

Arbetsfysiologi

Ulrika Andersson Hall

Institutionen för Neurovetenskap och Fysiologi



Upplägg av föreläsningen

Aerobt arbete (uthållighetsarbete)

- Syrekrav och syreförbrukning
- Ventilatorisk respons
- Kardiovaskulär respons

Syretransport

Metabolism under träning (aerob och anaerob)

Temperaturreglering

Effekter av träning



Leverera syre till arbetande muskler för att omvandla näringsämnen till mekanisk energi



SYRGASKONSUMTIONEN, VO₂

- I VILA 0.3 L/min
- PROMENAD (el. 50W cykel) 1 L/min
- MAX KONSUMTION

OTRÄNAD MAN
Ca 3,0 L/min (35-40 mL/min x kg)



ÖKNING MED 10 GGR

MYCKET VÄLTRÄNAD MAN
Ca 6 L/min (85 mL/min x kg)



ÖKNING MED 20 GGR



Leverera syre till arbetande muskler för att omvandla näringsämnen till mekanisk energi

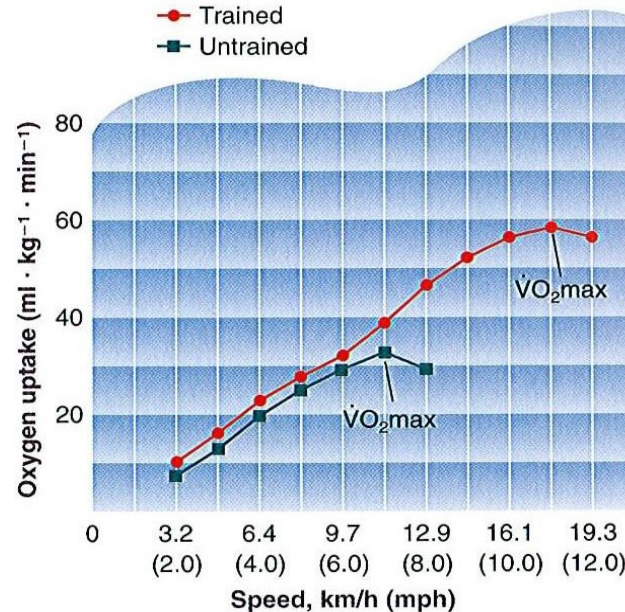


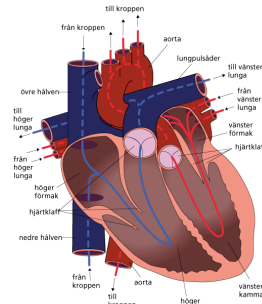
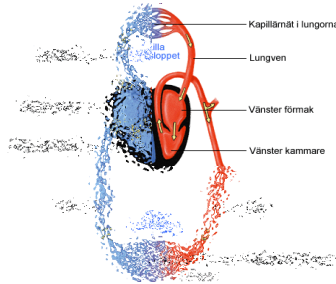
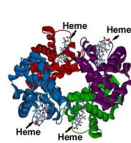
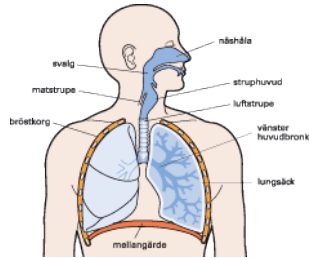
Figure 4.16 The relationship between exercise intensity (running speed) and oxygen uptake, illustrating $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ in a trained and an untrained man.

KONDITION

Kroppens förmåga att förbränna syrgas per minut och kg kroppsvikt,
dvs $\text{mL O}_2/\text{kg} \times \text{min}$



Leverera syre till arbetande muskler för att omvandla näringsämnen till mekanisk energi



Central nivå

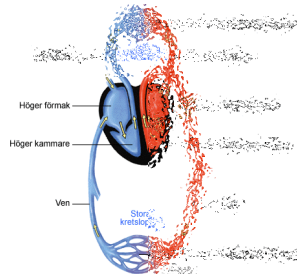
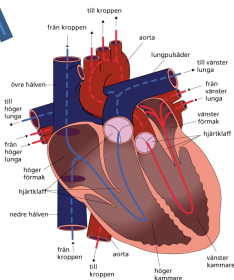
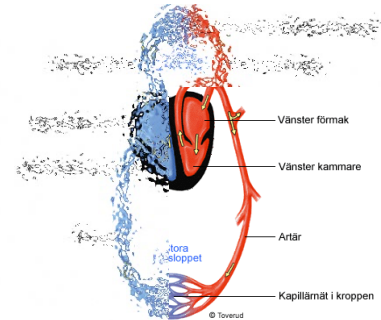
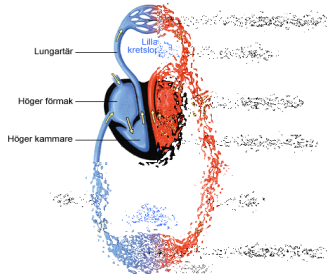
- Hjärta
- Lungor

Mellan nivå

- Blodmängd
- Blodtryck
- Hemoglobin koncentration
- Blodflöde

Lokal nivå

- Kapillärtäthet
- Mitokondrier
- Blodflöde



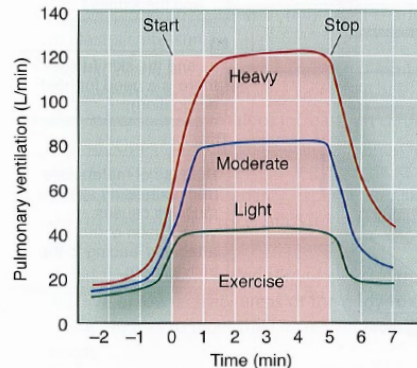
Energisubstrat

- Fett
- Kolhydrater
- (Proteiner)
- Fosfater (ATP-PCr)

ANDNINGSFÖRÄNDRINGAR

-säkerställa O₂ tillförsel och andas ut CO₂ som bildas

	Ventilation	Andningsfrekvens	
Vila	6 L/min	12 andetag/min	
Maximal ansträngning	ca 100-140 L/min	Ca 50-60 andetag/min	Otränad man



- Proportionerlig ökning i förhållande till syrebehovet (vid ventilatoriska tröskeln – börjar hyperventilera)
- Trots de stora förändringarna – finns reserv

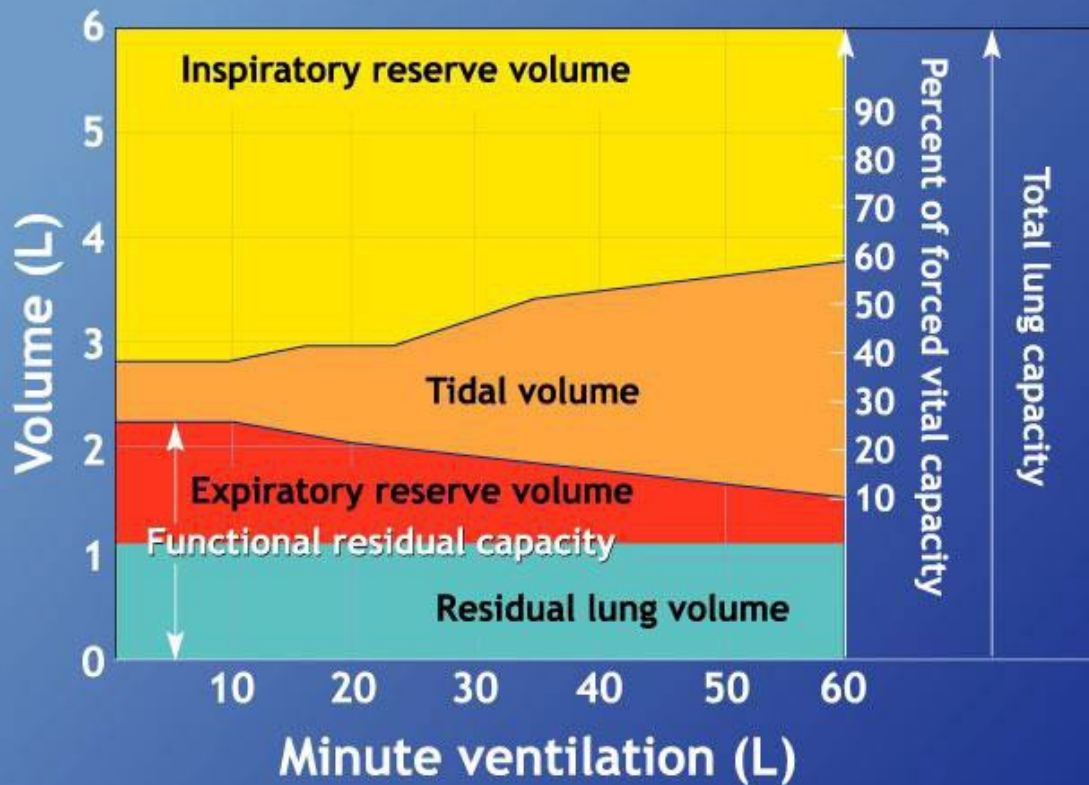
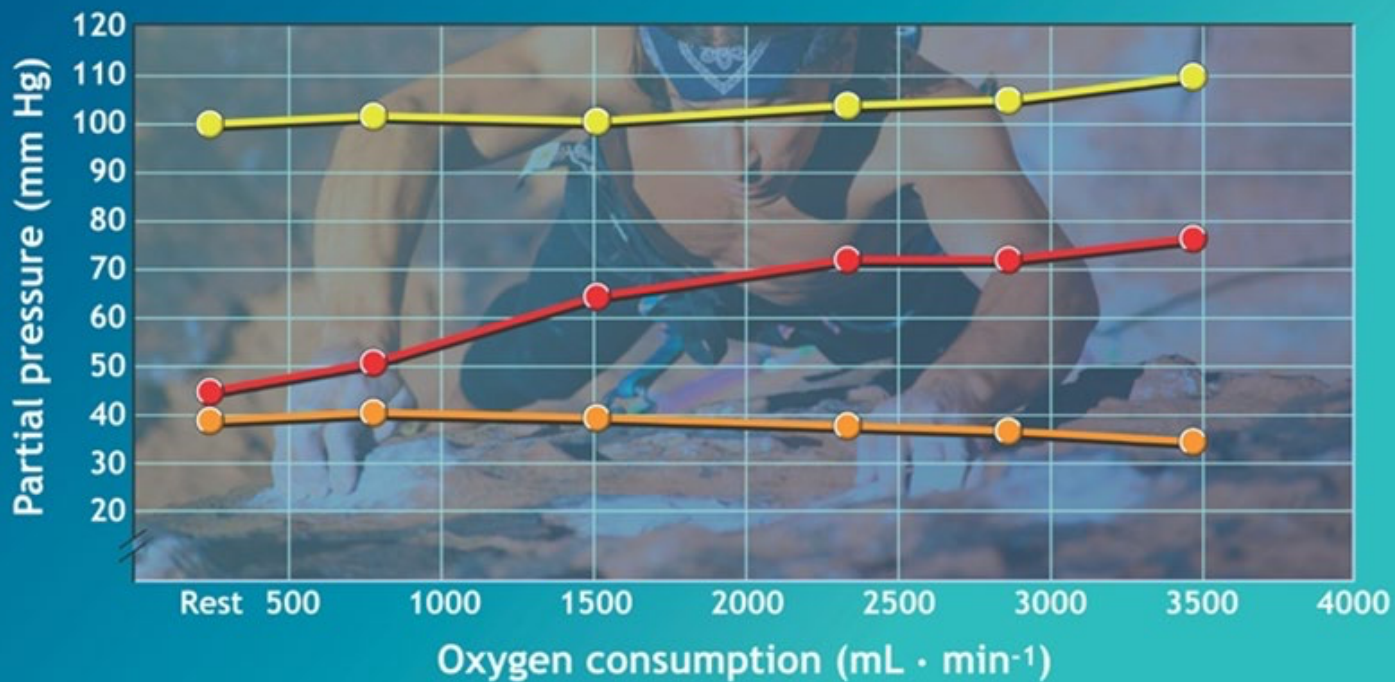


Figure 12.10. Tidal volume and subdivisions of pulmonary air during rest and exercise.



