

## PODSTAWY TEORETYCZNE: OODYCHANIE

Komórki w twoim organizmie zużywają tlen i produkują dwutlenek węgla. Podstawowym źródłem tlenu dla zwierząt lądowych jest powietrze atmosferyczne, które przy ciśnieniu atmosferycznym na poziomie morza zwykle zawiera około 78% azotu, 21% tlenu i mniej niż 0,05% dwutlenku węgla oraz liczne inne pierwiastki i związki chemiczne w ilościach śladowych.

Układ oddechowy człowieka składa się z dróg doprowadzających powietrze i właściwego narządu wymiany gazowej czyli płuc. Oddychanie dzieli się na zewnętrzne i wewnętrzne.

**Oddychanie zewnętrzne** składa się z czterech etapów. Są to:

1. Wentylacja płuc
2. Dyfuzja gazów: powietrze pęcherzykowe - krew
3. Transport gazów przez krew
4. Dyfuzja gazów: krew-komórki

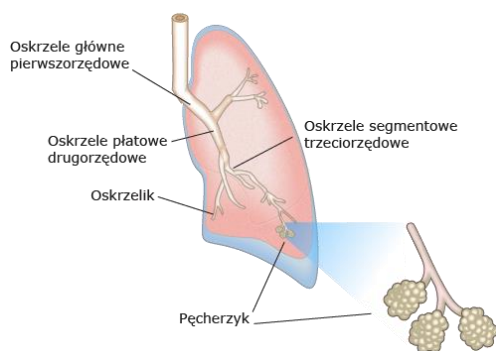
**Oddychanie wewnętrzne** (komórkowe) zachodzi w mitochondriach i polega na utlenianiu związków organicznych w celu uzyskania energii. Dzisiejsze zajęcia dotyczą tylko oddychania zewnętrznego.

Układ oddechowy przypomina drzewo. W każdym rozgałęzieniu drzewa powstają dwie nowe gałęzie.

**Drzewo oddechowe** dzieli się na dwie strefy:

1 - Strefa przewodzenia, zawierająca 16 pierwszych rozgałęzień drzewa. Obejmuje ona: gardło, krtań, tchawicę, oskrzela, oskrzeliki i oskrzeliki końcowe. W strefie tej nie zachodzi wymiana gazowa – jest to tzw. **przestrzeń martwa anatomiczna**.

2 – Strefa oddechowa, zawierająca najczęściej 7 ostatnich rozgałęzień. Tylko tutaj zachodzi wymiana gazowa. Obejmuje ona: oskrzeliki oddechowe, przewodniki pęcherzykowe i pęcherzyki oddechowe. Z około 500 mL powietrza pobranego przy każdym wdechu, do strefy oddechowej dociera ~350 mL. Reszta pozostaje w drogach oddechowych, tj. przestrzeni martwej anatomicznej.



Rysunek 1. Układ oddechowy człowieka

**Pęcherzyki płucne**, nazywane czasami workczkami pęcherzykowymi, są małymi strukturami o cienkiej błonie, silnie unaczynionej, gdzie dochodzi do wymiany gazowej. W pęcherzykach i w całym naszym organizmie gazy dyfundują zgodnie z gradientem ciśnień parcjalnych, z obszarów o wyższym ciśnieniu, do obszarów o niższym ciśnieniu parcjalnym. Jest to zwykle wyrażane z punktu widzenia ciśnienia parcjalnego gazów ( $PO_2$ ,  $PCO_2$ ) tak, aby łatwo można było porównać koncentrację gazów w powietrzu atmosferycznym i rozpuszczonych w płynach w organizmie.

Porównanie to jest możliwe, ponieważ liczba cząsteczek gazu rozpuszczonych w płynie, jest wprost proporcjonalna do ciśnienia parcjalego gazu. Określa to prawo Henry'ego.

U człowieka jest około 300–600 milionów pęcherzyków płucnych. Ich łączna powierzchnia wynosi ok. 140 m<sup>2</sup>. Pęcherzyki oplecione są siecią naczyń włosowatych. Pęcherzyki, w których przepływ krwi w tych naczyniach jest niewystarczający by zapewnić wymianę gazową nazywamy **przestrzenią martwą fizjologiczną**.

