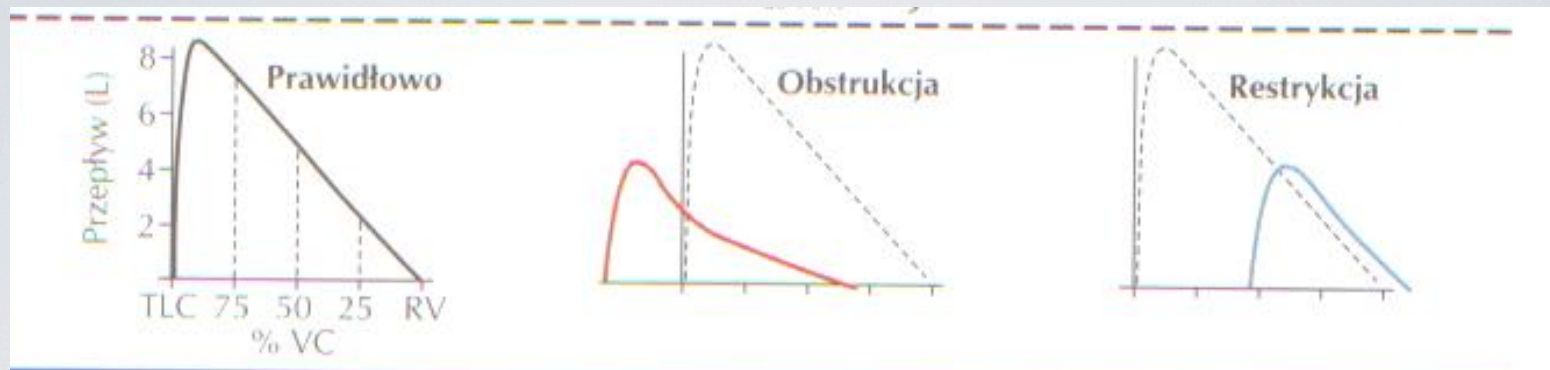
3 sekundowy

FEV₃

SPIROMETR

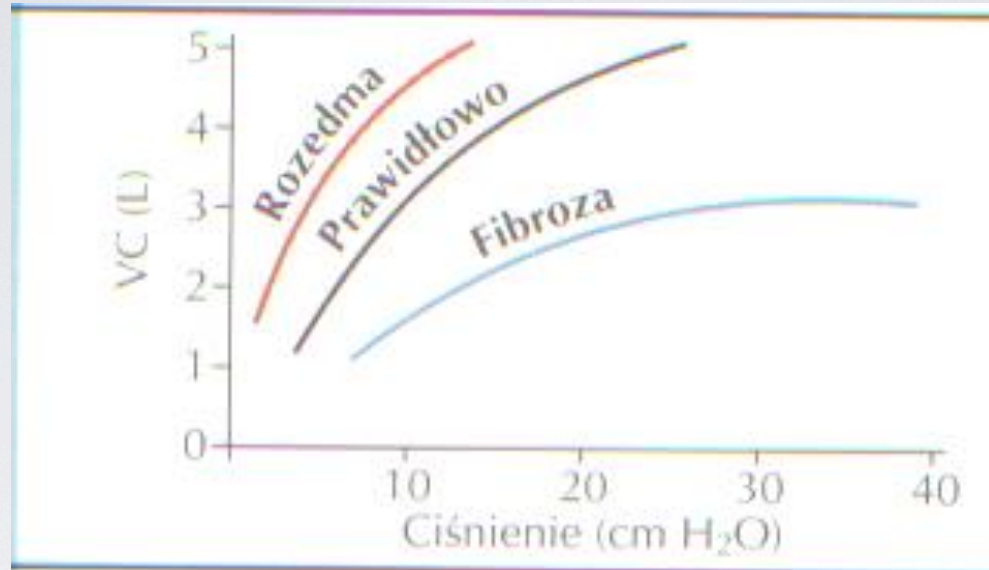
Natężony wydech
śródpływowy

FEV_{25-75%}



Krzywa przepływ/ objętość w czasie
maksymalnego wydechu

Maksymalny przepływ	MEFV	SPIROMETR z równoczesnym oznaczaniem przepływu i objętości zintegrowanego pneumotachografu
Przy 75% VC	$V_{\max} 75$	
Przy 50% VC	$V_{\max} 50$	
Przy 25% VC	$V_{\max} 25$	



Elastyczność płuc

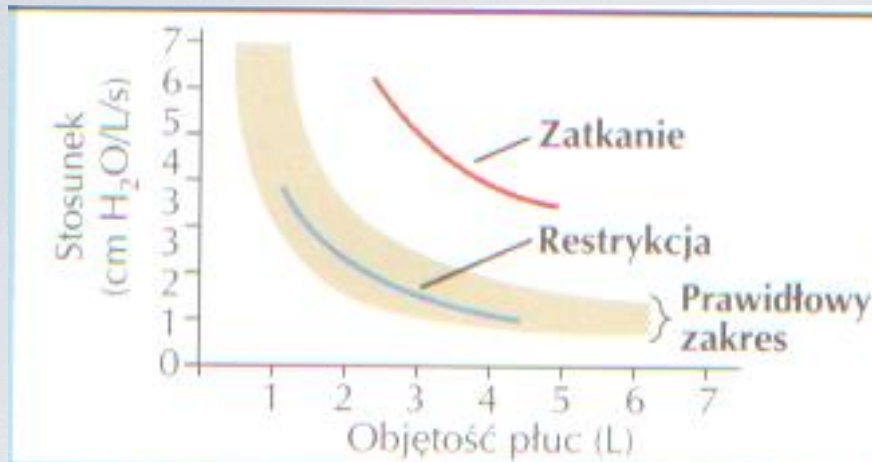
Ciśnienie statyczne

P_{STAT}

Podatność statyczna

C_{STAT}

Ciśnienie w opłucnej jest mierzone balonem w przełyku w trakcie zatrzymania wydechu przy różnych objętościach płuc; zmiany objętości płuc są mierzone spirometrem lub pneumotachografem



W niewydolności obstrukcyjnej płuc opór płucny wzrasta. Jeżeli dotyczy to tylko drobnych dróg oddechowych (<2 mm średnicy) to tylko niewielkie zmiany w oporze ogólnym są obserwowane. W chorobach restrykcyjnych płuc opór jest często zmniejszony na skutek rozszerzenia śródplucnych dróg oddechowych

Opór dróg oddechowych

Proporcja

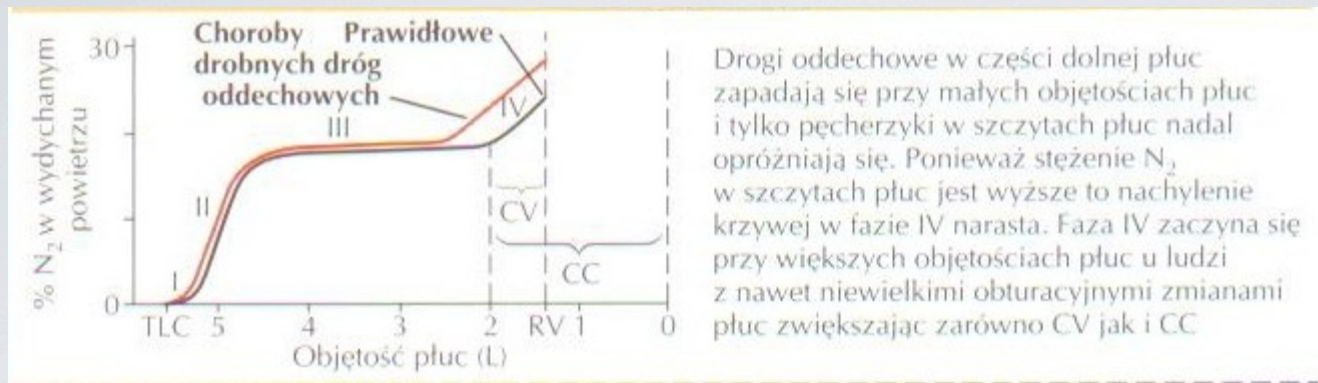
Pletyzmograf ciała do oceny ciśnienia pęcherzykowego i pneumotachograf do oceny przepływu powietrza

Pojemność dyfuzyjna

Dco

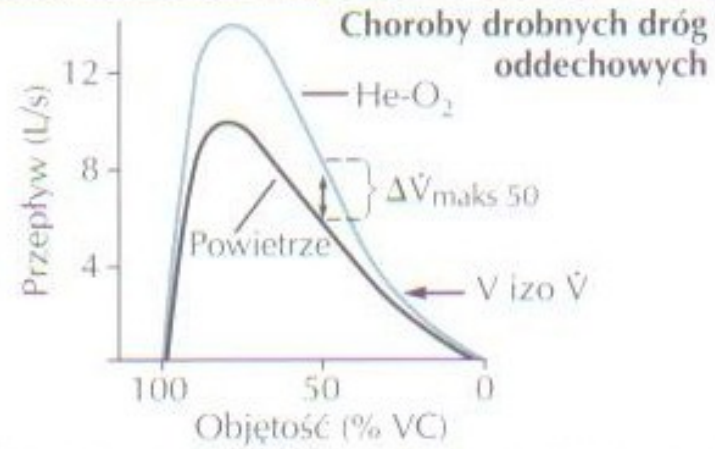
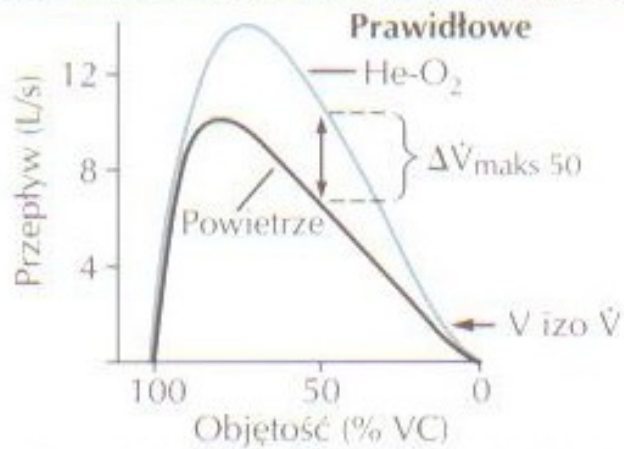
Niskie stężenie CO₂ wydychanego; wydychany gaz analizowany na CO

Pojemność dyfuzyjna jest zmniejszona gdy ściany pęcherzyków są zniszczone i kapilary płucne zwężone przez rozedmę płuc i gdy grubość ściany pęcherzykowo-włośniczkowej jest pogrubiona przez obrzęk, zwłóknienie lub połączenie z sąsiednimi strukturami.



Test na choroby drobnych dróg oddechowych

Objętość końcowa	CV	Po maksymalnym wdechu O_2 i częściowym opróżnieniu płuc zostaje wykreślony stosunek stężenia N_2 do pojemności płuc w zakresie od TLC do RV
Pojemność końcowa	CC	



W czasie wydechu maksymalnego opór dróg oddechowych zależy od zawiorań i sił konwekcji. Oddychanie helem, o mniejszej niż powietrze gęstości, obniża opór i zwiększa przepływ powietrza. W chorobach obejmujących drobniejsze drogi oddechowe opór przepływu laminarnego stanowi większość całkowitego oporu i przepływ gazu jest relatywnie niezależny od jego gęstości. Zwiększenie, przepływu wydychanego powietrza o 50 % w stosunku do VC przy oddychaniu He-O₂ ($\Delta\dot{V}_{\text{maks } 50}$), w porównaniu do oddychania czystym powietrzem będzie mniejsze u pacjentów z chorobą drobnych dróg oddechowych niż zdrowych

Krzywa przepływ/ objętość w czasie
maksymalnego wydechu
(oddychanie 80% He i 20% O₂)

$\Delta\dot{V}_{\text{maks } 50}$
 $\Delta \text{ izo } \dot{V}$

Spirometr lub
pneumotachograf
by zmierzyć
przepływ i objętość

Wymiana gazowa		Wartości prawidłowe	
Ciśnienie cząstkowe O ₂ we krwi tętniczej	P _{O₂}	60-100 mmHg	Niedotlenienie – nieprawidłowości wentylacja/przepływ, zaburzenia dyfuzji, niedodmy pęcherzyków płucnych
Ciśnienie cząstkowe CO ₂ we krwi tętniczej	P _{CO₂}	36-44 mmHg	PCO ₂ proporcjonalne do zmian metabolicznych CO ₂ i odwrotnie proporcjonalne do wentylacji pęcherzykowej
			Kwasica < 7.35
			Oddychanie nieprawidłowa wentylacja pęcherzykowa
pH krwi tętniczej	pH	7.35 – 7.45	Metaboliczne gromadzenie kwasów i/lub utrata zasad
			Alkaloz > 7.45
			Oddychanie zwiększona wentylacja pęcherzykowa
			Metaboliczne (gromadzenie zasad lub utrata kwasów)

Wymiana gazowa			Wartości prawidłowe	
Różnica O_2 pęcherzykowo-tętnicza	A-aDo ₂ A-aPo ₂		< 10mmHg oddychanie powietrzem w pomieszczeniu	Pierwotne odruchy zaburzające stosunek wentylacji/przepływu i/lub połączenia tętniczo-żylne mogą być wywołane nieprawidłową dyfuzją
Przestrzeń martwa/objętość i oddechowej	V _D /V _r	Oznaczone z tętniczego i mieszanego wydychanego Po ₂	<0.3	Wyższy stosunek może być wynikiem upośledzonej wentylacji np. gdy gaz pozostaje w pęcherzykach i nie podlega wymianie
Frakcja zespołów tętniczo-żylnych	Q _s /Q _r	Oznaczone z PO ₂ po okresie oddychania 100% O_2	<5%	Wzrost - większa ilość krwi mieszanej (t-ż) krążącej bez wymiany gazowej w pęcherzyku.