

Janusz Kocjan¹, Mariusz Adamek¹, Bożena Gzik-Zroska², Damian Czyżewski¹, Mateusz Rydel¹

¹Katedra i Klinika Chirurgii Klatki Piersiowej, Wydział Lekarski z Oddziałem Lekarsko-Dentystycznym w Zabrze, Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach

²Katedra Biomateriałów i Inżynierii Wytrobów Medycznych, Wydział Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Śląska w Zabrze

„Sieć oddechowa”. Wielofunkcyjna rola przepony — przegląd piśmiennictwa

Praca nie była finansowana

Tłumaczenie, należy cytować wersję oryginalną: Kocjan J, Adamek M, Gzik-Zroska B, Rydel M. Network of breathing. Multifunctional role of the diaphragm: a review. *Adv. Respir. Med.* 2017; 85: 224–232. doi: 10.5603/ARM.2017.0037

Streszczenie

Przepona jest głównym mięśniem zaangażowanym w proces oddychania. Stanowi też istotny punkt anatomiczny oddzielający jamę klatki piersiowej od jamy brzusznej. Podobnie jak inne struktury i narządy w ludzkim ciele, spełnia więcej niż jedną funkcję, poprzez wiele połączeń anatomicznych, które razem tworzą „sieć oddechową”. Poza funkcją oddechową, przepona pomaga utrzymać właściwą postawę ciała, stabilizuje bowiem odcinek lędźwiowy kręgosłupa podczas wykonywania rozmaitych czynności ruchowych. Odgrywa także ważną rolę w prawidłowym funkcjonowaniu układu naczyniowego i limfatycznego, a także uczestniczy w czynnościach żołądkowo-przetykowych, takich jak polykanie, wymiotowanie. Jest również barierą antyrefluksową. W niniejszej pracy przedstawiono szczegółowo anatomie i zagadnienia związane z embriologią przepony, próbując także wykazać, że jest ona ważny „punktem wymiany informacji” pochodzących z różnych miejsc ludzkiego organizmu oraz że sama w sobie stanowi źródłoowych „informacji”. W pracy omówiono także wszystkie funkcje przepony związane z oddychaniem.

Słowa kluczowe: przepona, oddychanie, czynność przepony

Wstęp

Naukowcy zainteresowali się przeponą pod koniec XVIII wieku, kiedy to Sewall i Pollard [1] zajęli się badaniem związku pomiędzy ruchami klatki piersiowej a przeponą. Stwierdzili, że przepona uczestniczy w oddychaniu, a na podstawie zaobserwowanych zmian w obwodzie jamy brzusznej — że kurcząca się w procesie oddychania przepona obniża się w kierunku jamy brzusznej. Na początku XIX wieku Bell [2] wykazał, że w przypadku urazu rdzenia kręgowego w odcinku szyjnym, człowiek może pozostawać przy życiu, oddychając tylko przeponą [2]. W ciągu kolejnych dziesięcioleci naukowcy badali mechanizmy fizjologiczne, funkcje biomechaniczne i anatomiczne powiązania przepony. Obecnie istnieje wiele dowodów na to, że przepona jest nie tylko

mięśniem oddechowym, ale pełni także wiele istotnych ról w fizjologii człowieka. Z punktu widzenia anatomii, przepona jedynie oddziela jamę klatki piersiowej od jamy brzusznej. Biorąc jednak pod uwagę aspekt funkcjonalny, mięsień ten rozciąga się od nerwu trójdzielnego do dna miednicy, ponadto łączy się z wieloma punktami w całym organizmie i jest ważnym punktem przekazu informacji dotyczących całego ciała. Przeponę unerwia nerw przeponowy, który rozciąga się od korzeni segmentu C3 do C5. Ścieżka przebiegu nerwu przeponowego obejmuje cały splot ramienny oraz cały splot szyjny. Wzdłuż swojej ścieżki przebiegu nerw przeponowy jest zespolony z nerwem błędnym połączonym z pęczkiem podłużnym przyśrodkowym i kontaktuje się z jądrem nerwu trójdzielnego poprzez dośrodkowe połączenia. Nerw błędny jest ponadto ściśle zwią-

zany z nerwem podjęzykowym, który z kolei ma powiązania z nerwem trójdzielnym i otrzymuje od nerwu przeponowego wiele impulsów presynaptycznych. W odniesieniu do omówionych połączeń neurologicznych, nieprawidłowa czynność przepony może powodować objawy występujące w okolicy podstawy szyi (*cervical base*) i oczu, a także dna jamy ustnej (trudności z połykaniem lub bezdech senny). Znajdujące się w części dolnej połączenie między przeponą a dnem miednicy jest mniej skomplikowane. Proces oddychania musi być wspierany przez dno miednicy w celu kontroli ciśnienia wewnątrz jamy brzusznej. Podczas fizjologicznych czynności przepony (np. oddychania, kaszlu), gdy przepona obniża się w kierunku jamy brzusznej, obserwuje się także jednocześnie obniżenie dna miednicy. Należy też wspomnieć, że aktywność elektryczną mięśni dna miednicy obserwuje się już przed czynnością wdechową [3]. Podsumowując, można powtórzyć za Stone [4], że „przepona jest jedną z najbardziej niezwykłych struktur w ciele człowieka, ponieważ jej działanie ma tak duży wpływ na jego funkcjonowanie, że konsekwencje jej nieprawidłowej pracy mogą być widoczne w dowolnym miejscu organizmu”. Z kolei Still [5], twórca podwalin osteopatii i medycyny osteopatycznej napisał, że „dzięki czynnościom przepony żyjemy, lecz z powodu jej niewłaściwego działania kurczymy się lub puchniemy oraz umieramy”.

Anatomia oraz anatomiczne połączenia przepony

Przepona jest cienkim (2–4 mm), ruchomym, wewnętrznym mięśniem szkieletowym w kształcie kopuły, oddzielającym jamę klatki piersiowej od jamy brzusznej. Odgrywa także ważną rolę w przekazywaniu informacji między tymi dwiema jamami. W pozycji anatomicznej przepona jest uwypuklona w formie prawej i lewej kopuły. Prawa kopuła jest umieszczona nieznacznie wyżej niż lewa, sięga bowiem do wysokości górnego brzegu piątego żebra. Natomiast lewa kopuła sięga dolnego brzegu piątego żebra. Prawa kopuła znajduje się wyżej niż lewa prawdopodobnie dlatego, że prawy płąt wątroby jest większy. Środek ścięgniasty, który znajduje się między dwiema kopułami, jest umiejscowiony na poziomie chrząstkozrostu wyrostka mieczykowatego. Kopuły przepony podpierają prawe i lewe płuco, zaś środek ścięgniasty stanowi podporę serca. Pozycja i kształt przepony nie jest stała, lecz zmienia się w zależności od fazy oddychania. Podczas maksymalnego wydechu kopuła przepony może się unieść do poziomu

czwartej przestrzeni międzyżebrowej (poziom sutków). Z kolei przy pełnym wdechu przepona spłaszcza się, obniżając jamę klatki piersiowej do poziomu łuków żebrowych z przodu, zaś z tyłu do 12. żebra. Ułożenie przepony zależy także od postawy ciała (jest niższe, gdy dana osoba siedzi lub stoi, i wyższe w pozycji leżącej) oraz stopnia rozdęcia wnętrza jamy brzusznej [6, 7].