Nabłonek pęcherzyków płucnych zbudowany jest z trzech typów komórek. Są to:

- Pneumocyty typu I, które stanowią 95% powierzchni. Należą one do nabłonka płaskiego, to przez ich ściany zachodzi wymiana gazowa.
- Pneumocyty typu II, które wytwarzają surfaktant.
- Makrofagi pęcherzykowe, których rolą jest są fagocytowanie oraz trawienie bakterii i innych obcych cząsteczek (np. pyłu, dymu tytoniowego, azbestu).

**Surfaktant płucny** pokrywa wewnętrzną powierzchnię pęcherzyków płucnych. Zbudowany jest z lipidów, białek i węglowodanów. Jego głównym składnikiem jest dipalmitoylofosfatydylocholina. Surfaktant to substancja powierzchniowo czynna, która redukuje napięcie powierzchniowe, zapobiegając nadmiernemu rozciągnięciu pęcherzyków płucnych podczas wdechu i ich zlepianiu podczas wydechu.

## MECHANIKA ODDYCHANIA

Wentylacja płuc ma na celu dostarczenie do organizmu tlenu i usunięcie dwutlenku węgla.

Skurcz i rozkurcz mięśni oddechowych zmienia objętość klatki piersiowej i ciśnienie w jej obrębie. Zmiany te umożliwiają przepływ powietrza podczas wdechu i wydechu. Ruch powietrza w układzie oddechowym następuje zgodnie z gradientem ciśnienia. Ani różnica w objętości, ani w oporach oddechowych nie wpływa bezpośrednio na przepływ powietrza.

### Wdech

Podczas spokojnego wdechu, skurcz przepony zwiększa objętość klatki piersiowej, ciśnienie wewnątrzpiersiowe spada i powietrze napływa do płuc z atmosfery na skutek różnicy ciśnień pomiędzy atmosferą a wnętrzem pęcherzyków. Wdech jest procesem aktywnym, wymagającym skurczu mięśni. **Podczas spokojnego wdechu kurczą się główne mięśnie wdechowe: mięśnie przepony i międzyżebrowe zewnętrzne.** Są one pobudzane przez motoneurony (neurony ruchowe), które aktywowane są przez impulsację z ośrodka wdechu.

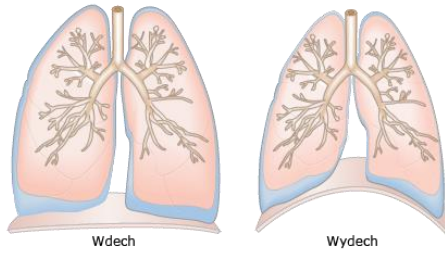
### Przepona

Przepona jest dużym mięśniem oddzielającym klatkę piersiową od jamy brzusznej. Jest to główny mięsień oddechowy. Podczas wdechu wypłaszcza się, podczas wydechu powraca do kształtu kopuły (Rys. 2).

### Mięśnie międzyżebrowe zewnętrzne

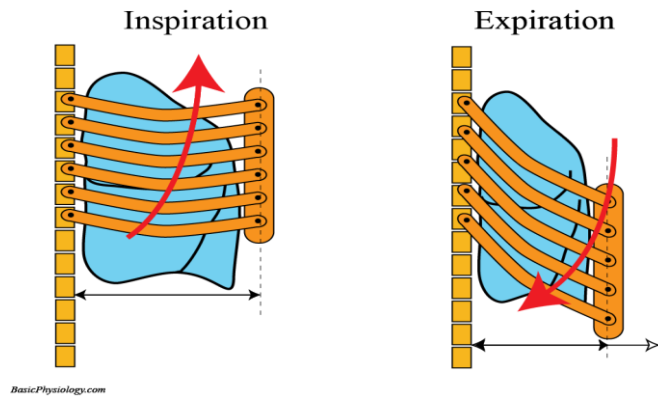
Mięśnie te położone są między żebrami. Ich skurcz unosi i obraca żebra, dzięki czemu klatka piersiowa zwiększa swą objętość (Rys. 3).

Mięśnie międzyżebrowe zewnętrzne zaangażowane są zarówno w czasie spokojnego, jak i nasilonego wdechu.