Alveolar Po₂ Mixed-venous Pco₂ Alveolar Pco₂

Reglering av ventilationsresponsen

Direkt respons – feedforward/central command
Finjustering av kemoreceptorer och mekanoreceptorer

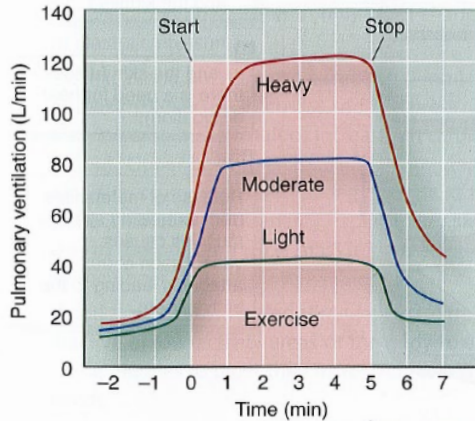
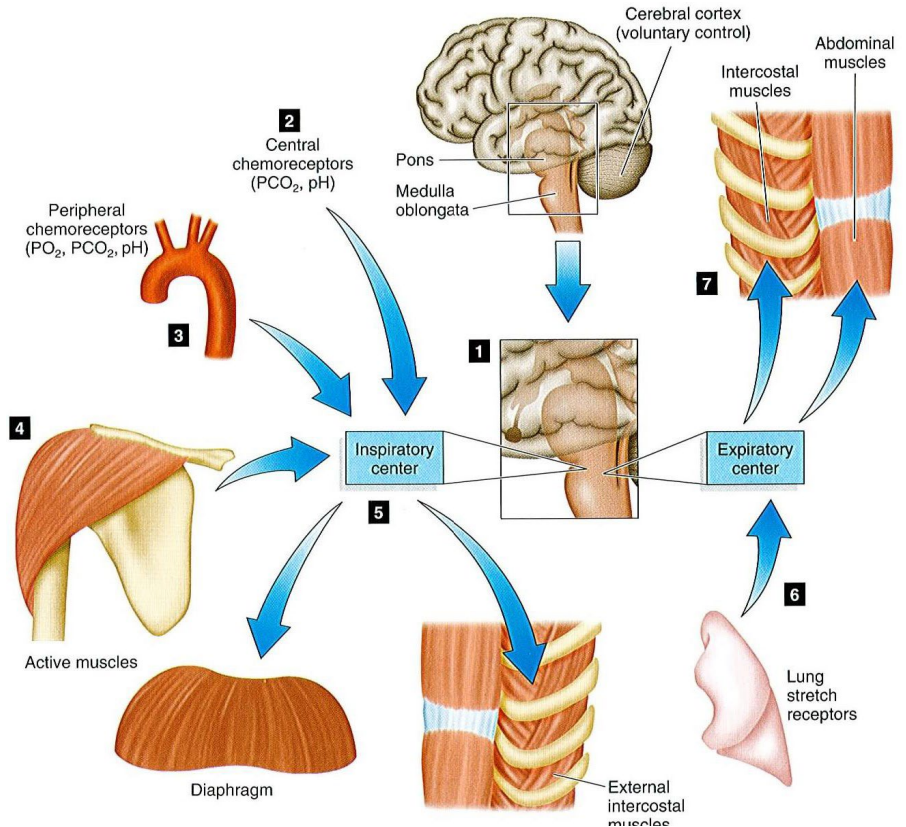
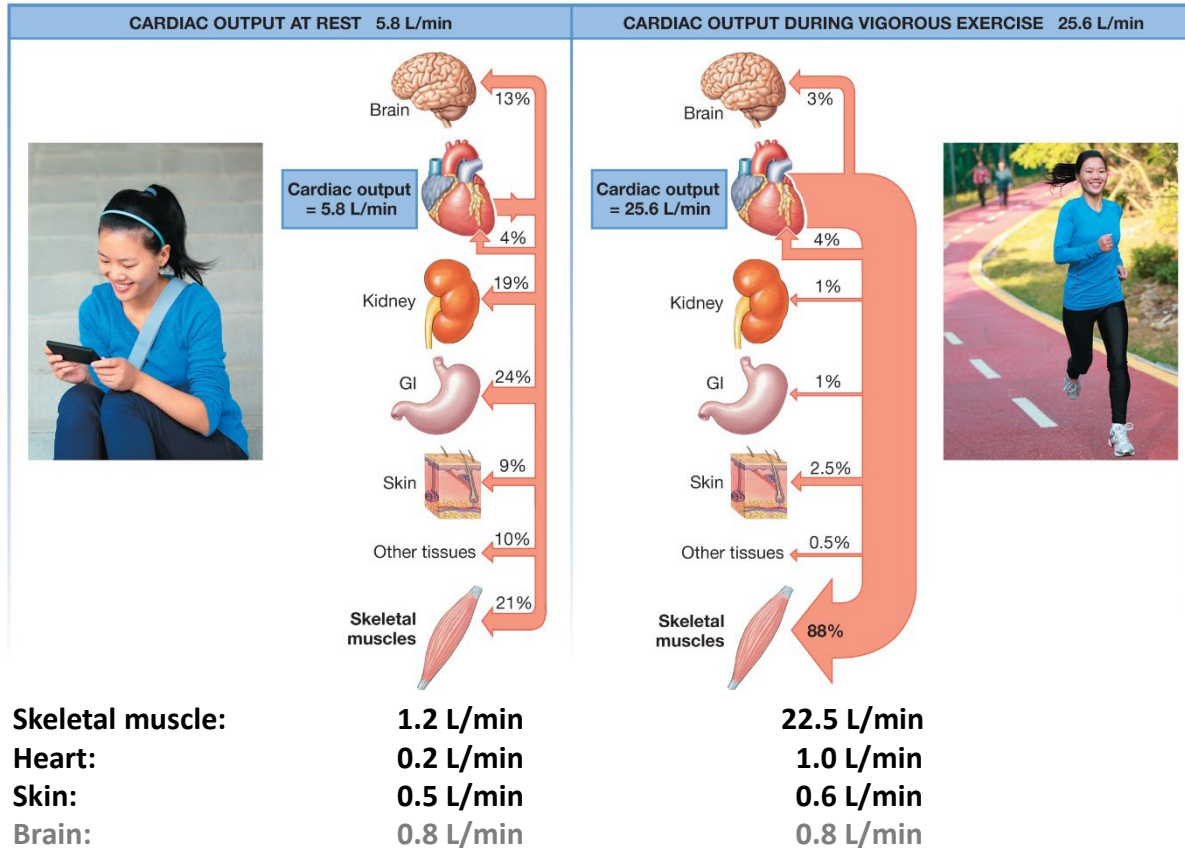


Figure 7.13 The ventilatory response to light, moderate, and heavy exercise. The subject exercised at each of the three intensities for 5 min. The ventilation volume tended to plateau at a steady-state value at the light and moderate intensities but continued to increase at the heavy intensity.



CIRKULATIONSFÖRÄNDRINGAR

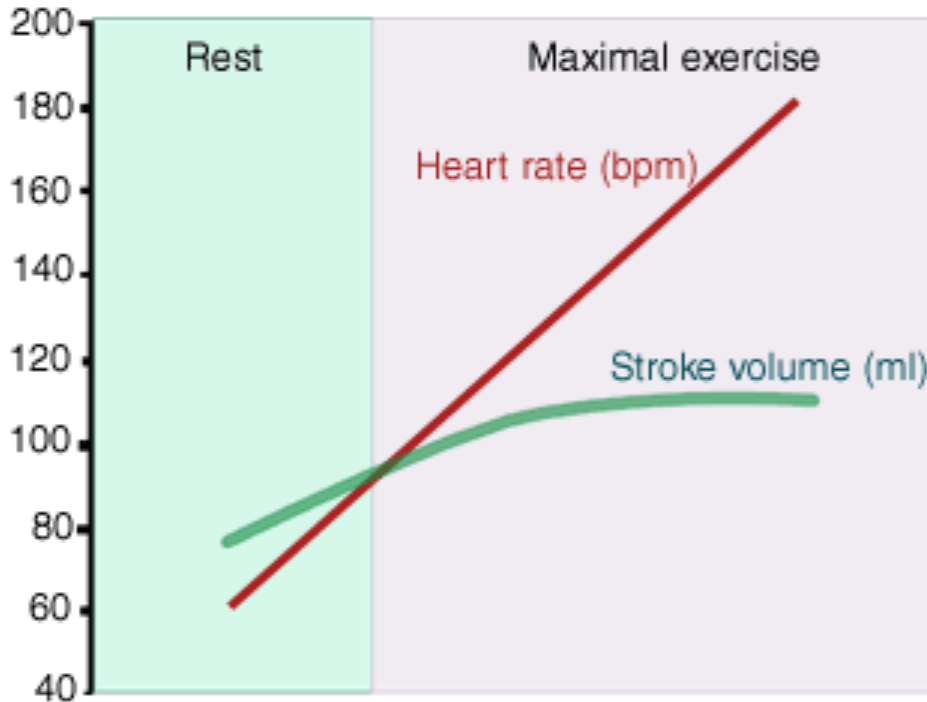
-säkerställa O₂ tillförsel, eliminera CO₂ och andra biprodukter, reglera temperaturen, transport av hormoner och nutrienter



Vasokonstriktion i icke arbetande vävnad (sympatikus aktivering), vasodilation i arbetande muskler (lokal reglering)

HJÄRTMINUTVOLYM = Slagvolym x Frekvens

(ca 5 L/min i vila och 20-35 L/min vid maxarbetet)



Ca 50% ökning i SV

Ca 2-300% ökning i HR

HJÄRTMINUTVOLYM (Cardiac Output) = Slagvolym x Frekvens

(~5 L/min vid vila och ~20-35 L/min vid maximalt arbete)

Exempel på hjärtfunktionen hos en otränad person respektive maratonlöpare

	Slagvolym (ml)	Hjärtfrekvens (bpm)
Vila		
Otränad	75	75
Maratonlöpare	105	50
Maximalt arbete		
Otränad	110	195
Maratonlöpare	162	185

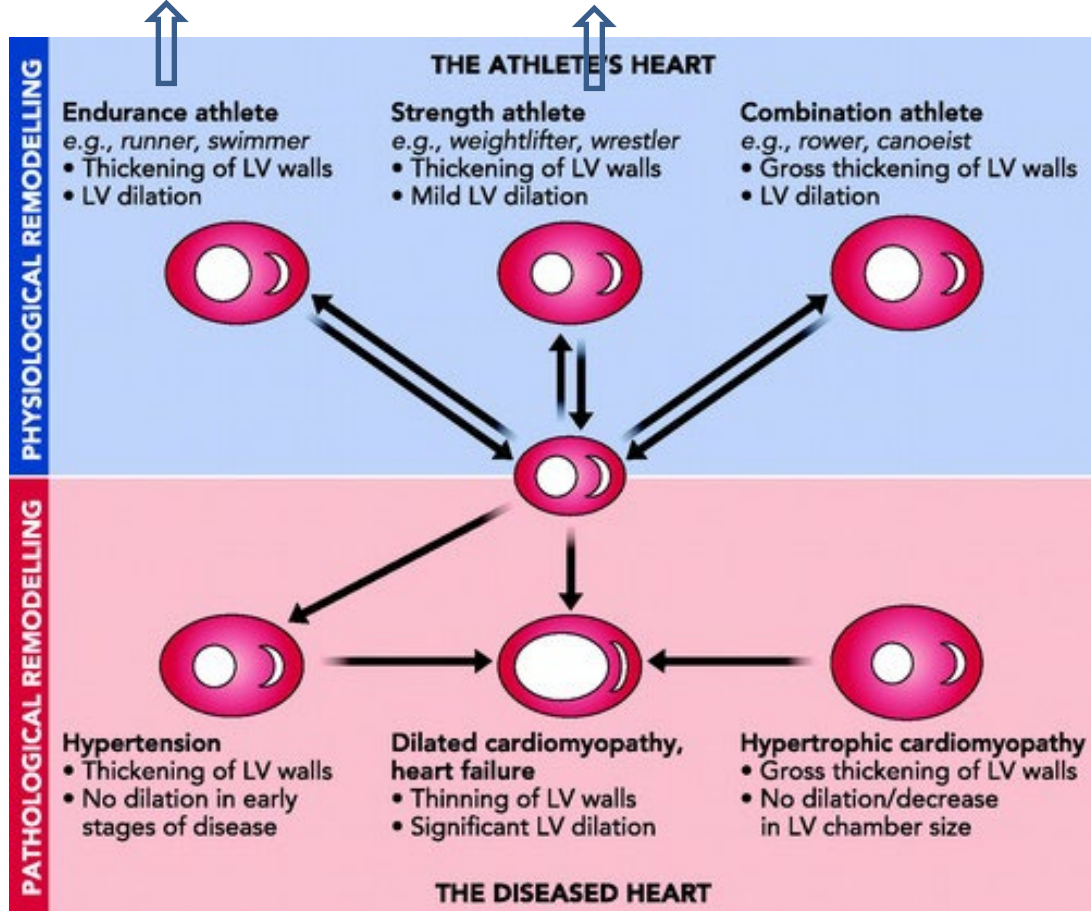
Maximal HR – individuell (“220-ålder”), inte relaterat till VO_2max

Excentrisk Hypertrofi

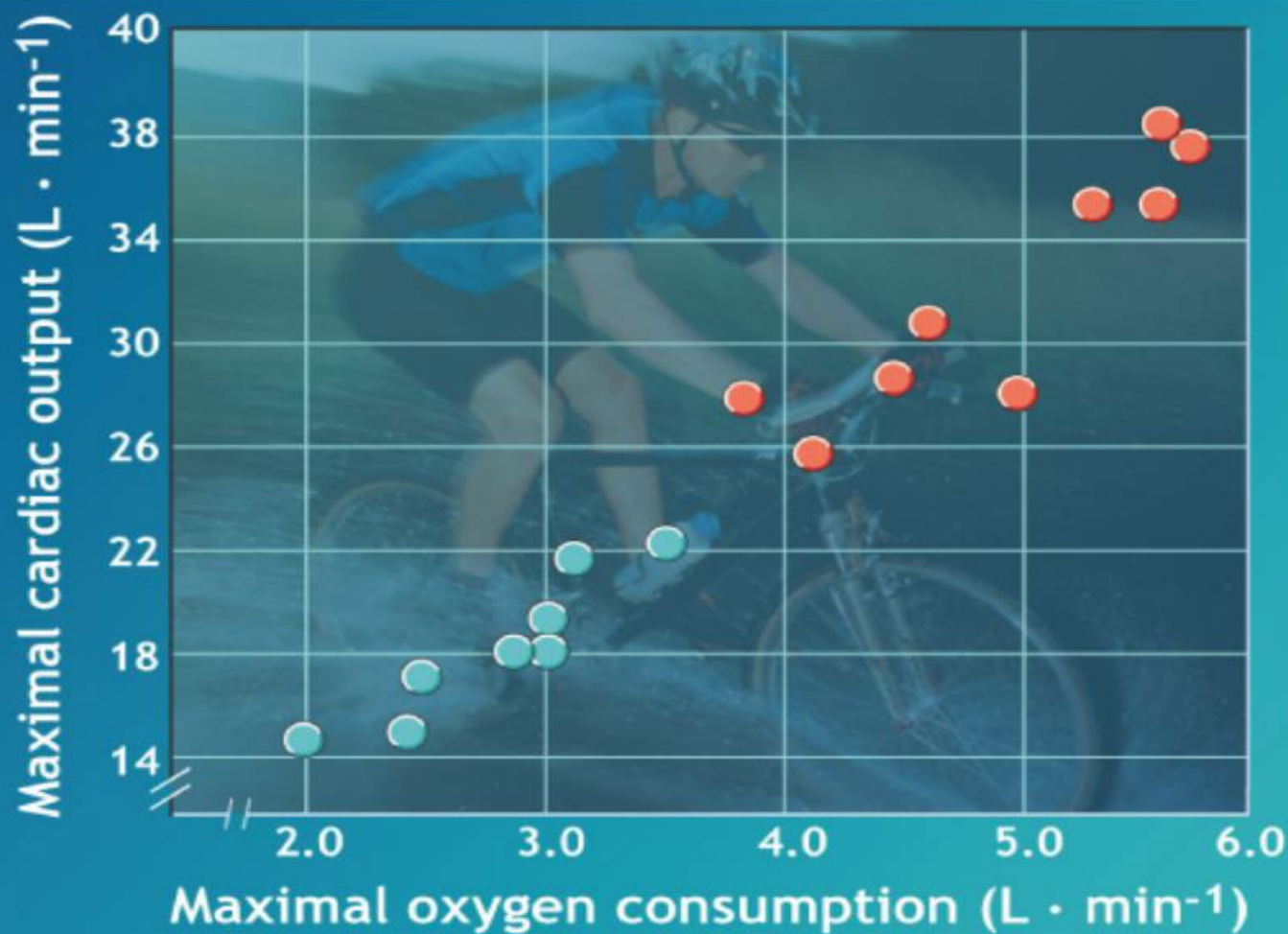
(ökad EDV, ökad slagvolym)

Koncentrisk Hypertrofi

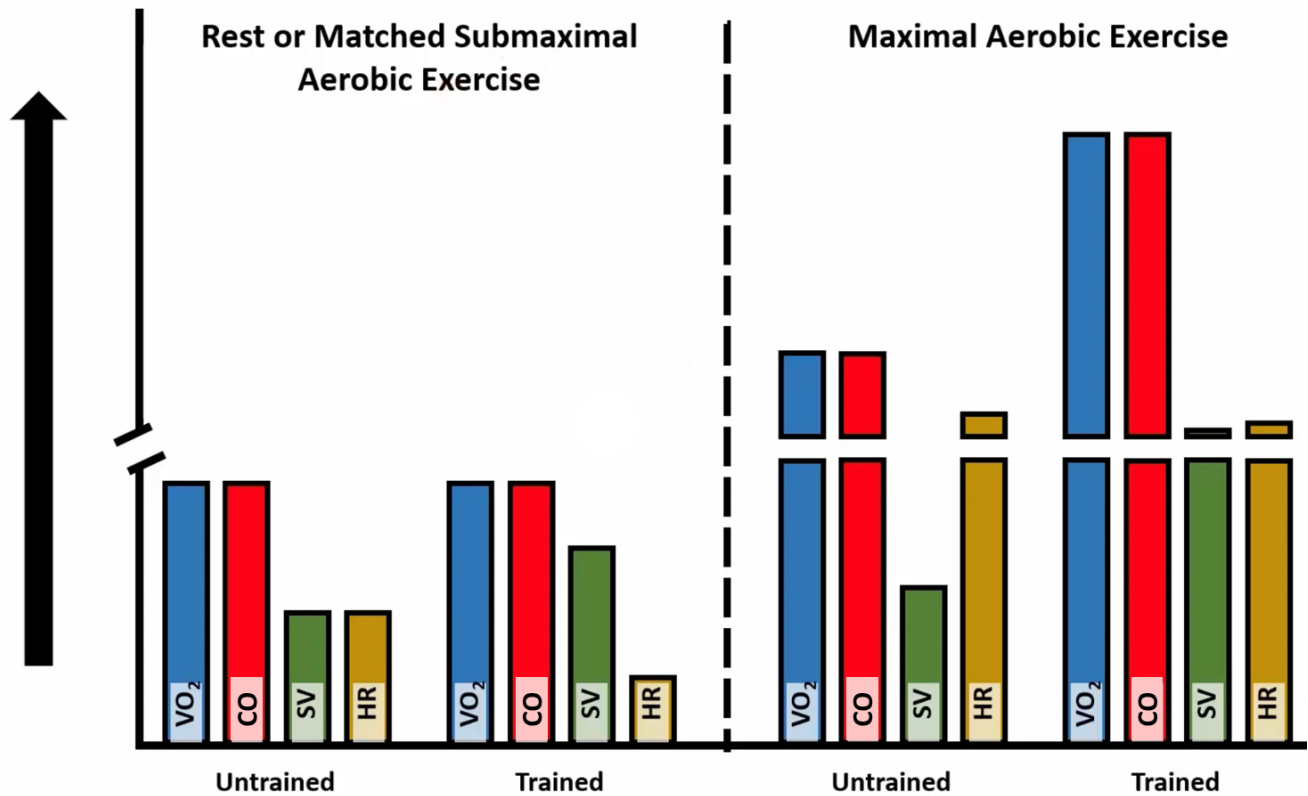
??



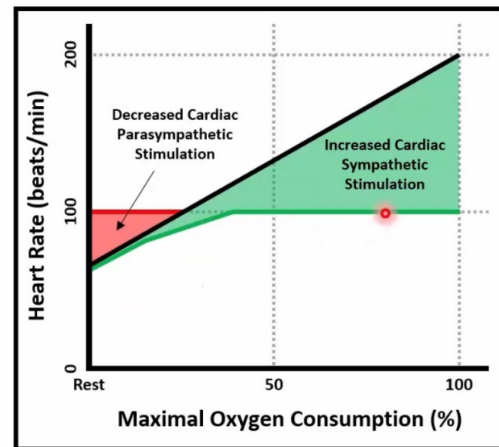
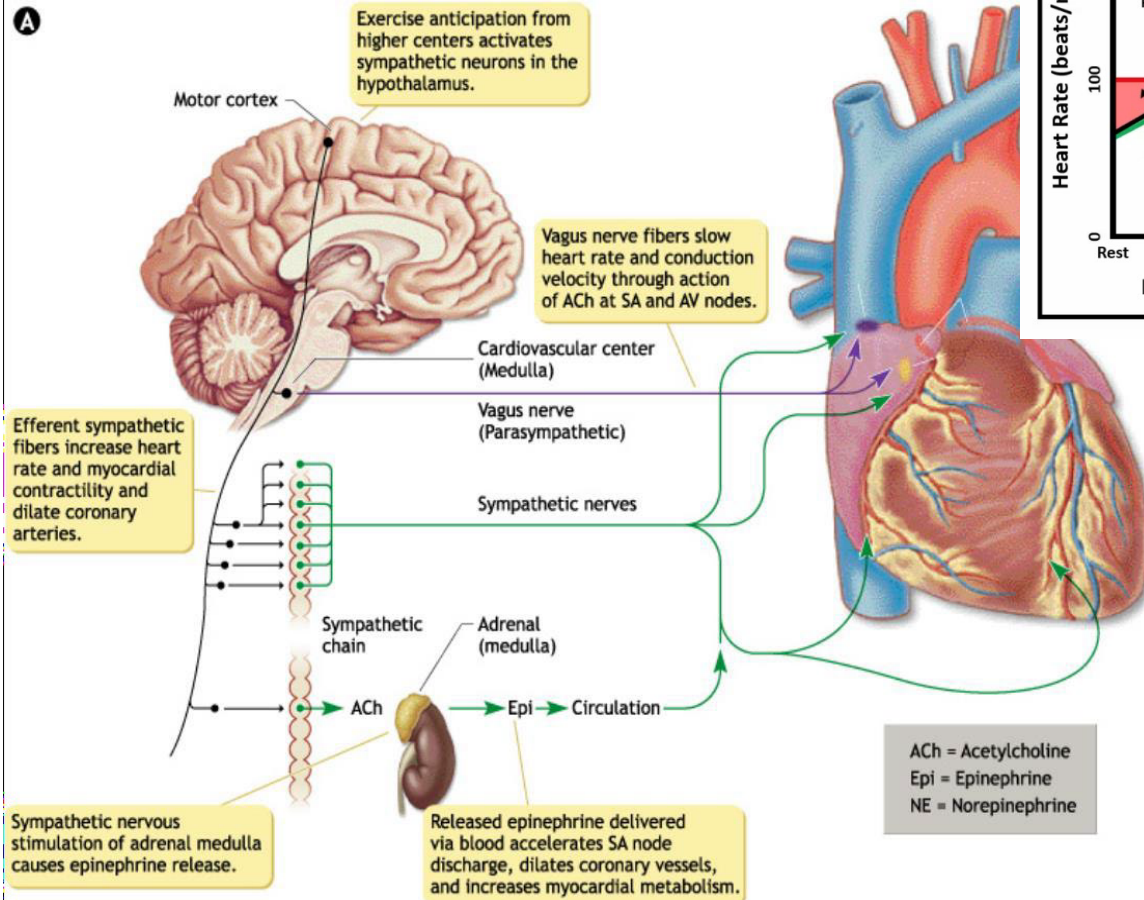
Slagvolymen hos en uthållighetstränad är högre pga hypertrofi och ökad blodvolym



 Sedentary  Endurance athletes



A



REGLERINGEN AV CIRKULATIONSMSTÄLLNINGEN

CENTRAL COMMAND

AKTIVERING AV SYMPATISKA NERVSYSTEMET KOPPLAT TILL
AKTIVERINGEN AV MUSKLERNA

LOKAL KONTROLL

KEMORECEPTORER I DE ARBETANDE MUSKLERNA
($\downarrow$ pH, $\uparrow$ P_{CO2}, $\uparrow$ ADP, $\uparrow$ Mg²⁺, $\uparrow$ Ca²⁺, $\uparrow$ temp)
MEKANORECEPTORER I SENOR OCH LIGAMENT

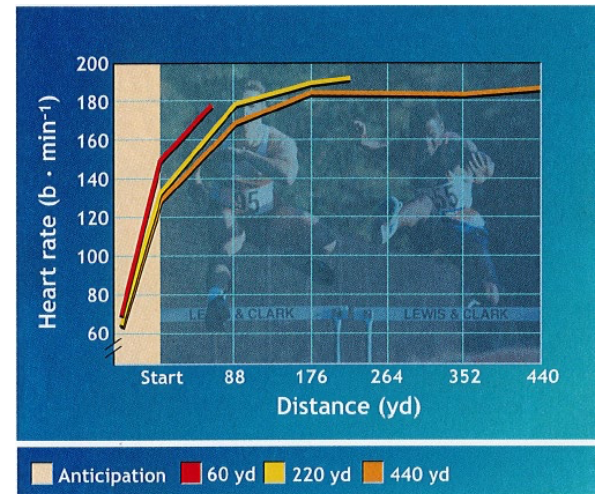
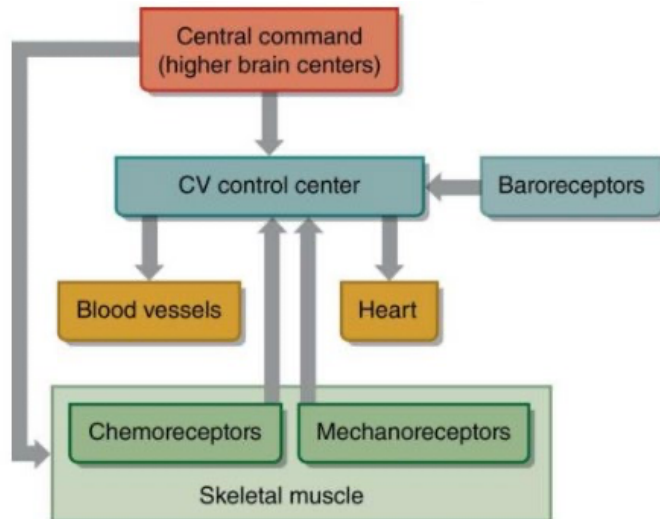
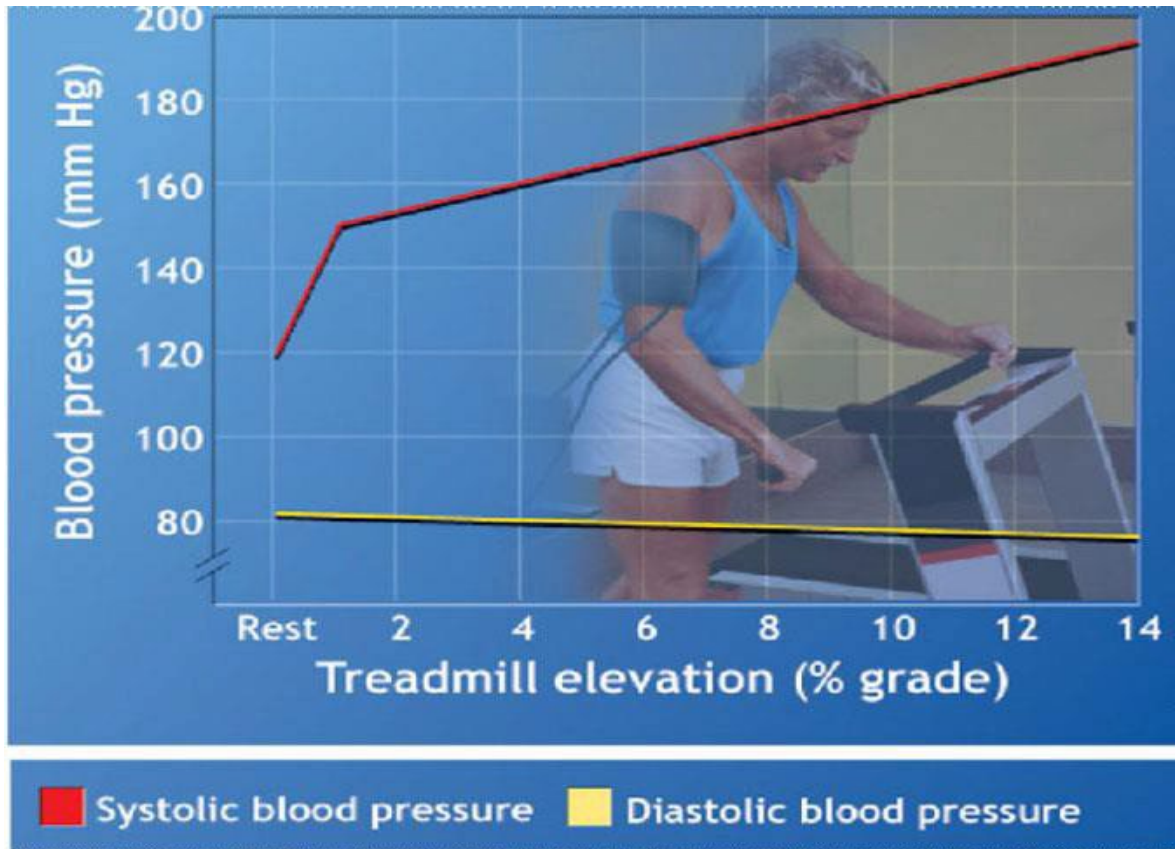


Figure 16.6 • Heart rate response of sprint-trained runners.

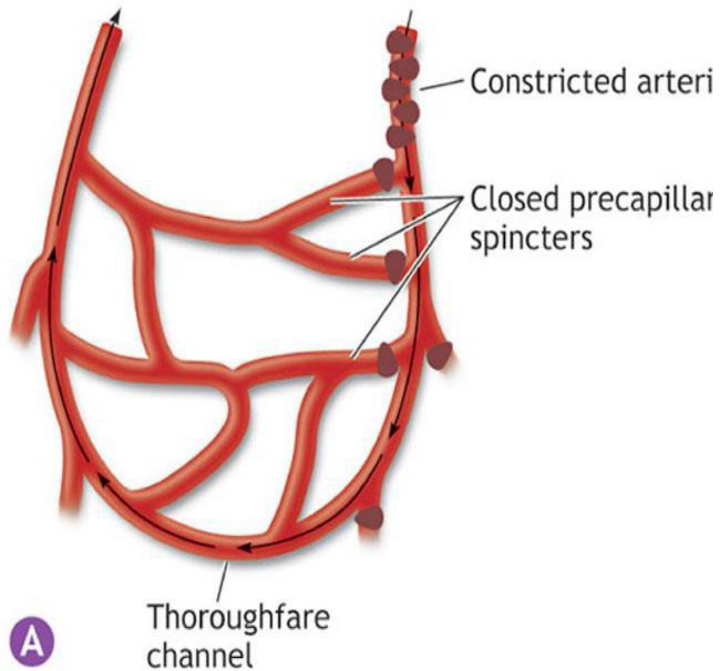
Vad händer med blodtrycket under arbete?



SBP ökar pga stor ökning av cardiac output

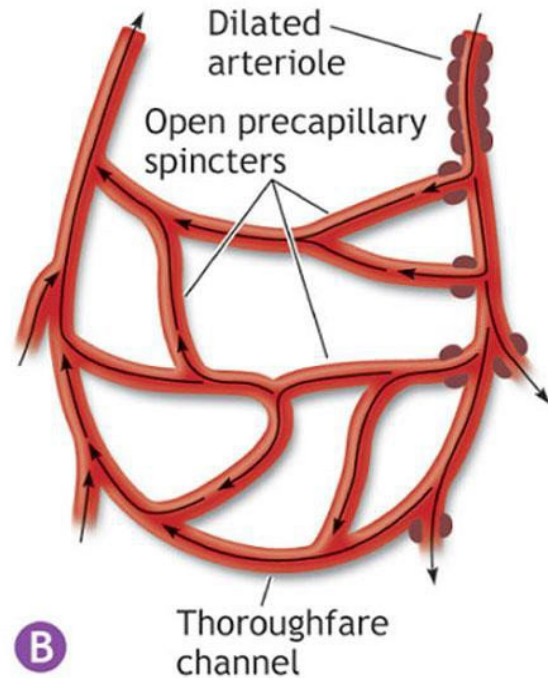
DBP är vanligen oförändrad pga låg perifer resistens

VILA



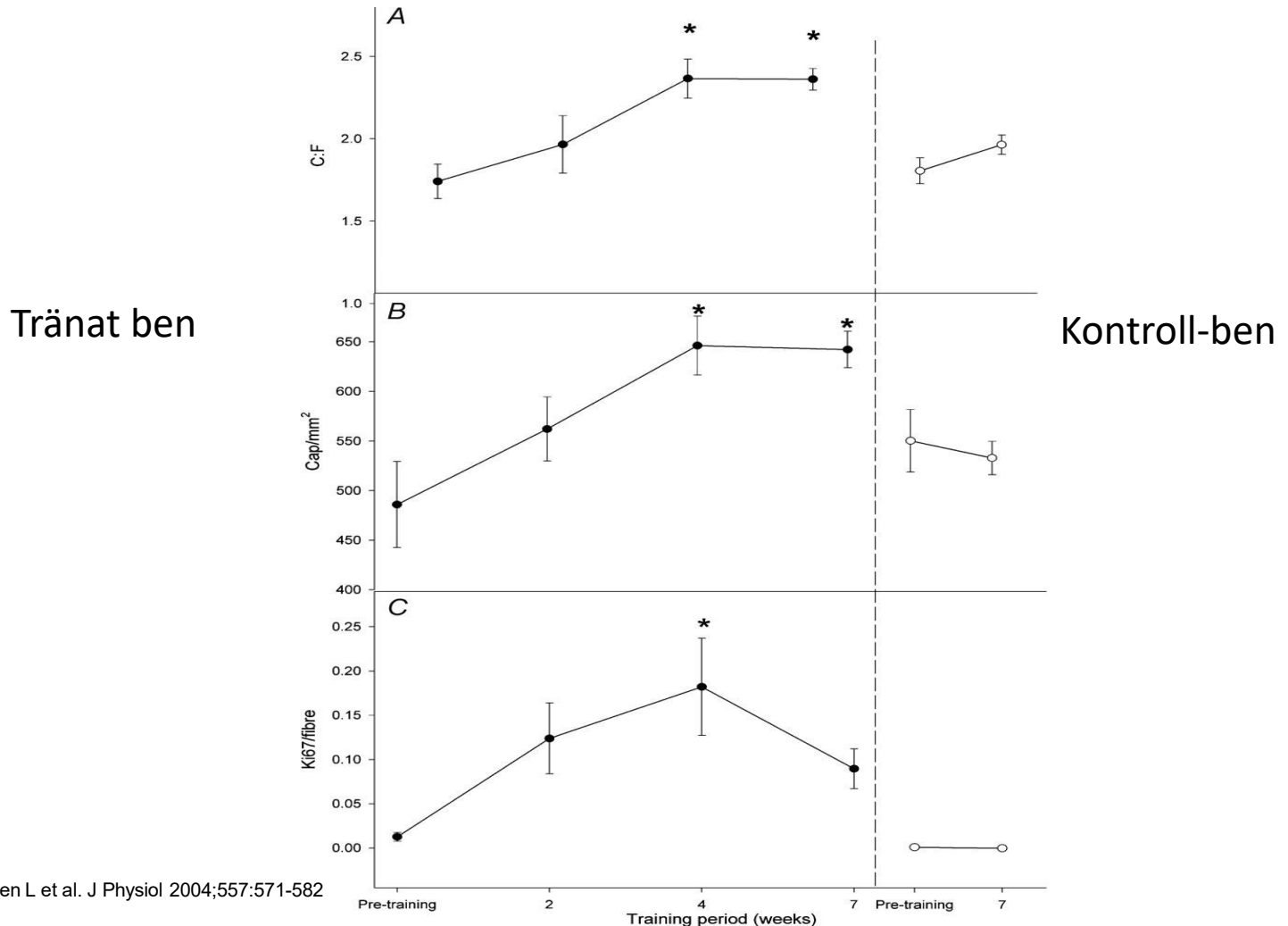
Ca 1/30 kapillärer öppna

ARBETE

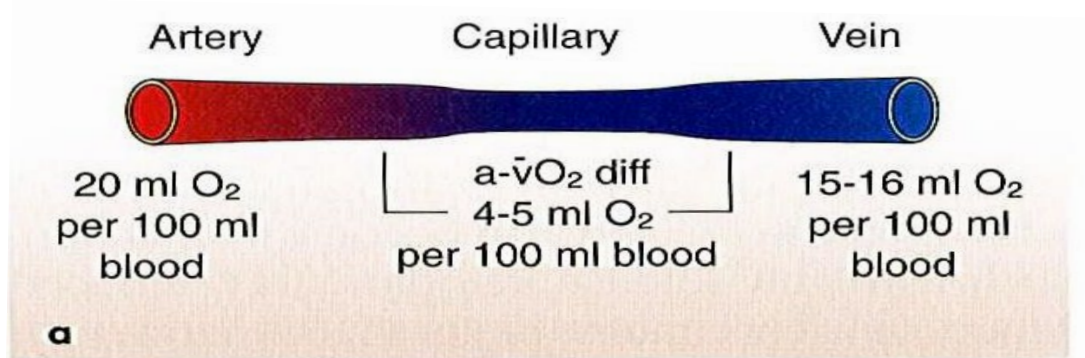


Presence of capillaries and proliferating endothelial cells in human skeletal muscle before, during and after a 7 week training period a trained (•) and control (○) leg.

Capillary-to-fibre ratio (C:F), capillary density (cap/mm²) and endothelial cell associated proliferating cells



Vila



Intensivt
arbete

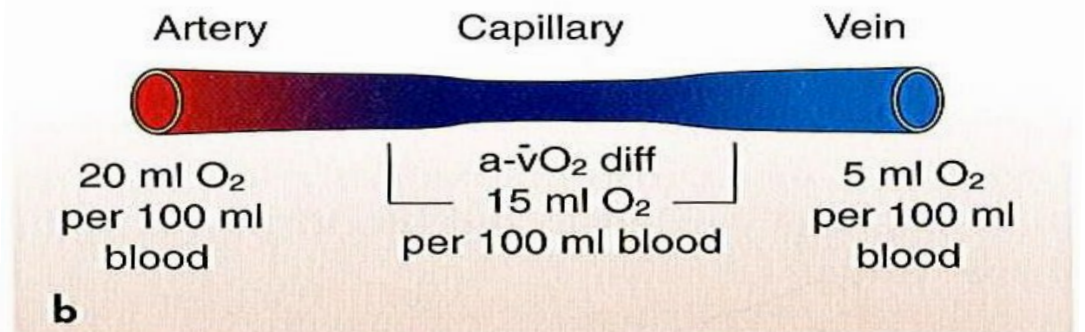
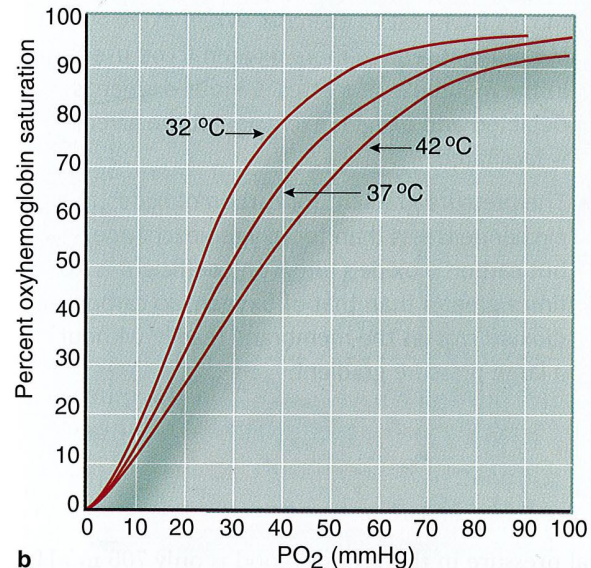
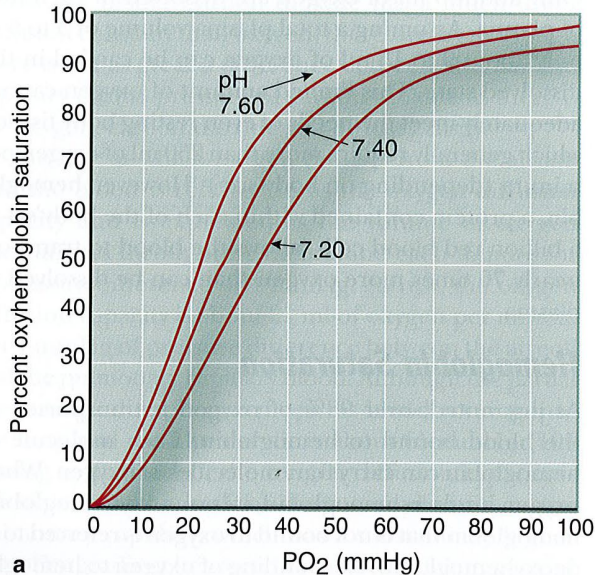
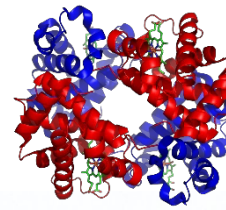


Figure 8.6 The arterial-venous oxygen difference ($a-\bar{v}O_2$ diff) across the muscle (a) at rest and (b) during intense aerobic exercise.

$$VO_2 = \text{Cardiac Output} \times a-vO_2 \text{ diff}$$

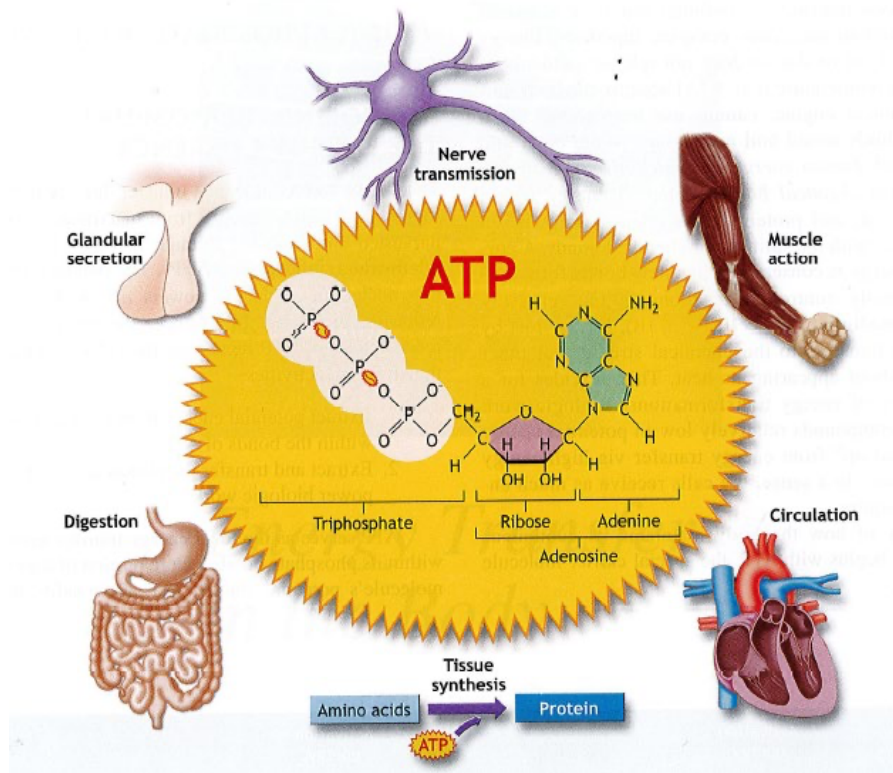
Dissociationskurva för Hemoglobin



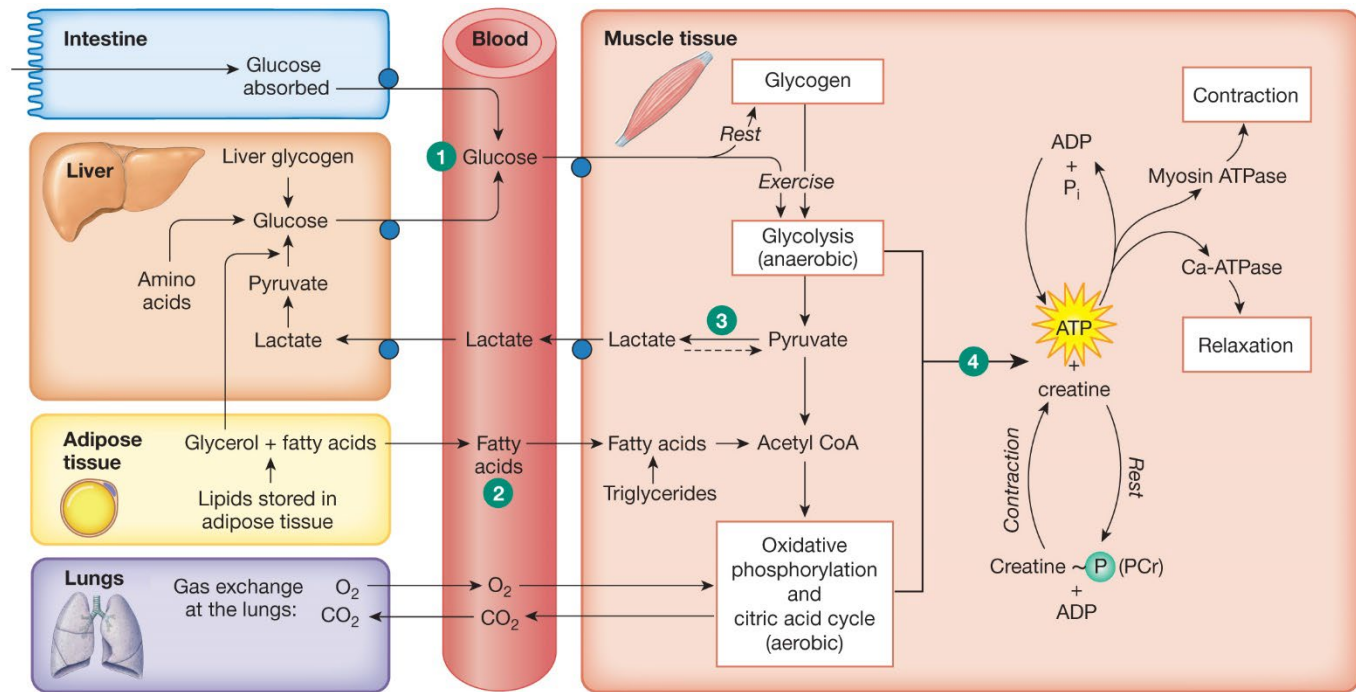
PO₂ i muskler ca 40 mmHg – brant kurva gör att små förändringar orsakar stora ändringar i syreavgivelse

Vid arbete – högre temperature och lägre pH gör avgivelsen än högre

Kroppens valuta för alla energikrävande processer - ATP



I den arbetande muskeln bildas ATP från kreatinfosfat eller förbränning av energisubstrat: GLUKOS, FETT, (och PROTEIN)



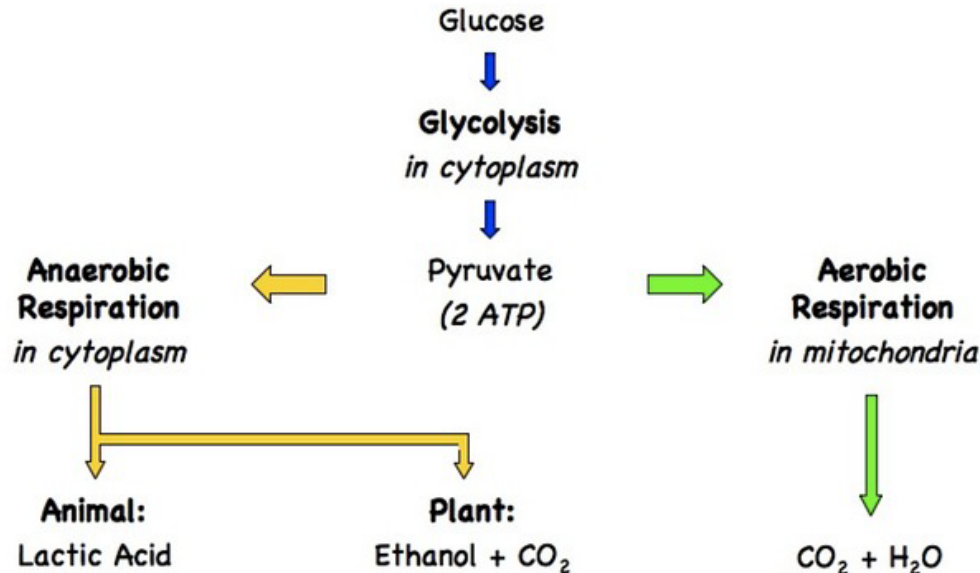
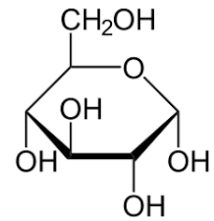
1 Glucose comes from liver glycogen or dietary intake.

2 Fatty acids can be used only in aerobic metabolism.

3 Lactate from anaerobic metabolism can be converted to glucose by the liver.

4 Both aerobic and anaerobic metabolism provide ATP for muscle contraction.

Energy Transfer From Glucose Catabolism

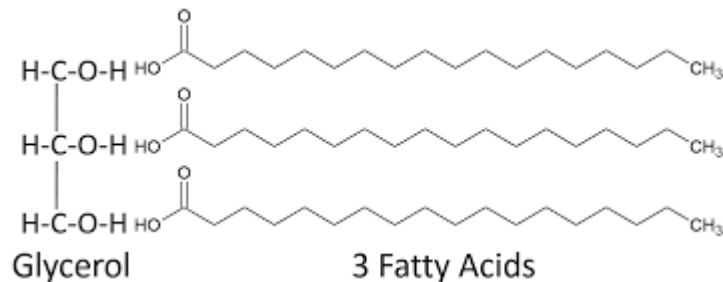


Nedbrytning av glukos till laktat ger **2 ATP**

Source	Reaction	Net ATPs
Substrate phosphorylation	Glycolysis	2
2 H ₂ (4 H)	Glycolysis	4
2 H ₂ (4 H)	Pyruvate → Acetyl-CoA	6
Substrate phosphorylation	Citric acid cycle	2
8 H ₂ (16 H)	Citric acid cycle	22

TOTAL: 36 ATP

Total Energy Transfer From Fat Catabolism



Source	Pathway	ATP yield per molecule neutral fat
1 molecule glycerol	Glycolysis + Citric acid cycle	19
3 molecules of 18-carbon fatty acid	β -oxidation + Citric acid cycle	<u>441</u>
		TOTAL: 460 

RESPIRATORISK KVOT, RQ. (RER)

FÖRHÅLLET MELLAN BILDAD MÄNGD CO₂ OCH FÖRBRUKAD MÄNGD O₂

$$\frac{VCO_2}{VO_2}$$



- Vid förbränning av **KOLHYDRATER** förbrukas lika många O₂ molekyler som det bildas CO₂ molekyler, **dvs RQ = 1**

- Vid förbränning av **FETT** förbrukas betydligt fler O₂ molekyler än det bildas CO₂ molekyler (140 % fler), **dvs RQ = 0.71**

- Beroende på vilken blandning av de olika energikällorna som vi använder kommer alltså RQ att variera mellan 0.71 och 1.

(OBS - Vid anaerob förbränning går RQ över 1)

At low-intensity exercise, muscles get more energy from fats than from glucose. During high-intensity exercise (levels greater than 70% of maximum), glucose becomes the main energy source.

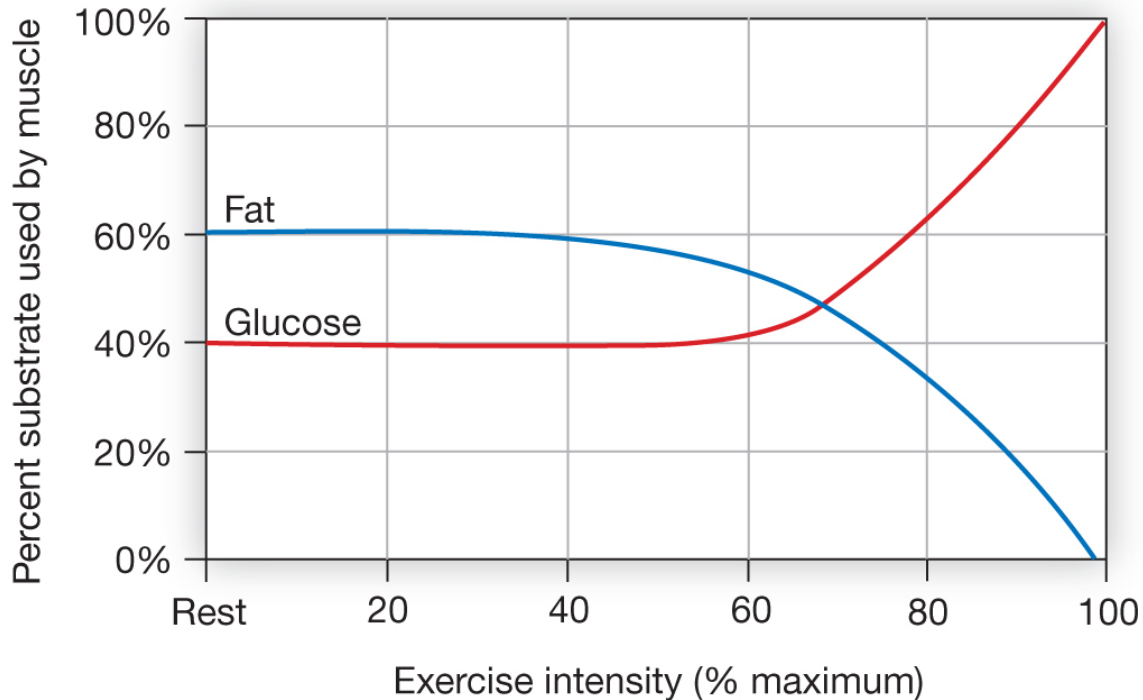
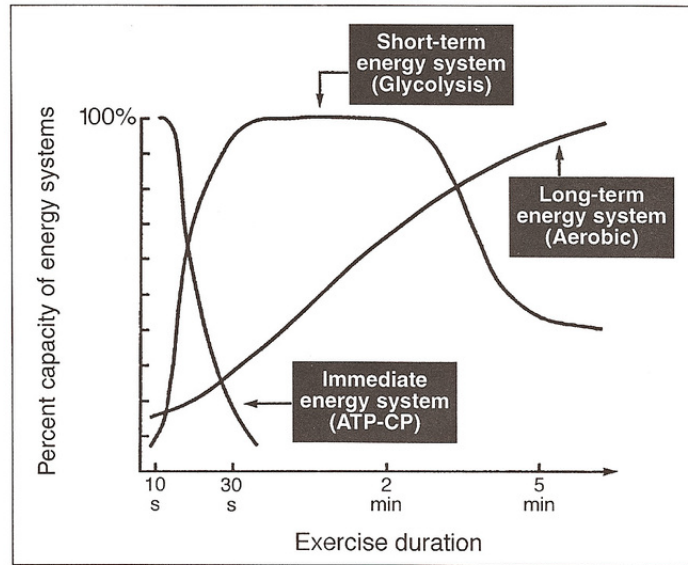


Figure 3-1: The three systems of energy transfer and their percentage contribution to total energy output during all-out exercise of different durations.



Reference: McArdle, Katch and Katch. (1996). Exercise Physiology. Energy, Nutrition and Human Performance. Williams & Wilkins, Maryland. p. 190.

- Kortvarigt hårt arbete, 10-20 sek: Tillgängligt ATP (ATP-CP).
- Hårt arbete upp till några minuter: anaerob förbränning av glukos (glykogen).
- Längre arbete: aerob förbränning av fett och glukos (glykogen).

Energy store

Phosphocreatine



100 kcal

Glycolysis



250 kcal

Anaerobic

Carbohydrate
Oxidation



Carbohydrates 600g
(Liver glycogen 100g
Muscle glycogen 500g)
2 500 kcal

Fat
Oxidation

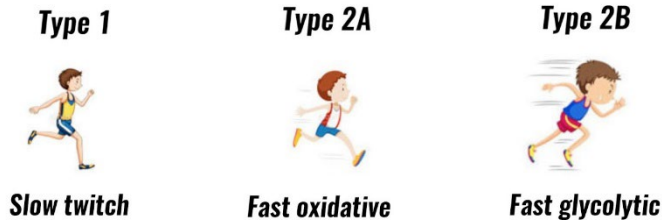


Fat depot > 8kg
55 000 kcal

Aerobic

Individer använder energisystemen i olika utsträckning beroende på genetik, hur mycket de tränar, vad de tränar och på olika näringsstrategier.

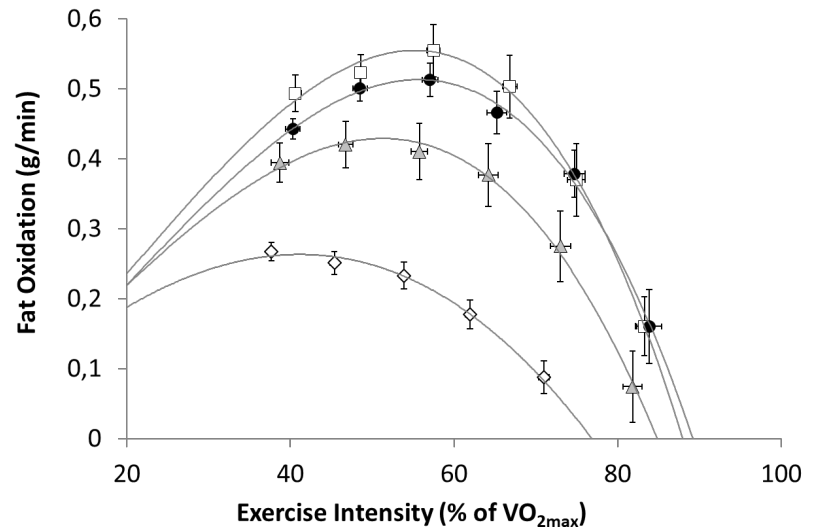
Types Of Muscle Fibres



Stor genetisk komponent, men kan ändra fibertyp med träning. Och kan ändra storlek, innehåll och antal fibrer.

Exempel på näringsstrategi:

- ◇ Control test
- After fasting
- After fasting + protein intake
- △ After fasting + carbohydrate intake



ANAEROBT ARBETE OCH LAKTATBILDNING

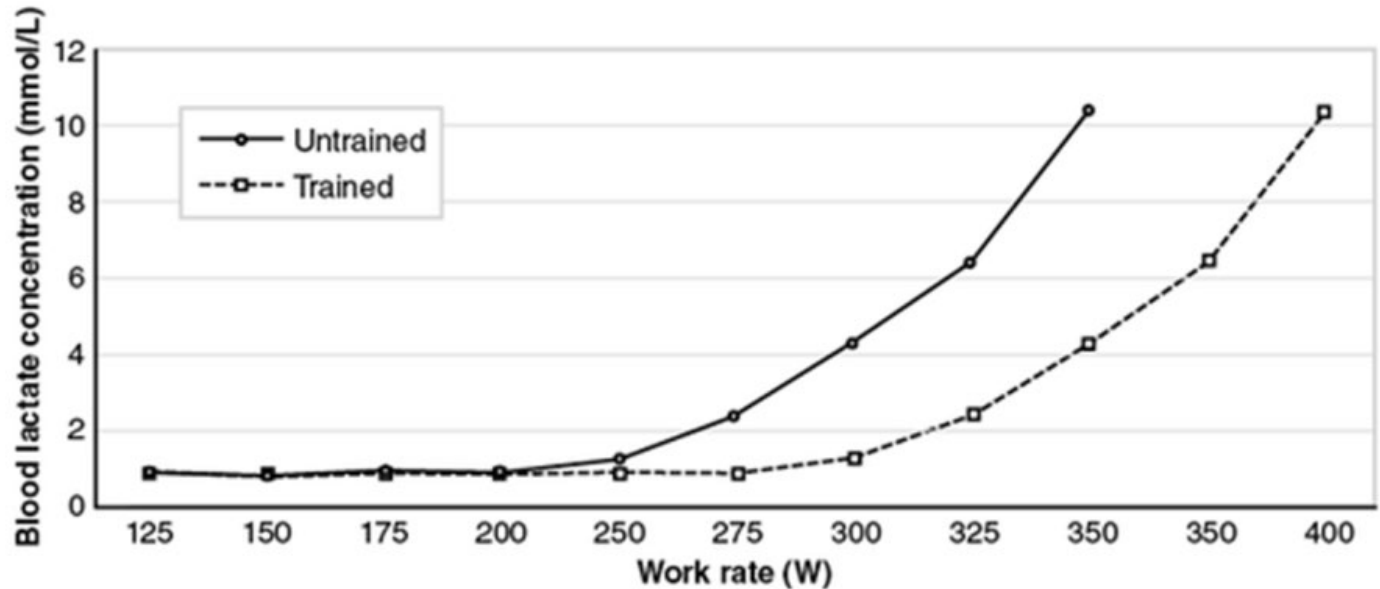
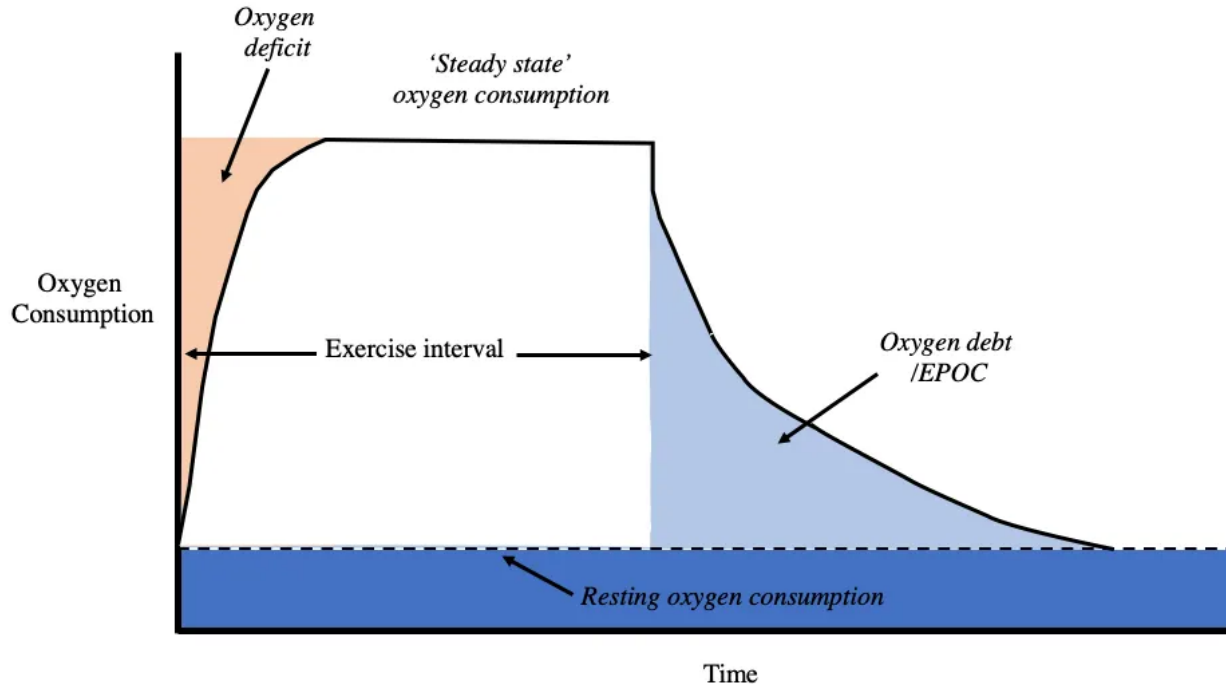


FIGURE 6.10 The lactate threshold training effect.

ANAEROBT ARBETET OCH “SYRESKULD”

EPOC- Excessive post-exercise oxygen consumption



En del av EPOC går åt till att återställa anaeroba systemen (kreatinfosfat och laktat-rensning). Större del till återfyllnad av energilager och reparation/underhåll (upp till 48h förhöjd syreförbrukning).

Temperaturreglering

*MUSKLERNAS VERKNINGSGRAD ca 20-25%
(förmåga att använda energin till muskelarbete)*

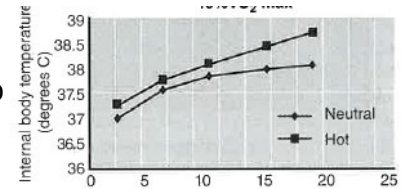
*Dvs vi bildar vid arbete överskotts-värme som vi
måste göra oss av med.*

*KONVEKTION genom ökat blodflöde till huden.
Innebär dock minskad andel av
hjärtminutvolymen till musklerna.*

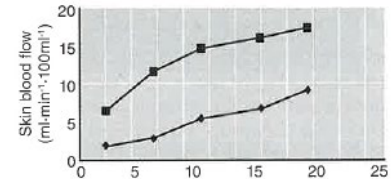
*SVETTNING: viktigaste mekanismen för att
avge värme. Innebär samtidigt vätskeförlust
och minskad blodvolym. Ju varmare och
fuktigare vädret är ju större blir förlusterna.*

Tempreglering under ett relativt hårt arbete
(70%) i neutral temp (◆) eller varm temp (■)

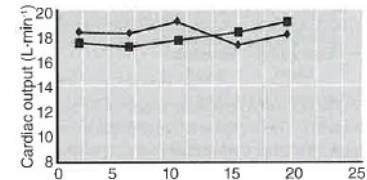
Kroppstemp



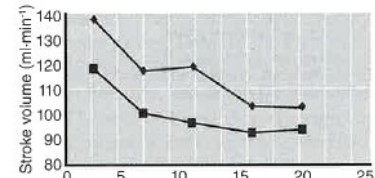
Blodflöde
Hud



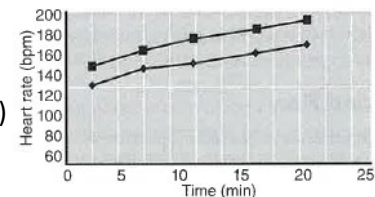
Cardiac
Output



Slagvolym



Hjärtfrekvens
(Cardiac drift)



Temperaturreglering forts.

Svett har lägre osmolaritet än plasma, men innebär ändå saltförluster. Kan acklimatiseras (ökad aldosterone utsöndring)

Vätskeförlusten vid tex ett maratonlopp kan uppgå till 2-3 l/tim.

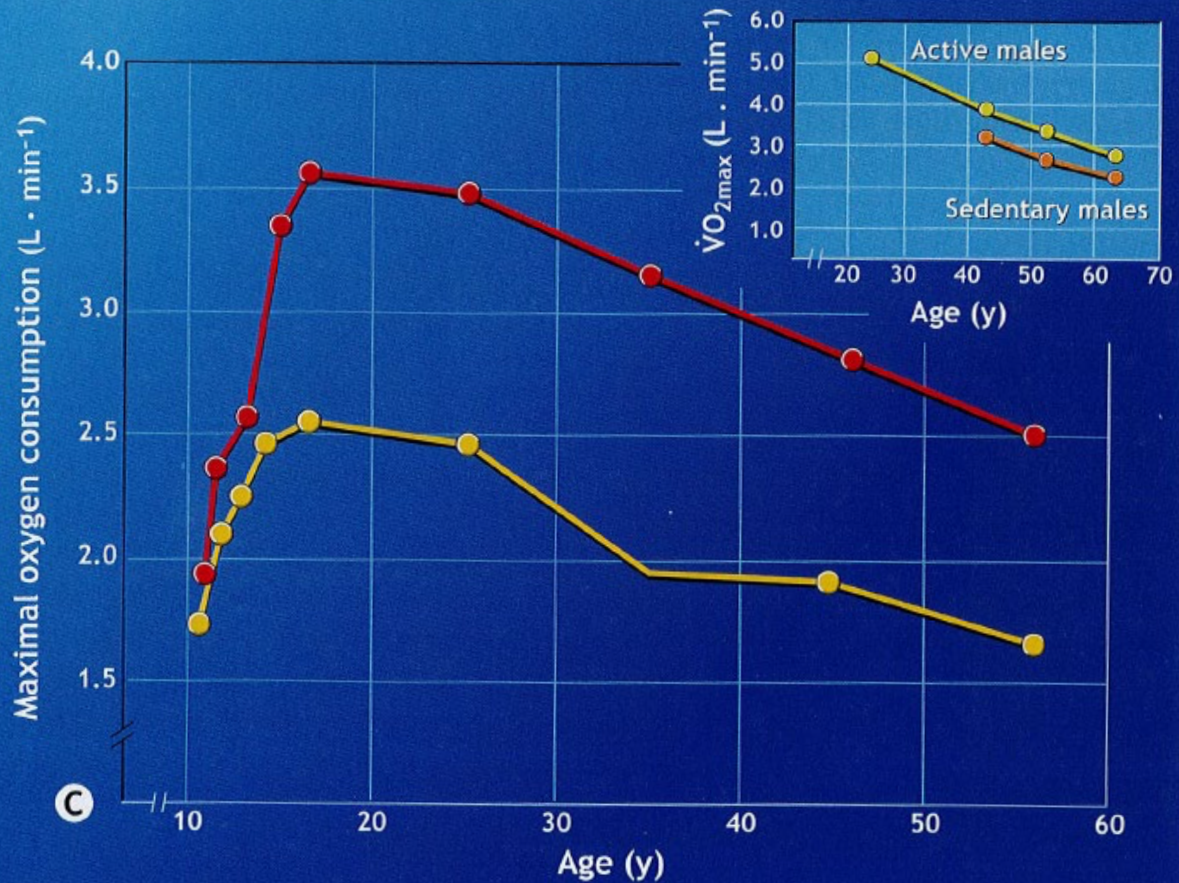
Hur mycket ska man dricka?



Rekommendation - lita på törst men som mest 2-3% viktförlust



ÅLDER OCH MAX $\dot{V}O_2$



■ Females ■ Males

Continuous improvements in VO_2 max over 10 weeks of high-intensity aerobic training

% förbättring



Snabb effekt för otränade individer

$\text{VO}_{2\text{max}}$, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$

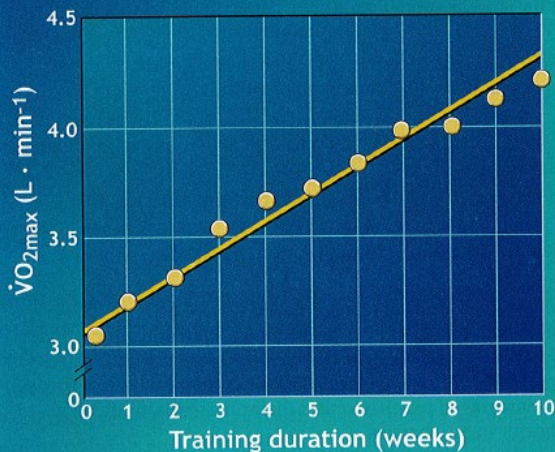
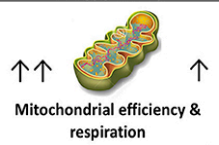
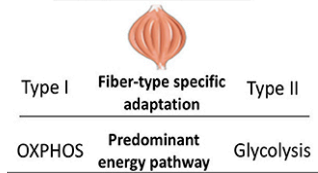
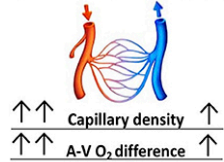
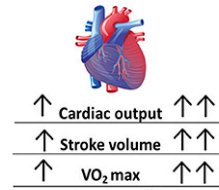


Figure 21.21 • Continuous improvements in $\text{VO}_{2\text{max}}$ during 10 weeks of high-intensity aerobic training. (From Hickson RC, et al. Linear increases in aerobic power induced by a program of endurance exercise. *J Appl Physiol* 1977;42:373.)

Hur ska man träna?

Moderate Intensity Continuous Training



Langan & Grosicki "Exercise is medicine...and dose matters" 2021

HIIT/SIT



High Intensity Interval Training/
Sprint Interval Training



Det mesta pekar på bäst utfall både för uthållighetsatleter (prestation) och metabola syndromet (hälsa) är att ha en MICT bas med HIIT/SIT träning som komplement – pyramidstruktur

Vad är mest realistiskt för en person med metabola syndromet?

Aerob träning - Centrala effekter

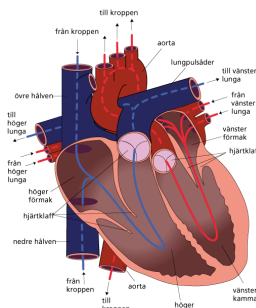
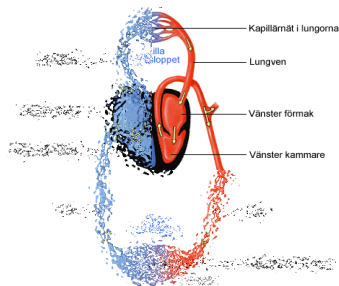
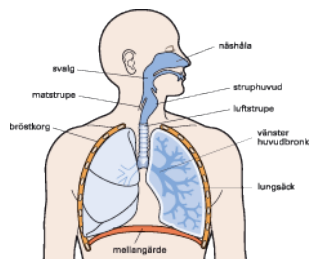
TABLE 9.4

Summary of Expected Physiological Alterations Resulting From Endurance Training in a Previously Inactive Man, Compared With Values for a Male World-Class Endurance Athlete

Variables	Sedentary normal male		World-class endurance runner
	Pretraining	Posttraining	
Cardiovascular			
HR at rest (beats/min)	71	59	36
HRmax (beats/min)	185	183	174
SV at rest (ml/beat)	65	80	125
SVmax (ml/beat)	120	140	200
$\dot{Q}$ at rest (L/min)	4.6	4.7	4.5
$\dot{Q}$ max (L/min)	22.2	25.6	34.8
Heart volume (ml)	750	820	1,200
Blood volume (L)	4.7	5.1	6.0
Systolic BP at rest (mmHg)	135	130	120
Systolic BPmax (mmHg)	210	205	210
Diastolic BP at rest (mmHg)	78	76	65
Diastolic BPmax (mmHg)	82	80	65



Leverera syre till arbetande muskler för att omvandla näringsämnen till mekanisk energi



