

# **Respirationsfysiologi**

Søren Lyager

**FADL'S FORLAG**



# Respirationsfysiologi

Søren Lyager



FADL'S FORLAG

*Respirationsfysiologi*

Søren Lyager

© 2010 FADL's Forlag

ISBN 978-87-7749-544-1

Forlagsredaktion: Thomas Bo Thomsen

Cover og principlayout: Anne Mette Dixen, Dixen Design

Medicinske illustrationer: Birgitte Lerche, Lerches Tegnestue

Grafer: 2Krogh A/S

Opsætning: Pernille Maack

Tryk: Special-Trykkeriet A/S

Tak til Maribo Medico og Spiropharma A/S for økonomisk støtte til udgivelsen.

Mekanisk, fotografisk eller anden gengivelse af denne bog eller dele heraf er kun tilladt i overensstemmelse med overenskomst mellem Undervisningsministeriet og Copy-Dan. Enhver anden udnyttelse uden forlagets skriftlige samtykke er forbudt ifølge gældende dansk lov om ophavsret.

FADL's Forlag  
Blegdamsvej 26  
2200 København N  
[www.forlag-fadl.dk](http://www.forlag-fadl.dk)  
[forlag@fadl.dk](mailto:forlag@fadl.dk)

# INDHOLDSFORTEGNELSE

<b>INDLEDNING</b> .....	<b>12</b>
"RULLEN" .....	12
BRUGSANVISNING .....	12
KORT OM RESPIRATIONENS FYSIOLOGI .....	13
<b>1. LUFTVEJENE</b> .....	<b>16</b>
DET SKADELIGE RUM (DEAD SPACE, $V_D$ ) .....	16
En model for luftvejenes forgrening .....	16
Beregninger af det anatomisk skadelige rums størrelse .....	18
Det transmurale tryks betydning for det skadelige rums størrelse ..	18
Betydning af tonus i den glatte muskulatur .....	19
Bronkietræets blodforsyning .....	20
RENSE, FUGTE OG TEMPERERE .....	20
Rense .....	21
Fugte og temperere .....	22
APPARAT DEAD SPACE .....	22
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 1 .....	24
<b>2. LUNGERNES VENTILATION</b> .....	<b>26</b>
LUNGERNES VENTILATION .....	26
INSPIRATIONSLUFTENS SAMMENSÆTNING .....	26
Atmosfærisk luft .....	26
Ændring i inspirationsluftens sammensætning .....	27
VENTILATIONENS STØRRELSE .....	27
Måling af ventilationens størrelse .....	27
ATPS-BTPS .....	27
DEN ALVEOLÆRE VENTILATION .....	28
Det skadelige rums indflydelse på den alveolære ventilation .....	28
Tyngdekraftens indflydelse på fordelingen af den alveolære ventilation	29
ALVEOLELUFTENS SAMMENSÆTNING .....	29
Beregning af $P_A O_2$ .....	30
Beregning af $P_A CO_2$ .....	30
Måling af $P_A O_2$ og $P_A CO_2$ .....	30
HYPO- OG HYPERVENTILATION .....	32
Hypoventilation .....	32
Hyperventilation .....	35
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 2 .....	36
<b>3. ALVEOLERNES FYSIOLOGI</b> .....	<b>38</b>
ALVEOLERNES STRUKTUR .....	38
INTERDEPENDENCE .....	39
SURFAKTANT .....	40
Overfladespænding .....	40

