

HOOFDSTUKOVERZICHT

Een inleiding tot het ademhalingsstelsel 640

15.1 Het ademhalingsstelsel, dat bestaat uit delen voor luchtverplaatsing en delen voor gaswisseling, heeft verschillende elementaire functies 640

De functies van het ademhalingsstelsel 640

Onderdelen van het ademhalingsstelsel 640

15.2 De neus, de farynx, de larynx, de trachea, de bronchiën en grootste bronchiolen vervoeren de lucht naar de longen 642

De neus 642

De farynx 644

De larynx 645

De trachea 646

De bronchiën 646

15.3 De kleinste bronchiolen en de alveoli in de longen vormen het gaswisselingsgedeelte van de luchtwegen 648

De bronchiolen 648

De ductuli alveolares en de alveoli 648

Het respiratorische membraan 649

De longen 651

De pleuraholten 651

15.4 Gaswisseling in het lichaam kan plaatsvinden dankzij externe en interne respiratie 653

15.5 Longventilatie – de verplaatsing van lucht tussen de buitenlucht en de longen – gaat gepaard met drukveranderingen en spierbewegingen 654

Druk en luchtstroom naar de longen 654

Compliantie 655

Mechanisme van ademhaling 657

Longvolume en capaciteit 657

15.6 De gaswisseling wordt bepaald door de partiële druk van gassen en de diffusie van moleculen 659

Gasmengsels en partiële druk 659

Alveolaire lucht tegenover atmosferische lucht 659

Partiële drukken in de kleine en grote bloedsomloop 660

15.7 De meeste zuurstof wordt vervoerd door binding aan hemoglobine (Hb), terwijl koolstofdioxide wordt vervoerd in de vorm van koolzuur, of gebonden aan Hb of opgelost in bloedplasma 661

Zuurstoftransport 662

Koolstofdioxidetransport 663

15.8 Neuronen in de medulla oblongata en de pons, in combinatie met de ademreflexen, reguleren de ademhaling 665

De plaatselijke regeling van de ademhaling 665

Regeling door de ademhalingscentra in de

hersenen 665

De reflectorische regulering van de ademhaling 666

Regeling door hogere centra 668

Verandering van de ademhaling bij de geboorte 670

15.9 De effectiviteit van de ademhaling neemt bij veroudering af 671

15.10 Het ademhalingsstelsel voert zuurstof aan en verwijdert koolstofdioxide uit andere orgaanstelsels 671

LEERDOELEN

Als je dit hoofdstuk hebt doorgenomen, zou je over de volgende vaardigheden moeten beschikken:

- 15.1 De primaire functies van het ademhalingsstelsel beschrijven en verklaren hoe de uitwisselingsoppervlakken van de ademhalingsorganen worden beschermd tegen celresten, pathogenen en andere gevaren.
- 15.2 De structuren benoemen die zorgen voor transport van lucht naar de longen en de functies beschrijven van deze structuren.
- 15.3 De functionele anatomie van alveoli en de uitwendige anatomie van de longen beschrijven.
- 15.4 De processen van externe en interne respiratie definiëren en de verschillen beschrijven.
- 15.5 De natuurkundige principes beschrijven waardoor de verplaatsing van lucht in en uit de longen mogelijk wordt. Beschrijven hoe de werking van de ademhalingsspieren de adembewegingen tot stand brengt.
- 15.6 De natuurkundige principes beschrijven waardoor de diffusie van gassen in en uit het bloed mogelijk wordt.
- 15.7 Beschrijven hoe zuurstof en koolstofdioxide in het bloed worden vervoerd.
- 15.8 De factoren beschrijven die invloed hebben op de ademhalingsfrequentie en de reflexen beschrijven die de ademhaling regelen.
- 15.9 De veranderingen van het ademhalingsstelsel beschrijven die zich voordoen bij veroudering.
- 15.10 Voorbeelden geven van interacties tussen het ademhalingsstelsel en andere orgaanstelsels die tot nu toe zijn behandeld.

Een inleiding tot het ademhalingsstelsel

Bij het **ademhalingsstelsel** denken we meestal aan de mechanica van de ademhaling: de verplaatsing van lucht in en uit de longen. Een efficiënt ademhalingsstelsel moet echter meer doen dan enkel lucht verplaatsen. Cellen hebben energie nodig voor onderhoud, groei, afweer en celdeling.

Onze cellen verkrijgen deze energie via een aeroob proces waar zuurstof voor nodig is en waarbij koolstofdioxide wordt gevormd (paragraaf 3.5.2). Het ademhalingsstelsel neemt zuurstof op voor de lichaamscellen en verwijdert koolstofdioxide. Een uitwisseling van deze gassen vindt plaats in de longen in kleine ruimten die met lucht zijn gevuld, de zogenoemde **alveoli** (longblaasjes, enkelvoud *alveolus*). De oppervlakken van deze blaasjes moeten heel dun zijn, zodat snelle diffusie kan plaatsvinden tussen de lucht en het bloed. Het cardiovasculaire stelsel verbindt de interstitiële vloeistof en de uitwisselingsoppervlakken van de longen. Bloed in de bloedsomloop vervoert zuurstof van de longen naar de perifere weefsels en neemt ook het koolstofdioxide op dat door deze weefsels wordt gevormd. Het bloed vervoert vervolgens koolstofdioxide naar de longen voor afgifte.

Onze bespreking van het ademhalingsstelsel begint bij de lucht als deze zich vanuit de buitenlucht naar de alveoli verplaatst. Vervolgens bespreken we de mechanica van het ademen, op welke wijze de lucht de longen in- en uitgaat als gevolg van de activiteit van de ademhalingspijpen.

Daarna bespreken we de fysiologie van de ademhaling; hiertoe behoren het proces van het ademen en de processen van gaswisseling en gastransport tussen de lucht en het bloed en tussen het bloed en de weefsels.

JE KENNIS UITBREIDEN

Het ademhalingsstelsel geeft lucht af aan de longen waar de gasuitwisseling plaatsvindt tussen de lucht en de bloedsomloop (zoals je hebt gezien in hoofdstuk 1). Dit stelsel produceert ook geluid voor de communicatie (figuur 1-2h).

5.1 Het ademhalingsstelsel, dat bestaat uit delen voor luchtverplaatsing en delen voor gaswisseling, heeft verschillende elementaire functies

Leerdoel: De primaire functies van het ademhalingsstelsel beschrijven en verklaren hoe de uitwisselingsoppervlakken van de ademhalingsorganen worden beschermd tegen celresten, pathogenen en andere gevaren.

15.1.1 De functies van het ademhalingsstelsel

Het **ademhalingsstelsel** bestaat uit structuren die zijn betrokken bij de fysieke verplaatsing van lucht in en uit de longen en bij de gasuitwisseling.

Het **ademhalingsstelsel** heeft vijf basale functies:

1. Het vormen van een groot oppervlak voor de gaswisseling tussen de lucht en het bloed.
2. Het verplaatsen van lucht van en naar het gaswisselingsoppervlak in de longen.
3. Het beschermen van de alveolaire oppervlakken tegen uitdroging en temperatuurveranderingen en het verdedigen tegen binnendringende ziekteverwekkers.
4. Het vormen van geluiden voor spreken, zingen en andere vormen van communicatie.
5. Het bevorderen van de reukzin door de reukcellen in de neusholten.

15.1.2 Onderdelen van het ademhalingsstelsel

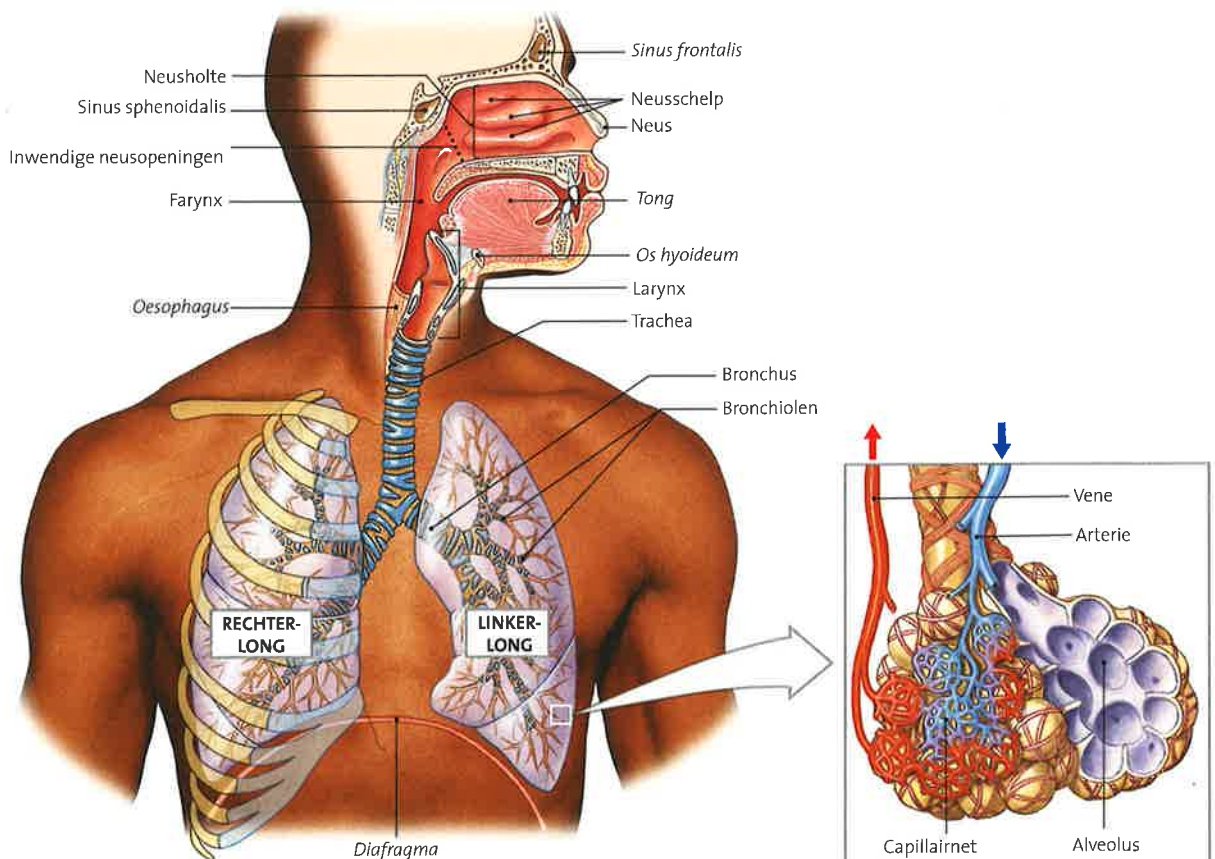
Op basis van de anatomische structuren kunnen we het ademhalingsstelsel indelen in de bovenste en onderste luchtwegen. Het *bovenste deel van de luchtwegen* bestaat uit de neus, de neusholte, de paranasale sinussen en de farynx (keel). Deze structuren vormen het onderdeel van het ademhalingsstelsel dat de ingeademde lucht gaat filteren, verwarmen en bevochtigen, waardoor de kwetsbare oppervlakken van het onderste deel van de luchtwegen worden beschermd. Het *onderste deel van de luchtwegen* bestaat uit de larynx (**strottenhoofd**); trachea (luchtpijp); bronchiën; en longen die de bronchiolen (doorgangen voor transport van lucht)

en de alveoli (longblaasjes, gaswisselingsoppervlakken) bevatten (figuur 15-1 ). Onder de term **luchtwegen** worden de 'buizen' verstaan waardoor lucht van en naar de uitwisselingsoppervlakken van de longen wordt vervoerd.

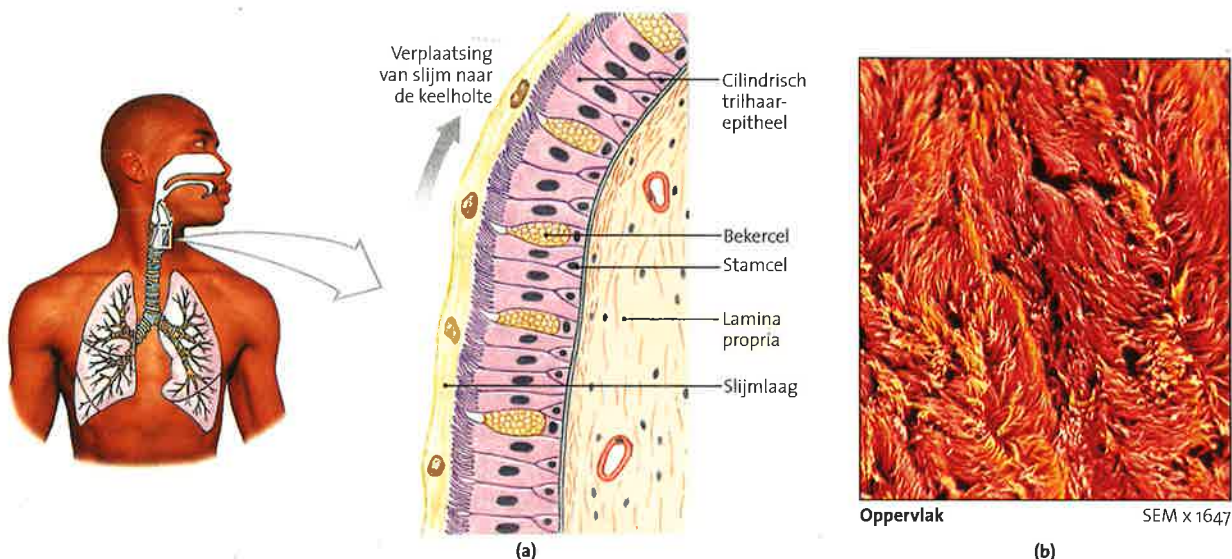
Wat de functies betreft, kunnen we de luchtwegen indelen in een gedeelte voor de *geleiding van lucht* en een gedeelte voor *gaswisseling*. Het gedeelte voor de geleiding van lucht begint bij de ingang van de neusholte en loopt door de farynx (keelholte), de larynx (het strottenhoofd), de trachea (luchtpijp), de bronchiën en de grotere bronchiolen. Het gedeelte voor de gaswisseling bestaat uit de respiratoire bronchioli (kleinste en dunste bronchiolen) en de alveoli (longblaasjes) in de longen.

De luchtwegen brengen de lucht niet alleen naar de longen, maar filteren, verwarmen en bevochtigen de lucht ook. Daardoor worden de alveoli tegen celresten, ziekteverwekkers en extreme uitwendige omstandig-

heden beschermd. Tegen de tijd dat de ingeademde lucht de alveoli bereikt, zijn de vreemdste deeltjes en ziekteverwekkers verwijderd en zijn de vochtigheid en temperatuur van de lucht binnen acceptabele grenzen gebracht. Deze 'voorbehandeling' is te danken aan de respiratoire mucosa. Het respiratoire slijmvlies bekleedt de buizen van het ademhalingsstelsel. Een *slijmvlies* is een dekweefsel met slijmcellen, een van de vier soorten vliezen die in hoofdstuk 4 zijn geïntroduceerd. Het respiratoir slijmvlies bestaat uit een respiratoir epitheel. Dit is een cilinderepitheel met trilharen dat veel *slijmcellen* (bekerzellen) bevat. De *lamina propria* is de daaronder gelegen losmazige bindweefsellaag die het epitheel ondersteunt. Deze bevat slijmklieren die hun klierproduct afgeven op het oppervlak van het dekweefsel (figuur 15-2 ). De uitwisselingsoppervlakken van het ademhalingsstelsel kunnen ernstig beschadigd raken als de ingeademde lucht is vervuild met celresten of ziekteverwekkers. Het trilhaarepitheel met



Figuur 15-1 De onderdelen van het ademhalingsstelsel



Figuur 15-2 Het respiratoire epitheel

(a) Doorsnede van het respiratoire epitheel van de luchtpijp. De pijl geeft de richting aan van het slijmtransport. (b) De trilharen van de epitheelcellen vormen een dichte laag die op een dik tapijt lijkt. Door de beweging van deze trilharen wordt slijm over het oppervlak van het dekweefsel voortgestuwd.

de slijmcellen en slijmklieren die een slijmlaag vormen, voorkomen dergelijke beschadigingen. Deze slijmlaag strekt zich uit vanaf de neusholte tot aan de bronchi. Trilharen vegen het slijm met gevangen celresten en micro-organismen in de richting van de farynx. Dit proces wordt de *mucociliaire lift* genoemd. De celresten en micro-organismen kunnen vervolgens worden doorgeslikt en door het zuur en de enzymen van de maag worden afgebroken.

INZICHTVRAGEN

- 1 Benoem de vijf functies van het ademhalingsstelsel.
- 2 Benoem de twee anatomische onderdelen van het ademhalingsstelsel.
- 3 Welk membraan bekleedt de luchtwegen van het ademhalingsstelsel?

De antwoorden zijn te vinden in bijlage 1 achter in het boek.

15.2 De neus, de farynx, de larynx, de trachea, de bronchiën en grootste bronchiolen vervoeren de lucht naar de longen

Leerdoel: De structuren benoemen die zorgen voor transport van lucht naar de longen en de functies beschrijven van deze structuren.

Het transportgedeelte van de luchtwegen begint bij de toegang tot de neusholte en loopt door de farynx, de larynx, de trachea, de bronchiën en de grootste bronchiolen.