Central nivå

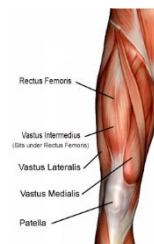
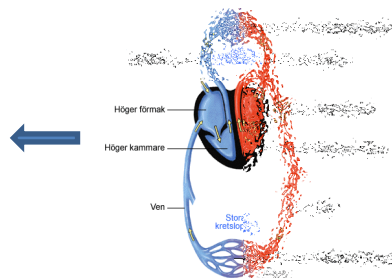
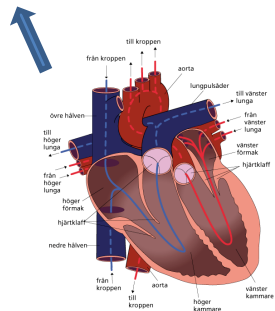
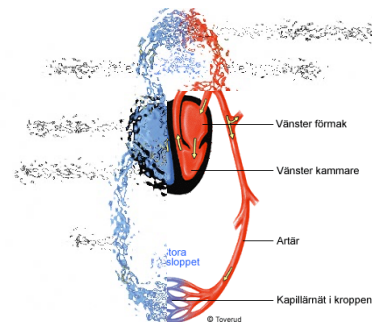
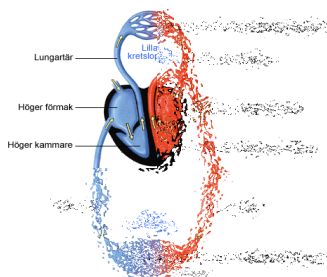
- Hjärta
- Lungor

Mellan nivå

- Blodmängd
- Blodtryck
- Hemoglobin koncentration
- Blodflöde

Lokal nivå

- Kapillärtäthet
- Mitokondrier
- Blodflöde



Energisubstrat

- Fett
- Kolhydrater
- (Proteiner)
- Fosfater (ATP-PCr)

Räkne-exempel:

Normal person med

maxpuls 200bpm

maximal slagvolym 100ml

➡ max hjärminutvolym $200 \times 100 = 20\text{L/min}$

Koncentrationen syre = 200ml/L syre

➡ max 4.0L O₂/min

om ALLT syre togs omhand (venöst pO₂=0, ej realistiskt)

Alltså, öka slagvolymen för att öka VO₂max.

Men – inte bara VO₂max som påverkar prestation.

(Laktattröskel, oxidativ förmåga osv)

Ytterligare om cirkulation och träning :

Den ökade slagvolymen verkar framförallt ha att göra med Frank-Starling effekten pga ökad ventrikelfyllnad. Ökad ventrikelfyllnad pga

- 1) Ökad kammarstorlek
- 2) Ökad blodvolym (vilket ökar vänster förmaks drivande tryck och ökar fyllnad)
- 3) Ökad diastol funktion, alltså kammaren vidgar sig lättare
- 4) Lägre HR (vid vila och submax arbete) vilket ger längre tid för fyllnad.

(överkurs):

Intressant nog verkar inte äldre personer öka sin ventrikulära compliance med träning (krävs livslång träning). Men slagvolymen ökar med träning i äldre män, ffa på grund av ökad blodvolym.

Äldre kvinnor verkar inte öka slagvolym med träning... (men livslång träning ger samma effekt som hos män). Äldre kvinnor kan öka sin VO₂max, men då pga ökad av-dif. (*OBS begränsat enligt räkneexemplet på förra bilden*)

Aerob träning - Perifera effekter

Fler och större mitokondrier

Större kapilläryta

Myoglobin halten ökar något

Ökad enzymaktivitet (oxidativa enzymer)

Större förmåga att förvara glycogen i muskeln

Större mängd triglycerider som förvaras i muskeln



Större förmåga att använda fett som energikälla, som innebär att muskeln kan spara glycolysoendepåerna

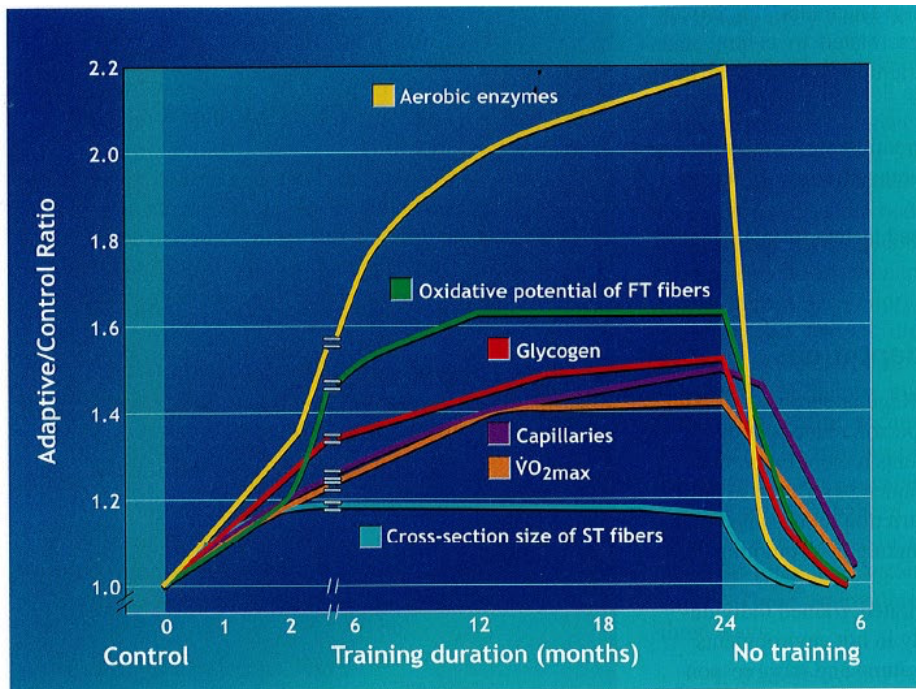
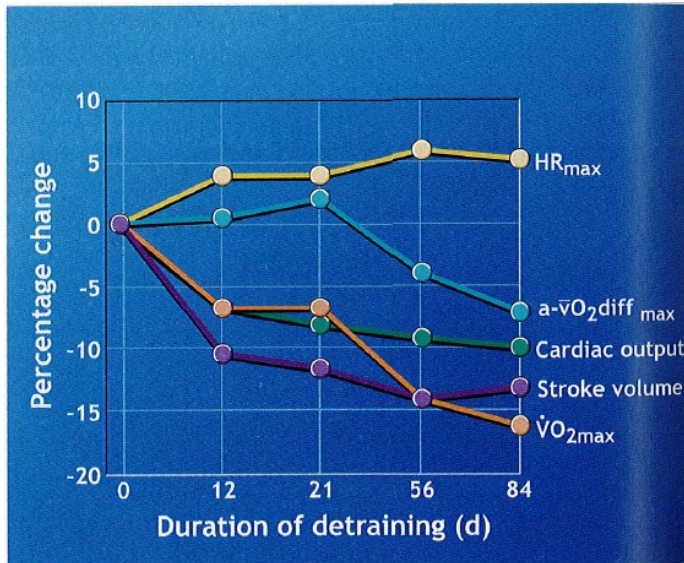
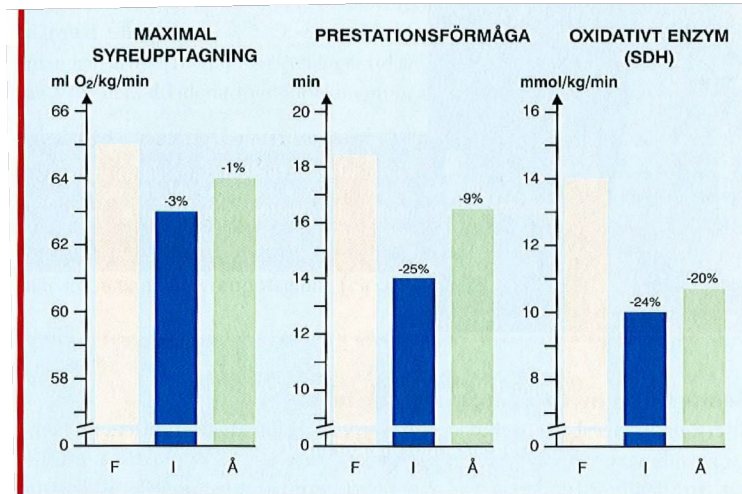


Figure 21.15 • Generalized summary of increase in aerobic capacity and muscle adaptations with endurance training. (Modified from Saltin B, et al. Fiber types and metabolic potentials of skeletal muscles in sedentary man and endurance runners. Ann NY Acad Sci 1977;301:3.)

Vad händer vid period av inaktivitet?



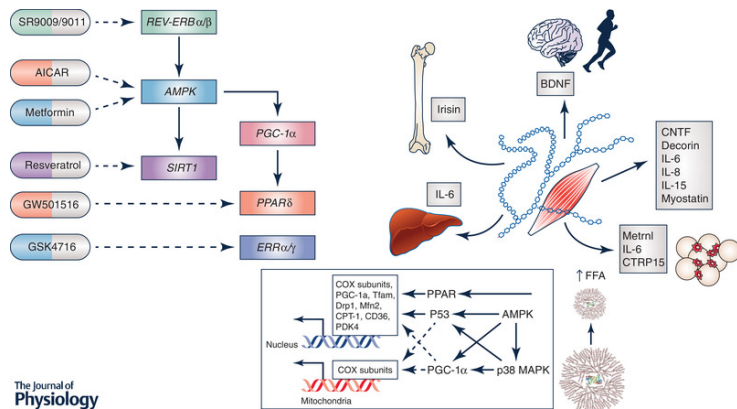
Average changes in maximum heart rate (HR_{max}), stroke volume, arteriovenous oxygen differences ($a-\bar{v}O_2 \text{ diff}_{max}$), cardiac output, and $\dot{V}O_{2max}$ over 84 days of detraining.



Figur 25. Värderna för maximal syreupptagning, prestationsförmåga (löpning intill utmattnings med en given fart på löpbandet) samt för aktiviteten av ett oxidativt enzym (succinat dehydrogenas, SDH) i underbensmuskulaturen hos löpare i förhållande till; när löparen tränade (F: före), efter två veckors total inaktivitet, gipsat ben (I: inaktiv) och två veckor efter det att träningen återupptogs (Å: återupptagen träning).

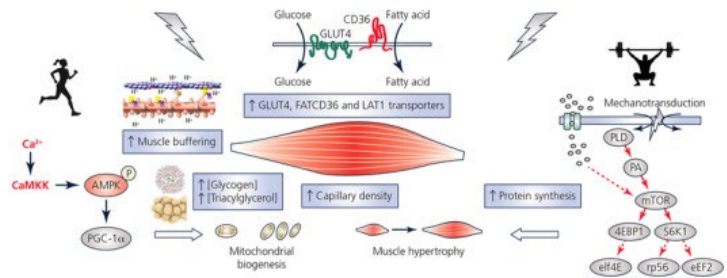
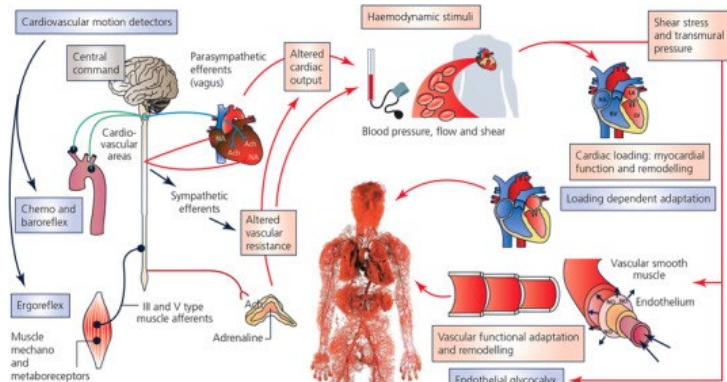
Kan vi farmakologiskt härma hälsoeffekten av träning?

“Exercise mimetics”



Hittills har sk exercise mimetics varit inriktat på metabola funktioner i muskeln.

- Osannolikt att något/några läkemedel kan härma de många olika effekterna av träning.



Stimulus	Sensor	Downstream effector
P _{O₂}	PHDs	HIF-1 α
NAD ⁺ /NADH	SIRT6	PGC-1 α , FOXO1, p53
AMP/ATP	AMPK	HDAC, PGC-1 α , CREB, SIRT1, HIF-1 α
Mechanical stress	MAPKs	PGC-1 α , CREB, ATF2
[Ca ²⁺]	CaMKs	HDAC, CREB, SRF
Mechanosensation	FAK	mTOR, p70 ^{S6}
Sarcolemmal disruption	PA	Akt, mTOR, FOXO1

“Realistically, what single pill could simultaneously increase skeletal muscle oxidative capacity and endurance, improve muscle strength and function, stimulate cardiovascular remodelling and enhance autonomic nervous system function?”