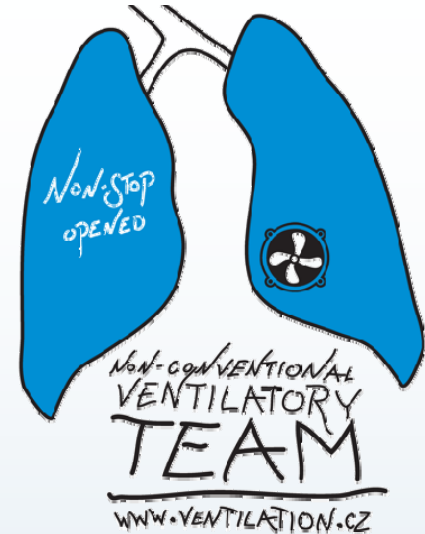


Fyzikální principy uplatňované v anesteziologii a IM



doc. Ing. Karel Roubík, Ph.D.

ČVUT v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství

e-mail: roubik@fbmi.cvut.cz, tel.: 603 479 901

Tekutiny: plyny a kapaliny



Tekutina teče: **plyn** nebo kapalina

definice plynu...,

definice kapaliny...,

skupenské změny...

Plyn a pára



Plyn a pára je jedno a totéž.

Označení pára jen říká, že se pohybujeme poblíž bodu zkapalnění a že plyn (tedy pára) může při relativně malé změně podmínek přecházet v kapalnou fázi.

Pojmem **plyn** označujeme plynné skupenství látky nad kritickou teplotou, tj. při teplotách, při kterých již plyn nelze zkapalnit.

Pojmem **pára** naopak označujeme plynné skupenství látky pod kritickou teplotou, tj. při teplotách, při kterých lze páru zkapalnit působením vysokého tlaku.

Plyn a pára



Kritická teplota plynu je:

menší než okolní teplota

- plyn nelze zkapalnit
- v tlakové láhvi je plyn (láhev „nešplouchá“)



kyslík O_2 : $t_k = -118,6 \text{ }^\circ\text{C}$

($t_v = -183 \text{ }^\circ\text{C}$)

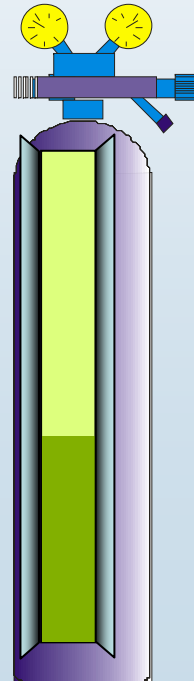
dusík N_2 : $t_k = -147 \text{ }^\circ\text{C}$

($t_v = -195,8 \text{ }^\circ\text{C}$)

He, Ar, Xe ($t_k = 16,6 \text{ }^\circ\text{C}$), H_2

větší než okolní teplota

- plyn lze zkapalnit
- v tl. láhvi je kapalina (láhev může šplouchat)



Oxid dusný N_2O :

$t_k = 36,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t_v = -88,5 \text{ }^\circ\text{C}$)

Oxid uhličitý CO_2 :

$t_k = 31 \text{ }^\circ\text{C}$ ($t_{sub} = -78,5 \text{ }^\circ\text{C}$)

NH_3 , Cl_2 , LPG (PB), ...

Plyn a pára

Plyn s $t_k <$ okolní teplota

(plyn nelze zkapalnit při pokojové teplotě)

Tlak v tlakové láhvi je dán výrobcem plynu:
pro O_2 či vzduch je typicky 150 nebo 200 bar.

Plyn s $t_k >$ okolní teplota

(kapalný plyn se při atmosférickém tlaku vaří)

Tlak v tlakové láhvi je dán fyzikálními vlastnostmi
pro N_2O je 50,8 bar při $20^\circ C$
pro CO_2 je 57,3 bar při $20^\circ C$

Plyn a pára

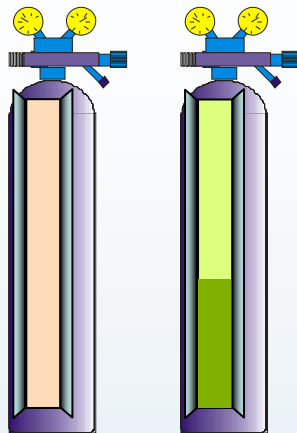
Plyn s $t_k <$ okolní teplota

Tlak v tlakové láhvi je dán výrobcem plynu:

pro O_2 či vzduch je typicky 150 nebo 200 bar.

Při odběru plynu klesá postupně tlak v láhvi.