Pod względem budowy przepona składa się z dwóch części: centralnie położonego niekurczliwego ścięgna — płaskiego rozciągniętego zbudowanego z gęstych włókien kolagenowych, oraz znajdującego się na obwodzie mięśnia, który biegnie do środka ścięgniastego. Część mięśniowa, w zależności od miejsca przyczepu, dzieli się na trzy części. Włókna części mostkowej są krótkie i wychodzą w formie małych pasków z nasady wyrostka mieczykowatego. Część żebrowa (po obu stronach mostka) jest zbudowana z kilku szerokich mięśni wychodzących z wewnętrznej powierzchni sześciu chrząstek żebrowych (*costal margin*, łuk żebrowy), natomiast część lędźwiowa przepony przyczepia się do kręgów lędźwiowych za pomocą dwóch odnóg i trzech łukowatych więzadeł. Prawa odnoga przymocowuje się dystalnie do przednich części od pierwszego do trzeciego kręgu lędźwiowego (L1-3), zaś lewa jest przyczepiona dystalnie do pierwszego i drugiego kręgu lędźwiowego (L1-2). Anatomowie nazywają odnogi lewą i prawą z powodu ich miejsca przyczepu do lewej lub prawej strony trzonów kręgu, natomiast chirurdzy określają je mianem lewej i prawej ze względu na ich położenie w stosunku do przełyku. Z boku, po obu stronach odnóg, przepona wychodzi z bocznych i przyśrodkowych więzadeł łukowatych. Więzadła łukowate to zgrubiałe górny brzeg powięzi pokrywającej powierzchnię przednią mięśnia lędźwiowo-udowego (więzadło łukowate przyśrodkowe) i mięśnia czworobocznego lędźwi (więzadło łukowate boczne). Parzyste więzadła łukowate boczne rozciągają się od wierzchołka i dolnego brzegu dwunastego żebra i poprzez mięsień czworoboczny lędźwi dochodzą do wyrostka poprzecznego kręgu L1 [6–8]. Chociaż więzadło łukowate boczne w podręcznikach anatomii jest opisywane jako przymocowane do pierwszego kręgu lędźwiowego (L1), wyniki badań podczas sekcji zwłok wykazały, że może być ono także przyczepione do drugiego (L2) lub trzeciego (L3) kręgu lędźwiowego [9]. U około 5% osób występuje dolno-boczne przedłużenie więzadeł łukowatych bocznych w formie zgrubiałych guzowatych miejsc przylegających do bocznej powierzchni przepony [10]. Parzyste więzadła

łukowate przyśrodkowe, w przeciwieństwie do więzadeł bocznych, przechodzą nad mięśniem lędźwiowym większym do wierzchołka wyrostka poprzecznego kręgu L1 (czasami także L2), aż do części ścięgnistej obu odnóg przepony. Przyśrodkowe krawędzie prawej i lewej odnogi łączą się, tworząc łagodny łuk — więzadło łukowate pośrodkowe, przez które przechodzi aorta, żyła nieparzysta oraz przewód piersiowy [8].

Więzadła przepony są strukturami łączącymi przeponę z trzewiami. Więzadło płucne dolne to zaś zgrubienie opłucnej łączące przeponę z podstawą płuc. Więzadło przeponowo-osierdziowe łączy przeponę z sercem i jest punktem podparcia, na którym opiera się, gdy przenosi swoje skurcze na boki. Więzadła wątrobowe (więzadło sierpowate oraz prawe i lewe więzadła trójkątne) są podprzeponowym zgrubieniem otrzewnej. Więzadło przeponowo-przełykowe łączy przełyk i przeponę i jest zbudowane z tkanki łącznej wiotkiej. Natomiast więzadło przeponowo-okrężnicze łączy przeponę z prawą okrężnicą wstępującą, zaś więzadło Treitz'a jest zbudowane z włókien mięśniowych, które wychodzą z lewej odnogi przepony i dochodzą do zgięcia dwunastniczo-czczego [3].

Embriologia przepony

Przepona rozwija się z czterech struktur embrionalnych pochodzących z mezodermy, z których każda albo zostaje całkowicie wcielona do przepony, albo włącza do niej swoją część. Przegroda poprzeczna jest pierwszym i najważniejszym składnikiem rozwijającej się przepony. W trzecim tygodniu życia płodu przegroda poprzeczna znajduje się na poziomie trzeciego kręgu szyjnego. Zanim jednak przepona powstanie w 8. tygodniu życia, jej początkowa forma obniża się do swojej ostatecznej pozycji na wysokości pierwszego segmentu lędźwiowego, wtórnie do szybkiego wzrostu kręgosłupa. Przegroda służy jako początkowa bariera pomiędzy jamą klatki piersiowej a jamą brzuszną, jednak nie oddziela tych przestrzeni całkowicie, ale w postaci fałdu staje się grubą, niepełną przegrodą dzielącą obie jamy, z otworami po każdej stronie przewodu pokarmowego i kanałami opłucnej. Przegroda tworzy środek ścięgniasty przepony. Błony opłucnowo-otrzewnowe (fałdy), które wychodzą z kaudalnego końca kanałów osierdziowo-otrzewnowych to drugi ważny element rozwijającej się przepony. Te dwie przejściowe struktury w kształcie piramidy, leżące po obu stronach przełyku wychodzą ze ściany tułowia pomiędzy jamą opłucnej

a jamą otrzewnej. Błony opłucno-otrzewnowe łączą się z kreską grzbietową przełyku i z częścią grzbietową przegrody poprzecznej uzupełniają ściankę pomiędzy jamami opłucnej i otrzewnej, tworząc przeponę pierwotną. Nie zostało do końca wyjaśnione, czy błony opłucno-otrzewnowe są tylko przejściowymi, zarodkowymi strukturami niemającymi formy dojrzałej, czy też powstały z nich komórki lub tkanki tworzące właściwą przeponę. Gdy początkowa forma przepony jest ukształtowana, kreska grzbietowa przełyku (trzecia struktura zarodkowa) łączy się z wcześniej wymienionymi strukturami (przegrodą poprzeczną i błonami opłucnej i otrzewnej), tworząc część środkową przepony, podczas gdy tkanka ściany tułowia (czwarta główna struktura) dzieli się na dwie warstwy w wyniku powiększenia się płuc i jamy opłucnej. Części wewnętrznej warstwy tworzą obwodową część przepony. Przedłużenia jamy opłucnej do ściany tułowia tworzą z kolei zachyłek żebrowo-przeponowy, stanowiący właściwą przeponę w kształcie kopuły [11, 12]. Ze względu na swoje zarodkowe pochodzenie, przepona składa się z dwóch różnych mięśni, z których każdy w inny sposób oddziałuje na klatkę piersiową. Odnogi przepony powstają z włókien mięśniowych, z których powstaje kreska przełyku, natomiast mioblasty z bocznych ścian tułowia tworzą część żebrową [13]. DeTroyer i wsp. [14] zaobserwowali, że podczas elektrycznej stymulacji mięśnia żebrowego psów zwiększała się pojemność płuc i ciśnienie w jamie brzusznej, a jama brzuszna i dolna część klatki piersiowej przemieszczała się w kierunku odśrodkowym. Podobny skutek wywoływała elektryczna stymulacja mięśnia odnogi, z tą różnicą, że nie wpływała na położenie klatki piersiowej. Działanie mięśnia odnogi, który jest przyczepiony do kręgów lędźwiowych, ale nie do klatki piersiowej, polega głównie na przyjęciu nacisku na jamę brzuszną, gdy przepona jest w pełni rozłożona. Odnogi przepony to para rozchodzących się wiązek włókien mięśniowych [14].