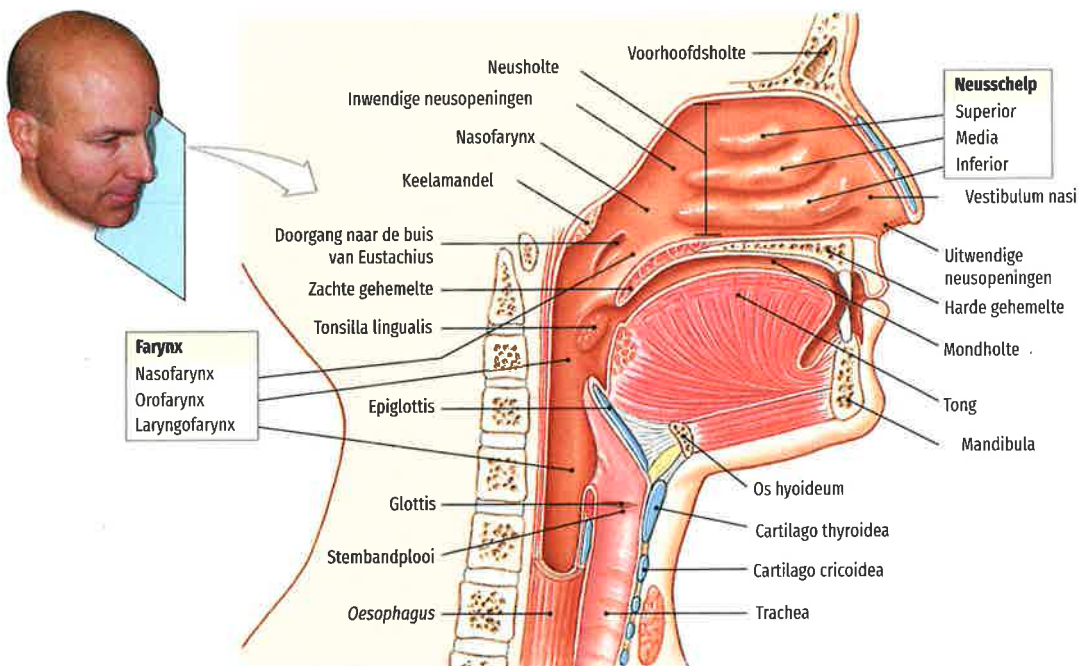
15.2.1 De neus

Onder normale omstandigheden komt de lucht het ademhalingsstelsel binnen via de gepaarde **uitwendige neusopeningen**, of **nares**, die in de **neusholte** uitmonden (figuur 15-3). Het **vestibulum nasi** is de ruimte die door de flexibele weefsels van de neus wordt omsloten. Hier steken ruwe haren (vibrissae) door de **neusgaten** naar buiten; deze beschermen de neusholte tegen grote deeltjes die met de lucht meekomen zoals zand, stof en zelfs insecten.

De maxilla (kaakbeen), os nasale (neusbeen), os frontale (voorhoofdsbeen), os ethmoidale (zeefbeen) en os sphenoidale (wiggenbeen) vormen de laterale en bovenste wanden van de neusholte (zie figuur 6-12b, c, paragraaf 6.7.1). Het *neustussenschot* verdeelt de neusholte in een linker- en een rechterhelft. Het voorste gedeelte van het neustussenschot bestaat uit hyalien kraakbeen. Het benige, achterste gedeelte van het tussenschot bestaat uit gedeelten van het vomer (ploegschaarbeen) en het os ethmoidale (zeefbeen) (zie figuur 6-11a, paragraaf 6.7.1). Een benig **hard gehemelte**, dat uit het gehemeltebeen en het kaakbeen bestaat, vormt de bodem van de neusholte en scheidt de mondholte van de neusholte (figuur 15-3). Een vlezig **zacht gehemelte** loopt achter het harde gehemelte door en vormt de bodem van de *nasofarynx* of het bovenste deel van de keel. De neusholte komt uit in de nasofarynx bij de achterste inwendige neusopeningen of *choanae*. De bovenste, middelste en onderste *neusschelp* (concha) lopen vanuit de zijwanden van de neusholte in de richting van het neustussenschot (septum nasale) door (zie figuur 15-3). Vanuit het vestibulum nasi stroomt de lucht naar de inwendige achterste neusopeningen meestal door smalle groeven tussen de aangrenzende

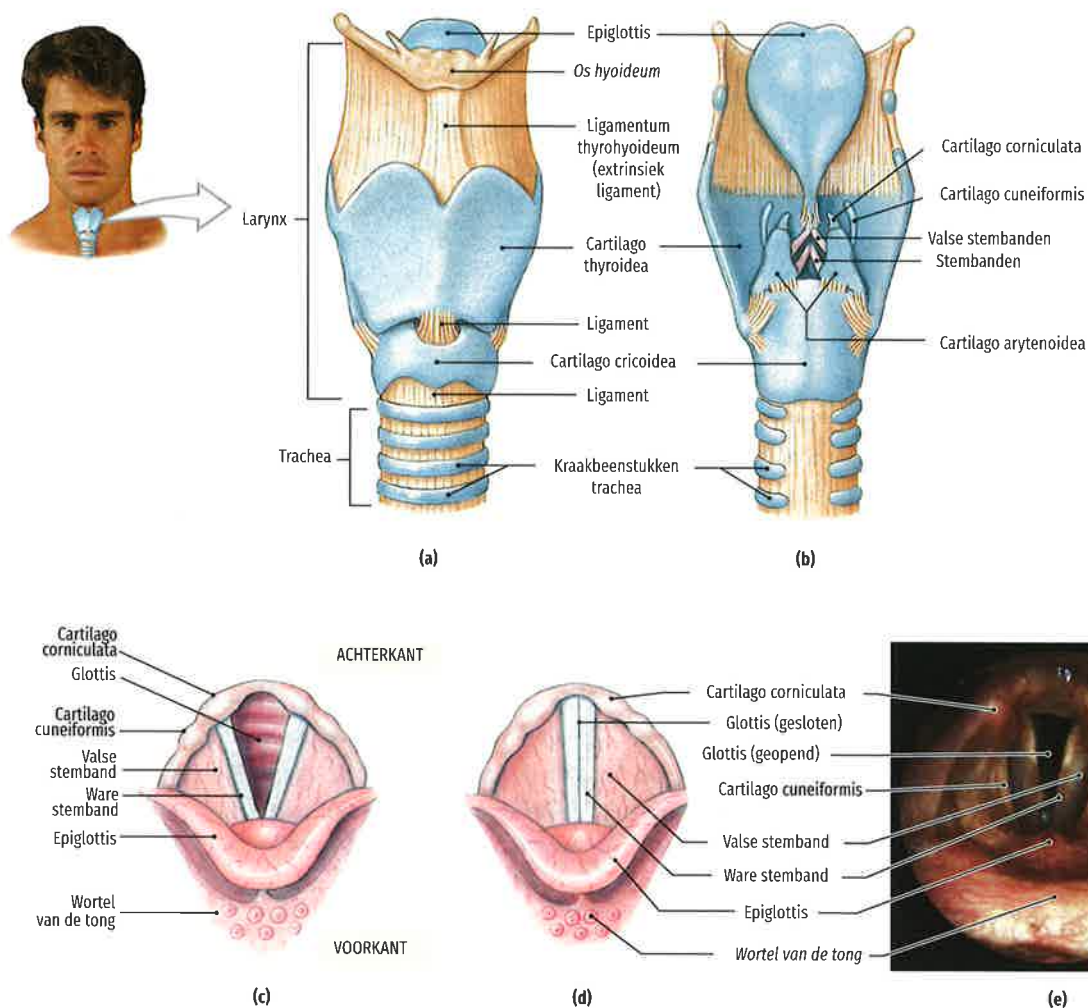
neusschelpen. Hierdoor wervelt de lucht net als water in een stroomversnelling, waardoor kleine deeltjes in de lucht in contact komen met het slijm op de bekleding van de neusholte. Deze turbulenties bevorderen niet alleen de filtratie van stof- en andere deeltjes, maar hierdoor heeft de binnenkomende lucht ook extra tijd om te worden verwarmd en bevochtigd.

De neusholte en een groot deel van de overige luchtwegen zijn met een beschermend slijmvlies of *respiratoire mucosa* bekleed. Dit slijmvlies bestaat uit het *respiratoir epitheel*, een cilindrepitheel met trilharen dat veel *bekercellen* bevat en uit een onderliggende laag van los bindweefsel (de **lamina propria**) dat slijmklieren bevat (figuur 15-2). De bekercellen en slijmklieren vormen slijm dat de oppervlakken van de neusholte en het bovenste deel van de luchtwegen omspoelt. Trilharen verplaatsen dit slijm en de eventueel aanwezige stofdeeltjes en micro-organismen in de richting van de farynx, waar ze kunnen worden ingeslikt en vervolgens aan de zuren en enzymen van de maag worden blootgesteld. De ademhalingsoppervlakken van de neusholte worden eveneens door slijm gespoeld dat in de **neusbijholten** (sinus paranasales of paranasale sinussen) wordt gevormd (de holten in het os frontale, het os



Figuur 15-3 De neus, neusholte en farynx

Op deze sagittale doorsnede zijn de onderdelen van de neusholte en de farynx weergegeven; het neustussenschot is verwijderd.



Figuur 15-4 De anatomische opbouw van de larynx en de stembanden

(a) Een vooraanzicht, (b) Een achteraanzicht, (c) De glottis is geopend, (d) De glottis is gesloten, (e) Foto genomen met een laryngoscoop die in de orofarynx is aangebracht, juist boven de larynx. Let op het afwijkende stembandknobbeltje.

sphenoidale, het os ethmoidale en de maxilla) (figuur 6-13 •, paragraaf 6.7.1) en door traanvocht dat door de traanbuis wordt afgevoerd (figuur 9-8b •). Wanneer in de ingeademde lucht giftige dampen, grote hoeveelheden stof en vuil, allergenen of ziekteverwekkers aanwezig zijn, wordt meestal meer slijm geproduceerd, waardoor een 'loopneus' ontstaat.

15.2.2 De farynx

De **farynx** (keelholte) maakt zowel deel uit van het spijsverteringsstelsel als van het ademhalingsstelsel. Hij strekt zich uit tussen de achterste inwendige neusopeningen en de toegang tot de larynx en de slokdarm. Hij bestaat uit drie delen: de nasofarynx, de orofarynx

en de laryngofarynx (zie figuur 15-3 •). De **nasofarynx** is via de achterste inwendige neusopeningen met de neusholte verbonden en loopt door tot de achterste rand van het zachte gehemelte. Op de achterste wand van de nasofarynx, die met trilhaarepitheel is bekleed, bevinden zich aan weerszijden een **keelamandel** en de doorgang naar de **buis van Eustachius**. De **orofarynx** loopt vanaf het zachte gehemelte naar de basis van de tong op het niveau van het os hyoideum. In de laterale wanden van de orofarynx liggen de gehemelteamandelen. De smalle **laryngofarynx** loopt tussen het niveau van het os hyoideum en de toegang tot de oesophagus. Stoffen die het spijsverteringskanaal binnengaan, passeren door de orofarynx en de laryngofarynx. Deze on-

derdelen zijn bekleed met een gelaagd plaveiselepitheel dat bestand is tegen mechanische slijtage, agressieve stoffen en binnendringende ziekteverwekkers.

15.2.3 De larynx

Ingeademde lucht verlaat de farynx en komt de larynx binnen via een smalle opening die de glottis (stemspleet) wordt genoemd (figuur 15-3●). De glottis is het 'stemapparaat' van de larynx. De larynx (strottenhoofd) is een kraakbenige buis die de glottis omgeeft en beschermt. Deze bestaat uit negen kraakbeendelen die door banden, skeletspieren of beide op hun plaats worden gehouden. De drie grootste kraakbeenstukken zijn het **strottenklepje**, het **schildkraakbeen** en het **ringvormig kraakbeen** (figuur 15-4a, b●).

De schoenlepelvormige **epiglottis** (strottenklepje) steekt boven de glottis uit en vormt een afdekking over de glottis.

Tijdens het slikken komt de larynx omhoog en vouwt het elastische strottenklepje zich naar achter over de stemspleet, waardoor wordt voorkomen dat vloeistof of vast voedsel in de luchtwegen terechtkomt. Het gebogen **cartilago thyroidea** (**schildkraakbeen**) vormt een groot deel van de voorste en laterale oppervlakken van de larynx. Een opvallende rand op het voorste oppervlak van dit kraakbeen vormt de 'adamsappel'. Onder de cartilago thyroidea (schildkraakbeen) ligt het **cartilago cricoidea** (**ringvormig kraakbeen**), dat de larynx aan de achterkant ondersteunt. Het schildkraakbeen en het ringkraakbeen beschermen de stemspleet en de toegang tot de trachea. Hun brede oppervlakken bieden plaats voor de aanhechting van belangrijke spieren en banden van de larynx.

De larynx bevat ook drie paar kleinere kraakbeenstukken die door het ringvormige kraakbeen worden ondersteund. Dit zijn het **cartilago arytenoidea**, **cartilago corniculata** en **cartilago cuneiformis**.

Twee paren banden, ingesloten door dekwefselplooiën, lopen over de larynx tussen het schildkraakbeen; door deze kleinere kraakbeenstukken wordt de stemspleet aanzienlijk verkleind. De banden van het bovenste paar, de zogenoemde **valse stembanden**, zijn betrekkelijk stug. Ze helpen voorkomen dat vreemde voorwerpen de open glottis binnenkomen en beschermen een tweetal kwetsbaardere banden, de **ware stembanden**. De ware stembanden liggen hieronder en bevatten elastische ligamenten die van het schildkraak-

been naar het cartilago arytenoidea lopen (figuur 15-4b●). De elastische ware stembanden zijn betrokken bij het voortbrengen van geluid (figuur 15-4c, d, e●). Voedsel of vloeistoffen die met de stembanden in aanraking komen, brengen de *hoestreflex* op gang. Tijdens het hoesten blijft de glottis gesloten, terwijl de spieren van borst en buik zich samentrekken, waardoor de longen worden samengedrukt. Als de glottis ineens wordt geopend, wordt het materiaal dat de toegang tot de glottis blokkeerde door de plotselinge sterke luchtstroom naar buiten geblazen.

KLINISCHE AANTEKENING

Cystische fibrose

Cystic Fibrosis (cystische fibrose) (CF) is een erfelijke ziekte die het ademhalingsstelsel, het spijsverteringsstelsel en het voortplantingsstelsel aantast. Een afwijkend gen veroorzaakt problemen met klieren die slijm en zweet produceren. Door een verstoring van het transport van water en zout gaan cellen te veel water en zout opnemen, waardoor het klierproduct dik en kleverig wordt.

Het dik en stoperig slijm dat bij individuen met het defecte gen wordt gevormd kan niet door de trilharen van de luchtwegen worden getransporteerd. Het slijm blokkeert de kleinere delen van de luchtwegen, waardoor de ademhaling wordt bemoeilijkt. Doordat de normale afweer van de luchtwegen is uitgeschakeld, ontstaan vaak bacteriële infecties. Dankzij de moderne technologie en behandelingsmethoden is de overleving van veel patiënten met CF gestegen tot het dertigste of veertigste levensjaar. Zij overlijden meestal als gevolg van uitgebreide bacteriële infecties van de longen en van hartfalen dat het gevolg is van de longinfecties. CF is de meest voorkomende dodelijke erfelijke ziekte van mensen van Noord-Europese afkomst. De aandoening komt voor bij 1 op de 3200 pasgeborenen. Bij mensen met een Zuid-Europese afkomst, bij de Asjkenazisch-Joodse bevolking en bij mensen van Afro-Amerikaanse afkomst, komt de ziekte minder voor. De aandoening is het gevolg van een defect gen op chromosoom 7.

De stembanden en de vorming van geluid

Hoe vorm je geluiden? Lucht die door de open glottis stroomt, brengt de **stembanden** aan het trillen,

waardoor geluidsgolven ontstaan. Net als bij een trillende snaar van een harp, hangt de toonhoogte van de stem af van de diameter, de lengte en de spanning van de trillende stembanden. Korte, dunne snaren trillen snel, waardoor een geluid met een hoge toon ontstaat; lange, dikke snaren trillen langzamer, waardoor een geluid met een lage toon ontstaat. De diameter en de lengte van de stembanden zijn recht evenredig met de omvang van de larynx. Bij kinderen is de larynx klein en zijn de stembanden dun en kort, waardoor hun stem meestal hoog is. In de puberteit groeit de larynx van mannen meer dan die van vrouwen. Doordat de stembanden van volwassen mannen dikker en langer zijn, hebben volwassen mannen een lagere stem dan volwassen vrouwen. De spanning van de stembanden wordt gereguleerd door kleine, intrinsieke skeletspieren van de larynx. Deze spieren beïnvloeden de positie van het cartilago arytenoïdeum. Als de spanning in de stembanden toeneemt, gaat de toon omhoog; als de spanning afneemt, gaat de toon omlaag.

Het karakteristieke geluid van de stem is niet alleen afhankelijk van de geluiden die in de larynx worden gevormd. Versterking en resonantie vinden plaats in de farynx, de mondholte, de neusholte en de neusbijholten. Woorden worden gevormd door willekeurige bewegingen van de tong, de lippen en de wangen.

15.2.4 De trachea

De **trachea** (luchtpijp) is een taaie, buigzame buis met een diameter van circa 2,5 centimeter en een lengte van ongeveer 11 centimeter (figuur 15-5a ). De trachea begint op het niveau van de zesde halswervel (C6), waar hij aan het ringvormig kraakbeen van de larynx is aangehecht. Hij eindigt in het mediastinum op het niveau van de vijfde borstwervel (T5). Daar vertakt hij in een linker- en rechterhoofdbronchus.

De trachea bevat vijftien tot twintig **kraakbeenringen**. Ze verstevigen de wanden van de trachea en beschermen de luchtwegen. Ze voorkomen eveneens dat de trachea dichtklapt of bij de drukveranderingen in het ademhalingsstelsel te veel uitrekt. Elk kraakbeenstuk heeft een U-vorm. Het open gedeelte van de 'U' wijst naar achteren, in de richting van de *oesophagus* (slokdarm) (figuur 15-5b ). Doordat de kraakbeenstukken een opening bezitten, kan de achterwand van de trachea gemakkelijk worden vervormd wanneer grote voedselbrokken de oesophagus passeren. De uiteinden

van de kraakbeenstukken zijn door een elastisch ligament en door de *m. trachealis* (*luchtpijpspier*), een band van glad spierweefsel, met elkaar verbonden. De diameter van de trachea wordt gewijzigd door de samen-trekkingen van deze spieren die door het autonome zenuwstelsel worden aangestuurd. Door sympathische prikkeling wordt de diameter van de trachea groter, waardoor er gemakkelijk grotere hoeveelheden lucht door de luchtwegen kunnen worden verplaatst.