Množství plynu v láhvi je možné stanovit pomocí tlakoměru na tlakové láhvi.



Plyn s $t_k >$ okolní teplota

Tlak v tlakové láhvi je dán fyzikálními vlastnostmi

pro N_2O je 50,8 bar při $20^\circ C$
pro CO_2 je 57,3 bar při $20^\circ C$

Při odběru se tlak v láhvi nemění, dokud je přítomna kapalná fáze (při $t = \text{konst.}$).

Množství plynu v láhvi lze stanovit pouze vážením.

Plyny



Kyslík	O₂	(-250 mL/min)	21 % obj.
Oxid uhličitý	CO₂	(+200 mL/min)	0,03 % obj.

N₂ (+ Ar) 79 % obj.

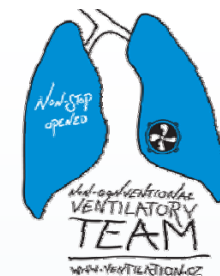
H₂O (v plicích: 6,28 % obj. při 37 °C)

NO

CO

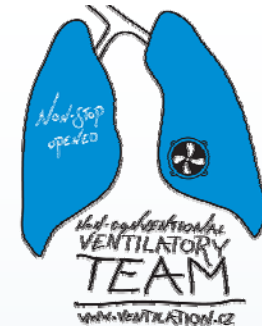
N₂O, volatilní anestetika

Složení suchého vzduchu



Plyn	Objemový zlomek v plynu ve vzduchu (obj. %)	Hmotnostní zlomek w plynu ve vzduchu (hmotn. %)
N ₂	78,084	75,51
O ₂	20,946	23,16
Ar	0,934	1,28
CO ₂	0,033	0,050
Ne	0,001 818	0,001 212
He	0,000 524	0,000 072
CH ₄	0,000 2	0,000 1
Kr	0,000 114	0,000 3
N ₂ O	0,000 05	0,000 05
H ₂	0,000 05	0,000 001
Xe	0,000 008 7	0,000 04

„Popis“ plynů



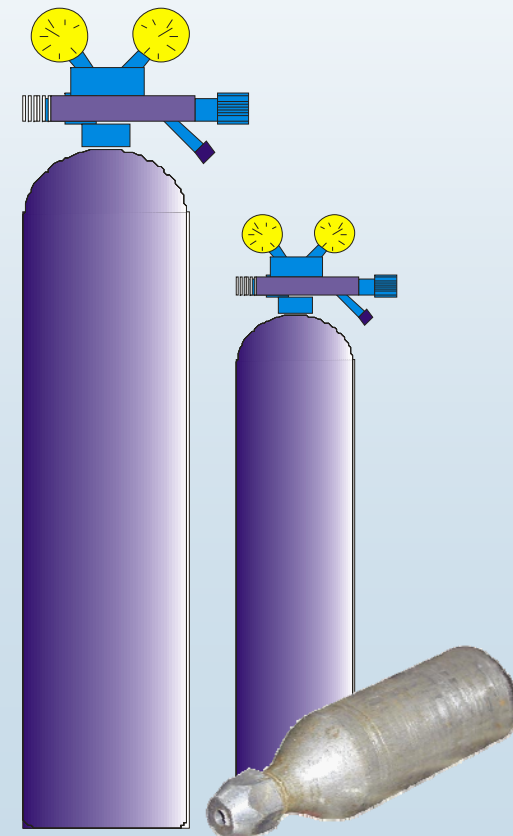
Popis množství a stavu plynů:

Množství plynu:

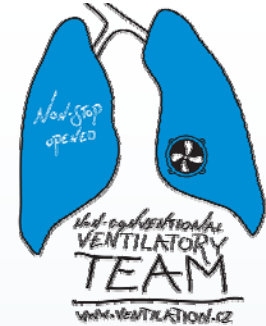
- Hmotnost m (kg)
- Látkové množství n (mol)
(\pm počet molekul)

Stav plynu:

- Objem V (m³) – závisí na T a p
- Teplota T (K), t (°C) – závisí na V a p
- Tlak p (Pa) – závisí na T a V



Popis plynů



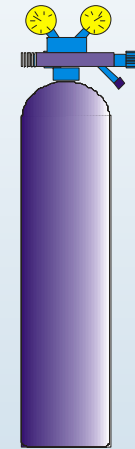
Popis množství a stavu plynů:

Množství plynu:

- Hmotnost m (kg)
- Látkové množství n (mol)
(\pm počet molekul)

Stav plynu:

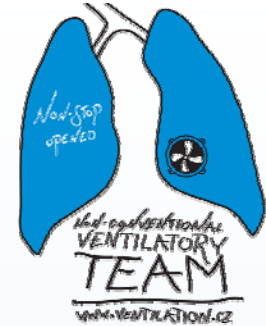
- Objem V (m³) – závisí na T a p
- Teplota T (K), t (°C) – závisí na V a p
- Tlak p (Pa) – závisí na T a V



$$pV = nRT$$

$$R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Popis plynů



Popis množství a stavu plynů:

Množství plynu:

- Hmotnost m (kg)
- Látkové množství n (mol)
(\pm počet molekul)

$$1 \text{ mol} = 6,023 \cdot 10^{23}$$

1 mol p^+ nebo n^0 váží 1 g

1 mol plynu zaujímá 22,4 litrů
(za normálního tlaku a teploty)

Stav plynu:

- Objem V (m^3) – závisí na T a p
- Teplota T (K), t ($^{\circ}C$) – závisí na V a p
- Tlak p (Pa) – závisí na T a V

$$pV = nRT$$

$$R = 8,314 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Tlak plynů



Absolutní tlak

na Zemi na úrovni moře:

1 atm = 101,325 kPa = 760 mm Hg (Torr) = 10 m H₂O

1 mm Hg = 0,133 kPa; 1 cm H₂O = 0,1 kPa

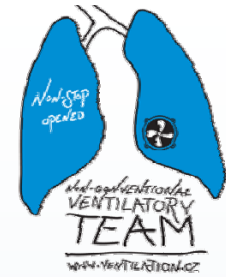
Relativní tlak

= Měřený tlak – skutečný atmosférický tlak

Parciální tlak

je vždy odvozen od absolutního tlaku, nikdy od relativního
definuje se pro směsi plynů pomocí Daltonova zákona

Parciální tlaky plynů



Daltonův zákon

Celkový tlak směsi nereaktivních plynů je roven součtu parciálních tlaků jednotlivých plynů

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

Složka směsi plynů přispívá svým parciálním tlakem k celkovému tlaku takovou měrou, jakou přispívá svým objemem k celkovému objemu.

***Příklad:* Suchý vzduch o celkovém tlaku 1 atm = 100 kPa:**

O₂ 21 % obj. , proto

$$p_{O_2} = 21 \% \text{ ze } 100 \text{ kPa} = 0,21 \times 100 = 21 \text{ kPa}$$

N₂ 78 % obj., proto

$$p_{N_2} = 78 \% \text{ of } 100 \text{ kPa} = 0,78 \times 100 = 78 \text{ kPa}$$

Parciální tlak × koncentrace?



Parciální tlak je jediný parametr určující biologický účinek plynu na organismus.

Příklad: Přístrojové potápění se vzduchem 40 m pod hladinou sladkovodního jezera

U hladiny: $P_{\text{tot}} = 1 \text{ atm} = 100 \text{ kPa}$
proto $p\text{O}_2 = 0,2 \times 100 = 20 \text{ kPa}$

V hloubce 40 m: $P_{\text{tot}} = 4+1 \text{ atm} = 500 \text{ kPa}$
proto $p\text{O}_2 = 0,2 \times 500 = 100 \text{ kPa} = 1 \text{ atm}$
stejný účinek jako dýchání 100% O₂