Przepona człowieka jest połączona z nerwem przeponowym zbudowanym z włókien nerwowych wychodzących z tych samych segmentów, z których wychodzą mięśnie szkieletowe przepony (C3, 4, 5 utrzymują przeponę przy życiu). Ponieważ nerw przeponowy ma strukturę symetryczną i biegnie po obu stronach linii środkowej ciała, każdy nerw doprowadza unerwienie motoryczne do połowy przepony po tej samej stronie. Włókna czuciowe nerwu przeponowego unerwiają środkową część przepony (włączając otaczającą opłucną i otrzewną) i przekazują bodźce z prze-

pony do centralnego układu nerwowego (w C3-C5). Neurony w tej części kręgosłupa otrzymują także sygnały z regionu obręczy barkowej poprzez nerwy nadobojczykowe (przysródkowe, pośrednie i boczne) [15]. Dlatego podrażnienie przepony lub stymulacja włókien czuciowych nerwu przeponowego może być odczuwane jako ból barku, co wynika z zarodkowego pochodzenia przepony. Po laparoskopii ginekologicznej przepona jest rozciągana przez insuflację dwutlenku węgla, co może powodować ból barku [16]. Kobiety z pękniętą ciążą pozamaciczną mogą odczuwać ból barku przy naciskaniu górnej części łożyska, prawdopodobnie z powodu podrażnienia przepony przez krew i płyny [17]. Kolejnym przykładem tego zjawiska jest podrażnienie powierzchni dolnej przepony poprzez przeciek krwi z pękniętej śledziony [18]. Sutton i wsp. [19] w opisie przypadku donieśli, że ból barku pacjenta był spowodowany pęknięciem tętnicy przeponowej. Ponadto przepona może być podrażniana przez choroby sąsiednich narządów. Zapalenie otrzewnej lub pęcherzyka żółciowego może podrażniać brzegi przepony w środkowej części otrzewnej [20]. Söyüncü i wsp. [21] zaobserwowali występowanie bólu w lewym barku w przypadku ropnia śledziony, co miało związek z przewodzeniem bólu przez nerw przeponowy.

Działanie mechaniczne przepony

Chociaż proces oddychania jest mimowolny, właściwe funkcjonowanie przepony i skuteczność jej mechanicznego działania w dużej mierze zależy od jej anatomicznego ułożenia w dolnej części klatki piersiowej. Miejsce przyczepu przepony do klatki piersiowej nazywane jest strefą apozycji (ZOA, *zone of apposition*) i rozciąga się od przyczepu przepony w pobliżu łuku żebrowego, od segmentu szyjnego do kąta przeponowo-żebrowego, gdzie włókna odłączają się od klatki piersiowej i tworzą swobodną kopułę przepony. Strefa apozycji odgrywa znaczącą rolę podczas oddychania, gdyż jest odpowiedzialna za związek między długością a napięciem przepony, to znaczy za utrzymanie pionowego ustawienia włókien przepony, tylnoboczny („rączka od wiadra”) ruch dolnej części klatki piersiowej. W pozycji wyprostowanej, podczas spokojnego oddechu, strefa apozycji stanowi około jedną trzecią całkowitej powierzchni wewnętrznej klatki piersiowej. W trakcie spokojnego wdechu przepona kurczy się, jej długość osiowa skraca, zaś kopuła przepony obniża się do przyczepów żebrowych. Wysokość strefy apozycji zmniejsza się o około 15 mm, natomiast kopuła przepony pozostaje stosunkowo

taka sama pod względem rozmiaru i kształtu. Przy maksymalnej pojemności wdechowej płuc, strefa apozycji równa się niemal zero [22, 23].

Strefa apozycji jest kontrolowana przez mięśnie brzucha i kieruje napięciem przepony. Podczas fazy wdechu, gdy przepona się kurczy i obniża w kierunku jamy brzusznej, ciśnienie wewnątrz jamy brzusznej zwiększa się i rozdyma ścianę brzucha w trzech kierunkach wraz z ruchem rotacyjnym żeber na zewnątrz. Ściana jamy brzusznej przeciwdziała ruchom przepony za pomocą ekscentrycznego skurczu wszystkich mięśni brzucha, kontrolując związek między długością a napięciem mięśnia przeponowego. Skurcz ekscentryczny zapewnia utrzymanie kształtu kopuły przepony oraz podtrzymuje strefę apozycji na czas wystarczający do tylnobocznego rozszerzenia się dolnej ściany klatki piersiowej i ułatwia tym samym zwiększenie siły skurczu przepony. Mniejsza aktywność mięśni brzucha umożliwia ponadto przemieszczenie się trzewi w wyniku obniżenia się kopuły przepony. Podczas wydechu czynność ta jest odwrócona. Mięśnie brzucha kurczą się koncentrycznie, wgniatając trzewia w jamę brzuszną, zaś przepona podnosi się do góry, a żebra kierują się do wewnątrz [24].

Gdy strefa apozycji zmniejsza się (poniżej optymalnej pozycji), przepona ma mniejszą zdolność do wciągnięcia powietrza do klatki piersiowej z powodu mniejszej ruchomości w stronę kaudalną podczas skurczu i mniej efektywnego nacisku przepony na żebra, a tym samym niższego ciśnienia przezprzeponowego (*transdiaphragmatic pressure*) [25]. Zjawisku temu towarzyszy mniejsze rozszerzenie się klatki piersiowej zmiany w postawie i kompensacyjne rozszerzenie się powłok brzusznych [24]. W rezultacie mogą się pojawić adaptacyjne strategie oddychania, takie jak większe niż konieczne rozluźnienie mięśni brzucha podczas wdechu, co powoduje wtedy rozszerzenie się klatki piersiowej oraz większe zaangażowanie pomocniczych mięśni oddechowych [25]. Może to spowodować potencjalne negatywne skutki: duszność, mniejszą wydolność oddechową, niższą tolerancję wysiłku, obniżone ciśnienie wewnątrz jamy brzusznej, zwiększoną lordozę lędźwiową, rozciągnięcie mięśni kulszowo-goleniowych, większy obwód brzucha, uniesienie mostka, większą niestabilność miednicy i odcinka lędźwiowego kręgosłupa, zwiększone napięcie mięśni przykręgosłupowych, ból odcinka lędźwiowego kręgosłupa, zespół górnego otworu klatki piersiowej, ból stawów krzyżowo-biodrowych, bóle głowy i objawy astmy [26].