KLINISCHE AANTEKENING

Blokkade van de trachea

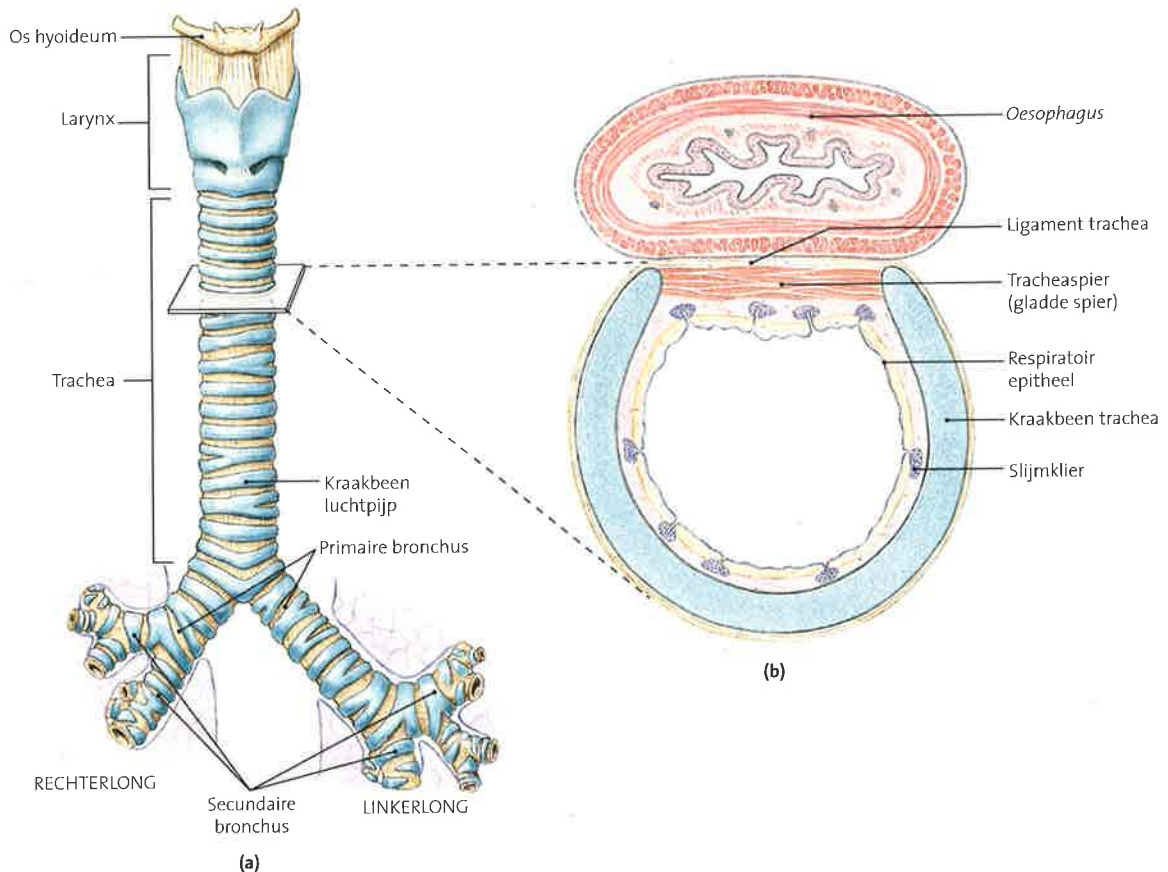
Soms ademen we vreemde voorwerpen in bij een proces dat aspiratie wordt genoemd. Vreemde voorwerpen die in de larynx of de trachea blijven steken, worden meestal door hoesten uitgedreven. Als de betrokkene kan spreken of geluid kan voortbrengen, zijn de luchtwegen nog open en hoeven er geen noodmaatregelen te worden genomen. Als het slachtoffer niet kan ademen of spreken, is de situatie levensbedreigend.

Bij de *Heimlichmanoeuvre* drukt een eerstehulpverlener op de buik, juist onder het diafragma. Hierdoor wordt het diafragma met kracht omhoog gebracht, waardoor genoeg druk wordt uitgeoefend om de blokkade te verwijderen. Deze manoeuvre moet correct worden uitgevoerd om beschadiging van inwendige organen te voorkomen. Van tijd tot tijd organiseren hulpverleningsinstellingen korte trainingssessies om de Heimlichmanoeuvre goed te leren uitvoeren.

Als de blokkade is ontstaan doordat de epiglottis of weefsels rond de glottis zijn opgezwollen, kan een professioneel opgeleide eerstehulpverlener een gebogen buis door de farynx en de stemspleet inbrengen om de luchtstroom op gang te brengen. Deze procedure wordt *intubatie* genoemd. Als de trachea geblokkeerd blijft, kan een *tracheostomie* worden uitgevoerd. Bij deze procedure wordt een insnijding gemaakt in de voorste wand van de trachea waardoor een buis wordt ingebracht. De buis loopt langs de larynx, waardoor lucht rechtstreeks de trachea in kan stromen.

15.2.5 De bronchiën

In het mediastinum vertakt de trachea zich in de **rechter** en **linker primaire bronchus** (figuur 15-5a ). De wanden van de primaire bronchiën lijken op die van de



Figuur 15-3 De anatomische bouw van de trachea

(a) Een schematisch vooraanzicht. (b) Een dwarsdoorsnede van de trachea en de oesophagus.

trachea: de binnenbekleding bestaat uit trilhaarepitheel en is door U-vormige kraakbeenstukken omgeven. De rechter primaire bronchus voert lucht aan naar de rechterlong en de linker naar de linkerlong. Doordat de rechter primaire bronchus een grotere diameter heeft en onder een minder scherpe hoek naar de long loopt, komen de meeste vreemde voorwerpen die de trachea binnenkomen, in de rechter primaire bronchus terecht en niet in de linker.

De primaire bronchiën en hun zijtakken vormen de **bronchusboom**. In figuur 15-6a is het vertakkingspatroon van de linker primaire bronchus te zien waar deze met de long is verbonden. (Het aantal vertakkingen is omwille van de duidelijkheid verkleind.) Elke primaire bronchus vertakt zich in **secundaire bronchiën** die de longkwabjes binnengaan. In elk van beide longen verdelen de secundaire bronchiën zich in negen à tien **tertiaire bronchiën**. Elke tertiaire bronchus

voorziet een specifiek gebied van lucht – een bronchopulmonair segment – waar hij zich herhaaldelijk vertakt tot kleinere bronchi.

De kraakbeenstukken van de secundaire bronchiën zijn vrij groot, maar verder langs de takken van de bronchusboom worden ze steeds kleiner. Als de diameter van de doorgang nog slechts ongeveer 1 mm bedraagt, verdwijnen de kraakbeenstukken helemaal. Zo'n smalle doorgang wordt een **bronchiolus** genoemd.

De wanden van de bronchiolen bestaan voornamelijk uit glad spierweefsel; de activiteit van deze spieren wordt door het autonome zenuwstelsel geregeld. Bronchiolen zijn voor de ademhalingsfunctie wat arteriolen zijn voor de functie van het cardiovasculaire stelsel. Net zoals de doorbloeding van de capillairnetten wordt gereguleerd door de diameter van de arteriolen te wijzigen, worden de weerstand van de luchtstroom en de verdeling van lucht naar delen van de longen

gereguleerd door de diameter van de bronchiolen te wijzigen. Sympathische activering leidt tot ontspanning van de gladde spieren in de wanden van bronchiolen en veroorzaakt **bronchodilatatie**, verwijding van de luchtwegen. Parasympathische prikkeling leidt tot samentrekking van deze gladde spieren en tot *bronchoconstrictie*, vernauwing van de luchtwegen. Door extreme bronchoconstrictie kunnen de doorgangen vrijwel geheel worden geblokkeerd, waardoor het ademen moeilijk of onmogelijk wordt. Dit kan het geval zijn tijdens een *astma-aanval* of tijdens allergische reacties waarbij de bronchiolen ontstoken zijn.

INZICHTVRAGEN

- Door welke stoffen of vloeistoffen worden de oppervlakken van de neusholte overspoeld?
- Voor welke twee orgaanstelsels vormt de farynx een doorgang?
- Wat gebeurt er met de hoogte van de stem als de spanning van de stembanden groter wordt?
- Wat is het functionele voordeel van U-vormige kraakbeenstukken in de wand van de trachea boven cirkelvormige (gesloten) kraakbeenstukken?

De antwoorden zijn te vinden in bijlage 1 achter in het boek.

15.3 De kleinste bronchiolen en de alveoli in de longen vormen het gaswisselings-gedeelte van de luchtwegen

Leerdoel: De functionele anatomie van alveoli en de uitwendige anatomie van de longen beschrijven.

15.3.1 De bronchiolen

Bronchiolen vertakken zich verder in de smalste transportbuizen, de *terminale bronchioli*. Deze smalle buisjes hebben een binnendiameter van 0,3 - 0,5 mm. Elke terminale bronchiolus voert lucht naar een lobje van de long. Een *lobje* is een gedeelte van het longweefsel dat is begrensd door tussenschotten van bindweefsel en dat lucht krijgt toegevoerd door één bronchiolus, die is omgeven door vertakkingen van de longarteriën en de longvenen (figuur 15-6b). Binnen een lobje

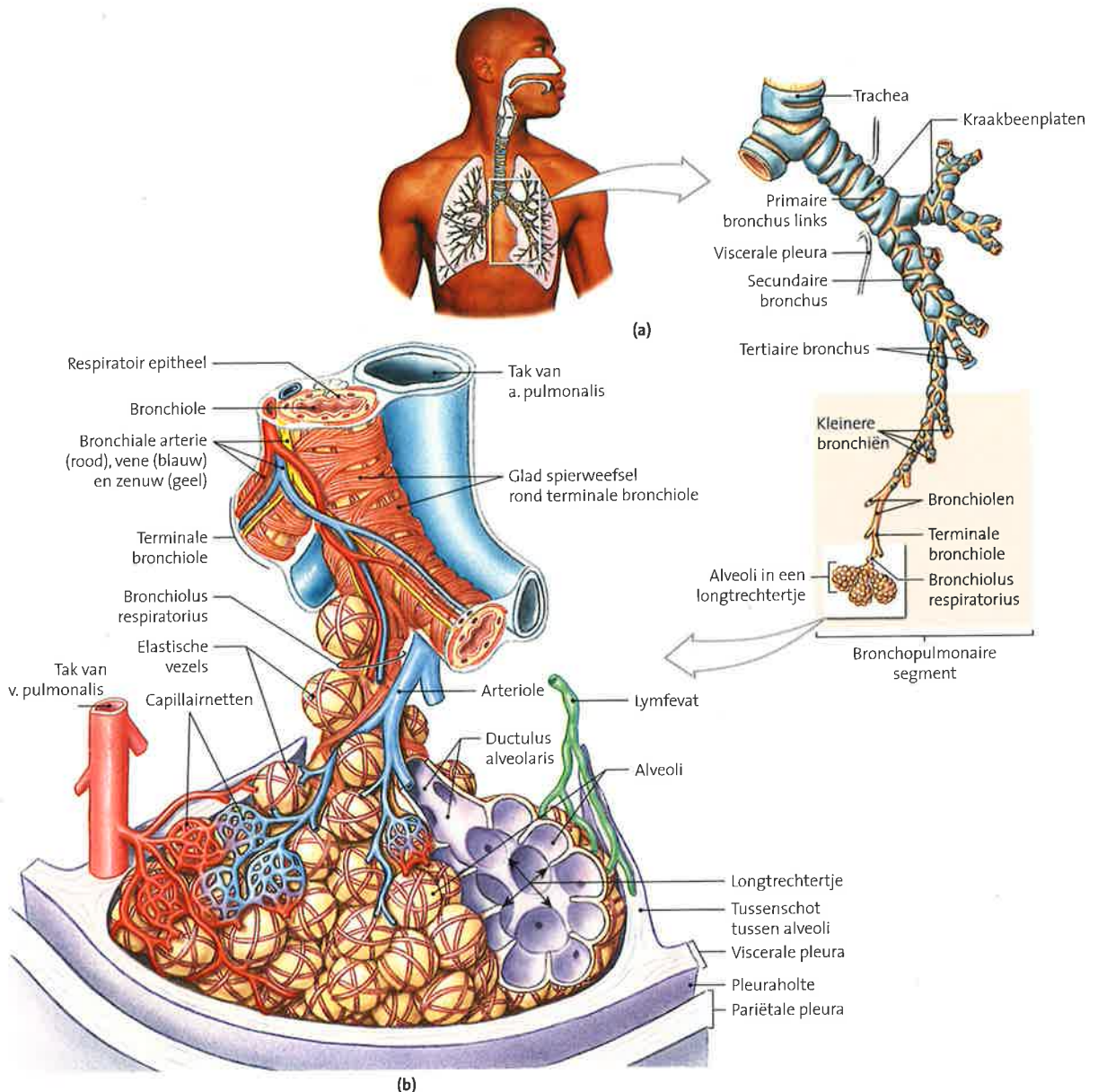
vertakt een terminale bronchiolus zich in verschillende *respiratoire bronchioli*. Deze doorgangen, de dunste vertakkingen van de bronchusboom, voeren gas naar de gaswisselingsoppervlakken van de longen.

15.3.2 De ductuli alveolares en de alveoli

De bronchioli respiratorii eindigen in doorgangen die **ductuli alveolares** worden genoemd (figuur 15-7a). Deze buisjes eindigen in **longtrechtertjes**, gezamenlijke compartimenten die uit vele afzonderlijke alveoli (longblaasjes) bestaan, het gaswisselingsoppervlak van de longen. Elke long bevat circa 150 miljoen alveoli. Door dit grote aantal krijgt de long een open, sponsachtig uiterlijk (figuur 15-7b).

Om in onze stofwisselingsbehoeften te kunnen voorzien, moet het uitwisselingsoppervlak van de alveoli heel groot zijn; dit oppervlak bedraagt ongeveer 140 vierkante meter, ongeveer de helft van een tennisbaan. Het epitheel van de alveoli bestaat voornamelijk uit een enkelvoudig plaveiselepitheel (figuur 15-7c). De verhoorde epitheelcellen, ook pneumocyten type I (*type I alveolaire cellen*) genoemd, zijn meestal dun. Rondzwervende **alveolaire macrofagen** patrouilleren ter hoogte van het epitheel en fagocyteren stof en afvalmateriaal dat het oppervlak van de alveoli heeft bereikt. Verspreid tussen de epitheelcellen liggen de grotere **pneumocyten type II**, of *alveolaire cellen type II*. Deze cellen vormen een vettig klierproduct dat **surfactant** wordt genoemd. Ze geven surfactant af aan het alveolair oppervlak waar dit een oppervlakkige deklaag vormt op een dunne waterlaag.

Het belang van surfactant is dat deze stof de oppervlaktespanning verlaagt in de vloeistoflaag die de alveolaire oppervlakken bedekt. Je herinnert je uit hoofdstuk 2 dat oppervlaktespanning ontstaat door de aantrekking tussen watermoleculen op de grenslaag tussen water en lucht (paragraaf 2.2.3). Zonder surfactant zouden de dunne wanden van de alveoli door de oppervlaktespanning naar elkaar toe worden getrokken. Als er te weinig surfactant is (als gevolg van een verwonding of van genetische afwijkingen), moet elke inademing genoeg kracht hebben om de alveoli 'op te blazen'. Iemand met deze aandoening, die **ademnoodsyndroom** (*respiratory distress syndrome*, hyalienemembranenziekte) wordt genoemd, raakt al snel uitgeput door de inspanning die nodig is om de ineengedrukte longen voortdurend met lucht te vullen.



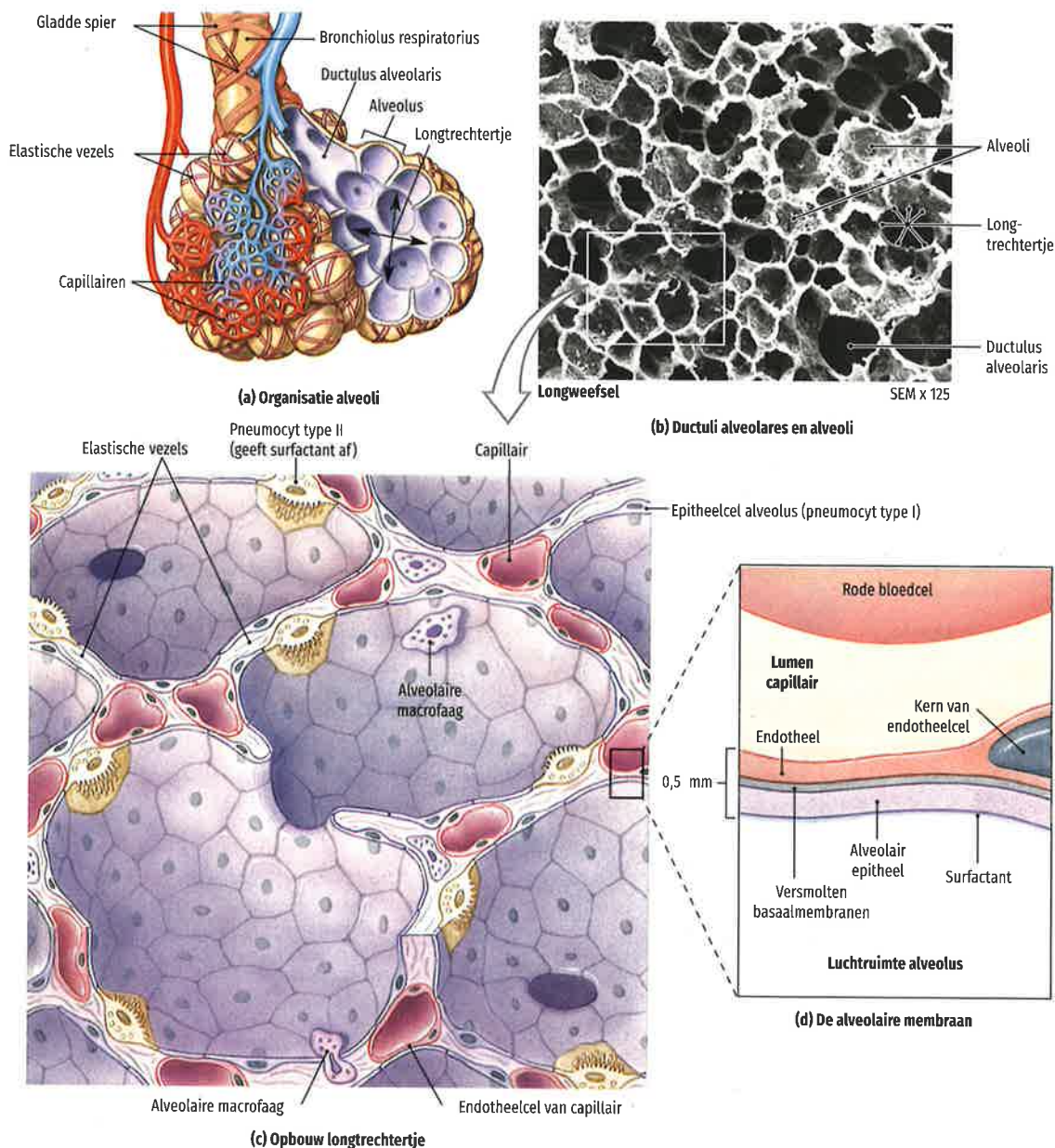
Figuur 15-6 De bronchusboom en longtrechttertjes

(a) Op deze tekening is het vertakkingspatroon van de luchtwegen in de linkerlong schematisch weergegeven. (b) De structuur van één longtrechttertje dat een deel is van een bronchopulmonaal segment.

