Om inertgastransport

eller

(Hur kommer kvävet in i och ut ur kroppen vid dykning)

2025

Hans Örnhagen, MD, PhD

Historia

- På 1600-talet observerade Boyle en gasbubbla som tillväxte i ögat på en orm som utsattes för subatmosfäriska tryck. Begreppet dekompressionssjuka fanns inte. Man dök bara med öppna klockor d.v.s. grunda djup och korta tider på denna tiden.
- Mitten på 1800-talet observerade man att personer som arbetade i trycksatta kassuner fick knä och axelvärk efter dekompression
- 1870 Paul Bert drar slutsatsen att besvären orsakas av bubblor som bildats vid dekompression och kallar detta dekompressionssjuka.

Notera att vi idag, 150 år senare, ännu inte riktigt förstår vad dekompressionssjuka är.

Historia 2

- Behandling genom rekompression börjar genomföras i slutet av 1800-talet

- Haldane och medarbetare börjar studera fenomenet systematiskt i början av 1900-talet och finner att dykare verkar tåla en momentan trycksänkning till halva det tryck man varit på utan att få dekompressionssjuka.

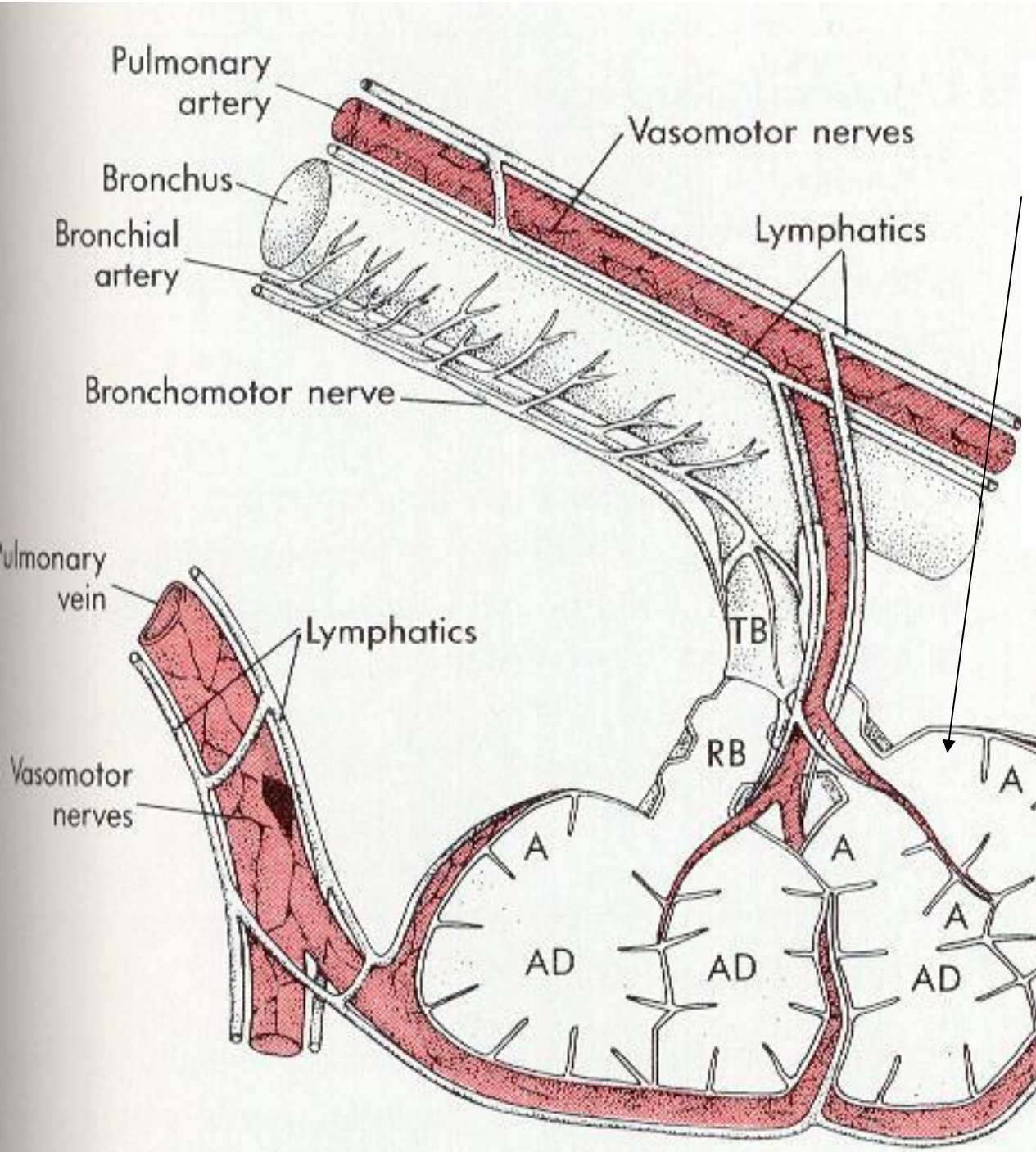
- Man börjar studera fysikaliska fenomen i samband med gastransport i kroppen.

För att bättre förstå hur tabellmakarna tänker måste man förstå en del basbegrepp.

- Luftens sammansättning
- Diffusion och perfussion
- Övermättnad och bubbelbildning
- Kroppens reaktion på bubblor

I lungorna

- Stor diffusionsyta (70 – 80 m^2) och kort diffusionsväg (ca 2 µm). Artärblodet har därför alltid samma inertgaspartialtryck som alveolargasen.
- Blodet rymmer 0.01 ml N_2 per ml blod om PN_2 är 75 kPa. Som fysikaliskt löst.
- Om vi andas ren oxygen blir artärblodet fritt från nitrogen.



För att förhindra stora förluster av vatten över alveolarmembranen måste luften som når hit vara 100% mättad med H2O.

För att medge snabb transfer av gaser över alveolarmembranen måste den vara tunn.

Vätskefilmen på alveolens insida innehåller surfactant för att minska ytspänningen och tillåta små och stora alveoler att vara hopkopplade i samma bronchträd.

Vad är gassammansättningen i lungorna?

- Ren torr luft innehåller 20.9% oxygen, 78% nitrogen, 1% argon och 0.1% annat = 100%
- Vid inandning tillförs:

  vattenånga till 6.3 kPa

  CO_2 till 5.4 kPa

  O_2 extraheras till 13.4 kPa.