Rysunek 2. Ułożenie przepony i zmiany objętości płuc na końcu wdechu i wydechu.

Podczas nasilonego, pogłębionego wdechu kurczą się również dodatkowe mięśnie wdechowe. Są to m.in. następujące mięśnie: mostkowo-obojczykowo-sutkowy (jeden z powierzchniowych mięśni szyi, pełni rolę pomocniczego mięśnia wdechowego, unosząc mostek podczas dynamicznego wdechu), czworoboczny, piersiowy mniejszy, zębaty przedni, dźwigacz łopatki, równoległoboczny, mięśnie pochyłe szyi czy skrzydełek nosa.



Rysunek 3. Zmiany położenia żeber i mostka podczas wdechu (Inspiration) i wydechu (Expiration)

## Wydech

W spokojnym oddychaniu wydech jest głównie zjawiskiem biernym. Przepona jest rozluźniona i cofające się struktury elastyczne płuc, podnoszą ciśnienie wewnątrzpiersiowe powyżej atmosferycznego. Podczas spokojnego oddychania dochodzi również, poprzez aktywność mięśni międzyżebrowych, do ruchu żeber, ale o małym zasięgu, w związku z tym w tych warunkach mają one stosunkowo niewielki wkład w oddychanie (Rysunek 3). Przy pogłębionym oddychaniu aktywowane są mięśnie wydechowe:

### Mięśnie międzyżebrowe wewnętrzne

Skurcz tych mięśni pociąga żebra ku dołowi i do tyłu, dzięki czemu klatka piersiowa zmniejsza swe wymiary. Mięśnie te zaangażowane są podczas nasilonego wydechu.

### Mięśnie przedniej ściany jamy brzusznej

Mięśnie te kurczą się w czasie nasilonego wydechu. Są to głównie mięśnie proste i skośne brzucha.

# REGULACJA ODDYCHANIA

## Ośrodek oddechowy

Podstawowy rytm oddechowy jest generowany w rdzeniu przedłużonym i jest modyfikowany przez impulsy dochodzące z mostu, wyższych pięter mózgowia (włączając korę mózgową) i receptorów obwodowych.

## Rdzeń przedłużony

W rdzeniu przedłużonym znajdujemy trzy obszary zaangażowane w kontrolę oddychania:

- Komplex **pre-Bötzingera (preBötC)** zawierający neurony zlokalizowane w brzuszno-bocznej części rdzenia przedłużonego, odpowiedzialne za generowanie rytmu oddechowego. Neurony te są funkcjonalnie połączone z ośrodkami wdechu i wydechu.
- **Ośrodek wdechu** czyli neurony oddechowe zlokalizowane w części grzbietowej (DRG) rdzenia przedłużonego, w pobliżu korzeni nerwu IX (językowo-gardłowego). Neurony DRG integrują informację płynącą z nerwu błędnego (X) i językowo-gardłowego (IX), które przewodzą informację czuciową z płuc, dróg oddechowych, chemoreceptorów obwodowych i proprioreceptorów stawowych.
- **Ośrodek wydechu** czyli neurony oddechowe zlokalizowanymi w części brzusznej (VRG) rdzenia przedłużonego to sieć neuronów rozciągających się od rdzenia kręgowego aż do obszaru połączenia mostu i rdzenia przedłużonego. Lokalizacja neuronów VRG nie pokrywa się z neuronami DRG. Ośrodek wydechu jest zaangażowany tylko podczas nasilonego wydechu, który wymaga skurczu mięśni wydechowych.

## Most

Neurony oddechowe zlokalizowane w moście modyfikują aktywność neuronów oddechowych rdzenia przedłużonego. Kluczowe są dwa ośrodki:

- **Ośrodek pneumotaksyczny** zlokalizowany w górnej części mostu, w tzw. jądrze podprzyramieniowym (inaczej jądro Köllikera-Fusego). Neurony tego ośrodka zwrotnie hamują ośrodek wdechu na 1-2 sekundy, dzięki czemu mamy czas na wydech. Spokojny wydech jest aktem biernym.
- **Ośrodek apneustyczny** zlokalizowany w dolnej części mostu, w tzw. tworze siatkowatym, który nasila wdech, zabezpieczając przed wyłączeniem neuronów wdechowych przez ośrodek pneumotaksyczny.