Tørre alveoler .....	41
Hysteresse .....	42
SAMMENFATNING .....	43
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 3 .....	44
<b>4. LUNGERNES PERFUSION .....</b>	<b>46</b>
LUNGERNES BLODGENNEMSTRØMNING .....	46
Perfusionens størrelse .....	46
Måling af lungernes perfusion .....	46
LUNGERNES BLODVOLUMEN .....	47
Ændring i det intratorakale blodvolumen .....	47
Måling af lungernes blodvolumen .....	47
TRYKFORHOLDENE I LUNGEKREDSLØBET .....	48
Regulering af blodtrykket i lungekredsløbet .....	48
Trykmåling i lungekredsløbet .....	49
LUNGEKARMODSTANDEN .....	51
Måling af lungekarmodstanden .....	51
Lungevolumens betydning for karmodstanden .....	52
Tyngdekraftens betydning for perfusionens fordeling i lungerne ..	53
Karmodstanden under muskelarbejde .....	55
VENO-ARTERIELLE SHUNTER .....	56
Veno-arterielle shunter i lungerne .....	56
Beregning af den totale shunts størrelse .....	58
Estimat af den pulmonale og den alveolære shunts relative størrelse	58
LUNGERNES IKKE-RESPIRATORISKE FUNKTIONER .....	59
Lymfe- og væskedannelse i lungerne .....	59
Lungerne som filter .....	60
Lungernes produktion og behandling af aktive stoffer .....	60
Lungernes eget oxygenforbrug .....	61
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 4 .....	62
<b>5. GRADIENTER I LUNGERNE .....</b>	<b>64</b>
DEN ALVEOLO-ARTERIELLE OXYGENTENSIONSGRADIENT ( $P(A-a)O_2$ )	65
Ventilation/perfusions-forholdet .....	65
Ventilation/perfusions-misforholdets betydning for oxygengradienten	68
Diffusionsbarrierens betydning for oxygengradienten .....	73
DEN ARTERIO-ALVEOLÆRE KARBONDIOXIDGRADIENT ( $P(a-A)CO_2$ )	73
DEN ARTERIO-ALVEOLÆRE NITROGENGRADIENT ( $P(a-A)N_2$ ) .....	74
$\dot{V}_{O_2}$ , $\dot{V}_{CO_2}$ , R OG RQ .....	75
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 5 .....	76
<b>6. DIFFUSION .....</b>	<b>78</b>
LUNGEDIFFUSION .....	78
Diffusion i luft .....	78
Diffusion i membraner og væske .....	79
Erytrocyttens rolle .....	81

OM LUNGEDIFFUSIONSKAPACITETEN FOR OXYGEN ( $D_L$ )	82
Membrankomponenten	82
Blodkomponenten ( $V_c \cdot \theta$ )	83
PERFUSIONS- OG DIFFUSIONSBEGRÆNSNING	83
Perfusionsbegrænsning	83
Diffusionsbegrænsning	84
Oxygen	84
MÅLING AF LUNGEDIFFUSIONSKAPACITETEN	85
DIFFUSION I DE PERIFERE VÆV	85
LUFTABSORPTION FRA AFLUKKEDE HULRUM	86
GASLAGRE I KROPPEN	88
Oxygen	88
Karbondioxid	88
Nitrogen	88
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 6	89
<b>7. BLODET</b>	<b>92</b>
OXYGEN (ILT, $O_2$ ) I BLODET	92
Fysisk opløst oxygen	92
Kemisk bundet oxygen	92
HYPOXI	94
KARBONDIOXID (KULDIOXID, $CO_2$ ) OG PH I BLOD	97
Fysisk opløst og kemisk bundet karbondioxid	97
Hyper- og hypokapni	100
KLINISK BEDØMMELSE AF SYRE-BASE-FORSTYRRELSER	100
Definitioner og normalværdier	100
Eksempel på analyse	102
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 7	103
<b>8. VENTILATIONENS REGULERING</b>	<b>106</b>
SENSORER	106
Virkning af $CO_2$	106
Virkning af hypoxi	106
SAMMENFATNING	107
Receptorer i lungerne	108
Receptorer i respirationsmuskler	108
KONTROLENHEDER	108
EFFEKTORER	109
Respirationsmuskulaturen	110
ISOLERET EFFEKT	110
Hypoxæmi	110
Hyperoxi	111
Hyperkapni	111
Hypokapni	112
Acidose og alkalose	112