15.3.3 Het respiratorische membraan

Gaswisseling vindt plaats door het *respiratorische membraan* van de alveoli. Het respiratorische membraan bestaat uit drie onderdelen (figuur 15-7d): een alveolair epitheel van de alveolus, een endotheellaag van het capillair en tussenin de versmolten basale lamina van capillair en alveolus.

Ter hoogte van het respiratorische membraan wordt de alveolaire lucht slechts door een heel kleine afstand van het bloed gescheiden. De totale afstand is soms maar $0,1 \mu\text{m}$, maar bedraagt gemiddeld circa $0,5 \mu\text{m}$. Diffusie door het respiratorische membraan vindt zeer snel plaats, doordat de afstand klein is en doordat zowel zuurstof- als koolstofdioxidemoleculen klein en in vet oplosbaar zijn.



Figuur 15-7 Organisatie alveoli

(a) De structuur van het distale uiteinde van één lobje. Merk op dat verschillende alveoli uitkomen in één ductulus alveolaris en dat een netwerk van haarvaten, ondersteund door elastische vezels, elke alveolus omgeeft. (b) Microfoto van longweefsels met geringe vergroting. (c) Een schematische doorsnede van de alveolaire structuur. Een capillair kan bij de gaswisseling voor verschillende alveoli betrokken zijn. (d) Het respiratorische membraan, dat bestaat uit drie onderdelen.

De plasmamembranen van de epitheelcellen en de endotheelcellen vormen dus geen barrière voor de verplaatsing van zuurstof en koolstofdioxide tussen bloed en de luchtruimten in de longtrechttertjes.

De oppervlakken van het respiratorische membraan krijgen bloed vanuit de arteriën van de *kleine bloedsomloop* (pragraaf 13.6). Je herinnert je dat de aa. pulmo-

nales gedeoxygeneerd (zuurstofarm) bloed vervoeren. Ze komen de longen binnen, vertakken en volgen de bronchiën en hun vertakkingen naar de longtrechttertjes. Elk longtrechttertje heeft een arteriole en elk longtrechttertje is omgeven door een netwerk van capillairen dat direct onder het epitheel van het respiratorische membraan ligt. Nadat de gaswisseling heeft

plaatsgevonden, passeert geoxygeneerd (zuurstofrijk) bloed de pulmonaire venulen en vervolgens de pulmonaire venen, om in het rechteratrium terecht te komen. Behalve dat de endotheelcellen van de longcapillairen deelnemen aan de gaswisseling, zijn ze ook de primaire bron van angiotensine converterend enzym (ACE), dat circulerend **angiotensine I** in angiotensine II omzet. Angiotensine II speelt een belangrijke rol bij het reguleren van het bloedvolume en de bloeddruk (paragraaf 10.9.2).

De bloeddruk in de kleine bloedsomloop is meestal betrekkelijk laag, waarbij de systolische druk in de longarterie 30 mm Hg of lager is.

Doordat de druk zo laag is, kunnen aa. pulmonales gemakkelijk door kleine bloedstolsels, vetdruppels of luchtballen geblokkeerd raken. De longen ontvangen het totale hartminuutvolume, waardoor de kans groot is dat drijvende vaste deeltjes in het bloed vrijwel onmiddellijk problemen veroorzaken. Wanneer een tak van een a. pulmonalis is geblokkeerd, stopt de bloedtoevoer naar een aantal longtrechters of alveoli, een aandoening die *longembolie* wordt genoemd.

KLINISCHE AANTEKENING

Longontsteking

Longontsteking (of *pneumonie*, *pneumon*, long en *ia*, aandoening) is een ontsteking van de longen, meestal als gevolg van een infectie met bacteriën of virussen. Terwijl de ontsteking optreedt, lekt vloeistof in de alveoli. De respiratorische bronchiolen zwellen op, waardoor de doorgang nauwer wordt en de stroming van de lucht wordt beperkt. Daardoor verslechtert de ademhalingsfunctie.

Als de infectie door bacteriën wordt veroorzaakt, zijn dit meestal bacteriën die normaal in de mond en farynx aanwezig zijn en die erin zijn geslaagd om aan de verdedigingsmechanismen van de luchtwegen te ontsnappen.

Longontsteking kan ernstige gevolgen hebben bij zuigelingen, jonge kinderen en bij ouderen.

De kans op een longontsteking wordt groter wanneer de afweer van het ademhalingsstelsel door andere factoren is aangetast, bijvoorbeeld door beschadiging van het epitheel als gevolg van roken, of wanneer het immuunsysteem niet goed werkt (zoals bij aids). De meest algemene vorm van longontsteking die bij pa-

tiënten met aids voorkomt, wordt veroorzaakt door de schimmel *Pneumocystis carinii*. Deze schimmel is onder normale omstandigheden in de longtrechters aanwezig, maar bij gezonde personen is de afweer van het ademhalingsstelsel in staat om invasie en beschadiging van het longweefsel te voorkomen.

15.3.4 De longen

De twee longen en de vertakkingen van de bronchusboom zijn in figuur 15-8* afgebeeld. Elk van de twee **longen** heeft duidelijk te onderscheiden *kwabben* die door diepe groeven zijn gescheiden (figuur 15-8*). De rechterlong heeft drie kwabben (*boven*, *midden* en *onder*) en de linkerlong heeft er twee (*boven* en *onder*). De ruw afgeronde *top* (apex) van beide longen loopt door in de basis van de hals boven de eerste rib; de holle longbasis van elke long rust op het bovenste oppervlak van het diafragma, de gespierde plaat die de scheiding vormt tussen borst- en buikholte. Het gebogen *costale oppervlak* van elke long volgt de binnenste rondingen van de borstkas. De *mediastinale oppervlakken* van beide longen hebben groeven die de doorgangen van grote bloedvaten en de instulpingen van het pericardium markeren. In vooraanzicht vormt de mediale rand van de rechterlong een verticale lijn, terwijl de mediale grens van de linkerlong bij de *incisura cardiaca* naar binnen loopt. Deze uitsparing herbergt het pericard, dat zich links van het midden bevindt.

De longen hebben een lichte en sponsachtige structuur, doordat het grootste deel van het volume van beide longen uit met lucht gevulde doorgangen en alveoli bestaat. Doordat de longen veel elastische vezels bevatten, zijn ze tegen aanzienlijke volumeveranderingen bestand.

15.3.5 De pleuraholten

De borstholte heeft de vorm van een brede kegel. De wanden worden gevormd door de borstkas en de bodem bestaat uit het gespierde diafragma. In de borstholte ligt elk van beide longen in een afzonderlijke pleurale holte, die met een sereus membraan is bekleed, de zogenoemde *pleura* (paragraaf 1.8.1). De *pariëtale pleura* (pleura parietalis of borstvlies) bekleedt het binnenste oppervlak van de lichaamswand en loopt over het diafragma en het mediastinum door. De *viscerale pleura* (pleura visceralis of longblad) bedekt de

Stap 3 transport van zuurstof en koolstofdioxide gaat door tussen de longcapillairen en de capillaire netten in andere weefsels.

Afwijkingen van een van deze processen zullen uiteindelijk invloed hebben op de gasconcentraties in de interstitiële vloeistof en daardoor ook op de activiteiten van cellen. Als de zuurstofconcentratie afneemt, zullen bepaalde weefsels een tekort aan zuurstof krijgen. **Hypoxie** of een *lage zuurstofconcentratie in de weefsels* vormt een ernstige beperking voor de stofwisselingsactiviteiten van een bepaald gebied. Als de toevoer van zuurstof volledig wordt afgesneden, ontstaat er **anoxie** of gebrek aan zuurstof. Door anoxie sterven cellen snel af. Een groot deel van de schade die door herseninfarcten en hartaanvallen ontstaat, is het gevolg van plaatselijke anoxie.

JE KENNIS UITBREIDEN

Mitochondria produceren circa 95 procent van de energie die een cel nodig heeft om in leven te blijven (zoals je hebt gezien in hoofdstuk 3). Tijdens de belangrijkste reacties in de mitochondria wordt zuurstof verbruikt en koolstofdioxide gevormd. Het proces van de mitochondriale energieproductie wordt **aeroob metabolisme** genoemd (*aero*, lucht en *bios*, leven) of **celademhaling**. Dit type respiratie verschilt zowel van de externe respiratie als van de interne respiratie (paragraaf 3.5.2).

INZICHTVRAGEN

- 11 Geef een definitie van externe en interne respiratie.
- 12 De externe respiratie verloopt in drie stappen, leg uit. *De antwoorden zijn te vinden in bijlage 1 achter in het boek.*

15.5 Longventilatie – de verplaatsing van lucht tussen de buitenlucht en de longen – gaat gepaard met drukveranderingen en spierbewegingen

Leerdoel: De natuurkundige principes beschrijven waardoor de verplaatsing van lucht in en uit de longen mogelijk wordt. Beschrijven hoe de werking van de ademhalingspijpen de adembewegingen tot stand brengt.

Longventilatie is de fysieke verplaatsing van lucht in en uit de luchtwegen. Een ademhaling of **ademhalingscyclus** bestaat uit een inademing en een uitademing. De *ademhalingsfrequentie* is het aantal ademhalingen per minuut. Deze snelheid loopt bij gezonde volwassenen in rust uiteen van twaalf tot achttien ademhalingen per minuut. Kinderen ademen sneller: circa achttien tot twintig keer per minuut.

De functie van de ademhaling is het handhaven van een voldoende **alveolaire ventilatie**, de verplaatsing van lucht in en uit de alveoli. De alveolaire ventilatie voorkomt dat koolstofdioxide zich in de alveoli ophoopt en zorgt ervoor dat voldoende zuurstof wordt aangevoerd, evenveel als door de bloedstroom wordt opgenomen.

15.5.1 Druk en luchtstroom naar de longen

Zoals we van het weerbericht op televisie weten, stroomt lucht van een gebied met hoge druk naar een gebied met lage druk. Dit verschil tussen hoge en lage druk wordt de *drukgradiënt* genoemd. De drukgradiënten zijn van toepassing op de beweging van wind in de atmosfeer en op de verplaatsing van lucht in en uit de longen (longventilatie). In een afgesloten ruimte met flexibele wanden (zoals een long) kan de druk van een gas (bijvoorbeeld lucht) worden gewijzigd door het volume van de ruimte groter of kleiner te maken. Als het volume van de ruimte (de longen) groter wordt, neemt de druk van het gas (lucht) af; wanneer het volume kleiner wordt, neemt de druk toe.

Het volume van de longen is afhankelijk van het volume van de thoracale holte. Zoals we hebben gezien, zijn het pariëtale en het pleurale membraan alleen door een dunne laag pleuravocht gescheiden. Hoewel de

twee vliezen over elkaar heen kunnen glijden, worden ze door deze vloeistoflaag bij elkaar gehouden. (Hetzelfde verschijnsel doet zich voor als we een nat glas op een glad oppervlak zetten. We kunnen het glas gemakkelijk verschuiven, maar als we het willen optillen, ondervinden we een aanzienlijke weerstand als gevolg van de twee oppervlakken die aan elkaar 'vastkleven'). Tussen de pariëtale pleura en de viscerale pleura, die de longen bedekken, bevindt zich een vloeistoflaagje. Daardoor kleeft het oppervlak van de longen tegen de binnenwand van de borst en tegen het bovenste oppervlak van het diafragma. Hierdoor heeft elke uitzetting of samentrekking van de borstholte direct invloed op het longvolume.

Veranderingen van het volume van de borstholte zijn het gevolg van bewegingen van het diafragma en de borstkas, zoals in spotlight figuur 15-10♦ te zien is:

- **Diafragma.** Het diafragma vormt de bodem van de borstholte. Als het diafragma ontspannen is, heeft het een koepelvorm; het dak van de koepel steekt uit in de borstholte en drukt tegen de onderzijde van de longen. Als het diafragma samentrekt, wordt het afgeplat, waardoor het volume van de borstholte toeneemt en de longen worden uitgetrokken. Wanneer het diafragma ontspant, keert het naar zijn oorspronkelijke positie terug, waardoor het volume van de borstholte afneemt.
- **Borstkas.** Door de wijze waarop de ribben en de wervels met elkaar verbonden zijn, wordt het volume van de borstholte groter wanneer de ribben zich omhoog bewegen, terwijl het volume van de borstholte kleiner wordt wanneer ze zich omlaag bewegen. De uitwendige tussenribspieren en hulpademhalingsspieren (zoals de m. sternocleidomastoideus) tillen de borstkas omhoog. De inwendige tussenribspieren en andere hulpademhalingsspieren (zoals de rechte buikspier en andere buikspieren) trekken de borstkas omlaag.

Bij het begin van een ademhaling is de druk binnen en buiten de longen gelijk en is er geen luchtverplaatsing (spotlight figuur 15-10a♦). Als het diafragma zich samentrekt en de borstholte door de beweging van de ademhalingsspieren wordt vergroot, zetten de longen uit om de extra ruimte op te vullen, waardoor de druk in de longen afneemt. Doordat de druk in de longen (P_{binnen}) lager is dan de atmosferische druk (P_{buiten}),

stroomt lucht de luchtwegen in (spotlight figuur 15-10b♦). Tijdens de uitademing wordt het proces omgekeerd, doordat de borstkas zich omlaag verplaatst en het diafragma omhoog komt; daardoor wordt het longvolume kleiner. De druk in de longen is nu hoger dan de atmosferische. Daardoor verplaatst lucht zich de longen uit (spotlight 15-10c♦).

15.5.2 Compliantie

De **compliantie** van de longen is de mate van de elasticiteit en het vermogen tot uitzetting van de longen. Hoe groter de compliantie, hoe gemakkelijker het is de longen te vullen en leeg te maken. Hoe kleiner de compliantie, hoe meer kracht nodig is om de longen te vullen en leeg te maken. Door problemen met de compliantie kunnen verschillende aandoeningen voorkomen. Door het verlies van steunweefsel als gevolg van beschadiging van de alveoli, zoals het geval is bij **emfyseem**, wordt de compliantie verhoogd (paragraaf 15.8.3). De compliantie neemt af wanneer onvoldoende surfactant wordt gevormd om te voorkomen dat de alveoli bij uitademing worden samengedrukt, zoals wel gebeurt bij het **ademnoodsyndroom** (paragraaf 15.3.2). De compliantie neemt ook af wanneer bewegingen van de borstkas worden beperkt door artritis of door andere skeletafwijkingen waardoor de gewrichten van de ribben of de wervelkolom worden aangetast.

Als we in rust zijn, is de spieractiviteit die nodig is voor longventilatie verantwoordelijk voor 3 tot 5 procent van onze energiebehoefte. Als de compliantie is verlaagd, kost de longventilatie aanzienlijk meer energie. Daardoor kunnen patiënten uitgeput raken, uitsluitend door de inspanning die nodig is voor de ademhaling.

KLINISCHE AANTEKENING

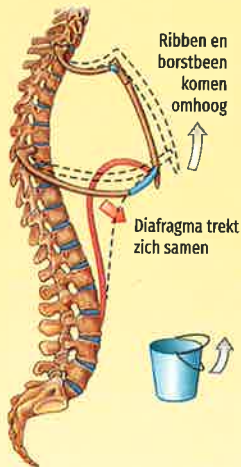
Beademing

Beademing is een techniek om iemand bij wie de ademhalingsspieren niet werken van lucht te voorzien. Bij **mond-op-mondbeademing** zorgt iemand anders voor de ademhaling door in de mond van het slachtoffer (of in de mond en de neus) uit te ademen. Na elke ademhaling wordt het contact verbroken, zodat het slachtoffer passief kan uitademen. Lucht die op deze wijze wordt toegediend, bevat voldoende zuurstof om in de behoeften van het slachtoffer te voorzien. Getrainde hulpverleners kunnen lucht toevoeren via een zogenoemde

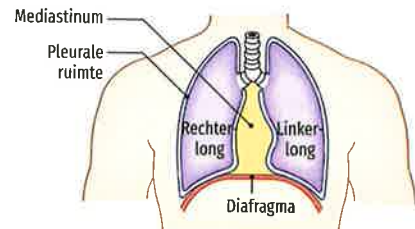
SPOTLIGHT

Figuur 15-10
LONGVENTILATIE

Longventilatie of ademhaling is de verplaatsing van lucht in en uit het ademhalingsstelsel. Longventilatie vindt plaats door het volume van de longen te wijzigen. Veranderingen van het longvolume vinden plaats door de contractie van skeletspieren. De belangrijkste ademhalingsspieren zijn het middenrif en de buitenste tussenribspieren.