## Wyższe piętra mózgowia

- **Kora mózgowia** jest zaangażowana w dowolną kontrolę oddychania
- **Układ limbiczny**, który zaangażowany jest w stany emocjonalne, sprawia, że w czasie silnych emocji zmienia się rytm oddechowy
- **Ośrodek termoregulacji w podwzgórzu**, ponieważ zmiana rytmu oddechowego jest pomocna w regulacji temperatury ciała.

## Powstanie rytmu oddechowego

Neurony kompleksu pre-Bötzingera generują rytmiczne wyładowania stanowiące zaczątek rytmu oddechowego. Z kolei neurony ośrodka wdechu wysyłają impulsy nerwowe do rdzenia kręgowego, do neuronów ruchowych unerwiających mięśnie wdechowe. Nie mają charakteru komórek rozrusznikowych, lecz przetwarzają na rytmiczną aktywność pobudzenie płynące z aktywującego tworzywa siatkowatego pnia mózgu (rdzeń, most, śródmózgowie), chemodetektorów i chemoreceptorów. Neurony ośrodka wdechu wysyłają salwy impulsów kilkanaście (10-16) razy na minutę. Impulsy biegną przez gałązkę zstępującą aksonu do neuronów ruchowych rdzenia kręgowego i równocześnie przez gałązkę wstępującą aksonu do neuronów tworzywa siatkowatego mostu tworzących ośrodek pneumatyczny. Hamuje on zwrótnie ośrodek wdechu na 1-2 sekundy, dzięki czemu możemy zrobić wydech.

**Rytmiczność oddychania jest związana z naprzemiennym pobudzaniem i hamowaniem ośrodka wdechu (a nie naprzemiennym pobudzaniem ośrodka wdechu i wydechu).**

Ruchy oddechowe są specyficzne, ponieważ podlegają podwójnej kontroli ośrodkowego układu nerwowego. Mogą też być wykonywane w sposób świadomy, w ten sam sposób, jak ruchy ramion czy kończyn. Jeśli modulujemy oddech w czasie recytacji czy śpiewu lub zatrzymujemy oddech przed zanurkowaniem mówimy wówczas o **kontroli dowolnej**. Jednakże, jeśli w sposób świadomy nie skupiamy się na oddychaniu, rytmiczne skurcze mięśni pojawiają się automatycznie. Oddychanie automatyczne jest kontrolowane przez ośrodek oddechowy, znajdujący się w pniu mózgu. Ośrodek oddechowy zapewnia sprawną wymianę gazową w płucach, odpowiadającą wymaganiom organizmu. W okresie zwiększonego popytu, tempo i głębokość oddechu zwiększa się, aby zapewnić większą ilość świeżego powietrza dla płuc. W takiej sytuacji mówimy o **kontroli automatycznej**. Ośrodek oddechowy opuszki rdzenia posiada chemodetektory, niezwykle wrażliwe na zmianę prężności ( $PCO_2$ ) i pH w płynie mózgowo-rdzeniowym. Chemoreceptory wrażliwe na zmiany ciśnienia parcjalnego ( $PCO_2$ ) we krwi są zgrupowane w pobliżu rozwidlenia tętnicy szyjnej wspólnej (kłębki szyjne) i łuku aorty (kłębki aortalne).

Ośrodek oddechowy pnia mózgu i sercowo-naczyniowy znajdują się w rdzeniu przedłużonym w bezpośrednim sąsiedztwie i neurony wdechowe mają hamujący wpływ na neurony nerwu błędnego serca. Znajduje to odzwierciedlenie w tachykardii, która zazwyczaj towarzyszy fazie wdechu (niemiarowość zatokowa).

## Chemoreceptory

Informacja z ośrodkowych i obwodowych chemoreceptorów dociera do ośrodka wdechu, modulując jego pracę tak że ciśnienie parcjalne gazów we krwi i jej pH pozostają stałe.

Bodźcem drażniącym chemoreceptory jest nieznaczne zwiększenie ciśnienia parcjalnego dwutlenku węgla ( $PCO_2$ ), pH lub bardzo duże zmniejszenie ciśnienia parcjalnego tlenu ( $PO_2$ ) w krwi tętniczej.