Wielofunkcyjność przepony

Przepona jest uważana za główny mięsień oddechowy, odpowiedzialny za 80% pracy związanej z prawidłowym, spokojnym oddychaniem. Podobnie jak inne struktury w ludzkim ciele, mięsień przepony pełni jednak więcej niż jedną funkcję. Poprzez modulację ciśnienia wewnątrzbrzusznego, przepona wpływa na utrzymanie stabilności posturalnej, pomaga w oddawaniu moczu, defekacji i porodzie. Ważna jest także dla właściwego funkcjonowania serca oraz krążenia w układzie limfatycznym, odgrywa rolę podczas wymiotowania, połykania i jako bariera antyrefluksowa.

Rola w utrzymaniu postawy (stabilności posturalnej)

Rola, jaką przepona odgrywa w utrzymaniu postawy, rozumianej jako stabilizacja tułowia i kontrola pozycji tułowia podczas powtarzanych czynności ruchowych, jest nierozzerwalnie związana z funkcją przepony podczas oddychania. Napięcie tułowia utrzymuje wszystkie segmenty kręgosłupa w neutralnej biomechanicznie pozycji podczas jakiegokolwiek ruchu ciała i zależy w głównej mierze od dynamicznej koordynacji wielu mięśni synergicznych i antagonistycznych, w celu precyzyjnej kontroli nadmiernego ruchu w stawach. Jest też powszechnie uznane, że wzrost ciśnienia wewnątrzbrzusznego (IAP, *intra-abdominal pressure*) stabilizuje kręgosłup. Przepona nie może w sposób kontrolowany poruszać tułowiem, ale jej skurcz przyczynia się do stabilizacji tułowia (kręgosłupa) poprzez zwiększenie ciśnienia w jamie brzusznej. Dualistyczna funkcja przepony (wentylacja i posturalna) jest wykonywana jednocześnie [27–29].

Podczas wczesnej fazy rozwoju posturalnego, przepona funkcjonuje głównie jako mięsień oddechowy. Dzieje się tak do około 4,5 miesiąca życia, kiedy centralny układ nerwowy (CNS, *central nervous system*) dojrzewa i rozwija się, a potem następuje strzałkowa stabilizacja kręgosłupa, miednicy i klatki piersiowej, umożliwiającą dalsze ruchy w płaszczyźnie poziomej (np. toczenie się, skręcanie, pełzanie, raczkowanie) aż do osiągnięcia pozycji pionowej. Przepona zaczyna pełnić wtedy swoją podwójną rolę: mięśnia oddechowego i mięśnia posturalnego około 6. miesiąca życia, w momencie gdy oddychanie brzuszne jest skoordynowane z oddychaniem piersiowym [30].

Teoria podwójnej funkcji przepony została wsparta kilkoma odkryciami. Już w 1969 roku Skla-

dal i wsp. [31] jako pierwsi dostarczyli pośredni dowód na udział przepony w utrzymywaniu postawy. Wyniki ich badań udokumentowały występowanie skurczu przepony przed skurczem mięśnia prostego brzucha podczas przygotowywania się do stania na palcach [31]. Kolejne prace doniosły o bliskim związku pomiędzy ciśnieniem przezprzeponowym a ciśnieniem wewnątrzbrzusznym. Hemborg i wsp. [32] wykazali, że przepona jest tonicznie aktywna podczas podnoszenia przedmiotów. Pierwszy bezpośredni dowód na to, że poza swoją rolą podczas oddychania, przepona może uczestniczyć w utrzymaniu postawy człowieka, został przedstawiony przez Hodgesa i jego zespół [28]. Dowiedli oni, że aktywność przepony oceniana w badaniu elektromiograficznym (EMG) wzrastała przed rozpoczęciem aktywności mięśnia odpowiedzialnego za ruch kontralateralnej kończyny górnej. Podczas szybkich ruchów zgięcia ramienia w reakcji na bodziec wzrokowy, aktywność EMG w części żebrowej i lędźwiowej przepony występowała około 10 ms przed rozpoczęciem aktywności EMG mięśnia naramiennego. To sprzężenie wyprzedzające (*feedforward feedback*) występowało niezależnie od fazy oddychania. Aktywność przepony widoczna w badaniu EMG była związana ze wzrostem ciśnienia przezprzeponowego. Badanie ultrasonograficzne ujawniło także, że podczas wzrostu ciśnienia przezprzeponowego część żebrowa przepony skróciła się, a następnie stopniowo się wydłużała [28]. Późniejsze badania przeprowadzone przez Hodgesa dostarczyły kolejnych dowodów potwierdzających tę funkcję przepony. Przede wszystkim aktywność przepony była niezmienna, gdy badane osoby wykonywały identyczne zadanie w pozycji siedzącej bez podpartego tułowia. Przepona nie była jednak aktywna przy pojedynczych ruchach niewielkich, dystalnych części kończyny górnej. Amplituda przepony w badaniu EMG była dodatkowo linearnie powiązana ze szczytowym przyśpieszeniem ruchu kończyny, i w ten sposób z siłami przekazywanymi do kręgosłupa. I w końcu szybki, powtarzający się ruch kończyny górnej podczas bezdechu (wstrzymanie oddechu pod koniec wydechu) także uaktywniał przeponę [33]. Kolar i wsp. [34] opublikowali ostatnio dwie interesujące prace na podstawie badań rezonansem magnetycznym przepony, które wspierają tezę o pełnieniu przez przeponę podwójnej funkcji — oddechowej i stabilizującej kręgosłup. Wynik pierwszego badania wykazał, że przepona odgrywa rolę w utrzymaniu postawy, która może być świadomie kontrolowana i która jest niezależna od fazy oddychania. Wyniki ujawniły, że u 81% badanych osób, gdy przepona oddziałuje na postawę, jej położenie jest niższe lub

podobne jak w pozycji podczas spokojnego oddychania (*tidal breathing*), ale zakres jej ruchu (ROM, *range of movement*) zarówno podczas oddychania, jak i czynności oddziałujących na postawę różni się u poszczególnych osób. Zachodzi także istotny związek pomiędzy objętością oddechową a zakresem ruchu przepony (ROM) podczas spokojnego oddychania [34]. Wynik drugiego badania wykazał, że obie funkcje przepony wykonuje równocześnie. Przepona może pełnić swoją rolę podczas oddychania będąc w obniżonej pozycji i zapewniając dostateczne ciśnienie wewnątrzbrzuszne, które jest niezbędne do wykonania zadań związanych z utrzymaniem postawy [35]. Za podstawowy wynik obu wspomnianych powyżej badań autorzy uznali odkrycie, że istnieje indywidualna zdolność do kontrolowania funkcji przepony związanej z postawą. U osób z ograniczoną zdolnością do kurczenia przepony podczas stabilizacji tułowia może występować większe prawdopodobieństwo wystąpienia dolegliwości bólowych w odcinku lędźwiowym kręgosłupa. Niewystarczająca i nieskoordynowana aktywacja przepony u osób z osłabioną jej funkcją podczas stabilizacji tułowia może prowadzić do przeciążenia kręgosłupa [36, 37]. Hodges [36] już wcześniej zaobserwował, że w trakcie bardziej intensywnego oddychania rola przepony w utrzymaniu stabilnej dolnej części pleców zmniejsza się, co zostało później potwierdzone przez innych autorów. Janssens i wsp. [37] wykazali, że większe zapotrzebowanie na jedną z funkcji przepony (obciążenie podczas wdechu) nieuchronnie prowadzi do zniesienia innej funkcji, na zasadzie zaburzonej kontroli równowagi. Z kolei Vostatek i wsp. [38] odkryli, że ruchomość przepony u osób z bólem w dolnej części pleców, jest co najmniej połowę mniejsza w porównaniu z osobami zdrowymi. Wyniki godne uwagi przyniosło w 2013 roku kolejne badanie Janssensa i wsp. [39]. Naukowcy zaobserwowali, że u osób skarżących się na ból w dolnej części pleców występowało znaczne zmęczenie przepony po obciążeniu mięśnia podczas wdechu, czego nie zauważono u osób zdrowych z grupy kontrolnej. Autorzy zasugerowali, że zmęczenie przepony może być potencjalnym mechanizmem leżącym u podłoża nawracających nieswoistych dolegliwości bólowych występujących w dolnej części pleców.

Funkcja związana z pracą serca

Oddychanie nie tylko wiąże się z wymianą powietrza w płucach i krwi, ale jest także modulatorem kontroli sercowo-naczyniowej,

redukującym negatywne ciśnienie w klatce piersiowej poprzez wdech; tym samym zmniejszając obciążenie następcze lewej komory i wytwarzając przezprzeponowy gradient, który pomaga w powrocie krwi do serca z krążenia wielkiego. Stone [3] zasugerował, że ruchy przepony mogą wpływać na ruchy serca, ponieważ osierdzie jest połączone z przeponą poprzez więzadła przeponowo-osierdziowe, zaś brak ruchów przepony może zmniejszyć kurczliwość serca i krążenie krwi w organizmie [3]. Zatokowa niemiarowość oddechowa (RSA, *respiratory sinus arrhythmia*), która stanowi jedną z fizjologicznych interakcji pomiędzy oddychaniem a krążeniem, jest zmiennością rytmu zatokowego w synchronizacji z oddychaniem, przez co odstęp R-R w badaniu EKG skraca się podczas wdechu a wydłuża podczas wydechu [40]. Kulur i wsp. [41] badali wpływ oddychania przeponą na zmienność rytmu zatokowego u osób chorych na chorobę niedokrwienną serca. Odnotowali oni, że w tej grupie chorych regularne praktykowanie oddychania przeponowego znacznie poprawia zmienność rytmu zatokowego (HRV, *heart rate variability*) i wpływa korzystnie na rokowanie lecznicze. Zaobserwowano także znaczny wzrost HRV u osób zdrowych z grupy kontrolnej, które przez okres jednego roku praktykowały oddychanie torem przeponowym [41]. Lee i wsp. [42] badali wpływ zwykłego oddychania i oddychania przeponą na ciśnienie krwi (BP, *blood pressure*) i tętno (HR, *heart rate*) w pojedynczym opisie przypadku, w którym BP i HR były rejestrowane przez trzy tygodnie. Autorzy odnotowali, że oddychanie przeponą wiązało się z istotnym statystycznie mniejszym skurczowym i rozkurczowym ciśnieniem krwi. Ponadto wykazano, że większość innych parametrów czynności serca, takich jak frakcja wyrzutowa, ciśnienie tętnicze, ciśnienie tętnicze w płucach, obciążenie wstępne i następcze, a nawet utlenowanie tkanek były zsynchronizowane w stosunku do oddychania [43, 44]. Skurcze przepony zwiększają także pojemność minutową serca w warunkach podlegania obciążeniu wstępnemu, co zaobserwowano u osób zdrowych [45] oraz u chorych z rozrzuśnikami serca, u których skurcze przepony były wywołane rozrzuśnikiem serca [46]. Co ciekawe, D'Alonzo i Krachman także stwierdzili, że słaba biomechanika przepony może skutkować obniżoną pojemnością minutową serca [47].

Korzystne skutki hemodynamiczne skurczów przepony wywołane elektrostymulacją przepony podczas spokojnego oddychania zostały opisane przez Roosa i wsp. [46]. Wyniki przeprowadzonego ostatnio przez Alivertiego i jego zespół

badania wykazały, że modulacja trzewnego łożyska naczyniowego w wyniku zwiększonego ciśnienia wewnątrzbrzusznego poprzez skurcz przepony przyczynia się do powrotu krwi z żyły głównej dolnej. Oznacza to, że podczas wdechu preferowany jest powrót krwi z trzewi, natomiast podczas wydechu — z udowego przepływu krwi poniżej ujścia żyły wątrobowej [45, 48]. W konsekwencji oddychanie brzuszne pomaga mobilizacji dodatkowej krwi (z krążenia trzewnego), zwiększając powrót krwi do żyły głównej dolnej, to znaczy, że oddech przeponowy ułatwia powrót krwi do żyły głównej dolnej głównie przez przemieszczanie się krwi z naczyń brzucha i nie jest to wynikiem ułatwienia powrotu krwi z kończyn dolnych [49]. W ten sposób większy skurcz przepony przyczynia się do lepszych wyników krążenia w jamie brzusznej, przynosząc korzyści hemodynamiczne, drugorzędne w stosunku do większego powrotu krwi i poprzez mechanizm Franka-Starlinga, do większej pojemności wyrzutowej serca [45, 48]. Należy też wspomnieć, że podczas wdechu zmniejsza się średnica żyły głównej dolnej [50], a wydolność drenażu żylnego osiąga punkt szczytowy podczas wolnego i głębokiego oddychania [51].

Cykl oddechowy odzwierciedla także równowagę pomiędzy podziałem układu nerwowego autonomicznego na przywspółczulny i współczulny, z wahaniami zmienności rytmu zatokowego (HRV), związanymi z lepszym zużyciem tlenu. Za każdym razem podczas wdechu i wydechu dochodzi do przejścia z układu przywspółczulnego na współczulny (wdech) i ze współczulnego na przywspółczulny (wydech). Wzrost tętna wskazuje na większy udział układu współczulnego podczas wdechu, a spadek sugeruje większy udział układu przywspółczulnego podczas wydechu [52]. Oddychanie przeponą zmniejsza aktywność układu współczulnego poprzez wzmocnienie rytmu hamowania ośrodkowego [53]. Z powodu większej objętości oddechowej podczas głębokiego oddychania przeponą, następuje aktywacja odruchu Heringa-Breura, co zmniejsza wrażliwość chemoreceptorów i może wzmacniać baroreceptory i zmniejszać aktywność układu współczulnego [54].

Funkcja w układzie limfatycznym

Przepona posiada system drenażu limfatycznego, który jest szczególnie skuteczny w przypadku szybkiego wchłaniania z jamy otrzewnej i odprowadzania do układu naczyniowego. Badania, w których próbowano wyjaśnić drogi powtórnego

wchłaniania płynu z jamy otrzewnej, wskazują, że powierzchnia przepony od strony otrzewnej jest ważnym miejscem drenażu limfatycznego. Wyniki badań morfologicznych wykazały jednoznacznie, że komórki mezotelialne pokrywające powierzchnię przepony od strony otrzewnej spoczywają na warstwie macierzy tkanki łącznej, w której znajduje się bogaty splot naczyń limfatycznych [55]. Te dobrze rozwinięte struktury naczyń limfatycznych przepony składają się z dwóch warstw, tj. sieci błony podsurowiczej i głębszej sieci naczyń limfatycznych, które łączą się ze sobą przy pomocy bocznych odgałęzień. Obie warstwy znajdują się w części mięśniowej przepony, natomiast w części ścięgnistej znajduje się jedynie warstwa naczyń limfatycznych. Jednak sieć naczyń limfatycznych w części ścięgnistej jest gęstsza niż w części mięśniowej. Następnie, poprzez otwory otrzewnej limfa z jamy otrzewnej wpływa do przestrzeni podotrzewnowej i dzięki kontroli systemu drenażu limfatycznego, do zatok limfatycznych. Zatoki limfatyczne występują tylko w mięśniowej części przepony człowieka. Są one szerokimi, powiększonymi i ślepo zakończonymi naczyniami limfatycznymi. Prawa połowa przepony posiada więcej zatok niż lewa. Ostatecznie chłonka przechodzi przez splot naczyń limfatycznych pod opłucną do przewodu piersiowego i przewodu limfatycznego prawego. Na drodze drenażu limfatycznego przepływowi wstęcznemu płynu limfatycznego z zatok limfatycznych do jamy otrzewnej zapobiega kilka podobnych do zastawek wypustek cytoplazmatycznych komórek mezotelialnych i śródbłonkowych, a także liczne nitkowate wypustki tkanki łącznej, oraz nakładanie się na siebie komórek śródbłonkowych w zatokach limfatycznych [56].

Przepona jest limfatyczną pompą, a około 60% wszystkich węzłów chłonnych w ciele człowieka znajduje się pod przeponą. Shields [57] we wnioskach z badania zatytułowanego „Limfa, węzły chłonne i homeostaza” stwierdził, że oddychanie przeponą stymuluje oczyszczanie węzłów chłonnych poprzez wytworzenie ujemnego ciśnienia, które „ciągnie” limfę przez układ limfatyczny [57]. Wchłanianie limfatyczne zależy przede wszystkim od rytmiczności i stopnia rozciągnięcia przepony, a następnie od ciśnienia wewnątrz jamy otrzewnej oraz postawy danej osoby [55]. Tłumaczy to, dlaczego nieprawidłowe funkcjonowanie przepony może negatywnie oddziaływać na układ limfatyczny. Trzeba też pamiętać o zbiorniku mleczu (*cisterna chyli*) znajdującym się poniżej części lędźwiowej przepony, który jest głównym punktem docelowym chłonki.

Rola przepony podczas wymiotowania, połykania i w barierze antyrefluksowej

De Troyer i wsp. [14] wykazali, że gdy część żebrowa przepony rozpycha dolny fragment klatki piersiowej, część lędźwiowa nie zmienia znacząco jej rozmiaru. Biorąc to pod uwagę, można przypuszczać, że część lędźwiowa przepony prawdopodobnie spełnia mało ważną rolę podczas oddychania, za to jest bardzo zaangażowana w zadania związane z żołądkiem i przełykiem, takie jak połykanie, wymiotowanie, i udział w barierze refluku żołądkowo-przełykowego.

Wymiotowanie jest złożonym procesem fizjologicznym. W fazie odruchów wymiotnych przepona mocno się kurczy wraz z mięśniami brzucha, zwiększając w ten sposób ciśnienie w żołądku. Jednak treść żołądkowa nie może łatwo przejść przez przeponę z powodu równoczesnego zwiększenia ciśnienia w połączeniu przełykowo-żołądkowym na skutek skurczu części lędźwiowej przepony. Podczas kolejnej fazy wymiotowania, część lędźwiowa i żebrowa przepony oddzielają swoje czynności, tj. część lędźwiowa rozluźnia się, pozwalając na wyrzucenie treści żołądkowej, zaś część żebrowa kurczy się, zwiększając ciśnienie w jamie brzusznej i wypychając w ten sposób treść żołądkową na zewnątrz [58].

Odrębność działania części lędźwiowej i żebrowej przepony jest widoczna także podczas połykania i rozszerzenia przełyku. Dokładny mechanizm, który zmniejsza odruch zahamowania części lędźwiowej przepony podczas rozszerzenia przełyku nadal pozostaje niewyjaśniony. Oyer i wsp. [59] zauważyli, że rozszerzenie przełyku wytworzyło całkowite zahamowanie aktywności części lędźwiowej przepony widoczne w badaniu EMG, podczas gdy w tym samym czasie nastąpiło jedynie częściowe zahamowanie części lędźwiowej nerwu przeponowego uczestniczącej w odprowadzaniu treści żołądkowej.

Obniżenie się części żebrowej przepony tworzy gradient ciśnienia w klatce piersiowej i jamie brzusznej, co sprzyja zarzucaniu kwasu żołądkowego. Podczas rytmicznego oddychania odnogi przepony mogą ścisnąć przełyk i przeciwdziałać się pracy części żebrowej przepony, która może rytmicznie wyciskać kwas z żołądka do przełyku. Zostało to potwierdzone przez Mittala i wsp. [60], którzy zaobserwowali, że selektywna miotomia odnogi przepony prowadziła do częstego występowania refluku żołądkowo-przełykowego.

Wnioski

Przepona jest tradycyjnie uważana za mięsień oddechowy. W świecie nauki panuje powszechne przekonanie, że mięsień przepony ma zasadnicze znaczenie dla oddychania i ta jego funkcja jest niezaprzeczalna. Przepona pełni jednak wiele innych ról ważnych dla całego organizmu, które nie są związane z wentylacją. Przede wszystkim układy oddechowy i krążenia posiada wspólne mechanizmy kontroli i zmiana w jednym układzie prowadzi do zmiany w funkcjonowaniu drugiego. Funkcja przepony jest związana z regulacją wielu parametrów układu krążenia, tj. z pojemnością minutową serca, pojemnością wyrzutową serca lub drenażem żylnym. Wyniki badań wykazały, że regularne oddychanie przeponą znacznie poprawia zmienność rytmu zatokowego (HRV, *heart rate variability*) i wpływa na korzystne rokowanie u pacjentów cierpiących na chorobę niedokrwieną serca. Układ limfatyczny przepony odgrywa także ważną rolę w drenażu płynów z jamy otrzewnej. Wielu autorów zaobserwowało, że przepona uczestniczy w utrzymaniu równowagi całego ciała podczas nagłych świadomych ruchów kończyn. Z punktu widzenia embriologii przepona jest źródłem i punktem wymiany informacji. Prowadzi to do wniosku, że mięsień przepony nie powinien być uważany tylko za fragment lub barierę pomiędzy dwiema jamami, ale za część całego systemu działającego w organizmie człowieka. Dlatego funkcjonowanie przepony stanowi obszerny temat dla wielu dziedzin medycyny, w tym pulmonologii, kardiologii, chirurgii klatki piersiowej, ortopedii, a także rehabilitacji.

Konflikt interesów

Autorzy zgłaszają brak konfliktu interesów.

Piśmiennictwo:

1. Sewall H, Pollard ME. On the Relations of Diaphragmatic and Costal Respiration, with particular reference to Phonation. *J Physiol.* 1890; 11(3): 159–178, indexed in Pubmed: [16991922](#).
2. Bell C. The Anatomy and Physiology of the Human Body. 6th ed. Longman, Rees, London 1826.
3. Bordoni B, Zanier E. Anatomic connections of the diaphragm: influence of respiration on the body system. *J Multidiscip Healthc.* 2013; 6: 281–291, doi: [10.2147/JMDH.S45443](#), indexed in Pubmed: [23940419](#).
4. Stone C. Science in the art of osteopathy. Osteopathic principles and practice. Stanley Thornes Ltd, Cheltenham 1999.
5. Still AT. Philosophy of osteopathy. Mo: A.T. Still, Kirksville 1899.
6. Downey R. Anatomy of the normal diaphragm. *Thorac Surg Clin.* 2011; 21(2): 273–279, doi: [10.1016/j.thorsurg.2011.01.001](#), indexed in Pubmed: [21477776](#).
7. Snell RS. Clinical anatomy by regions. PA: Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia 2008.

8. Moore KL, Dalley AF. Clinically oriented anatomy. 5th ed. PA: Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, 2006.
9. Deviri E, Nathan H, Luchansky E. Medial and lateral arcuate ligaments of the diaphragm: attachment to the transverse process. *Anat Anz*. 1988; 166(1-5): 63–67, indexed in Pubmed: [3189849](#).
10. Silverman PM, Cooper C, Zeman RK. Lateral arcuate ligaments of the diaphragm: anatomic variations at abdominal CT. *Radiology*. 1992; 185(1): 105–108, doi: [10.1148/radiology.185.1.1523290](#), indexed in Pubmed: [1523290](#).
11. Perry SF, Similowski T, Klein W, et al. The evolutionary origin of the mammalian diaphragm. *Respir Physiol Neurobiol*. 2010; 171(1): 1–16, doi: [10.1016/j.resp.2010.01.004](#), indexed in Pubmed: [20080210](#).
12. Merrell AJ, Kardon G. Development of the diaphragm — a skeletal muscle essential for mammalian respiration. *FEBS J*. 2013; 280(17): 4026–4035, doi: [10.1111/febs.12274](#), indexed in Pubmed: [23586979](#).
13. Pickering M, Jones JFX. The diaphragm: two physiological muscles in one. *J Anat*. 2002; 201(4): 305–312, indexed in Pubmed: [12430954](#).
14. De Troyer A, Sampson M, Sigrist S, et al. Action of costal and crural parts of the diaphragm on the rib cage in dog. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*. 1982; 53(1): 30–39, indexed in Pubmed: [7118646](#).
15. Fell SC. Surgical anatomy of the diaphragm and the phrenic nerve. *Chest Surg Clin N Am*. 1998; 8(2): 281–294, indexed in Pubmed: [9619305](#).
16. Ingelmo PM, Bucciario M, Somaini M, et al. Intraperitoneal nebulization of ropivacaine for pain control after laparoscopic cholecystectomy: a double-blind, randomized, placebo-controlled trial. *Br J Anaesth*. 2013; 110(5): 800–806, doi: [10.1093/bja/ae5495](#), indexed in Pubmed: [23293276](#).
17. King M, Bewes PC, Cairns J, Thornton J. Primary surgery: non-trauma. Vol 1. Oxford University Press, Oxford 1990.
18. Russell RC. Spleen. In: Mann CV, ed. *Bailey and Loves' short practice of surgery*. Chapman & Hall, London 1992.
19. Sutton CD, Marshall LJ, White SA, et al. Kehr's sign - a rare cause: spontaneous phrenic artery rupture. *ANZ J Surg*. 2002; 72(12): 913–914, indexed in Pubmed: [12523356](#).
20. Goodman CG, Snyder TK. *Differential Diagnosis for Physical Therapists*. 5th Ed. Elsevier, 2013.
21. Söyüncü S, Bektaş F, Cete Y. Traditional Kehr's sign: Left shoulder pain related to splenic abscess. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg*. 2012; 18(1): 87–88, indexed in Pubmed: [22290058](#).
22. Goldman MD, Mead J. Mechanical interaction between the diaphragm and rib cage. *J Appl Physiol*. 1973; 35(2): 197–204, indexed in Pubmed: [4723027](#).
23. Mead J. Functional significance of the area of apposition of diaphragm to rib cage [proceedings]. *Am Rev Respir Dis*. 1979; 119(2 Pt 2): 31–32, doi: [10.1164/arrd.1979.119.2Pt2.31](#), indexed in Pubmed: [426349](#).
24. De Troyer A, Estenne M. Functional anatomy of the respiratory muscles. *Clin Chest Med*. 1988; 9(2): 175–193, indexed in Pubmed: [3292122](#).
25. Lando Y, Boiselle PM, Shade D, et al. Effect of lung volume reduction surgery on diaphragm length in severe chronic obstructive pulmonary disease. *Am J Respir Crit Care Med*. 1999; 159(3): 796–805, doi: [10.1164/ajrccm.159.3.9804055](#), indexed in Pubmed: [10051253](#).
26. Boyle KL, Olinick J, Lewis C. The value of blowing up a balloon. *N Am J Sports Phys Ther*. 2010; 5(3): 179–188, indexed in Pubmed: [21589673](#).
27. Hodges PW, Eriksson AE, Shirley D, et al. Intra-abdominal pressure increases stiffness of the lumbar spine. *J Biomech*. 2005; 38(9): 1873–1880, doi: [10.1016/j.jbiomech.2004.08.016](#), indexed in Pubmed: [16023475](#).
28. Hodges PW, Butler JE, McKenzie DK, et al. Contraction of the human diaphragm during rapid postural adjustments. *J Physiol*. 1997; 505 (Pt 2): 539–548, indexed in Pubmed: [9423192](#).
29. Hodges PW, Gandevia SC. Changes in intra-abdominal pressure during postural and respiratory activation of the human diaphragm. *J Appl Physiol* (1985). 2000; 89(3): 967–976, indexed in Pubmed: [10956340](#).
30. Frank C, Kobesova A, Kolar P. Dynamic neuromuscular stabilization & sports rehabilitation. *Int J Sports Phys Ther*. 2013; 8(1): 62–73, indexed in Pubmed: [23439921](#).
31. Skladal J, Skarvan K, Ruth C, et al. propos de l'activite posturale du diaphragme chez l'Homme. *Journal de Physiologie*. 1969; 2: 405–406.
32. Hemborg B, Moritz U, Löwing H. Intra-abdominal pressure and trunk muscle activity during lifting. IV. The causal factors of the intra-abdominal pressure rise. *Scand J Rehabil Med*. 1985; 17(1): 25–38, indexed in Pubmed: [3159082](#).
33. Hodges PW, Gandevia SC. Activation of the human diaphragm during a repetitive postural task. *J Physiol*. 2000; 522 Pt 1: 165–175, indexed in Pubmed: [10618161](#).
34. Kolar P, Neuwirth J, Sanda J, et al. Analysis of diaphragm movement during tidal breathing and during its activation while breath holding using MRI synchronized with spirometry. *Physiol Res*. 2009; 58(3): 383–392, indexed in Pubmed: [18637703](#).
35. Kolar P, Sulc J, Kyncl M, et al. Stabilizing function of the diaphragm: dynamic MRI and synchronized spirometric assessment. *J Appl Physiol* (1985). 2010; 109(4): 1064–1071, doi: [10.1152/jappphysiol.01216.2009](#), indexed in Pubmed: [20705944](#).
36. Hodges PW, Heijnen I, Gandevia SC. Postural activity of the diaphragm is reduced in humans when respiratory demand increases. *J Physiol*. 2001; 537(Pt 3): 999–1008, indexed in Pubmed: [11744772](#).
37. Janssens L, Brumagne S, Polspoel K, et al. The effect of inspiratory muscles fatigue on postural control in people with and without recurrent low back pain. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2010; 35(10): 1088–1094, doi: [10.1097/BRS.0b013e3181bee5c3](#), indexed in Pubmed: [20393397](#).
38. Vostatek P, Novák D, Rychnovský T, et al. Diaphragm postural function analysis using magnetic resonance imaging. *PLoS One*. 2013; 8(3): e56724, doi: [10.1371/journal.pone.0056724](#), indexed in Pubmed: [23516397](#).
39. Janssens L, Brumagne S, McConnell AK, et al. Greater diaphragm fatigability in individuals with recurrent low back pain. *Respir Physiol Neurobiol*. 2013; 188(2): 119–123, doi: [10.1016/j.resp.2013.05.028](#), indexed in Pubmed: [23727158](#).
40. DeBurgh DM. Interactions between respiration and circulation. In: Cherniack NS, Widdicombe JG, ed. *Handbook of Physiology, Section 3: The Respiratory System, Vol II: Control of Breathing, Part 2*. American Physiological Society, Bethesda 1986: 529–594.
41. Kulur AB, Haleagrahara N, Adhikary P, et al. Effect of diaphragmatic breathing on heart rate variability in ischemic heart disease with diabetes. *Arq Bras Cardiol*. 2009; 92(6): 423–463, indexed in Pubmed: [19629309](#).
42. Lee JS, Lee MS, Lee JY, et al. Effects of diaphragmatic breathing on ambulatory blood pressure and heart rate. *Biomed Pharmacother*. 2003; 57 Suppl 1: 87s–91s, indexed in Pubmed: [14572682](#).
43. Bernardi L, Spadacini G, Bellwon J, et al. Effect of breathing rate on oxygen saturation and exercise performance in chronic heart failure. *Lancet*. 1998; 351(9112): 1308–1311, doi: [10.1016/S0140-6736\(97\)10341-5](#), indexed in Pubmed: [9643792](#).
44. van Dixhoorn J. [Favorable effects of breathing and relaxation instructions in heart rehabilitation: a randomized 5-year follow-up study]. *Ned Tijdschr Geneesk*. 1997; 141(11): 530–534, indexed in Pubmed: [9190510](#).
45. Aliverti A, Uva B, Laviola M, et al. Concomitant ventilatory and circulatory functions of the diaphragm and abdominal muscles. *J Appl Physiol* (1985). 2010; 109(5): 1432–1440, doi: [10.1152/jappphysiol.00576.2010](#), indexed in Pubmed: [20813981](#).
46. Roos M, Kobza R, Jamshidi P, et al. Improved cardiac performance through pacing-induced diaphragmatic stimulation: a novel electrophysiological approach in heart failure management? *Europace*. 2009; 11(2): 191–199, doi: [10.1093/europace/eun377](#), indexed in Pubmed: [19168496](#).
47. D'Alonzo GE, Krachman SL. Pulmonology. In: Ward RC, ed. *Foundations for osteopathic medicine* (2nd ed.). Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia 2003.
48. Aliverti A, Bovio D, Fullin I, et al. The abdominal circulatory pump. *PLoS One*. 2009; 4(5): e5550, doi: [10.1371/journal.pone.0005550](#), indexed in Pubmed: [19440240](#).
49. Miller JD, Pegelow DF, Jacques AJ, et al. Skeletal muscle pump versus respiratory muscle pump: modulation of venous return from the locomotor limb in humans. *J Physiol*. 2005; 563(Pt 3):