  Summan av dessa gaser är 25,1 kPa

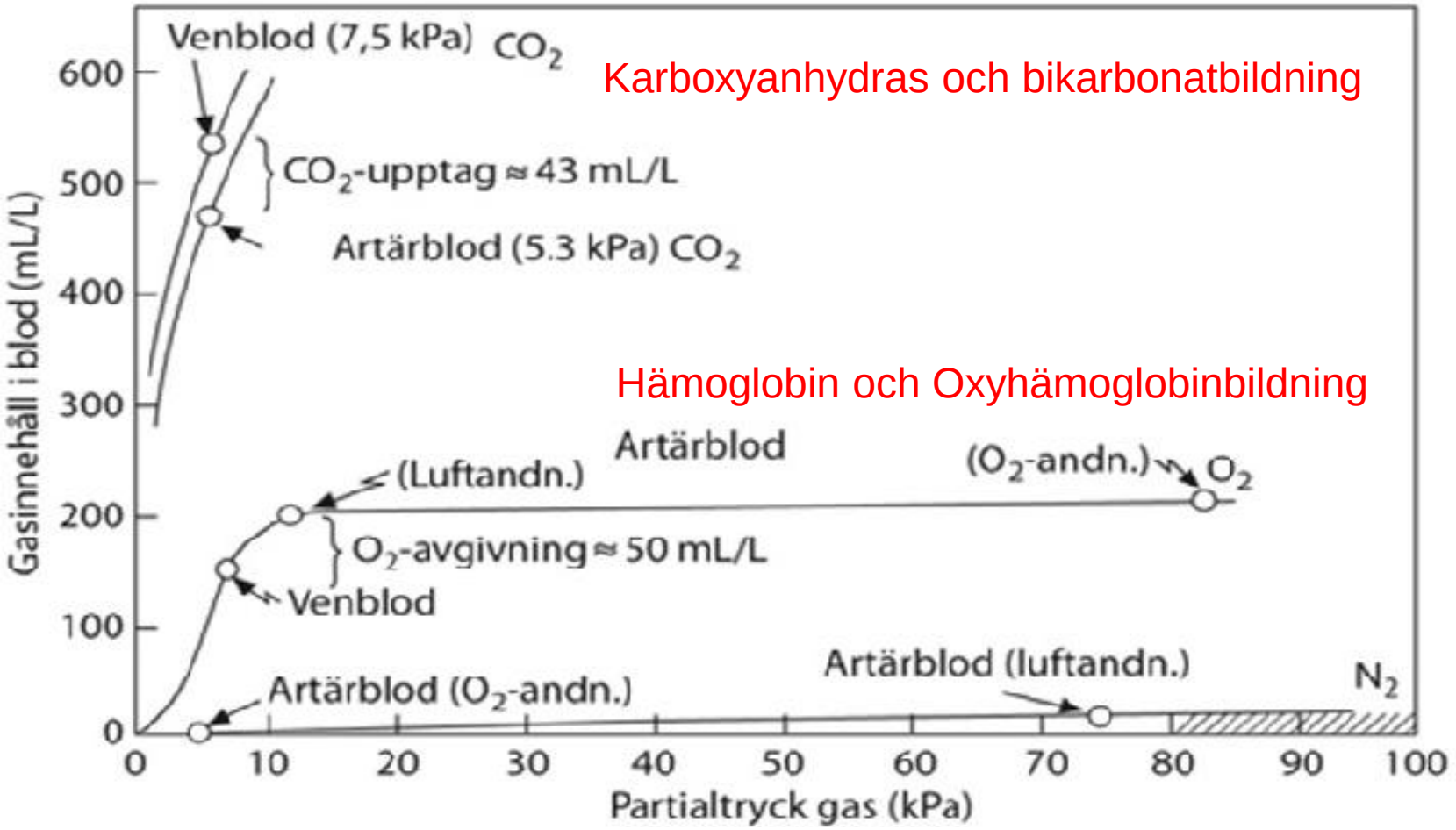
  Resten 100 – 25.1 dvs 74.9 kPa är N_2

Partialtryck i torr luft och i lunga

	Utomhusluft	I lunga
N_2	78	74,9
O_2	20,9	13,4
Ar	1	0,9
CO_2	0,04	5,4
H_2O	0,1	6,3
Tryck	100 kPa	100 kPa

Anfuktning samt tillsats av CO_2 och borttagande av O_2 ligger bakom förändringarna.

Innehåll av koldioxid, oxygen och nitrogen i blod vid varierande gaspartialtryck



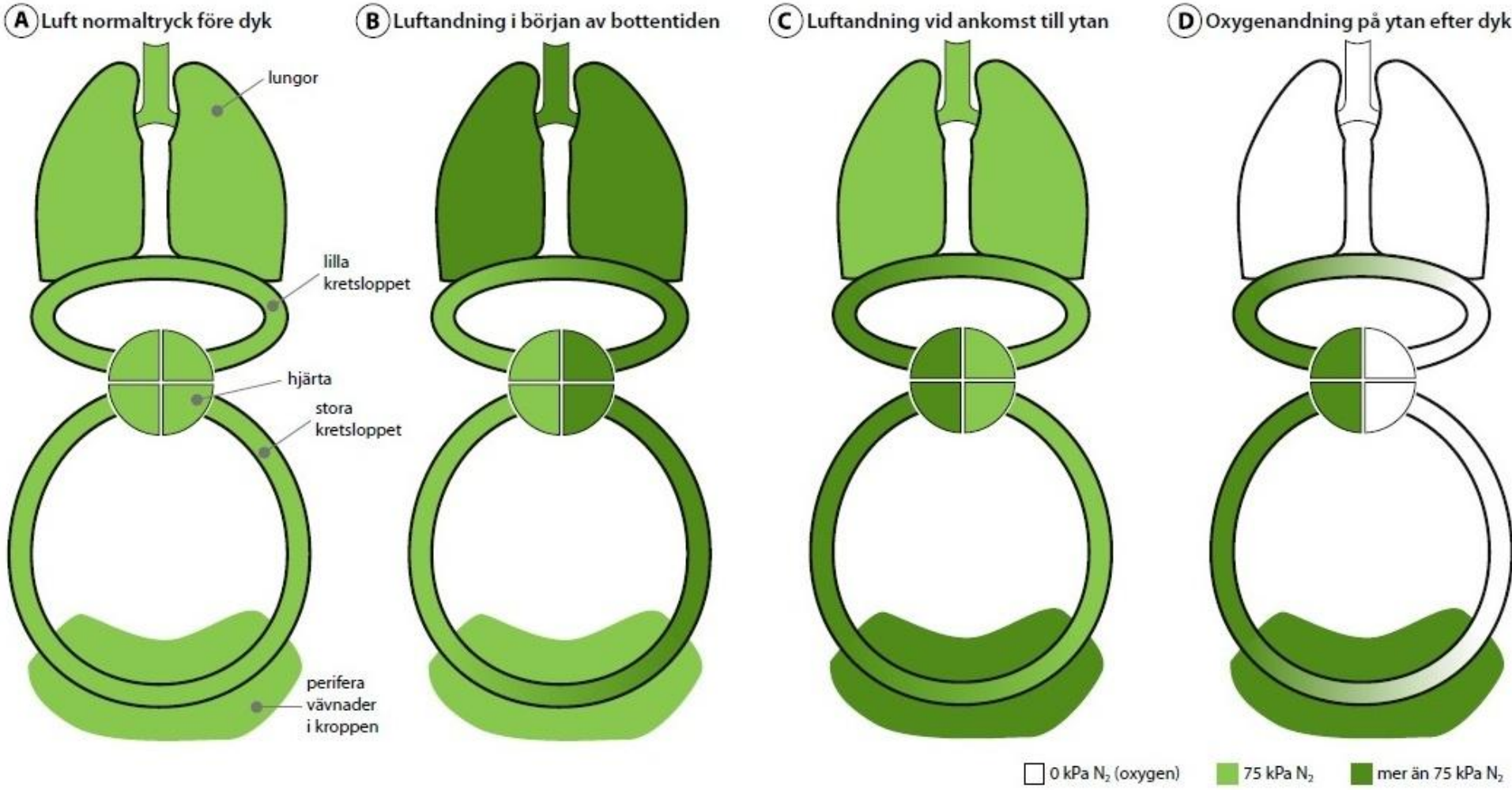
Kroppen innehåller fysikaliskt löst nitrogen redan vid 1 atm

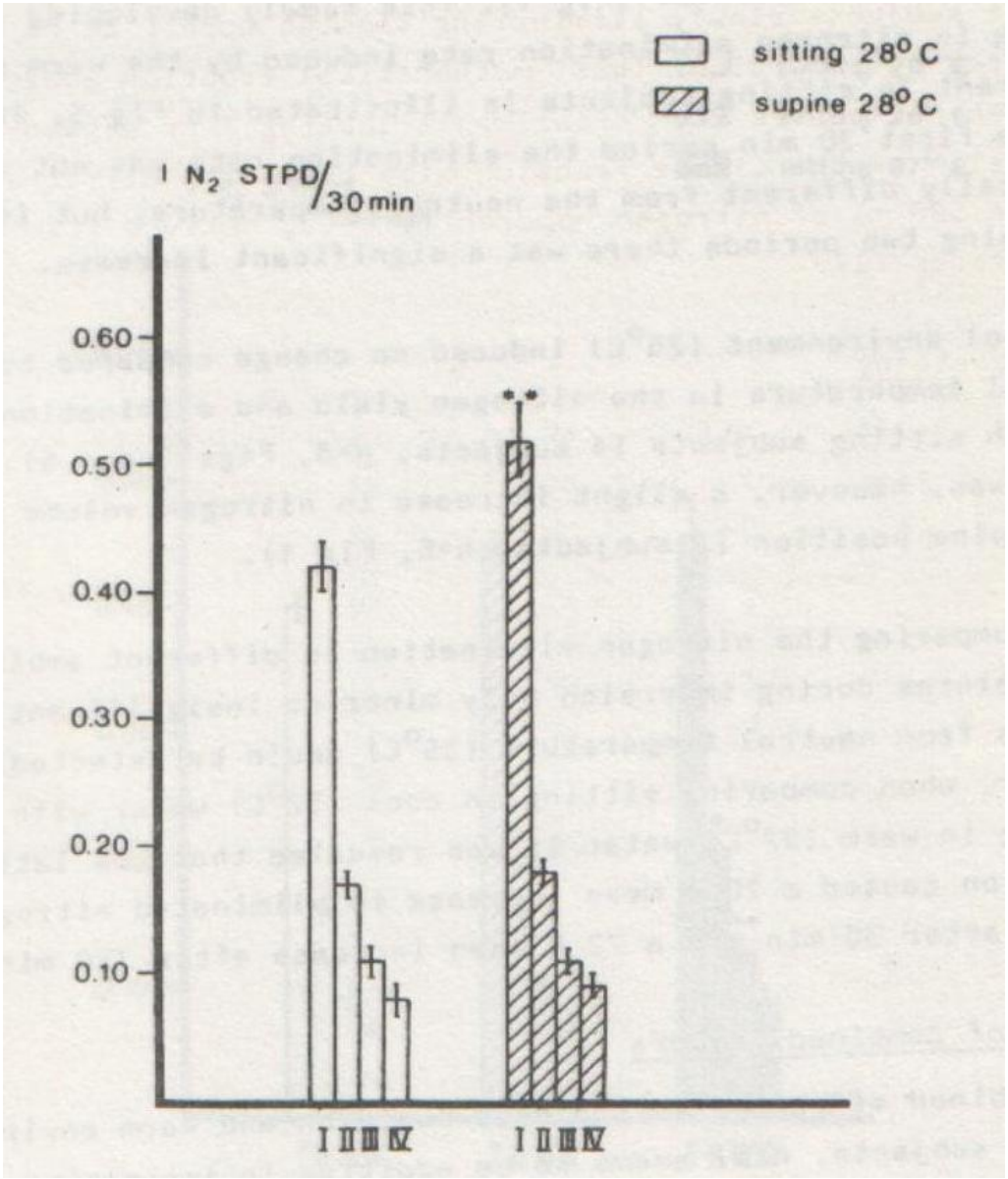
- Vi är i princip ”mättnadsdykare” vid 100 kPa (1 atm). PN_2 i lungorna och i kroppen 75 kPa
- Kroppen, totalt 80 kg, innehåller då:

  i vattenfasen 65 kg (0.75x0.012x65) 580 ml N_2

  i fettfasen 15 kg (0.75x0.062x15) 680 ml N_2

  d.v.s. totalt ca 1.3 liter N_2
- Stannar vi 12 tim på dubbla trycket 200 kPa löser kroppen ytterligare 1.3 liter N_2


A Luft normaltryck före dyk
B Luftandning i början av bottentiden
C Luftandning vid ankomst till ytan
D Oxygenandning på ytan efter dyk
lungor
lilla kretsloppet
hjärta
stora kretsloppet
perifera vävnader i kroppen
0 kPa N2 (oxygen)
75 kPa N2
mer än 75 kPa N2



Nitrogenutvädring under oxygenandning ur sex normalviktiga personer sittande och liggande.