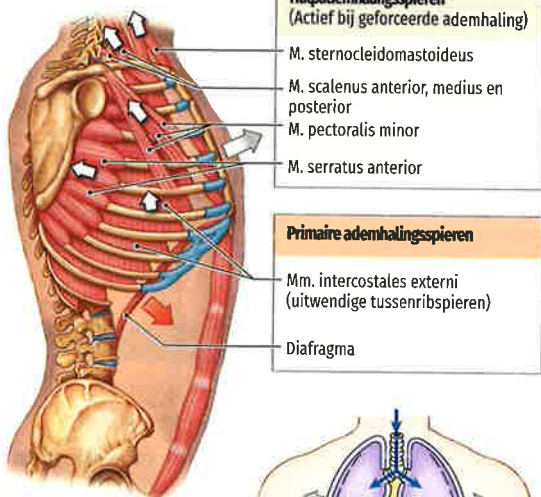


Wanneer het middenrif wordt ingedrukt of de borstkas (ribben en borstbeen) omhoog worden bewogen, neemt het volume van de borstholte toe en stroomt lucht de longen in. De buitenwaartse verplaatsing van de ribben als ze omhoog worden bewogen, lijkt op de buitenwaartse beweging van het handvat van een emmer die wordt opgetild.

a IN RUST

$$P_{\text{buiten}} = P_{\text{binnen}}$$

Als de borstkas en het middenrif in rust zijn, is de druk binnen en buiten de longen gelijk en vindt er geen luchtverplaatsing plaats.

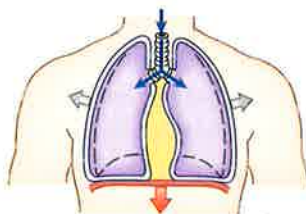
b INADEMING**Hulpademhalingsspieren**
(Actief bij geforceerde ademhaling)

M. sternocleidomastoideus
M. scalenus anterior, medius en posterior
M. pectoralis minor
M. serratus anterior

Primaire ademhalingsspieren

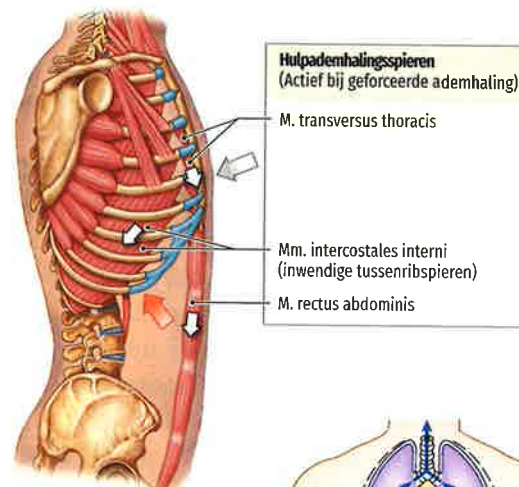
Mm. intercostales externi
(uitwendige tussenribspieren)
Diafragma

Doordat de borstkas zich omhoog verplaatst en door samentrekking van het middenrif wordt het volume van de borstholte vergroot. De druk in de longen daalt en lucht stroomt naar binnen.



Volume borstholte neemt toe

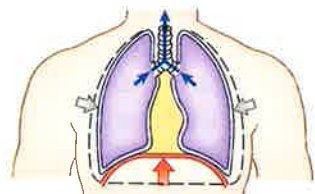
$$P_{\text{buiten}} > P_{\text{binnen}}$$

c UITADEMING**Hulpademhalingsspieren**
(Actief bij geforceerde ademhaling)

M. transversus thoracis

Mm. intercostales interni
(inwendige tussenribspieren)
M. rectus abdominis

Als de ribbenkast terugkeert naar zijn oorspronkelijke positie en het diafragma zich ontspant, neemt het volume van de borstholte af. De druk in de longen neemt toe en lucht stroomt naar buiten.



Volume borstholte neemt af

$$P_{\text{buiten}} < P_{\text{binnen}}$$

endotracheale buis die via de glottis (stemspleet) in de trachea wordt ingebracht. Indien mechanische ventilatoren beschikbaar zijn, kunnen deze aan de buis worden bevestigd. Als het hart van het slachtoffer ook niet functioneert, is zogenoemde *cardiopulmonale resuscitatie* (CPR of *cardiopulmonary resuscitation*) nodig om een adequate bloedstroom te handhaven en om de weefsels van voldoende zuurstof te voorzien.

15.5.3 Mechanisme van ademhaling

De ademhalingspijpen worden in verschillende combinaties gebruikt, afhankelijk van de hoeveelheid lucht die in of uit de longen moet worden verplaatst. De adembewegingen worden verdeeld in rustige ademhaling en geforceerde ademhaling.

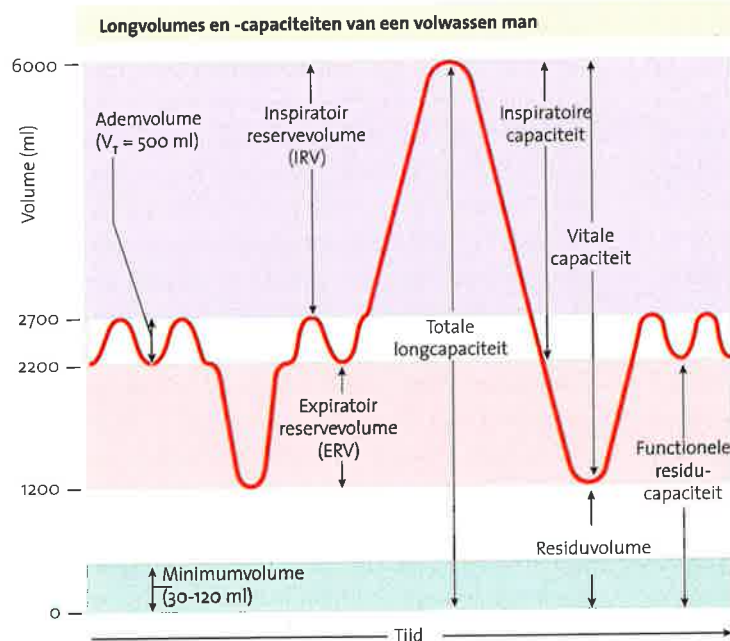
Bij *rustige ademhaling* zijn spiercontracties nodig bij de inademing, maar de uitademing is passief. Voor inademing is de samentrekking van *primaire ademhalingspijpen* – het diafragma en de uitwendige tussenribpijpen – nodig. Onder normale omstandigheden en bij normale, rustige ademhaling is de samentrekking van het diafragma verantwoordelijk voor circa 75 procent van de longventilatie; de uitwendige tussenribpijpen

zijn verantwoordelijk voor de overige 25 procent. Deze percentages kunnen echter veranderen. Zwangere vrouwen zijn bijvoorbeeld steeds meer afhankelijk van bewegingen van de borstkas, doordat de buikorganen door de uitzetting van de baarmoeder tegen het diafragma worden gedrukt.

Bij *geforceerde ademhaling* verlopen zowel de inademing als de uitademing actief en zijn de *hulpademhalingspijpen* betrokken (figuur 15-10b, c). Tijdens de uitademing zijn de inwendige tussenribpijpen en de buikpijpen actief.

15.5.4 Longvolume en capaciteit

Een enkele ademhaling of ademhalingscyclus bestaat uit een inademing of *inspiratie* en een uitademing of *expiratie*. De *ademhalingsnelheid* is het aantal ademhalingen per minuut. Bij normale volwassenen in rust loopt deze snelheid uiteen van twaalf tot achttien ademhalingen per minuut. Kinderen ademen sneller. Kinderen van 1 tot 5 jaar hebben een ademhalingsnelheid van circa twintig tot dertig keer per minuut. Tijdens een rustige ademhalingscyclus verversen we slechts een klein gedeelte van de lucht in onze longen. Deze hoeveelheid lucht wordt het *teugvolume* of het *ademvolume*



Versillen tussen man en vrouw			
Mannen		Vrouwen	
Vitale capaciteit	IRV	3300	1900
	V_t	500	500
	ERV	1000	700
Residuvolume		1200	1100
Totale longcapaciteit		6000 ml	4200 ml

Figuur 15-11 Longvolumes en -capaciteiten

De rode lijn geeft het volume van de lucht in de longen aan tijdens de ademhaling.

(VT) genoemd. Dit kan worden vergroot door krachtiger in te ademen en volledig uit te ademen.

We kunnen het totale longvolume verdelen in een reeks *volumes* en *capaciteiten* (elke capaciteit is de som van verschillende volumes) zoals in figuur 15-11 is afgebeeld.

- Het **teugvolume** (V_T) of ademvolume is de hoeveelheid lucht die zich in of uit de longen verplaatst tijdens een enkele ademhalingscyclus. Deze bedraagt gemiddeld circa 500 ml, zowel bij mannen als vrouwen.
- **Expiratoir reservevolume.** Tijdens een normale, ongestoorde ademhalingscyclus bedraagt het V_T gemiddeld circa 500 ml. De hoeveelheid lucht die aan het eind van een dergelijke ademhalingscyclus zou kunnen worden uitgeblazen, circa 1.000 ml (bij mannen) en circa 700 ml (bij vrouwen), is het **expiratoir reservevolume (ERV)**.
- **Inspiratoir reservevolume.** Het **inspiratoir reservevolume (IRV)** is de hoeveelheid lucht die boven op het ademvolume kan worden ingeademd. Doordat de longen van mannen groter zijn dan die van vrouwen, bedraagt het IRV van mannen gemiddeld 3.300 ml ten opzichte van 1.900 ml bij vrouwen.
- De vitale capaciteit is de som van het inspiratoir reservevolume, het expiratoir reservevolume en het wat overeenkomt met de maximale hoeveelheid lucht die bij een ademhalingscyclus in of uit de luchtwegen kan worden gebracht.
- Het **residuvolume** is de hoeveelheid lucht die, zelfs na een maximale uitademing, in de longen achterblijft; meestal circa 1.200 ml bij de man en 1.100 ml bij vrouwen. Het grootste deel van dit residuvolume blijft achter doordat de longen aan de borstwand gekleefd blijven, waardoor de elastische vezels zich niet verder kunnen samentrekken.
- Het **minimumvolume** is de hoeveelheid lucht die in je longen zou achterblijven als deze zich konden samentrekken. Het minimumvolume loopt uiteen van 30 tot 120 ml. Zelfs bij het minimumvolume blijft er echter enige lucht in de longen achter, doordat het surfactant dat de oppervlakken van de alveoli bedekt, voorkomt dat ze volledig worden ingedrukt.

Niet alle ingeademde lucht bereikt het respiratorische membraan in de longen. Bij een gemiddelde inademing

wordt circa 500 ml lucht het ademhalingsstelsel in gezogen. De eerste 350 ml stroomt langs de luchtwegen en komt de alveoli binnen, maar de laatste 150 ml komt niet verder dan het begin van de luchtwegen en neemt geen deel aan de gaswisseling met het bloed. Het totale volume van dit deel van de luchtwegen (150 ml) wordt de *dode ruimte* van de longen genoemd.

INZICHTVRAGEN

- 13 Geef een definitie van compliantie en benoem enkele factoren die deze compliantie beïnvloeden.
- 14 Wat is het ademvolume?
- 15 Mark breekt een rib en deze maakt een gat in de thoraxwand aan de linkerkant. Wat zal er daardoor volgens jou met zijn linkerlong gebeuren?
- 16 Bij longontsteking hoopt zich vloeistof op in de alveoli. Welk effect heeft deze vochttophoping op de vitale capaciteit?

De antwoorden zijn te vinden in bijlage 1 achter in het boek.

KLINISCHE AANTEKENING

Longfunctieonderzoeken

Bij longfunctieonderzoeken worden verschillende aspecten van de ademhalingsfuncties onderzocht. Met een *spirometer* worden waarden zoals de vitale capaciteit, het expiratoir reservevolume en het inspiratoir reservevolume bepaald. Met een *pneumotachograaf* wordt de snelheid van de luchtverplaatsing bepaald. Met een *peakflowmeter* (*piekstroommeter*) wordt de maximale snelheid van de geforceerde uitademing gemeten. Longfunctieonderzoeken kunnen betrekkelijk eenvoudig worden uitgevoerd en zijn van groot belang voor de diagnose. Bij mensen met astma sluiten de vernauwde luchtwegen zich bijvoorbeeld voordat een uitademing is voltooid. Daardoor blijkt bij een longfunctieonderzoek dat de vitale capaciteit, het ERV en de peakflowsnelheid zijn gedaald. Aan het eind van een rustige ademhalingscyclus blijft minder lucht in de longen achter. De stroomsnelheid door de vernauwde luchtwegen is eveneens verlaagd. Het fluiten van de lucht door de vernauwde luchtwegen brengt het karakteristieke piepen (wheezing) teweeg dat met een astma-aanval gepaard gaat.

15.6 De gaswisseling wordt bepaald door de partiële druk van gassen en de diffusie van moleculen

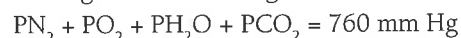
Leerdoel: De natuurkundige principes beschrijven waarvoor de diffusie van gassen in en uit het bloed mogelijk wordt.

Tijdens de longventilatie worden de alveoli van zuurstof voorzien en wordt koolstofdioxide uit het bloed verwijderd. Het feitelijke proces van gaswisseling met de uitwendige omgeving, tussen het bloed en de lucht in de alveoli, vindt plaats via het respiratorische membraan. De snelheid van dit proces wordt bepaald door (1) de partiële druk van de betrokken gassen en (2) de diffusie van moleculen tussen een gas en een vloeistof (paragraaf 3.3.1).

15.6.1 Gasmengsels en partiële druk

De lucht die we inademen bestaat uit een mengsel van gassen. Stikstofmoleculen (N_2) zijn het talrijkst, en vormen circa 78,6 procent van de gasmoleculen in de atmosfeer. Zuurstofmoleculen (O_2), de op een na meest voorkomende moleculen, vormen ongeveer 20,9 procent van de atmosfeer. Het grootste deel van de overige 0,5 procent bestaat uit watermoleculen, waarbij koolstofdioxide (CO_2) slechts 0,04 procent bijdraagt.

De atmosferische druk op zeeniveau bedraagt ongeveer 760 mm Hg. De bijdrage van elk van de gassen in de lucht aan de totale atmosferische druk is recht evenredig met de concentratie van het gas. De druk die door één gas wordt uitgeoefend, is de **partiële druk** van dat gas, afgekort tot P . De som van alle partiële drukken is gelijk aan de totale druk die door het gasmengsel wordt uitgeoefend. Voor de atmosfeer kan deze relatie als volgt worden samengevat:



We kunnen de partiële druk van elk gas makkelijk berekenen omdat het percentage van elk gas in de lucht bekend is. De partiële zuurstofdruk, de P_{O_2} , is bijvoorbeeld gelijk aan 20,9 procent van 760 mm Hg, ofwel ongeveer 159 mm Hg. De partiële drukken van de andere gassen in de atmosfeer zijn in tabel 15-1 vermeld. Deze waarden zijn belangrijk, omdat de partiële druk van elk gas bepalend is voor de snelheid waarmee dit

gas tussen de lucht in de alveoli en het bloed diffundeert. Onthoud dat de partiële zuurstofdruk weliswaar bepalend is voor de hoeveelheid zuurstof die een oplossing binnengaat, maar dat deze partiële druk geen effect heeft op de diffusiesnelheid van stikstof of van koolstofdioxide.

15.6.2 Alveolaire lucht tegenover atmosferische lucht

Zodra lucht de luchtwegen binnengaat, beginnen de eigenschappen te wijzigen. Bij het passeren door de neusholte begint de ingeademde lucht warmer te worden en vochtiger (de hoeveelheid waterdamp neemt toe). Wanneer de binnenkomende lucht de alveoli bereikt, wordt deze gemengd met de lucht die na de vorige ademhalingscyclus is achtergebleven. Daardoor bevat het ontstane gasmengsel in de alveoli meer koolstofdioxide en minder zuurstof dan de atmosferische lucht. Zoals al eerder is opgemerkt, komt de laatste 150 ml van de ingeademde lucht (ongeveer 30 procent van het ademvolume) nooit verder dan de luchtwegen, de dode ruimte van de longen. Tijdens de uitademing mengt de lucht die de alveoli verlaat zich met lucht in de dode ruimte, zodat weer een ander mengsel ontstaat. Dit mengsel verschilt zowel van de lucht in de atmosfeer als van de lucht in de alveoli. De verschillen in samenstelling tussen de atmosferische (ingeademde) lucht en de lucht in de alveoli zijn eveneens in tabel 15-1 vermeld.

KLINISCHE AANTEKENING

Decompressieziekte

Decompressieziekte is een pijnlijke aandoening die ontstaat wanneer iemand aan een plotselinge daling van de atmosferische druk wordt blootgesteld. Stikstof is het gas dat verantwoordelijk is voor dit probleem, doordat de partiële druk van dit gas in de lucht zo hoog is. Als de druk daalt, komt stikstof uit de oplossing en vormt bellen, te vergelijken met de bellen die ontstaan wanneer een blikje frisdrank wordt geopend. De bellen kunnen in gewrichtsholten, in het bloed en in de cerebrospinale vloeistof ontstaan. Mensen met decompressieziekte rollen zich meestal op vanwege de pijn in de aangedane gewrichten, vandaar dat deze ziekte in het Engels the *bends* wordt genoemd. Decompressieziekte komt het meest voor bij scubaduikers die te snel naar



het oppervlak terugkeren. Onder water hebben ze lucht ingeademd onder een hogere druk dan normaal. De ziekte kan zich ook bij luchtvaartpassagiers voordoen wanneer de druk in de cabine plotseling daalt.

15.6.3 Partiële drukken in de kleine en grote bloedsomloop

In figuur 15-12• is de partiële druk van zuurstof en koolstofdioxide in de pulmonaire en systemische bloedsomloop weergegeven. Het zuurstofarme bloed dat door de aa. pulmonales wordt vervoerd, heeft een lagere PO_2 en een hogere PCO_2 dan de alveolaire lucht (figuur 15-12a•). Als gevolg van diffusie tussen de alveolaire lucht en de alveolaire capillairen stijgt de PO_2 van het bloed en daalt de PCO_2 . Tegen de tijd dat het zuurstofrijke bloed de longvenulen heeft bereikt, is het zuurstofrijke bloed in evenwicht met de lucht in de longen. Dus als het bloed de alveoli verlaat, heeft het een PO_2 van circa 100 mm Hg en een PCO_2 van circa

40 mm Hg. Als dit bloed de pulmonale venen binnengaat, vermengt het zich met het bloed uit de capillairen rond de luchtwegen, dat betrekkelijk weinig zuurstof bevat. De PO_2 van het mengsel is daardoor lager, 95 mm Hg. Dit is de PO_2 van het bloed dat de systemische circulatie binnengaat.