Chemoreceptory ośrodkowe (chemodetektory) to neurony wrażliwe na pH płynu mózgowo-rdzeniowego. Gdy pH obniża się chemodetektory wysyłają impulsy nerwowe do ośrodka wdechu. Chemoreceptory obwodowe to nagie zakończenia nerwowe zlokalizowane w kłębkach szyjnych i aortalnych. Impulsacja z kłębków aortalnych biegnie nerwem językowo-gardłowym (nerw czaszkowy IX) i nerwem błędnym (nerw czaszkowy X) do ośrodka wdechu powodując przyspieszenie i pogłębienie oddechów. Dzięki temu usuwany jest nadmiar  $CO_2$ .

Receptorami zaangażowanymi w regulację rytmu oddechowego są również **interoreceptory** w tkance płucnej i **proprioceptory** klatki piersiowej. Wdech, który jest równoznaczny z rozciągnięciem tkanki płucnej pobudza receptory inflacyjne, co stymuluje wydech. Przeciwnie,

wydech powoduje pobudzenie receptorów deflacyjnych stymulując kolejny wdech. Im głębszy wdech robimy tym głębszy wydech następuje.

## **OBJĘTOŚCI I POJEMNOŚCI ODDECHOWE**

### **Statyczne parametry płuc**

Podczas spokojnego oddychania wdychamy i wydychamy pewną, określoną ilość powietrza, tzw. objętość oddechową. Zajmuje ona tylko niewielką część całkowitej pojemności płuc, stąd zawsze można wziąć głębszy wdech i zrobić głębszy wydech. Jednakże nawet po najgłębszym wydechu w płucach pozostaje pewna ilość powietrza. W skład całkowitej pojemności płuc wchodzi cztery **objętości**:

#### **Zapasowa objętość wdechowa (IRV)**

Jest to ilość powietrza, jaka może być wciągnięta do płuc podczas maksymalnego wdechu wykonanego po spokojnym wdechu. Wynosi ona około 3 L.

#### **Objętość oddechowa (VT)**

Jest to ilość powietrza, jaka jest wdychana i wydychana podczas spokojnego oddychania. Przeciętnie dorosły człowiek wykonuje 10-16 oddechów na minutę, a objętość oddechowa wynosi ~0,5 L.

#### **Zapasowa objętość wydechowa (ERV)**

Jest to ilość powietrza, jaką można usunąć z płuc podczas maksymalnego wydechu, licząc od spokojnego wydechu. Wynosi ona ~1,5 L.

#### **Objętość zalegająca (RV)**

Jest to ilość powietrza, jaka pozostaje w płucach po wykonaniu maksymalnego wydechu. Wynosi ona ~1,2L.

Poszczególne objętości płuc można połączyć funkcjonalnie i w ten sposób uzyskać **pojemności płuc**. Poniższy schemat pokazuje, jakie objętości wchodzi w skład poszczególnych pojemności. Pamiętaj, że pojęcia "objętość" i "pojemność" nie są równoznaczne.

#### **Pojemność wdechowa (IC)**

Jest to ilość powietrza, jaką można wciągnąć do płuc podczas maksymalnego wdechu, wykonanego po spokojnym wydechu. Jest to suma IRV i VT.

#### **Pojemność wydechowa (EC)**

Jest to ilość powietrza, jaką można usunąć z płuc podczas maksymalnego wydechu, wykonanego po spokojnym wdechu. Jest to suma VT i ERV.

#### **Pojemność zalegająca czynnościowa (FRC).**

Jest to ilość powietrza, jaka pozostaje w płucach po normalnym wydechu. Jest to suma ERV i RV.

#### **Pojemność życiowa (VC)**

Jest to ilość powietrza, jaką można usunąć z płuc podczas maksymalnego wydechu, wykonanego po maksymalnym wdechu. Jest to suma IRV, VT i ERV.

#### **Całkowita pojemność płuc (TLC)**

Jest to ilość powietrza, jaka znajduje się w płucach na szczycie maksymalnego wdechu. Jest to suma wszystkich objętości: IRV, VT, ERV i RV.

Poniższy schemat obrazuje i definiuje poszczególne objętości i pojemności płuc:

