

Ergospirometri vid lungsjukdom och vid dyspnéutredning SFE-24

Peer Blom
Klinisk fysiologi och Medicincentrum/lungsektionen
NUS
Peer.Blom@regionvasterbotten.se

Indikationer för ergospirometri

Diagnostisk

- Dyspné och/eller ansträngningsintolerans av oklar orsak

Prognostisk / Uppföljande

- Hjärtsvikt (både HFrEF och HFNEF)
- GUCh = ACHD
- Lungsjukdom (KOL, interstitiell lungsjukdom)
- Lungkärllssjukdom (pulmonell hypertension).
- Preoperativ riskvärdering, t.ex. inför lungresektion eller stor bukoperation

Övriga

- Som grund för träningsordination
- Kvantifiering av nedsatt fysisk arbetsförmåga

Typiska fynd vid lungsjukdom

Grundläggande ergospirometrivariabler

- Nedsatt $\dot{V}O_{2peak}$
- Förhöjd $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ -slope
- Nedsatt ventilatorisk reserv

Kriterier för maximal ansträngning

$\dot{V}O_2$	Platå ses
$\dot{V}O_2$	$\geq 100\% \text{ pred}$
Ventilatorisk reserv	$< 15\%$
IC sänkning under arbete	$> 0,15 \text{ L}$
RER	$> 1,05$
Hjärtfrekvens	$\geq 100\% \text{ pred}$
Laktat	$\geq 8 \text{ mmol/L}$

Padua T, et al. ERS statement on standardisation of cardiopulmonary exercise testing in chronic lung diseases. Eur Respir Rev. 2019;28(154):180131.

Pulmonell (pato-)fysiologi vid ergospirometri

Ventilatorisk reserv

Dynamisk hyperinflation

Inspiratorisk volymbegränsning

Expiratorisk flödesbegränsning

Gasutbytesstörning med hypoxi

Hypoventilation

Hyperventilation

Dysfunktionell andning

Förhöjd V_D/V_T

Ineffektiv ventilation (hög $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$)

Ventilatorisk reserv

Förväntad maximal ventilationskapacitet hos vuxna beräknas ofta som $40 \cdot FEV_1$ eller mäts som MVV_{40} (maximal volontär ventilation vid 40 andetag/min).

Ventilatorisk reserv (eller andningsreserv) uttrycker hur mycket ventilationskapacitet som återstår när patienten under arbete uppnått högsta minutventilation.

Vanliga normalvärden för ventilatorisk reserv är $> 15\%$ och $> 11 \text{ L/min}$.

$$100 \cdot \left(1 - \frac{\dot{V}_{E\text{Peak}}}{MVV} \right)$$

$$MVV - \dot{V}_{E\text{Peak}}$$

MVV = maximal ventilationskapacitet

$\dot{V}_{E\text{Peak}}$ = högsta minutventilation

Ventilatorisk reserv, normal

Variabel	Enhet	Förväntat	LLN eller ULN	Mätt	% av förväntat
VC	L	4,63	3,92	4,16	90
IC	L	2,88		2,25	
FEV1	L	3,76	3,10	3,62	96
FEV1/VC		0,82	0,71	0,87	106
FVC	L	4,22	3,37	4,05	96
FEV1/FVC		0,86	0,74	0,89	104
$40 \cdot FEV_1$	$\approx \text{L/min}$			145	
MVV (mätt)	L/min	120	97	108	90
$\dot{V}_{E\text{Peak}}$	L/min			80	
$MVV - \dot{V}_{E\text{Peak}}$	L/min	38	11	28	
$\dot{V}_{E\text{Peak}}/MVV$		0,72	0,90	0,74	
$(40 \cdot FEV_1) - \dot{V}_{E\text{Peak}}$	L/min	38	11	65	
$\dot{V}_{E\text{Peak}}/(40 \cdot FEV_1)$		0,72	0,90	0,55	
VTpeak	L			1,8	
VTpeak/IC		0,70	0,90	0,80	
VTpeak/VC		0,55		0,43	
Max. andningsfrekv.	andetag/min		55	44	

Ventilatorisk reserv, olika varianter

Exempel: KOL med liten ventilatorisk reserv

Ventilation och gasutbyte

Variabel	Enhet	Förväntat	LLN eller ULN	Mätt	% av förväntat
VC	L	2,73	2,02	2,59	95
IC	L	2,36		2,35	
FEV1	L	2,28	1,62	1,32	58
FEV1/VC		0,79	0,67	0,51	65
FVC	L	2,64	1,98	2,59	98
FEV1/FVC		0,79	0,67	0,51	64
40*FEV1	≈ L/min			53	
MVV (mätt)	L/min	77	54	48	63
V'Epeak	L/min			48	
MVV-V'Epeak	L/min	38	11	0	
V'Epeak/MVV		0,72	0,90	1,00	
(40*FEV1)-V'Epeak	L/min	38	11	5	
V'Epeak/(40*FEV1)		0,72	0,90	0,91	
VTpeak	L			1,3	
VTpeak/IC		0,70	0,90	0,55	
VTpeak/VC		0,55		0,50	
Max. andningsfrekv.	andetag/min		55	39	

Pulmonell (pato-)fysiologi vid ergospirometri

Ventilatorisk reserv

Dynamisk hyperinflation

Inspiratorisk volymbegränsning

Expiratorisk flödesbegränsning

Gasutbytesstörning med hypoxi

Hypoventilation

Hyperventilation

Dysfunktionell andning

Förhöjd V_D/V_T

Ineffektiv ventilation (hög $V'E/V'CO_2$)

Flöde-volymloop

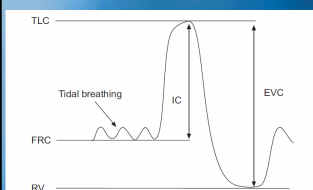


FIGURE 12. Tracing of tidal breathing followed by an inspiratory manoeuvre to total lung capacity (TLC) to record inspiratory capacity (IC), followed by a full expiration to residual volume (RV) to record expiratory reserve volume (ERV). FRC: functional residual capacity.

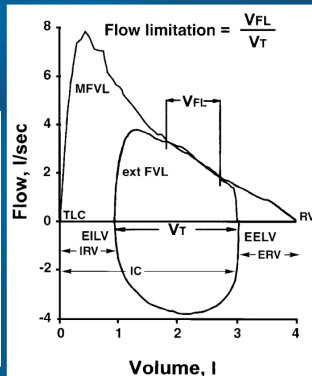


FIGURE 1. Defining expiratory flow limitation. extFVLs are aligned within the MEFV according to a measured EELV. The percent of the tidal breath (VFL) that expiratory air flows meet or exceed the MEFV are used as an estimate as to the degree of expiratory flow limitation. EIRV = expiratory reserve volume; IRV = inspiratory reserve volume.

Flöde-volymloop under arbete

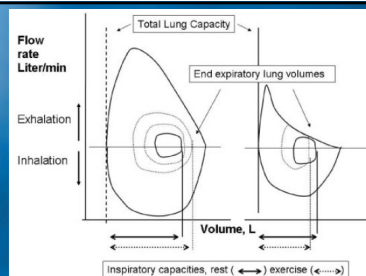


Figure 7. Flow-volume loops. Spontaneous tidal flow-volume loops at rest (inner solid lines) and exercise (dotted lines) and maximal flow-volume loops measured before exercise (outer solid lines) for a normal subject (left) and a patient with chronic obstructive pulmonary disease (right). Tidal flow-volume loops are positioned within the maximal loops by periodic measurement of inspiratory capacity (←→) during exercise. On the left, the normal subject increases tidal volume (x-axis) without reaching maximal flow rates and with stable or increased inspiratory capacity (arrows). In contrast, on the right, the patient with chronic obstructive pulmonary disease attains maximal expiratory flow rates during spontaneous breaths and needs to increase end-expiratory lung volume, as inferred from a decrease in inspiratory capacity.

EELV och EILV förändring vid arbete

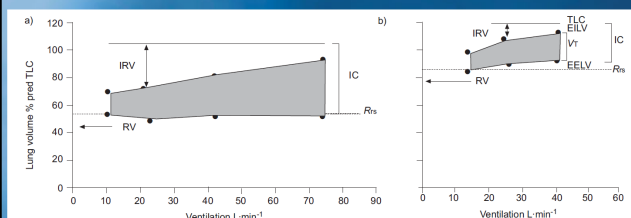


FIGURE 1. Changes in operating lung volumes as ventilation increases with exercise in a) age-matched healthy subjects and b) chronic obstructive pulmonary disease (COPD) patients. End-expiratory lung volume (EELV) increases above the relaxation volume of the respiratory system (R_{rs}) in COPD, as reflected by a decrease in inspiratory capacity (IC), while EELV in health either remains unchanged or decreases. TLC: total lung capacity; RV: residual volume; IRV: inspiratory reserve volume; EILV: end-inspiratory lung volume; V_T : tidal volume. Reproduced from [78] with permission from the publisher.

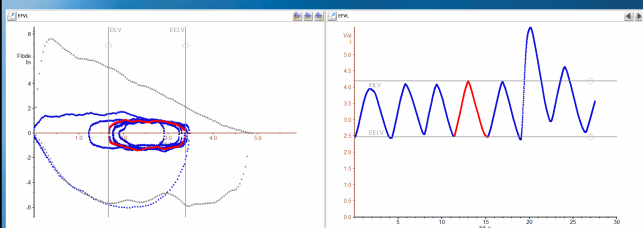
Flöde-volymloop under arbete

EELV (End Expiratory Lung Volume) – hos friska sjunker EELV under arbete. Hos friska äldre individer kan EELV åter stiga under tungt arbete. Vid KOL kan dynamisk hyperinflation (stigande EELV) ses.

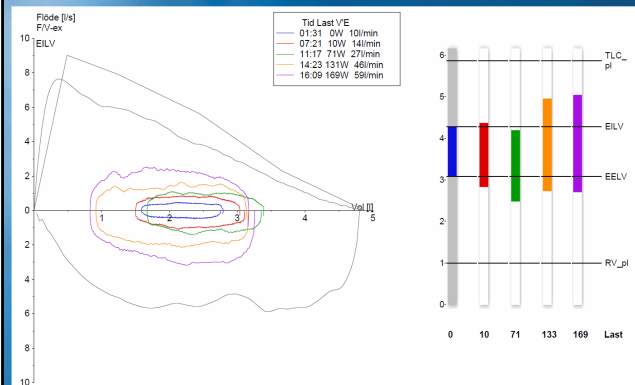
EILV/TLC (End Inspiratory Lung Volume / Total Lung Capacity) – Mått på återstående inandningskapacitet. Ska normalt vara $\leq 0,9$ (men kan bli $>0,9$ hos friska äldre). Kan bli $>0,9$ både vid obstruktivitet och restriktivitet (t.ex. KOL, lungfibros).

Expiratorisk flödesbegränsning – flöde-volymloopens utandningsdel deformeras/begränsas av expiratoriska luftvägsförhållanden (luftvägsmotstånd). Osäkra normalvärden. Liten flödesbegränsning kan ses som normalfynd hos många friska, mer flödesbegränsning är normalfynd hos äldre. Flödesbegränsning $>50\%$ av V_T är troligen patologiskt.

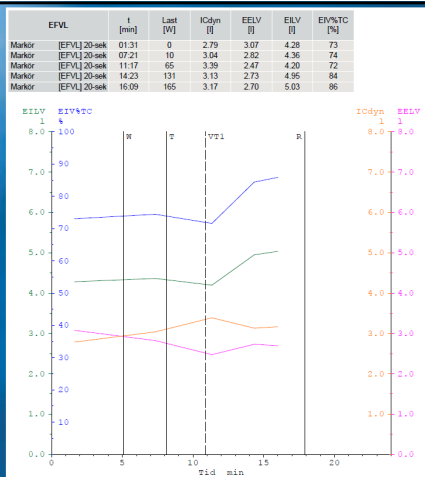
Placera andningsloopen i förhållande till den maximala F-V-loopen



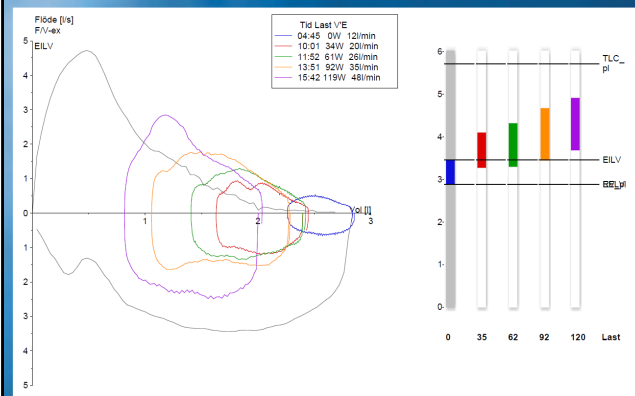
Exempel, normal



Exempel, normal



Exempel, obstruktiv



Pulmonell (pato-)fysiologi vid ergospirometri

- Ventilatorisk reserv
- Dynamisk hyperinflation
- Inspiratorisk volymbegränsning
- Expiratorisk flödesbegränsning
- Gasutbytesstörning med hypoxi
- Hypoventilation
- Hyperventilation
- Dysfunktionell andning
- Förhöjd V_D/V_T
- Ineffektiv ventilation (hög $V'E/V'CO_2$)

Blodgaser före och under arbete

- pO_2 – Syrehalt
- pCO_2 – Koldioxidhalt
- pH – Surhet (syror, baser, vätejoner...)
- Basöverskott, Base Excess – Ett beräknat mått på den metaboliska komponenten i syra-bas-balansen)
- Standardbikarbonat – HCO_3^- är blodets främsta buffert.
- Kan tas som artärblodprov från a. radialis (punktion, kateter) eller a. brachialis (kateter).
- Kan även tas som kapillärblodprov i fingertopp eller örsnibb. Om adekvat uppvärmt erhålls i stort sett arteriellt pCO_2 och pH men däremot inte pO_2 .

Gasutbytesstörning

Hypoxi kan påvisas med saturationsmätning.

För säker bedömning av om hypoxi beror på gasutbytesstörning behövs dock artärblodprov.

Utifrån $P_a\text{CO}_2$ ($\approx P_A\text{CO}_2$) och RER kan alveolärt $p\text{O}_2$ ($P_{A\text{O}_2}$) beräknas enligt alveolära gasekvationen.

$$P_{A\text{O}_2} = P_{I\text{O}_2} - \frac{1}{R} \cdot P_{A\text{CO}_2} + [F]$$

Arteriellt $p\text{O}_2$ ($P_{a\text{O}_2}$) är vanligtvis maximalt 2-3 kPa lägre än $P_{A\text{O}_2}$.

Differensen $P_{(A-a)}\text{O}_2$ (alveoloarteriell $p\text{O}_2$ -differens) kan beräknas automatiskt av ergospirometriutrustningen.

Hög $P_{(A-a)}\text{O}_2$ talar för gasutbytesstörning.

Ventilation

$$P_{a\text{CO}_2} \propto \frac{1}{\dot{V}_A}$$

Hypoventilation (underventilering)

Onormalt liten ventilation som leder till $p\text{CO}_2 >$ övre normalgräns (vanligen 6,0 kPa).

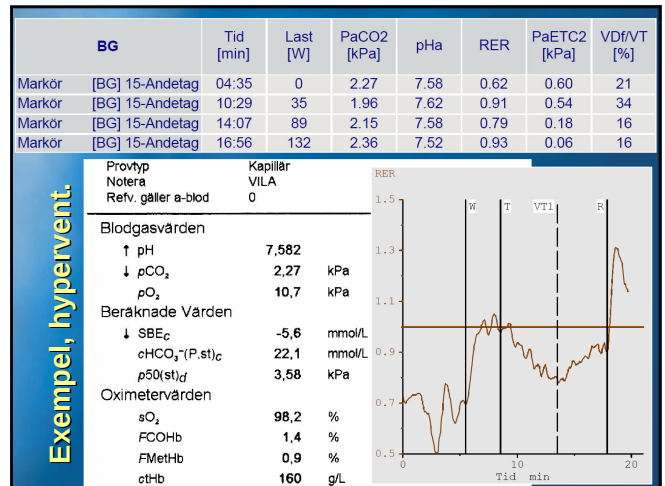
Hyperventilation

I vila: Onormalt stor ventilation som leder till $p\text{CO}_2 <$ nedre normalgräns (vanligen 4,6-4,8 kPa). Vid kronisk hyperventilation även lågt basöverskott och standardbikarbonat.

Under arbete: Mer svårbedömt eftersom ventilationen normalt ökar under arbete. Under tungt arbete är den anaeroba energiproduktionen så stor att buffertsystemen mätts och då sjunker pH. Om pH istället stiger under tungt arbete är det troligen uttryck för hyperventilation.

Exempel, artärblodgas, normal

	BG	Tid [min]	Last [W]	PaO2 [kPa]	PaCO2 [kPa]	pHa	RER	AaDO2 [kPa]	PaETC2 [kPa]	VDf/VT [%]
Markör	[BG] 15-Andetag	01:29	0	12.60	4.87	7.39	0.70	0.87	0.52	32
Markör	[BG] 15-Andetag	05:39	10	11.70	5.24	7.38	0.69	0.66	0.49	30
Markör	[BG] 15-Andetag	08:04	48	11.60	5.31	7.37	0.71	1.10	0.40	28
Markör	[BG] 15-Andetag	10:06	90	11.60	5.60	7.35	0.83	1.41	0.20	26
Markör	[BG] 15-Andetag	12:04	129	13.30	5.27	7.35	0.98	1.19	0.27	23
Markör	[BG] 15-Andetag	14:03	168	13.40	4.92	7.33	1.08	1.82	0.14	25
Markör	[BG] 15-Andetag	15:05	189	13.50	4.67	7.32	1.17	2.09	0.18	28
Markör	[BG] 15-Andetag	15:44	0	13.70	4.40	7.30	1.20	2.32	0.24	23



Pulmonell (pato-)fysiologi vid ergospirometri

Ventilatorisk reserv

Dynamisk hyperinflation

Inspiratorisk volymbegränsning

Expiratorisk flödesbegränsning

Gasutbytesstörning med hypoxi

Hypoventilation

Hyperventilation

Dysfunktionell andning

Förhöjd V_D/V_T

Ineffektiv ventilation (hög $V'E/V'\text{CO}_2$)

$$V_D/V_T$$

$$V_D/V_T = \frac{P_{a\text{CO}_2} - P_{\bar{E}\text{CO}_2}}{P_{a\text{CO}_2}}$$

Mått på "bortkastad" ventilation. Vid ojämn ventilations-perfusionsmatchning i lungorna slösas en del ventilation bort på att ventilera dåligt perfunderade alveoler.

V_D/V_T vid ansträngning

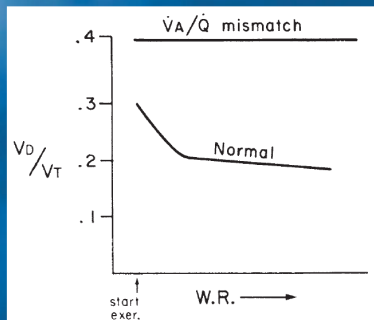


FIGURE 4.16. Example of the change in the ratio of physiologic dead space to tidal volume (V_D/V_T) during rest and at increasing work rate (WR) for a normal subject and a patient with ventilation-perfusion (V_A/Q) mismatch.

Ventilatorisk ekvivalent för CO_2

$$\frac{\dot{V}_E}{\dot{V}_{CO_2}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{V_D}{V_T}\right) \cdot PaCO_2 \cdot K}$$

där $\dot{V}_{CO_2}$ koldioxidutvädring
 $\dot{V}_E$ minutventilation
 V_D/V_T andel fysiologisk dead space
 $PaCO_2$ arteriellt partialtryck för koldioxid
 K korrektionsfaktor ($\approx 0,0087 \text{ kPa}^{-1}$)

V'_E/V'_{CO_2}

Ospecifikt mått. Förhöjt vid hjärtsvikt, KOL, lungfibros och lungkärllsjukdom/PAH.

Hypoventilation (høgt pCO_2) kan maskera ineffektiv ventilation p.g.a. høg V_D/V_T . Sådant mönster kan bero på begränsad ventilationskapacitet ("kan inte ventilera", t.ex. grav KOL) eller nedsatt kemosensitivitet ("vill inte ventilera", t.ex. obesitasrelaterat hypoventilationssyndrom).

$$\frac{\dot{V}_E}{\dot{V}_{CO_2}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{V_D}{V_T}\right) \cdot PaCO_2 \cdot K}$$

Nyckelvariabler

TABLE 4 Outcome values to report in standard clinical cardiopulmonary exercise testing as employed by the Task Force members

Exercise capacity	Cardiovascular limitation	Gas exchange limitation	Ventilatory limitation
Variable relevance			
$\dot{V}'_{O_{2,peak}}$	HR_{peak}	V'_E/V_{CO_2} slope	V'_{Epeak} in % $MV_{V_{rest}}$
Peak WR	$\dot{V}'_{O_2}/WR$ slope	Lowest V'_E/V_{CO_2} value (nadir)	
AT	O_2 pulse peak	$S_{pO_{2,peak}}$	
	HR/V'_{O_2} slope	Borg symptom scores	
For studies featuring additional measurements		$V_D/V_T^{\#}$	$V_T/IC^{\S}$
		$P_{A-aO_{2,peak}}^{\#}$	$IRV_{peak}^{\S}$

$\dot{V}'_{O_{2,peak}}$: peak oxygen uptake; WR: work rate; AT: anaerobic threshold; HR: heart rate; V'_E : minute ventilation; $\dot{V}_{CO_2}$: carbon dioxide production; V'_{Epeak} : peak minute ventilation; $MV_{V_{rest}}$: maximum voluntary ventilation at rest; $\dot{V}'_{O_2}$: oxygen uptake; $S_{pO_{2,peak}}$: peak arterial oxygen saturation measured by pulse oximetry; V_D/V_T : dead space/total volume ratio; IC: inspiratory capacity; $P_{A-aO_{2,peak}}$: peak alveolar-arterial oxygen tension difference; IRV_{peak} : peak inspiratory reserve volume. $^{\#}$: in studies featuring arterial blood gas measurements; § : in studies featuring serial inspiratory capacity measurements.

Revised 1, et al. ERS statement on standardisation of cardiopulmonary exercise testing in chronic lung diseases. Eur Respir Rev. 2019;28(154):180101.

Dyspnéutredning – ett exempel