INTERAKTION .....	112
CO <sub>2</sub> og O <sub>2</sub> .....	112
CO <sub>2</sub> og pH .....	113
RESPIRATIONSMØNSTERET .....	113
Det normale respirationsmønster .....	113
Nyttige ændringer i respirationsmønsteret .....	113
Søvn .....	114
APNØ .....	115
RESPIRATIONSREGULERING UNDER MUSKELARBEJDE .....	115
SAMMENFATNING .....	117
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 8 .....	118
<b>9. THORAX' OG LUNGERNES MEKANISKE FORHOLD – DE STATISKE EGENSKABER .....</b>	<b>120</b>
LUNGERNES VENTILATION KRÆVER BEVÆGELSE AF THORAXVÆGGEN, DIAFRAGMA OG LUNGEVÆVET .....	120
THORAXVÆGGEN OG PLEURA .....	120
Costae, sternum og columna .....	120
Respirationsmusklerne .....	121
Pleurahulen .....	124
THORAX' OG LUNGERNES ELASTISKE EGENSKABER .....	124
Måling af lungevolumina .....	124
Lungevolumina og lungekapaciteter .....	125
Måling af tryk .....	129
Registrering og plot af volumen-tryk-kurver .....	131
Analyse af kurveforløbene .....	133
Dynamisk compliance .....	134
Specifik compliance .....	134
ENERGIER .....	135
Efter en eksspiration .....	136
Efter en inspiration .....	136
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 9 .....	138
<b>10. THORAX' OG LUNGERNES DYNAMISKE EGENSKABER .....</b>	<b>140</b>
LUFTSTRØMNING .....	140
Laminær og turbulent strømningsform .....	140
De drivende tryk .....	141
Måling af luftvejsmodstanden (Raw) .....	141
RESPIRATIONSARBEJDET .....	144
Respirationsløjfen .....	144
Det visuelle indtryk .....	145
DEN FORCEREDE EKSSPIRATION .....	146
TEORETISKE OVERVEJELSER .....	146
FLOW-VOLUMEN-KURVEN .....	149
MEFV-kurvens udseende .....	149
Kompressionsvolumen .....	150
He-O <sub>2</sub> -kurver .....	150

PEAK FLOW .....	151
SPIROGRAMMET .....	152
FEV <sub>1</sub> .....	153
Air trapping .....	153
MVV .....	154
TIDSKONSTANTEN.....	154
Lungemodeller.....	154
Dynamisk compliance .....	156
Pendulluft .....	157
Nitrogrammets fase 3 .....	157
Den optimale respirationsfrekvens .....	157
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 10 .....	159
<b>11. USÆDVANLIGE OMGIVELSER .....</b>	<b>162</b>
BJERGE.....	162
Akklimatisering .....	164
Akklimatisering har en pris .....	164
Sammenfatning .....	165
DYKNING .....	165
Fri dykning (dykning uden hjælpemidler) .....	165
Besvimelse under vandet .....	165
Dykning med hjælpemidler .....	166
Dykkersyge (trykfoldssyge) .....	166
NITROGEN, OXYGEN OG HELIUM .....	167
HYPERBAR OXYGEN .....	167
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 11 .....	168
<b>12. VARIATIONER I LUNGEFUNKTIONEN .....</b>	<b>170</b>
NORMALPERSONVÆRDIER .....	170
En holdbar konklusion .....	171
NORMALE ÆNDRINGER I LUNGEFUNKTIONEN .....	171
Før og umiddelbart efter fødslen .....	171
Børn og unge .....	172
Voksne, mænd og kvinder .....	172
Gravide .....	172
Gamle .....	172
Etniske forskelle .....	173
Variationer i løbet af dagen og året .....	173
Fysisk træning .....	173
Svært overvægtige .....	173
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 12 .....	176
<b>13. MÅLEMETODER .....</b>	<b>178</b>
BESTEMMELSE AF STATISKE LUNGEFUNKTIONSVÆRDIER .....	178
Spirometri.....	178
Bestemmelse af det anatomisk skadelige rums volumen.....	178
Bestemmelse af TGV ved nitrogenfortynding .....	180
Bestemmelse af CV ved <i>single breath</i> -nitrogenudvaskning .....	180

BESTEMMELSE AF DYNAMISKE LUNGEFUNKTIONSVÆRDIER . . . .	183
FEV <sub>1</sub> . . . . .	183
PEF <sup>1</sup> . . . . .	183
Dynamisk bestemmelse af alveoletryk (Palv) . . . . .	184
Pneumotachografi . . . . .	185
Kropspletysmografi . . . . .	187
Bestemmelse af TGV ved hjælp af kropspletysmografi . . . . .	188
FORCEREDE OSCILLATIONER . . . . .	189
MÅLING AF MINUTVENTILATION M.M. . . . .	190
Kalibrering af volumen, flow og tryk . . . . .	190
Kalibrering af volumenmålere . . . . .	191
Kalibrering af flowmålere . . . . .	191
Kalibrering af trykmålere . . . . .	192
NITROGENUDVASKNINGSKURVER . . . . .	192
Udvaskningstid og halveringstid . . . . .	192
Kompartementsanalyse . . . . .	192
REGIONAL LUNGEFUNKTIONSUERSØGELSE . . . . .	194
Den regionale ventilation . . . . .	194
Den regionale perfusion . . . . .	194
BLODTRYKSMÅLING I LUNGEKREDSLØBET . . . . .	195
BLODPRØVER . . . . .	195
Lungeveneblood . . . . .	195
Arterieblood . . . . .	196
Veneblood . . . . .	196
Blandet veneblood . . . . .	196
TRANSKUTANE MÅLINGER . . . . .	196
P <sub>tc</sub> O <sub>2</sub> og P <sub>tc</sub> CO <sub>2</sub> . . . . .	196
Pulsoxymetri . . . . .	196
LUFTPRØVER . . . . .	197
SPØRGSMÅL TIL KAPITEL 13 . . . . .	198
<b>14. APPENDIKS . . . . .</b>	<b>200</b>
MÅLEENHEDER FOR TRYK . . . . .	200
Omsætningstabel mellem enhederne mmHg, kPa og cm H <sub>2</sub> O . . . . .	200
SYMBOLER . . . . .	200
Symboler brugt i respirationsfysiologien . . . . .	201
Regler for anvendelse af symbolerne . . . . .	201
Eksempler på sammensatte symboler . . . . .	201
DAMPFORM OG LUFTFORM . . . . .	202
Temperaturens indflydelse på mættet vanddamp . . . . .	203
Trykkets indflydelse på mættet vanddamp . . . . .	203
Trykkets indflydelse på gasvolumen . . . . .	203
Temperaturens indflydelse på gasvolumen . . . . .	204
ATPS, BTPS OG STPD . . . . .	204
BTPS . . . . .	204
STPD . . . . .	205

UDLEDNING (OG OMTALE) AF NOGLE RESPIRATIONS- FYSIOLOGISKE LIGNINGER . . . . .	205
Det skadelige rums størrelse (Bohrs ligning) . . . . .	205
Hjertets minutvolumen (Ficks ligning) . . . . .	206
Den veno-arterielle shunts størrelse . . . . .	207
Oxygenoptagelseshastigheden . . . . .	207
Karbondioxidudskillelseshastigheden . . . . .	208
Den respiratoriske udvekslingskvotient . . . . .	208
Alveoleluftligningen i sin udvidede form . . . . .	208
Beregning af $P_A\text{CO}_2$ . . . . .	209
Lungediffusionskapaciteten (DL) . . . . .	209
Compliance ( $C_{\text{tot}}$ ) . . . . .	210
<b>15. SVAR PÅ SPØRGSMÅL . . . . .</b>	<b>212</b>
<b>ORDFORKLARING . . . . .</b>	<b>222</b>
<b>STIKORDSREGISTER . . . . .</b>	<b>226</b>

# INDLEDNING

## ”RULLEN”

Hver morgen inden afdelingskonferencen på Kardiologisk afdeling på Århus Kommunehospital gennemgik overlæge, dr.med. Ernst Boye ”Rullen” for mig. ”Rullen” var en tegneserie, der handlede om respirationens fysiologi. Den var optegnet på en rulle bordpapir. Serien var baseret på Julius Comroes klassiske værk *The Lung* og med mange tegninger inspireret af John B. West. Vi tog en halv time hver morgen i et halvt år. Så kunne jeg lære det! Det var pædagogisk, inspirerende og morsomt.

Denne bog er mest for medicinstuderende. Derfor er der – indsat som ”kliniske blokke” – omtalt en del kliniske situationer i tilknytning til de fysiologiske fænomener, overvejende med det formål at illustrere, at teori og praksis hænger sammen. Det samme gælder omtalen af normale og sygelige variationer i lungernes funktion. På grund af den relativt beskedne plads, der er afsat til øvelseskurser i fysiologi ved de tre fakulteter, er målemetoderne gennemgået grundigere end i andre gængse fysiologibøger.

I blade og i elektroniske medier finder man jævnligt udokumenterede, alternative forslag til, hvordan man bør trække vejret for at forbedre sit helbred. Det er mit håb, at bogen også kan give forståelse for, at organismen hos alle lungeraske (og flertallet af lungesyge) selv er i stand til meget fint at regulere vejtrækningen optimalt.

Jeg har valgt ikke at bruge betegnelserne ”fysiologisk skadeligt rum” og ”fysiologisk shunt”, men bruger i stedet betegnelserne ”totalt skadeligt rum” og ”totalt shunt”. Jeg har endvidere valgt at bruge de traditionelle, gammeldags enheder for tryk: mmHg og cm H<sub>2</sub>O. Disse enheder er anvendt i de nyeste lærebøger, der omhandler respirationens fysiologi (J.B. West, 2008; Boron & Boulpaep, 2009). De er fortsat dominerende i klinikken. Omregning mellem enheder er beskrevet i bogens appendiks.

Også andre end Ernst Boye har inspireret min interesse for respirationens fysiologi, blandt andre lektor, dr.med. Noe Næraa og docent, dr.med. Ole Find Pedersen, begge tidligere ansat ved Fysiologisk Institut ved Aarhus Universitet. I en lang periode var fysioterapeut, med.dr. Birgit Steffensen, Muskelsvindfonden, en inspirerende samarbejdspartner. Den opbakning, jeg under udarbejdelsen af denne bog har fået fra stud.med. Rolf Blauenfeldt, har været opmuntrende og enestående. Min datter og svigersøn, Mette og Ole, har bidraget med en sproglig gennemgang af manuskriptet. Jeg vil derudover gerne takke Peter Norsk, professor dr.med., ved Biomedicinsk Institut, Københavns Universitet, samt Peter Bie, professor, dr.med., og Pernille B. Lærkegaard Hansen, lektor, begge Syddansk Universitet, som venligst har læst og kommenteret manuskriptet. Desuden vil jeg gerne sende en stor tak til Spiropharma A/S og Maribo Medico, som gavmildt har støttet bogen økonomisk.

## BRUGSANVISNING

Før hvert kapitel er der en oversigt over kapitlets indhold, som kan bruges som skabelon ved repetition, fx i eksamenssammenhæng. Klinisk relevante forhold er samlede i ”kliniske blokke”. Efter alle kapitler er der nogle spørgsmål i

relation til kapitlets indhold. Disse er relevante i eksamenssammenhæng og skulle gerne kunne besvares af den studerende. Svar på spørgsmålene findes bagest i bogen. Svarene er dog holdt i en kortfattet stil og må derfor ikke opfattes som hverken modelbesvarelser eller rettevejledninger. Centrale ord og begreber findes oplistet sidst i bogen.

## KORT OM RESPIRATIONENS FYSIOLOGI

Lungernes opgave er ved hjælp af ventilationen at forsyne organismen med oxygen (oxygenoptagelseshastigheden) og fjerne karbondioxid (karbondioxidudskillelseshastigheden) i et tempo, der under alle forhold sikrer et optimalt indre miljø med hensyn til  $O_2$ ,  $CO_2$  og  $H^+$ .

Kan lungerne ikke klare denne opgave, taler man om respirationsinsufficiens. Andre organer, primært hjertet, kredsløbet, nyrerne og nervesystemet, deltager aktivt i denne proces.

Oxygenoptagelsen og karbondioxidudskillelsen foregår over den alveolo-kapillære membran dybt nede i lungerne.

Idet inspirationsluften passerer gennem de øvre luftveje, bliver den rensat, fugtet og tempereret. Her foregår der ingen optagelse af oxygen eller udskillelse af karbondioxid. Derfor kaldes de øvre luftveje også "skadeligt rum" eller *dead space*.

Under indåndingen (inspirationen) transporteres oxygen fra omgivelserne ned til alveolerne, og under eksspirationen transporteres karbondioxid med eksspirationsluften fra alveolerne ud til luften omkring os. Dette luftskifte kaldes lungernes ventilation.

For at det venøse blod, der tilføres lungerne, kan blive arterialiseret (få tilført oxygen og fjernet karbondioxid), må der på samme tid foregå to modsatrettede transporter: Oxygenmolekylerne skal passere fra alveolerne over den alveolo-kapillære membran, gennem blodplasmaet og hen til og ind i erythrocytterne. Her bliver størstedelen kemisk bundet til hæmoglobin. Noget oxygen forbliver dog fysisk opløst i blodets vandfase. Modsat må karbondioxid passere fra blodet gennem alveolo-kapillær-membranen til alveolerne.

Denne transport af oxygen og karbondioxid over membranen kræver ikke energitilførsel, men er passiv. Processen kaldes diffusion.

Blodets passage fra højre hjertehalvdel gennem arteria pulmonalis, lungekapillærene og venae pulmonalis kaldes lungernes perfusion. Lungernes perfusion er nødvendig for transporten af oxygen fra alveolerne ud til cellerne og for karbondioxidtransporten fra cellerne frem til alveolerne.

Den mængde luft, der når ned i alveolerne (den alveolære ventilation), skal stå i et rimeligt forhold til den mængde blod, der passerer omkring alveolerne i lungekapillærene (lungernes ventilation/perfusions-forhold). Hvis nogle alveoler overventileres, opstår der alveolære "skadelige rum", hvis andre underventileres, opstår der alveolære "shunter".

Hos alle tilføres der små mængder venøst blod til det arterialiserede. Dette blod kommer fra små vener, der indmunder i venae pulmonalis og i venstre hjertehalvdel. Dette kaldes anatomiske veno-arterielle shunt. Det betyder, at selv normale lunger ikke er perfekte.

Lungerne ventileres ved hjælp af respirationsmusklerne, der således udfører et arbejde, respirationsarbejdet. Størrelsen af dette arbejde afhænger af, hvor

stor modstand musklerne skal overvinde. Denne modstand består af: 1) en modstand mod luftens strømning gennem luftvejene (strømningsmodstanden) og 2) en modstand som følge af lungernes og brystkassens elastiske egenskaber (den elastiske modstand eller compliance).

Ventilationen er reguleret efter de vekslende krav (hvile, muskelarbejde osv.), for at der kan være et rimeligt forhold mellem oxygenbehov og oxygen-tilførsel samt karbondioxidproduktion og karbondioxidudskillelse. Ventilationens regulering foregår ved hjælp af respirationscenteret, der befinder sig i medulla oblongata. Respirationscenteret reagerer på ændringer i blodets pH samt oxygen- og karbondioxidindhold. Falder oxygenindholdet og pH, og/eller stiger karbondioxidindholdet i blodet, vil respirationscenteret øge antallet af impulser (via nervesystemet) til respirationsmusklerne, således at ventilationen øges, indtil man atter nærmer sig det normale oxygen- og karbondioxidindhold i blodet.

For at danne sig et indtryk af om lungerne fungerer tilfredsstillende, kan man tage en arterieblodprøve og bestemme respirationstal. Oxygeneringen kan bestemmes ved at måle oxygentension og oxygenmætning (saturation) og udskillelsen af karbondioxid ved at bestemme karbondioxidtension, pH og standard bikarbonat eller *base excess*.

Mange af lungernes delfunktioner kan testes. Testresultaterne sammenlignes med normalpersonværdier for at afgøre den øjeblikkelige status eller konstatere eventuelle ændringer over tid.

*Søren Lyager  
Læge, tidligere lektor ved Fysiologisk Institut,  
Aarhus Universitet*