Směs pro potápění ve 40 m: 20 % O₂/5 = 4 % O₂ v N₂



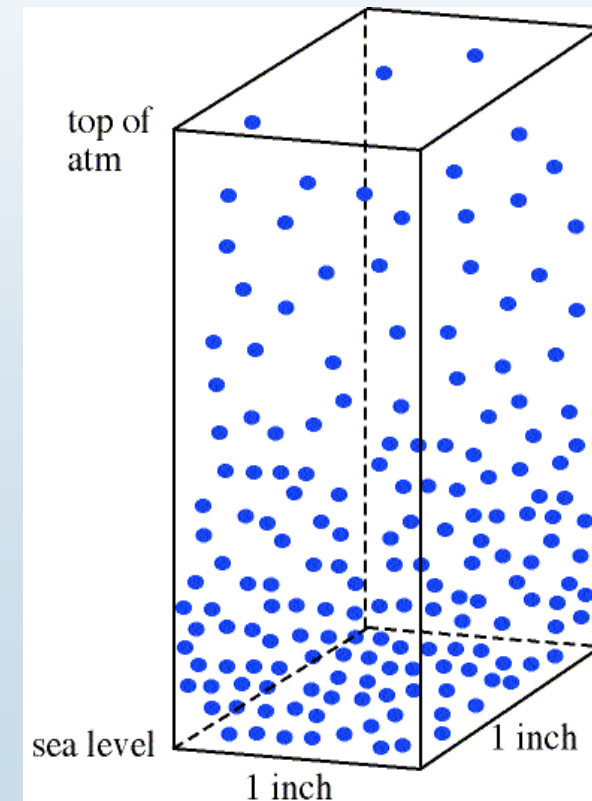
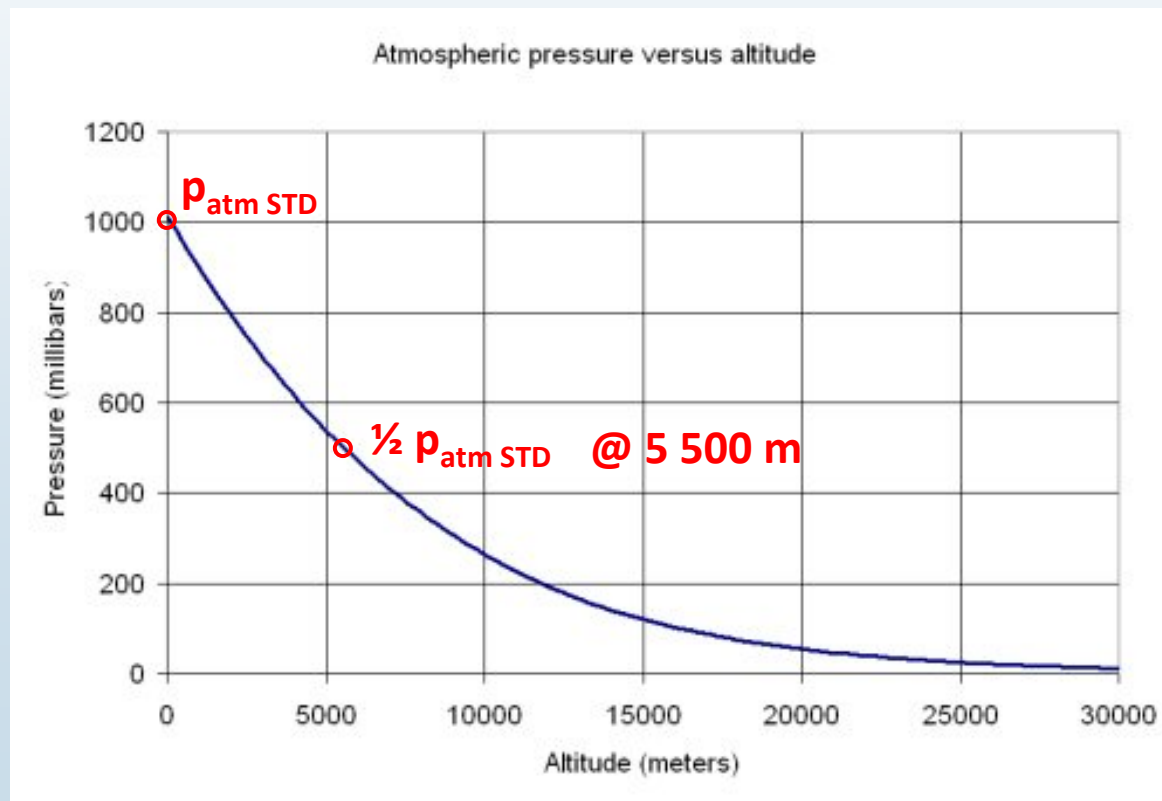
Atmosféra a nadmořská výška



Atmosférický tlak klesá s nadmořskou výškou.