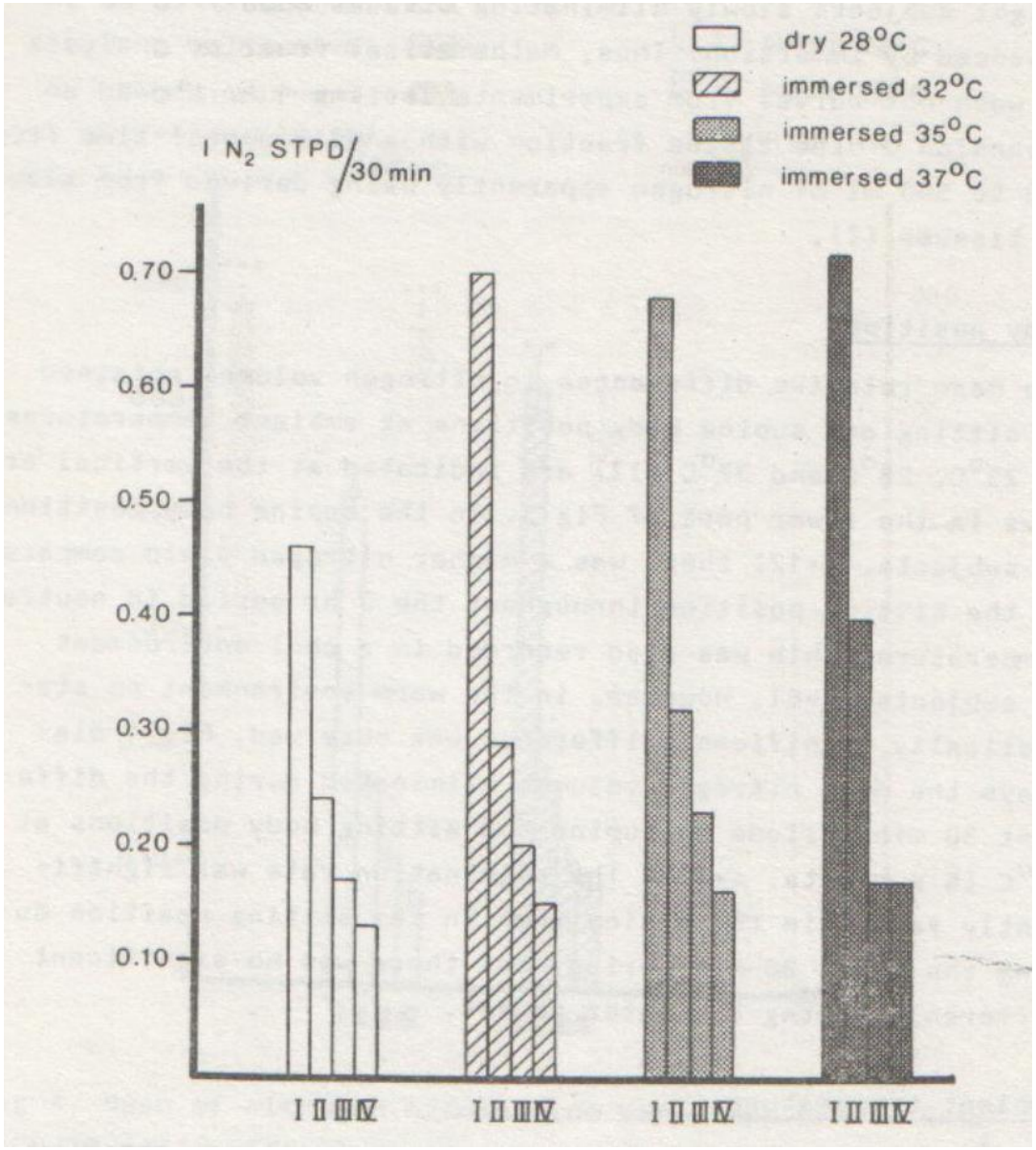
I = 0 – 30 minuter

II = 31 – 60 minuter

III = 61 – 90 minuter

IV = 91 – 120 minuter

(Från Ul Balldin 1973)



Nitrogenutvädring under oxygenandning ur en person med 20 kg övervikt sittande torrt och i vatten.
I = tid 0 – 30 minuter
II = 31 – 60 minuter
III = 61 – 90 minuter
IV = 91 – 120 minuter

(Från UI Balldin 1973)

Vid kompression, tryckhöjning

- Stiger partialtrycken för nitrogen och oxygen i lungorna
- Temperatur- och andningsregleringen tillser att partialtrycken för vatten och CO_2 förblir oförändrade.
- Artärblodet får ett förhöjt N_2 partialtryck och innehåller mer N_2 än vid vistelse i normaltryck.

Olika vävnadstyper

- Vävnader med hög genomblödning tillförs mer N_2 per tidsenhet än vävnader med låg genomblödning.

- Om vävnaden har hög löslighet för nitrogen tar det längre tid att uppnå mättnad

Olika vävnadstyper 2

- I vävnad kan kapilläravståndet vara så stort att man får diffusionsbegränsning av inertgastransporten.
- Små molekyler och molekyler med hög löslighet i mediet diffunderar snabbast

Vad avgör om en vävnad är snabb eller långsam?

Genomblödning	Löslighet för N_2: Hög	Löslighet för N_2: Låg
Låg	**Långsam vävnad** (Fettvävnad)	**Medel** (Kall hud, ej aktiv vävnad)
Hög	**Medel** (CNS)	**Snabb vävnad** (Arbetande muskel)

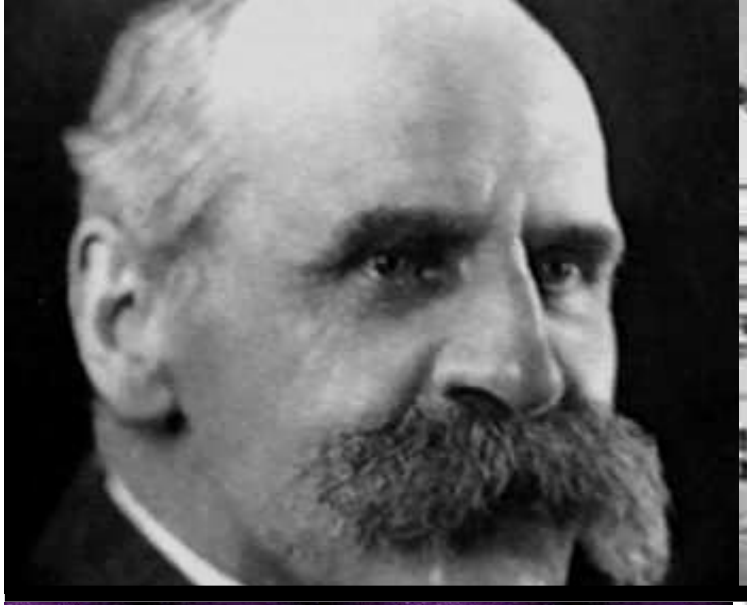
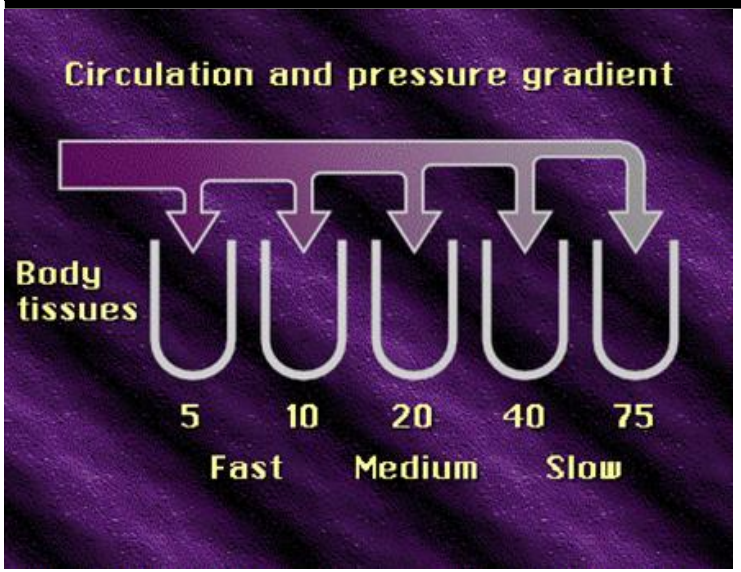
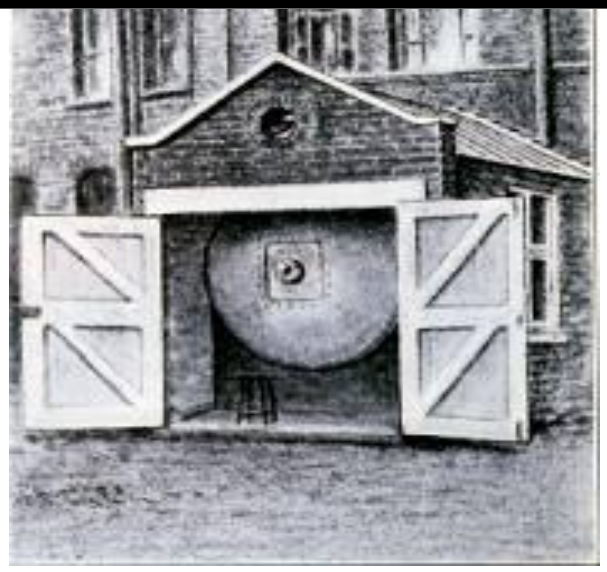


TABLE I.

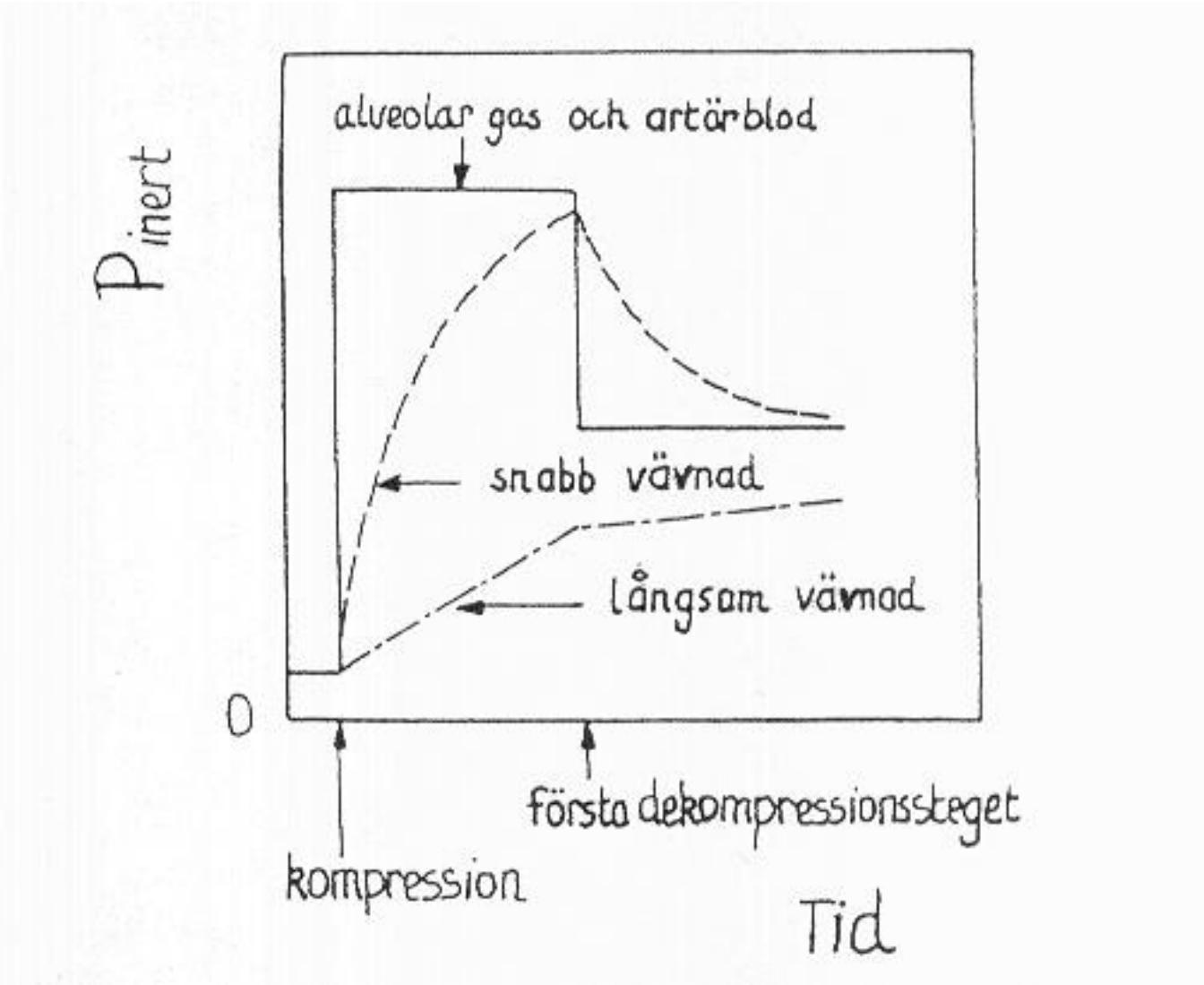
g the Ascent of a Diver after ordinary
from Surface.

Time from Surface to beginning of Ascent.	Approximate Time to First Stop.	Stoppages in Minutes at d			
		60 Ft.	50 Ft.	40 Ft.	30 F
No limit	—	—	—	—	—
Over 3 hours	1	—	—	—	—
Up to 1 hour	—	—	—	—	—
1-3 hours	1½	—	—	—	—
Over 3 hours	1½	—	—	—	—





Boycott AE, Damant GCC and Haldane JS. *J Hyg* 8: 342-443, 1908.


alveolar gas och artärblod
P inert
snabb vävnad
långsam vävnad
0
kompression
första dekompressionssteget
Tid

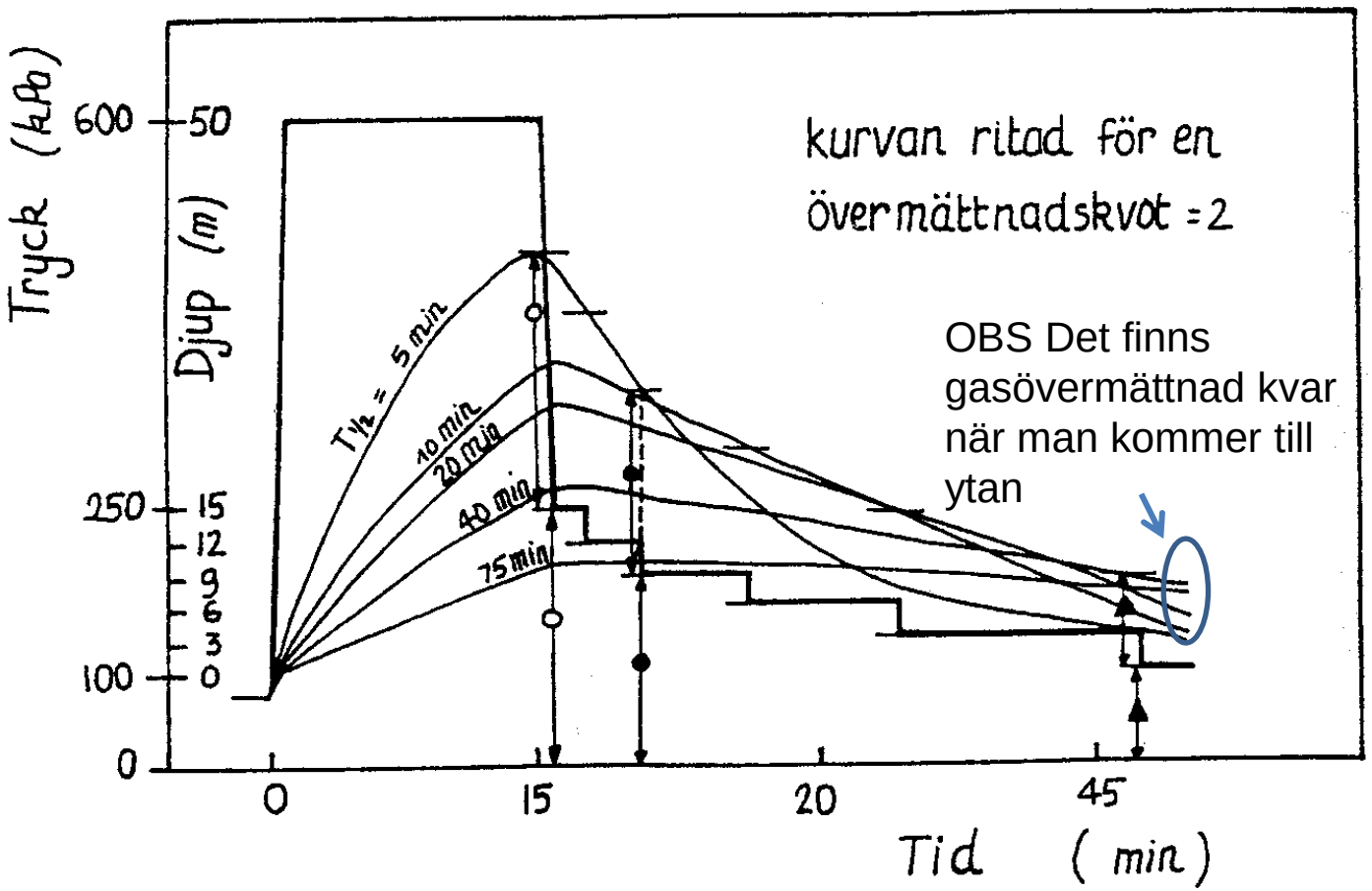
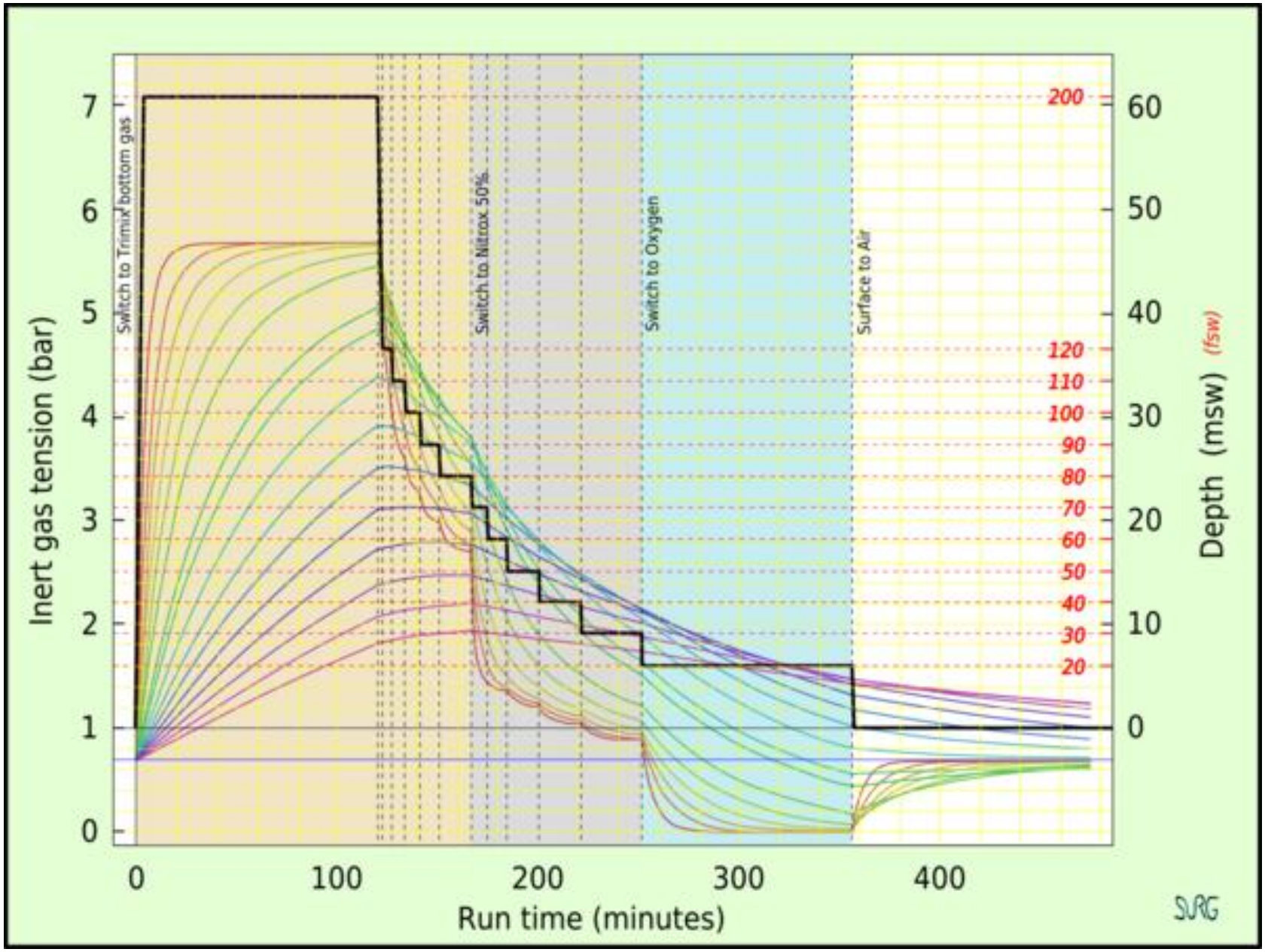


Fig X: 2 Ett exempel på tabellberäkning med användande av Haldanes ursprungliga övermättnadskvot 2. Tiden på etapperna beräknas så, att man vid övergång till närmast ytligare etapp, inte får ett gaspartialtryck som är mer än dubbelt så högt som totaltrycket på etappdjupet. (Bilden är omritad efter Hills; Decompression sickness Vol 1. Wiley & and sons, New York, 1977.)



Från Wikipedia 2019. https://en.wikipedia.org/wiki/Decompression_theory

Nitrox

- En blandning av oxygen och nitrogen med högre oxygenhalt än i luft.
- Ger ett lägre PN2 i lungorna och således mindre N2 uppladdning än vid dykning med luft.
- Är inget magiskt. Tillåten maxtid räknas enkelt ut genom beräkning av luftekvivalent djup (LED) och vanliga lufttabeller.

$$LED = \frac{(D + 10) \times FN_2}{79} - 10$$

D = Aktuellt dykdjup
LED = Luftekvivalent djup
FN_2 = Nitrogenfraktion i gasen

Dekompressionstabeller

- Övermättnadskvot definieras som partialtrycket för inertgas i vävnaden/totaltrycket
- Haldanes ursprungliga tabell (1907) bygger på att alla typer av vävnader tål en övermättnad av 2 och att utsköljningen av gas i en vävnadstyp sker med samma hastighet som uppladdningen

Dekompressionstabeller 2

- US-navy utvecklar senare konceptet med övermättnads-kvot då man märker att snabba vävnader verkar tåla högre övermättnadskvoter än långsamma. US Navy tabeller blir allmänt använda i hela världen efter WW2.

- Workman (USA) inför M-värden för att underlätta beräkning av tabeller

- Hempleman (England) för in diffusionsbegränsnings-konceptet och antar att urladdning går långsammare än uppladdning. Denna dekompressionsteori används vid framtagning av de norska dyktabellerna som senare också blivit nordiska tabeller för sportdykning.

Dekompressionstabeller 3

- Det behöver inte vara etapper i dekompressionen, men det är mest praktiskt.

- Många menar att den höga hastigheten mot ytan till första etapp i USN tabellerna skapar bubblor och att man kan komma till ytan lika snabbt om man gör stopp djupare i och med att man kan göra stoppen nära ytan kortare om man stannat på större djup på vägen upp (L Hill och B Hills).

Dekompressionstabeller 4

Uppstigningshastigheter

18 m/min	US-navy, (Svenska marinen)
	PADI
10 m/min	Nordiska standardtabellen
	Många dykdatorer
	US-navy efter 1993

Det viktigaste är nog att man gör ett säkerhetsstopp (5 min på 3-5 m). För att klara detta i fritt vatten måste man gå långsamt.

Dekompressionstabeller 5

- Risken för allvarlig dekompressionssjuka, DS, är för de flesta tabeller i storleksordningen 1.5 – 3 fall av DS/10 000 dykningar.

- Räknar man in alla de tillfällen som dykare känner sig påverkade av dekompressionen (Adverse Effects of Decompression, AED), utan att det är så allvarligt att de söker läkare, får man ett tillfälle på 1000 dykningar.

Dekompressionstabeller 6

För att få dykaren ur vattnet snabbt kan man utnyttja det faktum att det tar tid innan bubblor bildas. Metoden kallas ytdekompression med syrgas (Oxygen)

Teknik:

- Speciella tabeller används
- Stopp djupare än 6 m görs i vattnet
- Max 5 min från 6 m till dykaren skall vara på tryck motsvarande 12 m i tryckkammare andandes O_2

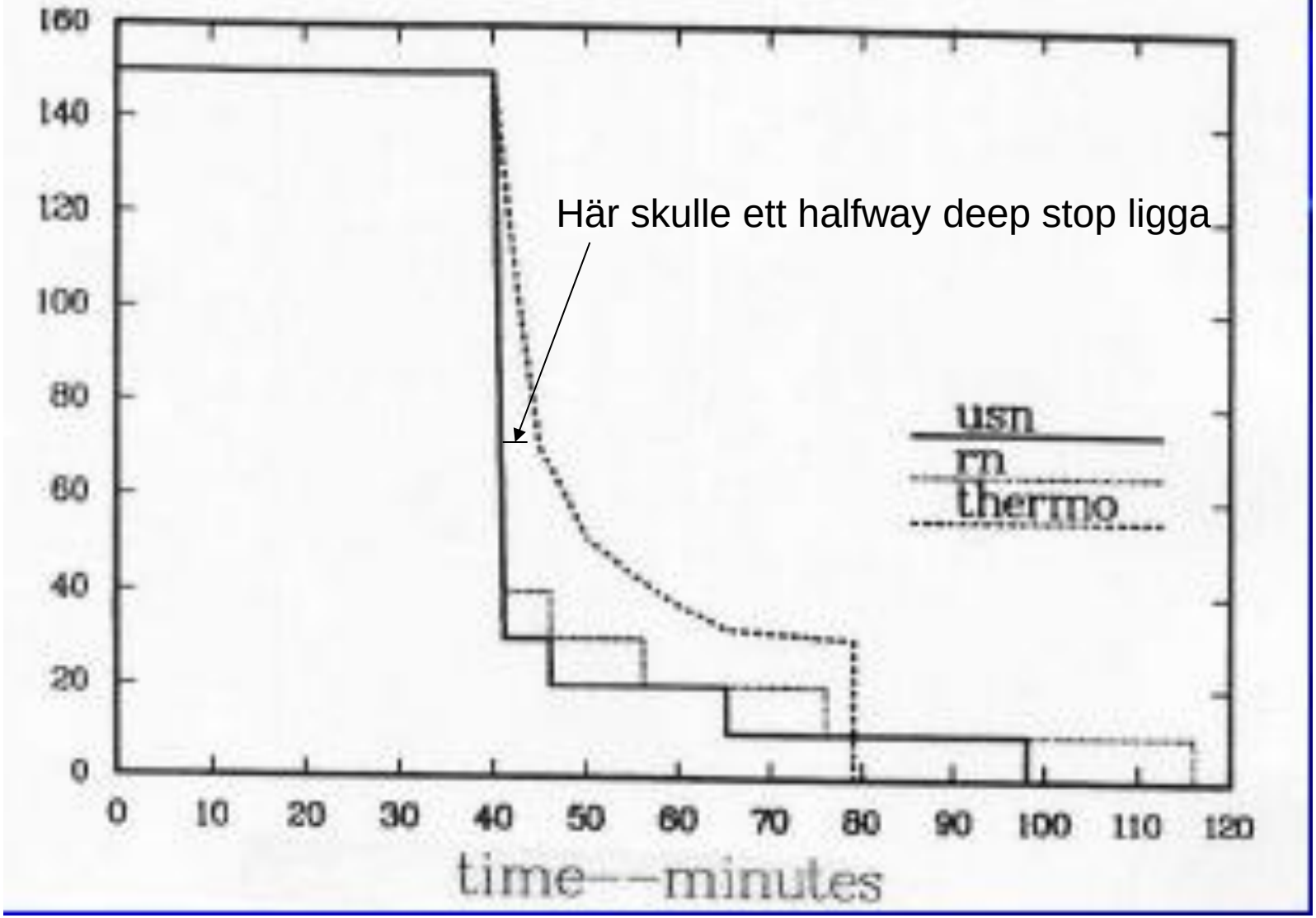
Dekompressionstabeller 7

- Tänk på att vid dykning på hög höjd > 250 m återvänder man inte till 1 atm och man kan ha nitrogen överskott om man inte adapterat sig till höjden. Speciella tabeller finns

- Efter avslutat dyk finns ett kväveöverskott i kroppen som tar 12 tim att bli av med (ev kan det ta längre tid) Du kan därför inte flyga inom denna tid eftersom även plan med tryckkabin har ett reducerat tryck jmf med havsytan.

- Tider innan man kan flyga varierar mellan 12 – 48 tim beroende på vem som uttalar sig och vad typ av dykning som föregått. Även datorer erbjuder denna uppgift, men är nog generellt alltför generösa dvs ger för korta tider.

Figure 4. Phase And Supersaturation Decompression Profiles.



Några steg i tabellutvecklingen efter Haldane

- Tab. baserade på perfussionsbegränsningar (Haldane 1908)
- Högre tolerans för övermättnad i snabba vävn. (Workman -65)
- Tab. baserade på termodynamisk model (Hills -66)
- Tab. baserade på diffusionsbegränsningar (Hempleman -77)
- Maximum likelihood theory (Weathersby -84)
- Variable permeability model (Yount – 87)
- Reduced bubble gradient model (Wienke -91)
- Deep stops (Pyle -99)

Minskad uppstigningshastighet
Införandet av säkerhetsstopp
} Åtgärder införda pga sunt förnuft

Problem med utvärdering av tabeller

- Dekompressionssjuka är inte en och samma sjukdom och det kan vara svårt att bedöma hur allvarlig sjukdomen är
- Använder man doppler får man lite mer objektivitet, men man vet fortfarande inte riktigt vad man mäter
- Sedan några år tillbaka vet vi att bubblor i blodet påverkar vita blodkroppar och kärlens insida. Är detta dykarsjuka?

Ett exempel på hur ekvationer för tabellutveckling kan se ut.

Ur: www.freeplanner.org

Arranging the critical volume equation so that it can be solved for P_{ss}^{new} :

Now all the previous solutions and simplifications can be plugged back into the critical volume equation:

$$\alpha V_{crit} = \frac{N_o S(\gamma_c - \gamma)}{kT} \cdot \frac{P_{ss}^{new} - P_{ss}^{min}}{P_{ss}^{new} - \frac{\gamma}{\gamma_c} \cdot P_{crush}} \cdot P_{ss}^{new}\left(t_{deco} + \frac{1}{k}\right)$$

To solve this equation for P_{ss}^{new} , the quadratic formula must be used. To do this, further simplification is required and the equation must be rearranged in the form $ax^2 + bx + c = 0$.

First, the decompression parameter λ is defined :

$$\lambda = \frac{\alpha V_{crit} \cdot \gamma \cdot N_o \cdot (\gamma_c - \gamma) S}{\gamma_c \cdot kT}$$

$$\alpha V_{crit} = \frac{\lambda \cdot \gamma \cdot N_o \cdot (\gamma_c - \gamma) S}{\gamma_c \cdot kT}$$