- 925–943, doi: [10.1113/jphysiol.2004.076422](https://doi.org/10.1113/jphysiol.2004.076422), indexed in Pubmed: [15649978](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15649978/).
50. Kimura BJ, Dalugdugan R, Gilcrease GW, et al. The effect of breathing manner on inferior vena caval diameter. *Eur J Echocardiogr.* 2011; 12(2): 120–123, doi: [10.1093/ejechocard/jeq157](https://doi.org/10.1093/ejechocard/jeq157), indexed in Pubmed: [20980326](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20980326/).
51. Byeon K, Choi JO, Yang JH, et al. The response of the vena cava to abdominal breathing. *J Altern Complement Med.* 2012; 18(2): 153–157, doi: [10.1089/acm.2010.0656](https://doi.org/10.1089/acm.2010.0656), indexed in Pubmed: [22339104](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22339104/).
52. Stauss H. Heart rate variability. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology.* 2003; 285(5): R927–R931, doi: [10.1152/ajpregu.00452.2003](https://doi.org/10.1152/ajpregu.00452.2003).
53. Montano N, Cogliati C, Porta A, et al. Central vagotonic effects of atropine modulate spectral oscillations of sympathetic nerve activity. *Circulation.* 1998; 98(14): 1394–1399, indexed in Pubmed: [9760293](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9760293/).
54. Bernardi L, Gabutti A, Porta C, et al. Slow breathing reduces chemoreflex response to hypoxia and hypercapnia, and increases baroreflex sensitivity. *J Hypertens.* 2001; 19(12): 2221–2229, indexed in Pubmed: [11725167](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11725167/).
55. Abu-Hijleh MF, Habbal OA, Moqattash ST. The role of the diaphragm in lymphatic absorption from the peritoneal cavity. *J Anat.* 1995; 186 (Pt 3): 453–467, indexed in Pubmed: [7559120](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7559120/).
56. Li J, Zhao Z, Zhou J, et al. A study of the three-dimensional organization of the human diaphragmatic lymphatic lacunae and lymphatic drainage units. *Ann Anat.* 1996; 178(6): 537–544, doi: [10.1016/S0940-9602\(96\)80113-0](https://doi.org/10.1016/S0940-9602(96)80113-0), indexed in Pubmed: [9010570](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9010570/).
57. Shields JW. Lymph, lymph glands, and homeostasis. *Lymphology.* 1992; 25(4): 147–153, indexed in Pubmed: [1293429](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1293429/).
58. Miller AD. Respiratory muscle control during vomiting. *Can J Physiol Pharmacol.* 1990; 68: 237–241.
59. Oyer LM, Knuth SL, Ward DK, et al. Reflex inhibition of crural diaphragmatic activity by esophageal distention in cats. *Respir Physiol.* 1989; 77(2): 195–202, indexed in Pubmed: [2781162](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2781162/).
60. Mittal RK, Sivri B, Schirmer BD, et al. Effect of crural myotomy on the incidence and mechanism of gastroesophageal reflux in cats. *Gastroenterology.* 1993; 105(3): 740–747, indexed in Pubmed: [8359645](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8359645/).