Onder normale omstandigheden heeft de interstitiële vloeistof een PO_2 van 40 mm Hg en een PCO_2 van 45 mm Hg. Daardoor diffundeert zuurstof uit de capillairen. Koolstofdioxide diffundeert naar binnen tot de partiële druk van elk van deze gassen in de capillairen gelijk is aan die in de aangrenzende weefsels (figuur 15-12b•). Als het bloed naar de longcapillairen terugkeert, zal de zuurstof die aan de weefsels is afgegeven, door externe respiratie worden vervangen. De overmaat CO_2 wordt afgegeven.

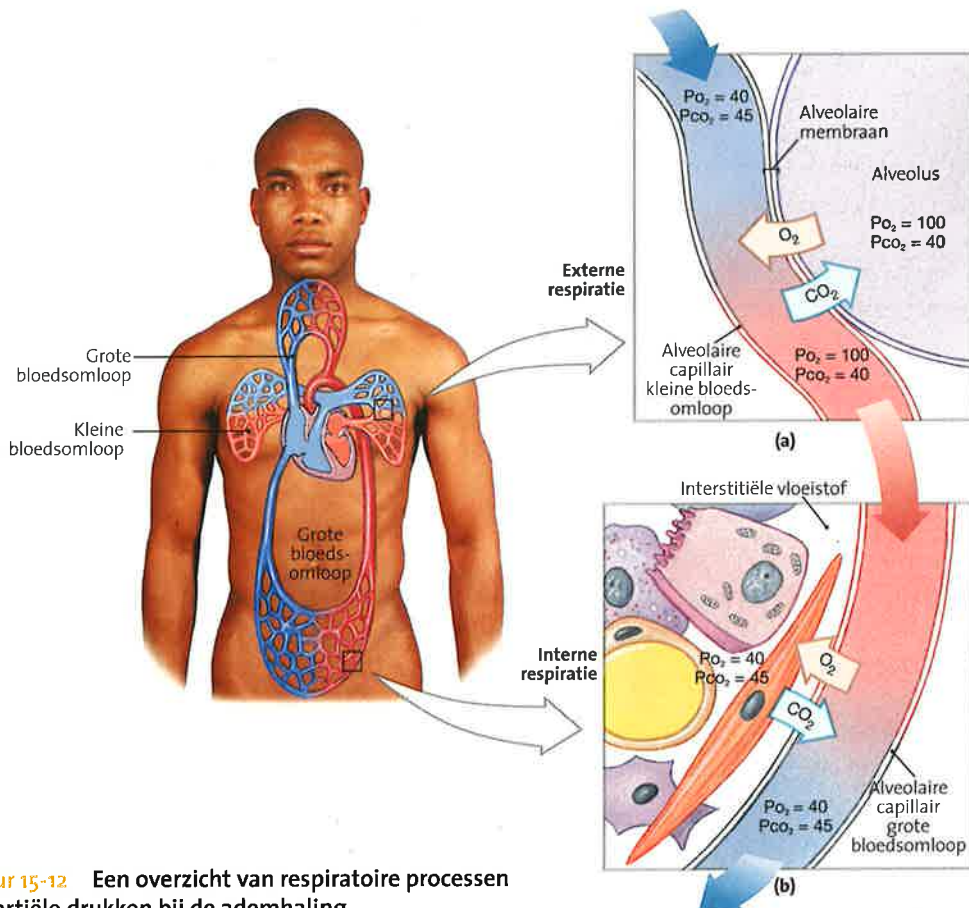
INZICHTVRAGEN

- 17 Juist of onjuist: elk gas in een mengsel oefent een partiële druk uit die gelijk is aan de concentratie van het gas in het mengsel.
- 18 Wat gebeurt er met lucht als deze de neusholte passeert?
- 19 Vergelijk het zuurstof- en het koolstofdioxidegehalte van lucht in de alveoli en de buitenlucht.

De antwoorden zijn te vinden in bijlage 1 achter in het boek.

Tabel 15-1 Partiële druk (mm Hg) en normale gasconcentratie (%) in lucht

LUCHT	STIKSTOF (N_2)	ZUURSTOF (O_2)	WATERDAMP (H_2O)	KOOLSTOFDIOXIDE (CO_2)
Ingeademde lucht (droog)	597 (78,6%)	159 (20,9%)	3,7 (0,5%)	0,3 (0,04%)
Lucht alveoli (verzadigd)	573 (75,4%)	100 (13,2%)	47 (6,2%)	40 (5,2%)
Uitgeademde lucht (verzadigd)	569 (74,8%)	116 (15,3%)	47 (6,2%)	28 (3,7%)



Figuur 15-12 Een overzicht van respiratoire processen en partiële drukken bij de ademhaling

15.7 De meeste zuurstof wordt vervoerd door binding aan hemoglobine (Hb), terwijl koolstofdioxide wordt vervoerd in de vorm van koolzuur, of gebonden aan Hb of opgelost in bloedplasma

Leerdoel: Beschrijven hoe zuurstof en koolstofdioxide in het bloed worden vervoerd.

Zuurstof en koolstofdioxide lossen slecht op in bloedplasma. De slechte oplosbaarheid is een probleem, omdat perifere weefsels meer zuurstof nodig hebben en meer koolstofdioxide produceren dan het bloedplasma alleen kan opnemen en vervoeren. Dit probleem wordt verholpen doordat erythrocyten de opgeloste zuurstof-

en koolstofdioxidemoleculen uit het bloedplasma opnemen en binden (in het geval van zuurstof) of gebruiken om oplosbare verbindingen te vormen (in het geval van koolstofdioxide). Doordat bij deze reacties opgeloste gassen uit het bloedplasma worden opgenomen, blijven gassen naar het bloed diffunderen en wordt een diffusie-evenwicht nooit bereikt. Het belangrijkste van deze reacties is dat ze beide *tijdelijk* en *volledig omkeerbaar* zijn. Als de concentratie van zuurstof of koolstofdioxide in het bloedplasma hoog is, worden de overtollige moleculen door erythrocyten verwijderd; wanneer de concentraties in het plasma dalen, geven de erythrocyten hun opgeslagen reserves af.

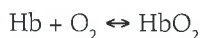
JE KENNIS UITBREIDEN

Veel biologische reacties zijn gemakkelijk omkeerbaar (zoals je hebt gezien in hoofdstuk 2). Een omkeerbare reactie bestaat uit twee reacties die

tegelijkertijd plaatsvinden: synthese en afbraak. In de evenwichtstoestand zijn de snelheden van beide reacties gelijk. Zodra een molecuul afbraak ondergaat wordt een ander molecuul opnieuw gevormd. Dit evenwicht wordt verstoord wanneer de concentraties van een of meer moleculen wordt gewijzigd. Als deze verandering plaatsvindt, zal het evenwicht van de omkeerbare reactie verschuiven, zodanig dat meer synthese of meer afbraak zal plaatsvinden (paragraaf 2.3.2).

15.7.1 Zuurstoftransport

Slechts circa 1,5 procent van de zuurstof in arterieel bloed bestaat uit opgeloste zuurstofmoleculen. De overige zuurstofmoleculen zijn aan hemoglobinemoleculen (Hb-moleculen) gebonden. Je herinnert je dat het hemoglobinemolecuul uit vier globulaire eiwit-subeenheden bestaat. Elke subeenheid bevat een haemgroep met een centraal ijzerion (paragraaf 11.3.3). Elk ijzerion bindt één zuurstofmolecuul. Een hemoglobinemolecuul kan vier zuurstofmoleculen binden. Deze binding vindt plaats via een omkeerbare reactie die als volgt kan worden samengevat:



De hoeveelheid zuurstof die door hemoglobine wordt gebonden (of afgegeven), is vooral afhankelijk van de PO_2 in de omgeving. Hoe lager het zuurstofgehalte van een weefsel, hoe meer zuurstof wordt afgegeven door de hemoglobinemoleculen die de lokale capillairen passeren. Inactieve weefsels hebben bijvoorbeeld een lage zuurstofbehoefte en de plaatselijke PO_2 bedraagt circa 40 mm Hg. Onder deze omstandigheden geeft hemoglobine ongeveer 25 procent van de opgeslagen zuurstof af. Wanneer de plaatselijke PO_2 van actieve weefsels daarentegen tot 15-20 mm Hg daalt (ongeveer de helft van de PO_2 van normale weefsels), dan geeft hemoglobine tot wel 80 procent van de opgeslagen zuurstof af. In praktische termen betekent dit dat actieve weefsels ongeveer drie keer zo veel zuurstof zullen ontvangen als inactieve weefsels.

Hoeveel zuurstof door hemoglobine kan worden afgegeven, wordt behalve door de PO_2 ook bepaald door de pH en de temperatuur. Actieve weefsels vormen zuren, waardoor de pH van de interstitiële vloeistof daalt.

Als de pH daalt, geven de hemoglobinemoleculen hun gebonden zuurstofmoleculen gemakkelijker af. Hemoglobine geeft eveneens meer zuurstof af wanneer de lichaamstemperatuur stijgt.

Deze drie factoren (PO_2 , pH en temperatuur) zijn belangrijk tijdens perioden van maximale inspanning. Als een skeletspier erg actief is, stijgt de temperatuur van de spier en nemen de pH en de PO_2 ter plaatse af. Door deze combinatie geeft de hemoglobine die het gebied binnenkomt veel meer zuurstof af die door de actieve spiervezels kan worden benut. Zonder deze automatische aanpassing zou de PO_2 vrijwel onmiddellijk tot zeer lage concentraties dalen en zou de inspanning moeten stoppen.

KLINISCHE AANTEKENING

Koolstofmonoxidevergiftiging

Slachtoffers van moord die in een afgesloten garage in hun auto sterven, vormen een populair onderwerp voor detectiveschrijvers. In werkelijkheid overlijden elke winter gezinnen op een soortgelijke manier, als gevolg van lekkende kachels en geisers. De doodsoorzaak is **koolstofmonoxidevergiftiging**. Het uitlaatgas van auto's en andere benzinemotoren, van olielampen en van petroleumkachels bevat het reukloze gas koolstofmonoxide (CO). Koolstofmonoxide concurreert met zuurstofmoleculen om de bindingsplaatsen op de haemgroepen. Helaas wint het koolstofmonoxide meestal, doordat dit gas zelfs bij een zeer lage partiële druk een veel sterkere affiniteit (bindingskracht) heeft voor hemoglobine dan zuurstof. Door de binding van een molecuul koolstofmonoxide is die haemgroep niet langer beschikbaar om zuurstof te binden. Als de ingeademde lucht slechts voor 0,1 procent uit koolstofmonoxide bestaat, zal nog maar weinig hemoglobine beschikbaar zijn voor binding van zuurstof en is het onmogelijk om zonder medische hulp te overleven. De behandeling kan bestaan uit (1) verdere blootstelling aan CO voorkomen, (2) het toedienen van zuivere zuurstof, opdat de zuurstofmoleculen het koolstofmonoxide uit de hemoglobine 'verdrijven' mits de partiële zuurstofdruk voldoende hoog is en, indien nodig, (3) de transfusie van compatibele erythrocyten.

15.7.2 Koolstofdioxidetransport

Koolstofdioxide wordt gevormd bij de aerobe stofwisseling in perifere weefsels. Koolstofdioxide wordt in de bloedcirculatie op drie verschillende manieren vervoerd. Wanneer moleculen CO_2 in het bloed zijn terechtgekomen, kunnen ze (1) oplossen in het bloedplasma, (2) zich binden aan hemoglobine in rode bloedcellen, of (3) worden omgezet in een bicarbonaation (HCO_3^-) (figuur 15-13*). Deze drie processen zijn volledig omkeerbaar, waardoor koolstofdioxide ter hoogte van de lichaamsweefsels kan worden opgenomen en ter hoogte van de alveoli kan worden afgegeven.

Transport in bloedplasma

Bloedplasma raakt vrij snel verzadigd met koolstofdioxide. Daardoor wordt slechts circa 7 procent van het koolstofdioxide dat door perifere capillairen wordt opgenomen in de vorm van opgeloste gasmoleculen vervoerd. De rest diffundeert de rode bloedcellen in.

Binding aan hemoglobine

In de rode bloedcellen wordt een deel van de koolstofdioxidemoleculen aan 'globine' gebonden, een onderdeel van het hemoglobinemolecuul; hierbij ontstaat **carbaminohemoglobine**. Doordat een dergelijke binding niet remmend werkt op de binding van zuurstof aan haemgroepen, kan hemoglobine tegelijkertijd zuurstof en koolstofdioxide vervoeren. Onder normale omstandigheden wordt circa 23 procent van het koolstofdioxide dat in de perifere weefsels in het bloed terechtkomt, in de vorm van carbaminohemoglobine vervoerd.

Vorming en dissociatie van koolzuur

Circa 70 procent van de koolstofdioxidemoleculen die door het bloed worden opgenomen, wordt uiteindelijk in het plasma vervoerd in de vorm van **bicarbonaationen** (HCO_3^-). De bicarbonaationen worden niet direct uit koolstofdioxide gevormd.

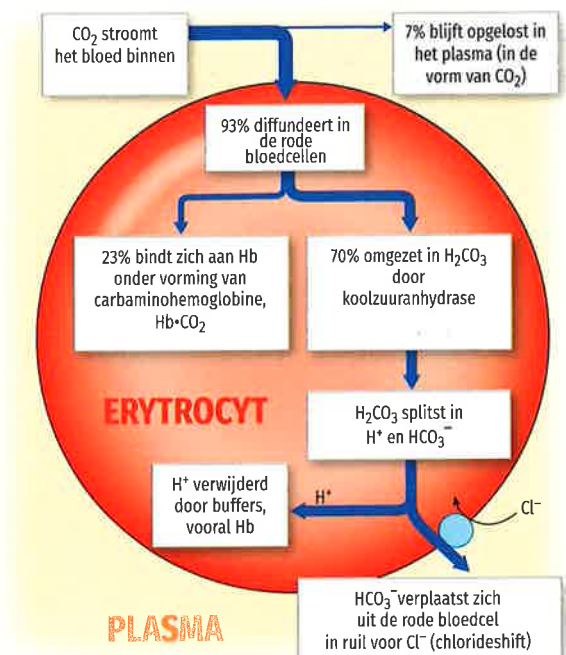
Eerst wordt koolstofdioxide in koolzuur (H_2CO_3) omgezet door het enzym **koolzuuranhydrase** dat aanwezig is in rode bloedcellen. Elk koolzuurmolecuul valt vrijwel onmiddellijk uiteen in een waterstofion en een bicarbonaation. De reacties kunnen als volgt worden samengevat:



Deze reacties vinden zeer snel plaats en zijn volledig omkeerbaar. Doordat het grootste deel van het gevormde koolzuur zich onmiddellijk splitst in een bicarbonaat- en een waterstofion, kunnen we de tussenstap negeren en de reactie als volgt samenvatten:



In perifere capillairen wordt bij deze reactie snel een groot aantal moleculen koolstofdioxide gebonden. Het evenwicht van deze reactie verschuift naar rechts, doordat er steeds meer koolstofdioxide bij komt, die vanuit de interstitiële vloeistof diffundeert en doordat de waterstofionen en de bicarbonaationen voortdurend worden verwijderd. Waar gaan deze ionen naartoe? Het grootste deel van de waterstofionen bindt zich aan hemoglobinemoleculen; hierdoor wordt verhinderd dat deze ionen door de rode bloedcellen worden afgegeven, wat tot een daling van de pH van het bloedplasma zou leiden. De bicarbonaationen diffunderen het omringende bloedplasma in. Het verdwijnen van



Figuur 15-13 Koolstofdioxidetransport in het bloed

de bicarbonaationen wordt gecompenseerd door het binnenkomen van chloride-ionen uit het bloedplasma, waardoor het ene anion met het andere wordt 'geruild'. Deze massale verplaatsing van chloride-ionen in de rode bloedcellen wordt de *chlorideshift* genoemd.

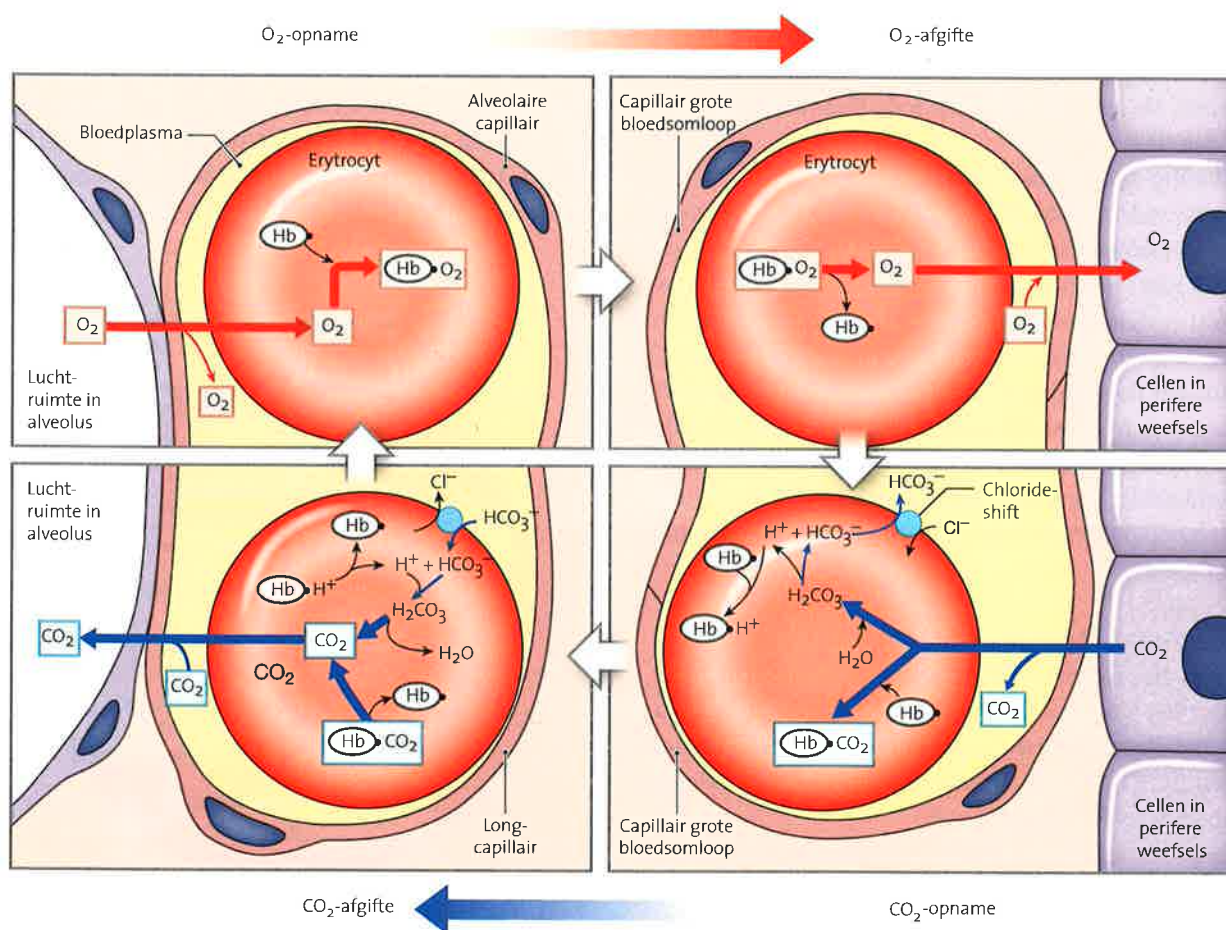
Wanneer het veneuze bloed de alveoli bereikt, diffundeert koolstofdioxide uit het bloedplasma en de PCO_2 daalt. Doordat alle transportmechanismen voor koolstofdioxide omkeerbaar zijn, vinden de processen die in figuur 15-13 zijn afgebeeld in omgekeerde richting plaats wanneer koolstofdioxide uit de rode bloedcellen diffundeert. Waterstofionen worden afgesplitst vanuit de hemoglobinemoleculen. Bicarbonaationen diffunderen vanuit het bloedplasma naar het cytoplasma van de rode bloedcellen en worden omgezet in water en CO_2 .

In figuur 15-14 zijn het vervoer van zuurstof en koolstofdioxide en de uitwisseling tussen het ademhalingsstelsel en bloed samengevat.

INZICHTVRAGEN

20. Benoem de drie manieren waarop koolstofdioxide in het bloed wordt vervoerd.
21. Bij het sporten geeft Hb meer zuurstof af aan actieve skeletspieren dan wanneer de spieren in rust zijn. Hoe komt dit?
22. Welke invloed zou een blokkade van de trachea hebben op de pH van het bloed?

De antwoorden zijn te vinden in bijlage 1 achter in het boek.



Figuur 15-14 Een samenvatting van gastransport en gaswisseling

In deze afbeelding zijn de gebeurtenissen weergegeven die plaatsvinden bij zuurstofopname vanuit de alveoli, bij afgifte aan perifere weefsels, bij opname van koolstofdioxide vanuit perifere weefsels en bij afgifte aan de alveoli.

15.8 Neuronen in de medulla oblongata en de pons, in combinatie met de ademreflexen, reguleren de ademhaling

Leerdoel: De factoren beschrijven die invloed hebben op de ademhalingsfrequentie en de reflexen beschrijven die de ademhaling regelen.

Cellen nemen voortdurend zuurstof op uit de interstitiële vloeistof en vormen koolstofdioxide. Onder normale omstandigheden is de snelheid waarmee cellen zuurstof opnemen en koolstofdioxide vormen gelijk aan de snelheid waarmee zuurstof wordt aangevoerd en koolstofdioxide door de capillairen wordt verwijderd. Bovendien zijn deze snelheden gelijk aan die waarmee zuurstof in de longen wordt opgenomen en koolstofdioxide wordt uitgescheiden. Als deze snelheden niet langer in evenwicht zijn, moeten de activiteiten van het bloedvatenstelsel en het ademhalingsstelsel worden aangepast. Homeostatische processen herstellen het evenwicht. Deze processen omvatten: (1) veranderingen van de doorbloeding en de zuurstofafgifte door plaatselijke regulering en (2) veranderingen van de diepte en snelheid van de ademhaling, onder invloed van het ademhalingscentrum in de hersenen.

15.8.1 De plaatselijke regulering van de ademhaling

Zowel de snelheid van zuurstofafgifte ter hoogte van de weefsels als de efficiëntie waarmee zuurstof in de longen wordt opgenomen worden plaatselijk geregeld. Wanneer de activiteit van een perifeer weefsel toeneemt, daalt de PO_2 in de interstitiële vloeistof en stijgt de PCO_2 . Door deze veranderingen wordt het verschil tussen de partiële druk in de weefsels en de partiële druk in het aangevoerde bloed groter, waardoor meer zuurstof wordt afgegeven en meer koolstofdioxide wordt afgevoerd. Bovendien relaxeren gladde spieren in de wanden van de arteriolen zich als de PCO_2 stijgt, waardoor meer bloed wordt aangevoerd naar een specifiek weefsel.

Door plaatselijke aanpassingen van de bloedtoevoer of van de luchtstroom naar de alveoli wordt het ren-

dement van het gastransport eveneens verhoogd. Als bloed naar de longcapillairen stroomt, wordt het bijvoorbeeld omgeleid naar die longtrechters waar de PO_2 betrekkelijk hoog is. Dit gebeurt doordat de precapillaire sfincters in capillairnetten rond de alveoli zich samentrekken wanneer de plaatselijke PO_2 laag is. (Deze reactie is omgekeerd aan de reactie die in de perifere weefsels optreedt, paragraaf 13.1.4). Ook in de longen zijn de gladde spieren in de wanden van bronchioli gevoelig voor de PCO_2 van de lucht die ze bevatten. Als de PCO_2 stijgt, verwijden de bronchiolen zich, wanneer de PCO_2 afneemt, trekken de bronchiolen zich samen. Daardoor stroomt de lucht naar die longtrechters waar de PCO_2 hoog is.

15.8.2 Regeling door de ademhalingscentra in de hersenen

De regeling van de ademhaling heeft zowel onbewuste als bewuste componenten. De onbewuste ademhalingscentra in de hersenen (in de medulla oblongata en de pons) reguleren de ademhalingsspieren, de frequentie (ademhalingsfrequentie) en de diepte van de ademhaling. Dit doen ze als reactie op sensorische informatie die aankomt vanuit de longen en andere delen van de luchtwegen, evenals vanuit verschillende andere plaatsen. De bewuste regeling van de ademhaling is het gevolg van activiteit in de hersenschors die invloed heeft op de output van de ademhalingscentra of op motorische neuronen die de ademhalingsspieren aansturen.

De *ademhalingscentra* bestaan uit drie paar kernen in de formatio reticularis van de pons en de medulla oblongata. De **centra voor het ademritme** in de medulla oblongata spelen een belangrijke rol bij het instellen van het ademritme. Elk centrum kan worden onderverdeeld in een *dorsale respiratoire groep* die een *inademingscentrum* bevat en een *ventrale respiratoire groep*, die een *uitademingscentrum* bevat. Hun output wordt aangepast door de twee paar kernen waaruit de ademhalingscentra van de pons bestaan. De centra in de pons reguleren de ademhalingsfrequentie en de diepte van de ademhaling als reactie op sensorische prikkels, de emotionele toestand of op spraakpatronen.

De activiteiten van de ademritmecentra

Een *wederzijdse remming* (reciproke inhibitie) vindt plaats tussen de neuronen die zijn betrokken bij de

inademing en de uitademing (paragraaf 8.9.2). Als de inspiratoire neuronen actief zijn, worden de expiratoire neuronen geremd en andersom. Het patroon van de interactie tussen deze groepen is bij rustige ademhaling anders dan bij geforceerde ademhaling.

Het inademhalingscentrum van de dorsale respiratoire groep functioneert bij elke ademhalingscyclus. Dit centrum bevat neuronen die de inademingsspieren aansturen. Dit zijn de uitwendige tussenribspieren en het diafragma.

Tijdens een rustige ademhaling verhogen de neuronen van het inademingscentrum geleidelijk de prikkeling van de inademingsspieren gedurende twee seconden. Daarna wordt het inademingscentrum gedurende de volgende drie seconden inactief. Tijdens deze periode van inactiviteit ontspannen de inademingsspieren en passieve uitademing volgt. Het inademingscentrum handhaaft dit basale ritme, zelfs in afwezigheid van sensorische of regulerende prikkels.

De ventrale respiratoire groep functioneert alleen tijdens geforceerde ademhaling. Dan activeert dit centrum de hulpademhalingssspieren die bij inademing en uitademing zijn betrokken.

De relatie tussen het inadem- en het uitademcentrum tijdens rustige ademhaling en geforceerde ademhaling is in figuur 15-15[•] schematisch weergegeven.

Het functioneren van deze ademhalingscentra kan worden beïnvloed door de stofwisseling of de chemische activiteit van zenuwweefsels. Door een verhoogde lichaamstemperatuur of door stoffen die het CZS stimuleren (zoals amfetaminen of cafeïne) wordt de ademhaling bijvoorbeeld versneld. Door een verlaagde lichaamstemperatuur of door stoffen die de werking van het CZS onderdrukken (zoals barbituraten of opiaten), wordt de ademhalingsfrequentie verlaagd. De ademhalingsactiviteit wordt ook sterk beïnvloed door reflexen die door mechanische of chemische prikkels worden geactiveerd.

15.8.3 De reflectorische regulering van de ademhaling

Een normale ademhaling vindt automatisch plaats, zonder bewuste regulering (figuur 15-16[•]). De activiteiten van de ademhalingscentra worden gewijzigd door sensorische informatie van mechanoreceptoren (zoals rek- en drukreceptoren) en chemoreceptoren. De teweeggebrachte veranderingen worden *ademhalingsreflexen* genoemd.

Reflexen door mechanoreceptoren

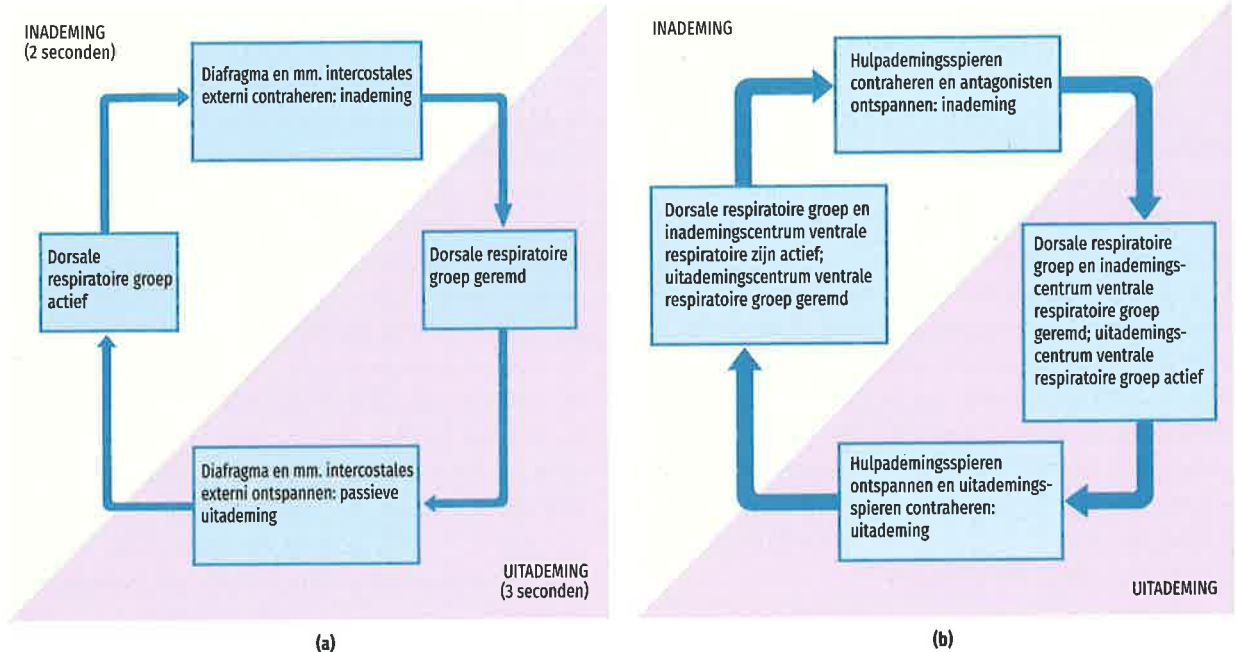
Mechanoreceptoren reageren op veranderingen van het longvolume of op veranderingen van de arteriële bloeddruk. In hoofdstuk 9 zijn verschillende baroreceptoren beschreven die bij de ademhalingsbewegingen zijn betrokken (paragraaf 9.2.3).

De **inademingsreflex** voorkomt dat de longen tijdens een geforceerde ademhaling te veel worden uitgerekt. De mechanoreceptoren die hierbij zijn betrokken, zijn rekreceptoren die worden geprikkeld als de longen zich uitzetten. Sensibele vezels die de longen verlaten, lopen via de n. vagus naar de ademritmecentra. Als het volume van de longen toeneemt, wordt het inademingscentrum van de dorsale respiratoire groep geleidelijk geremd en het uitademingscentrum van de ventrale respiratoire groep wordt gestimuleerd. Daardoor stopt de inademing wanneer de longen hun maximale volume bijna hebben bereikt. Daarna begint de actieve uitademing.

De inademingsreflex functioneert normaal gesproken alleen tijdens de geforceerde uitademing. Deze reflex remt het uitademingscentrum en stimuleert het inademingscentrum wanneer lucht uit de longen wordt geblazen. Hoe kleiner het longvolume, hoe meer het uitademingscentrum wordt geremd. Uiteindelijk stopt de uitademing en begint de inademing.

Hoewel de inademingsreflex en de **uitademingsreflex** bij de normale, rustige ademhaling geen rol spelen, zijn beide reflexen belangrijk bij het reguleren van de geforceerde in- en uitademing bijvoorbeeld tijdens zware lichamelijke inspanning. Samen worden de inademings- en uitademingsreflex de **Hering-Breuerreflex** genoemd, naar de fysiologen die deze reflex in 1865 als eerst hebben beschreven.

De effecten van de baroreceptoren van de sinus caroticus en de sinus aortae op de bloeddruk in de grote bloedsomloop zijn in hoofdstuk 13 beschreven (paragraaf 13.3.2). De output van deze baroreceptoren heeft eveneens invloed op de ademhalingscentra. Als de bloeddruk daalt, neemt de ademhalingsfrequentie toe; als de bloeddruk stijgt, neemt de ademhalingsfrequentie af. Deze aanpassingen zijn het gevolg van de stimulering of remming van de ademhalingscentra door sensorische vezels in de n. glossopharyngeus (IX) en de n. vagus (X).



Figuur 15-15 Basale regelpatronen van de ademhaling

(a) Rustige ademhaling. (b) Geforceerde ademhaling.

KLINISCHE AANTEKENING

Emfyseem en longkanker

Emfyseem en longkanker zijn twee betrekkelijk veelvoorkomende aandoeningen die vaak in verband worden gebracht met roken. Emfyseem is een chronische, progressieve aandoening die gekenmerkt wordt door kortademigheid en het niet verdragen van fysieke inspanning. Het onderliggende probleem is de vernietiging van de alveolaire oppervlakken, waardoor er onvoldoende oppervlak is voor gaswisseling. Het komt er eigenlijk op neer dat de respiratoire bronchioli en alveoli functioneel zijn uitgeschakeld. De alveoli zetten geleidelijk uit en vormen met naastgelegen alveoli grote ruimten die ondersteund worden door bindweefsel zonder capillairen. Wanneer bindweefsel wegvalt, neemt de compliantie toe, waardoor lucht gemakkelijk de longen in- en uitgaat. Het verlies van respiratoir oppervlak beperkt echter de zuurstofopname, zodat men kortademig wordt. Emfyseem wordt in verband gebracht met het inademen van lucht die fijne stofdeeltjes of toxische dampen bevat, zoals sigarettenrook. Genetische factoren kunnen ook invloed hebben op de ontwikkeling van emfyseem. Naar schatting heeft 66 procent van



Gezonde long

Rokerslong

de volwassen mannen en 25 procent van de volwassen vrouwen waarneembare gebieden van emfyseem in hun longen.

Longkanker of *pleuropulmonair neoplasma* is een agressieve groep kwaadaardige gezwellen die in de bronchiën of de alveoli ontstaan. Deze tumoren tasten de epitheelcellen aan die de luchtwegen, de slijmklieren of de alveoli bekleden. Symptomen ontstaan meestal pas als de

gezwollen de luchtstroom beperken of op aangrenzende structuren drukken. Pijn op de borst, kortademigheid, hoesten of een piepende ademhaling en gewichtsverlies zijn veelvoorkomende symptomen. De behandeling is afhankelijk van de cellulaire opbouw van de tumor en van of er metastase (uitzaaiing van tumorcellen) heeft plaatsgevonden. De behandeling kan bestaan uit chirurgie, bestraling of chemotherapie.

In 2018 hebben naar schatting 18,1 miljoen mensen een nieuwe kankerdiagnose gekregen en zijn er 9,6 miljoen patiënten overleden aan de ziekte. De meest voorkomende kankers wereldwijd zijn (in aflopende volgorde): borstkanker, prostaatkanker, longkanker en darmkanker. Europa doet het opvallend slecht. Europeanen maken slechts 9 procent uit van de wereldbevolking, maar stellen wel 23,4 procent van de nieuwe kankerdiagnoses en 20,3 procent van de sterfgevallen.

Reflexen door chemoreceptoren

Chemoreceptoren reageren op chemische veranderingen van het bloed en de cerebrospinale vloeistof (paragraaf 9.2.4). Wanneer deze receptoren worden geprikkeld, neemt de diepte en de snelheid van de ademhaling toe. Receptoren in het glomus caroticum (naast de carotissinus) en het glomus aorticum zijn gevoelig voor de pH, de PCO_2 en PO_2 in het arteriële bloed. Receptoren in de medulla oblongata reageren op de pH en de PCO_2 in de cerebrospinale vloeistof.

De koolstofdioxideconcentratie heeft een veel sterker effect op de ademhalingsactiviteit dan de zuurstofconcentratie. Dit komt doordat de CO_2 -receptoren door een betrekkelijk geringe toename van de arteriële PCO_2 worden geprikkeld, terwijl de arteriële PO_2 meestal niet genoeg daalt om de zuurstofreceptoren te activeren. Onder normale omstandigheden wordt de ademhalingsactiviteit dus door de concentratie van koolstofdioxide gereguleerd. Wanneer de PO_2 in de arteriën daalt, werken de twee receptoren echter samen. Koolstofdioxide wordt gevormd tijdens zuurstofverbruik; dus als de zuurstofconcentraties snel dalen, neemt de koolstofdioxideconcentratie meestal toe. Daardoor kunnen we onze adem niet oneindig inhouden. Zodra de PCO_2 tot een kritiek niveau stijgt, moeten we wel inademen.

De samenwerking tussen de koolstofdioxide- en de zuurstofreceptoren stopt onder ongewone omstan-

digheden. Wanneer iemand eerst diep en volledig inademt, kan hij zijn adem bijvoorbeeld langer inhouden dan normaal, maar dit is erg gevaarlijk. Dat we de adem langer kunnen inhouden, komt niet doordat de zuurstofconcentratie is verhoogd, maar doordat de koolstofdioxideconcentratie is verlaagd. Als de PCO_2 genoeg is gedaald, kan de adem zo lang worden ingehouden dat iemand het bewustzijn verliest als gevolg van een zuurstoftekort in de hersenen, zonder dat diegene ooit de aandrang heeft gevoeld om in te ademen. De chemoreceptoren die de CO_2 -concentraties meten, zijn ook gevoelig voor de pH. Elke aandoening waardoor de pH van het bloed of de CSF (cerebrospinaal vocht) wordt beïnvloed zal invloed hebben op de werking van de ademhaling. Een stijging van de melkzuurconcentratie na lichamelijke inspanning gaat bijvoorbeeld gepaard met een daling van de pH, waardoor de ademhalingsactiviteit wordt gestimuleerd.

KLINISCHE AANTEKENING

Hypercapnie

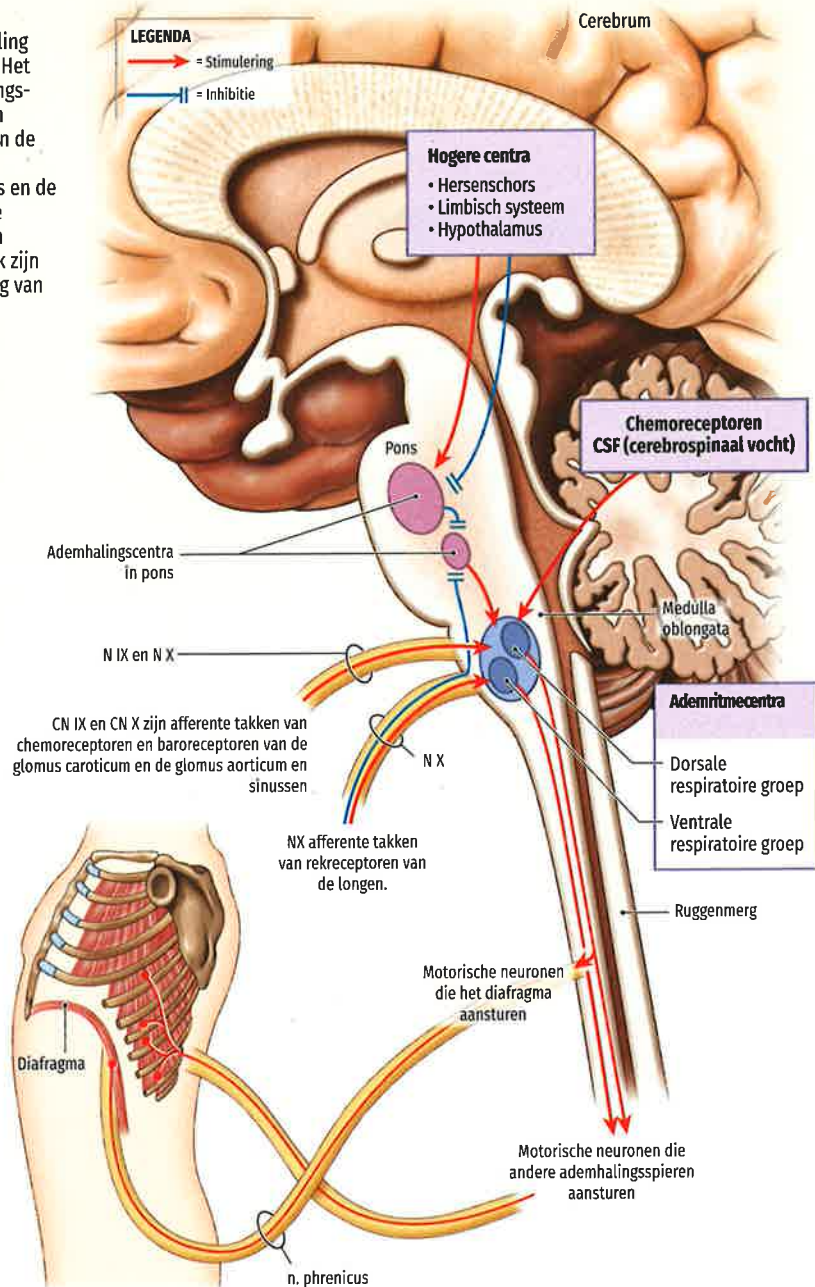
Onder **hypercapnie** wordt een verhoging van de PCO_2 van het arteriële bloed verstaan. Door een dergelijke verandering worden de chemoreceptoren in het glomus caroticum en het glomus aorticum geprikkeld. De chemoreceptoren van de medulla oblongata worden ook gestimuleerd, doordat koolstofdioxide de bloed-hersenbarrière tamelijk snel passeert. Deze receptoren stimuleren de ademhalingscentra tot **hyperventilatie**, een snellere en diepere ademhaling. De ademhalingsfrequentie neemt toe. Bij elke ademhaling verplaatst zich meer lucht in en uit de longen. Doordat per minuut meer lucht in en uit de alveoli gaat, neemt de koolstofdioxideconcentratie in de alveoli af, waardoor de diffusie van koolstofdioxide vanuit de longcapillairen wordt bevorderd. Hyperventilatie leidt geleidelijk aan tot hypercapnie, een abnormaal lage PCO_2 . Als de PCO_2 in de arteriën onder het normale niveau daalt, neemt de activiteit van de chemoreceptoren af en daalt de ademhalingsfrequentie. Deze **hypoventilatie** gaat door totdat de PCO_2 tot een normale waarde is gestegen.

15.8.4 Regeling door hogere centra

Hogere centra beïnvloeden de ademhaling via de ademhalingscentra van de pons en door directe aan-

Ademhalingscentra en reflexmatige regulering

De regulering van de ademhaling omvat verschillende niveaus. Het grootste deel van de reguleringsactiviteiten vindt automatisch plaats. Op deze afbeelding zijn de locaties van de belangrijkste ademhalingscentra in de pons en de medulla oblongata te zien. De relaties tussen deze centra en andere factoren die belangrijk zijn voor de reflectorische regulering van de ademhaling worden ook weergegeven. Routes voor de bewuste controle over de ademhalingspijpen zijn niet afgebeeld.



sturing van de ademhalingspijpen. De contracties van ademhalingspijpen kunnen bijvoorbeeld door de wil worden onderdrukt of versterkt; deze regulering is noodzakelijk tijdens spreken of zingen. De diepte en de snelheid van de ademhaling veranderen ook bij activering van de centra die zijn betrokken bij woede, eten of seksuele opwinding. Deze veranderingen, die door het limbische systeem worden aangestuurd, vinden op onbewust niveau plaats. In figuur 15-16 • staan de factoren samengevat die betrokken zijn bij het reguleren van de ademhaling.

KLINISCHE AANTEKENING

Wiegendood

Wiegendood, ook wel sudden infant death syndrome of **SIDS** genoemd, komt tegenwoordig steeds minder voor door de verschillende preventiecampagnes 'veilig slapen'. In 1995 overleden nog 50 Nederlandse baby's en 64 Vlaamse baby's. In 2017 was dat aantal voor Nederland gedaald tot 12. In Vlaanderen is dit aantal in 2016 verder gezakt tot 14 per jaar. De meeste gevallen van wiegendood vinden plaats tussen middernacht en 9:00 uur 's morgens, laat in de herfst of in de winter. Het gaat voornamelijk om kinderen van 2 tot 4 maanden oud. Uit ooggetuigenverslagen blijkt dat het slapende kind plotseling stopt met ademen, blauw wordt en zich ontspant. Er zijn verschillende theorieën over de oorzaken van wiegendood: het slapen op de buik staat boven aan de lijst. Ook genetische factoren lijken een rol te spelen, maar het relatieve belang van andere factoren is nog niet duidelijk. De leeftijd van overlijden komt overeen met een periode waarin verbindingen worden gevormd tussen de ademhalingscentra en andere gedeelten van de hersenen. Gesuggereerd wordt dat wiegendood het gevolg is van een probleem met deze verbindingen, waardoor het reflectorische ademhalingspatroon wordt verstoord.

INZICHTVRAGEN

- 23 Zijn perifere chemoreceptoren meer of minder gevoelig voor de koolstofdioxideconcentratie dan voor de zuurstofconcentratie? Waarom?
- 24 Welke groep ademhalingsreflexen wordt door zware lichamelijke inspanning gestimuleerd?
- 25 Johnny zegt tegen zijn moeder dat hij zijn adem gaat

inhouden tot hij blauw aanloopt en doodgaat. Moet zij zich zorgen maken?

De antwoorden zijn te vinden in bijlage 1 achter in het boek.

15.8.5 Verandering van de ademhaling bij de geboorte

Tussen het ademhalingsstelsel van een foetus en een pasgeborene bestaat een aantal belangrijke verschillen. Voor de bevalling zijn de longvaten samengedrukt, waardoor de weerstand in de aa. pulmonales hoog is. De borstkas is samengedrukt en de longen en luchtwegen bevatten slechts een kleine hoeveelheid vloeistof in plaats van lucht.

Onmiddellijk na de geboorte haalt de zuigeling heel diep adem door een krachtige samentrekking van het diafragma en de uitwendige tussenribspieren. De ingeademde lucht komt de luchtwegen met genoeg kracht binnen om de oppervlaktetensioning die zich daar bevindt te overwinnen en de gehele bronchusboom en het grootste deel van de alveoli op te blazen. Door dezelfde daling van de druk waardoor lucht in de longen wordt gezogen, wordt bloed in de kleine bloedsomloop gezogen. Bij de uitademing die volgt, worden de longen niet helemaal leeggemaakt, doordat de borstkas niet naar zijn eerdere, volledig ineengedrukte toestand terugkeert. Door kraakbeen en bindweefsel worden de luchtwegen opengehouden en het surfactant dat de oppervlakken van de alveoli bedekt, zorgt ervoor dat ze niet helemaal worden samengedrukt. Door de volgende ademhalingen worden de alveoli helemaal opgeblazen. Pathologen maken soms gebruik van deze lichamelijke veranderingen om te bepalen of een pasgeborene voor de geboorte is gestorven of kort daarna. Voorafgaand aan de eerste ademhaling zijn de longen volledig met amnionvocht gevuld en als ze in water zouden worden gebracht, zouden ze zinken. Na de eerste ademhaling bevatten de longen zelfs na de uitademing genoeg lucht om ze drijvende te houden.

15.9 De effectiviteit van de ademhaling neemt bij veroudering af

Leerdoel: De veranderingen van het ademhalingsstelsel beschrijven die zich voordoen bij veroudering.

Bij ouderen vermindert de efficiëntie van het ademhalingsstelsel door een combinatie van veel onderling samenhangende factoren. Twee daarvan zijn het vermelden waard:

1. De bewegingen van de borstkas worden door verschillende veranderingen beperkt. Dit zijn onder meer artrose van de botverbindingen ter hoogte van de ribben en afgenomen flexibiliteit van het ribkraakbeen en verzwakking van de spieren als gevolg van het ouder worden. (Deze achteruitgang van skelet en spieren wordt gecompenseerd door een toename van de compliantie van de longen, die ontstaat doordat de weefsels bij veroudering minder elastisch worden.) De longventilatie en de vitale capaciteit worden kleiner doordat de borstkas stijver wordt en de bewegingsmogelijkheden afnemen. Hierdoor zijn ouderen minder goed in staat tot lichamelijke prestaties en neemt het vermogen tot lichamelijke inspanning af.
2. Bij mensen ouder dan vijftig is enige mate van emfyseem normaal. Deze aandoening is echter ernstiger na een levenslange blootstelling aan sigarettenrook en andere stoffen die de ademhalingsorganen prikkelen. Uit vergelijkende onderzoeken van niet-rokers en mensen die gedurende verschillende lange perioden hebben gerookt, blijkt duidelijk dat het roken een negatief effect heeft op het rendement van de ademhaling.

INZICHTVRAAG

26. Beschrijf twee leeftijdsgerelateerde veranderingen die tezamen het rendement van het ademhalingsstelsel verlagen.

Het antwoord is te vinden in bijlage 1 achter in het boek.

15.10 Het ademhalingsstelsel voert zuurstof aan en verwijdert koolstofdioxide uit andere orgaanstelsels

Leerdoel: Voorbeelden geven van interacties tussen het ademhalingsstelsel en andere orgaanstelsels die tot nu toe zijn behandeld.

In figuur 15.17 zie je hoe het ademhalingsstelsel interacties aangaat met de andere orgaanstelsels die tot nu toe zijn behandeld. De belangrijkste functionele relaties tussen het ademhalingsstelsel en de huid, het beenderstelsel, het spierstelsel, het zenuwstelsel, het hormoonstelsel, het cardiovasculaire stelsel en het lymfestelsel worden getoond. Merk op dat het ademhalingsstelsel veel structurele en functionele verbindingen heeft met het cardiovasculaire stelsel.

INZICHTVRAGEN

- 27 Benoem de belangrijkste functie die het ademhalingsstelsel vervult voor alle andere orgaanstelsels die tot nu toe zijn behandeld.
- 28 Op welke wijze ondersteunt het zenuwstelsel de functies van het ademhalingsstelsel?

De antwoorden zijn te vinden in bijlage 1 achter in het boek.

HOOFDSTUKOVERZICHT

BELANGRIJKE TERMEN

- Ademhalingscyclus** Eén ademhaling, bestaat uit een inademing en een uitademing
- Ademhalingsstelsel** Alle structuren die zijn betrokken bij de fysieke verplaatsing van lucht in en uit de longen en bij de gaswisseling
- Ademnoodsyndroom** Syndroom dat wordt veroorzaakt doordat er te weinig surfactant wordt aangemaakt ter hoogte van de alveoli, waardoor veel inspanning moet worden geleverd om de samenge-drukte longen met lucht te vullen
- Alveolaire macrofagen** Macrofagen ter hoogte van de alveoli
- Alveolaire ventilatie** De verplaatsing van lucht in en uit de alveoli
- Alveolus/alveoli** Blind eindigende uiteinden van de bronchusboom, bekleed met een enkelvoudig plavei-selepitheel en omgeven door een capillairnet; plaats waar gassen met het bloed worden uitgewisseld
- Angiotensine I** Het hormoon dat wordt geproduceerd door de activering van angiotensinogeen door renine; angiotensine-converterend enzym (ACE) zet angioten-sine I om in angiotensine II in longcapillairen
- Anoxie** Zuurstoftekort in de weefsels
- Astma** Omkeerbare contractie van gladde spieren rond de luchtwegen, vaak veroorzaakt door een aller-gische reactie
- Bicarbonaationen** Anionen die deel uitmaken van het koolzuur-bicarbonaatbuffersysteem
- Bronchiolus** De kleinste vertakkingen van de lucht-wegen met een diameter van ongeveer 1 mm
- Bronchodilatatie** Verwijding van de bronchiën, kan door sympathische stimulering worden veroorzaakt
- Bronchus/bronchiën** Een van de takken van de bronchusboom die zich bevindt tussen de trachea en de bronchiolen
- Bronchusboom** De trachea, bronchiën en bronchio-len
- Carbaminohemoglobine** Hemoglobine die met kool-stofdioxidemoleculen gebonden is
- Cardiopulmonale resuscitatie (CPR)** Methode om de ademhalingsfunctie en de circulatie kunstmatig op gang te houden
- Cartilago thyroidea** Schildkraakbeen
- Centra voor het ademritme** Bevinden zich in de medulla oblongata en bepalen het ritme van de adem-haling
- Compliantie** Een maat voor de elasticiteit en het ver-mogen van uitzetten van de longen
- Cystic Fibrosis (CF)** Een erfelijke aandoening die door een defect ter hoogte van het slijmvlies van de luchtwegen wordt veroorzaakt; de bekerzellen secrete-ren een dik, stroperig slijm dat niet door de trilharen van de luchtwegen kan worden verplaatst; de verstopte luchtwegen bemoeilijken de ademhaling en doordat de normale afweer van de luchtwegen is uitgeschakeld ontstaan veel bacteriële infecties
- Ductuli alveolares** Een onderdeel van het respi-ratorische stelsel, waar gasuitwisseling doorgaat; de ductuli alveolares eindigen in longtrechters, geza-menlijke compartimenten die uit vele afzonderlijke alveoli bestaan
- Emfyseem** Een chronisch progressieve aandoening waarbij de oppervlakken van de alveoli door bepaalde factoren worden vernietigd; mogelijk door het inha-leren van fijne deeltjes of giftige gassen, zoals die in sigarettenrook
- Epiglottis** Langwerpige weefselflap, versterkt door kraakbeen, die is verbonden met het dorsale en bo-venste oppervlak van het schildklierkraakbeen; tijdens het slikken vouwt ze zich over de toegang tot het strottenhoofd; strotklepje
- Expiratoir reservevolume (ERV)** Tijdens een nor-male ademhalingscyclus bedraagt het adembvolume ongeveer 500 ml, de hoeveelheid lucht die aan het einde van zo'n ademhalingscyclus zou kunnen wor-den uitgeblazen, ongeveer 1000 ml, is het expiratoir reservevolume
- Externe respiratie** Alle processen die betrokken zijn bij de uitwisseling van zuurstof en koolstofdioxide tussen de interstitiële vloeistoffen van het lichaam en het externe milieu
- Farynx** De keel, een gespierde doorgang, die deel uitmaakt van zowel het spijsverteringskanaal als de luchtwegen