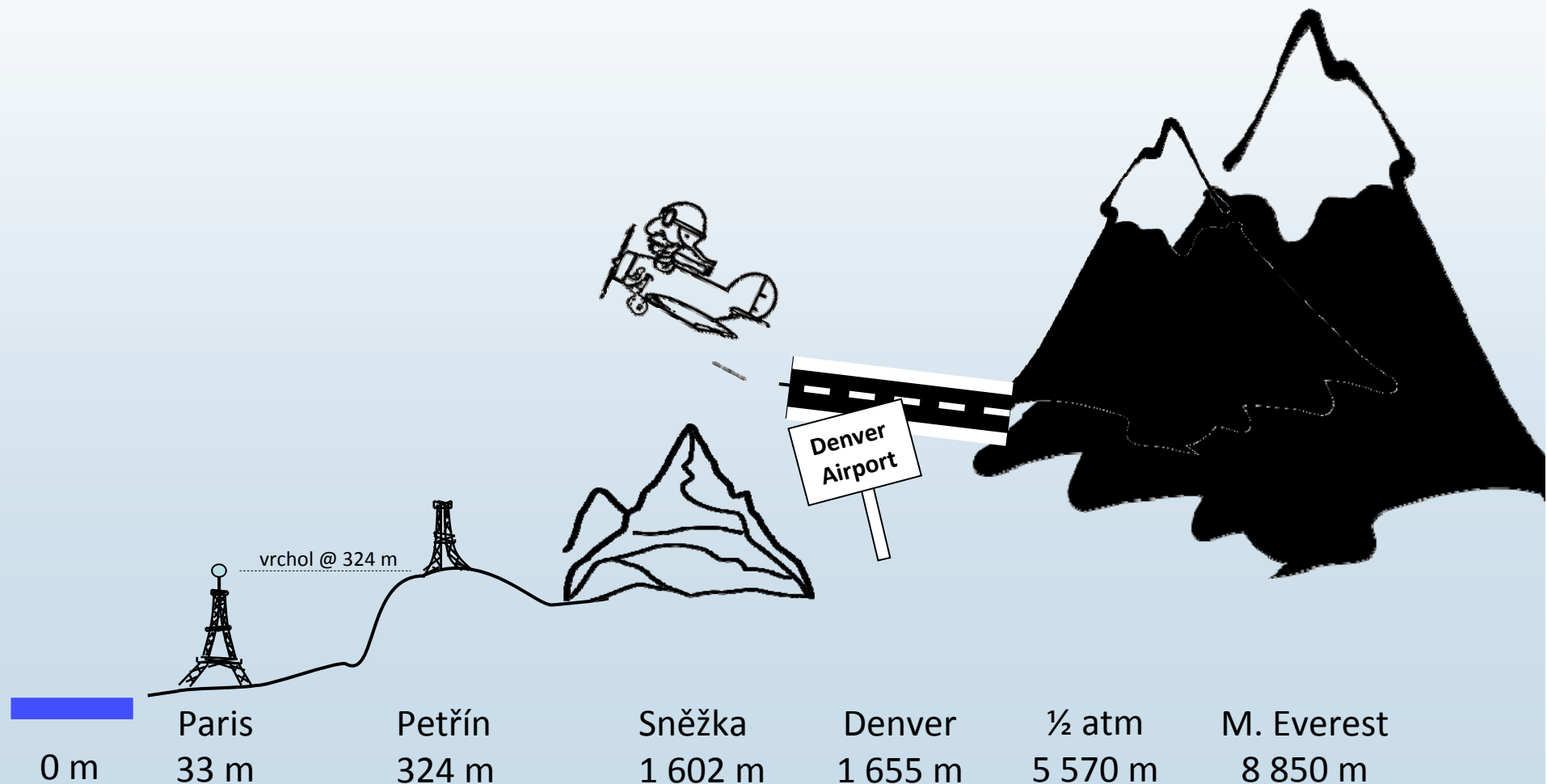
Koncentrace složek vzduchu se \pm nemění s nadmořskou výškou.

Důsledek: Parciální tlaky klesají s nadmořskou výškou.



Vertikální změny v atmosféře

p_{atm} (kPa)	101	97	84	83	50	31
c_{O_2} (%)	21	21	21	21	21	21
p_{O_2} (kPa)	21	20	18	17	10,5	6,5



Tlak v kabině letadla



Equivalent effective cabin altitude

„nadmořská výška kabiny“ 8 000 ft = 2 400 m

při letu ve 40 000 ft (12 000 m)

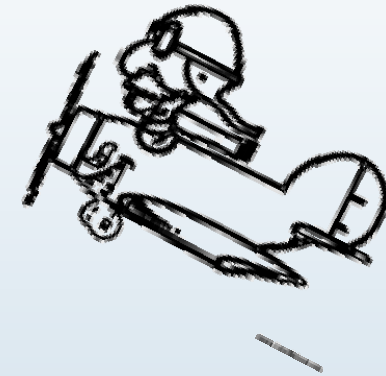
Ve výšce 2 400 m:

$$p_{\text{atm}} = 76 \text{ kPa}$$

$$p_{\text{O}_2} = 16 \text{ kPa}$$

$$*p_a\text{O}_2 = 8,4 \text{ kPa (63 mm Hg)}$$

$$*S_p\text{O}_2 = 91 \%$$



Okamžitý stav organismu × hodnocení funkce organismu

S.T.P.D. Standard temperature (0 °C) and pressure (101,325 kPa), dry

S.T.P.S. Standard temperature and pressure, saturated

B.T.P.S. Body temperature (37 °C) and (ambient) pressure, saturated

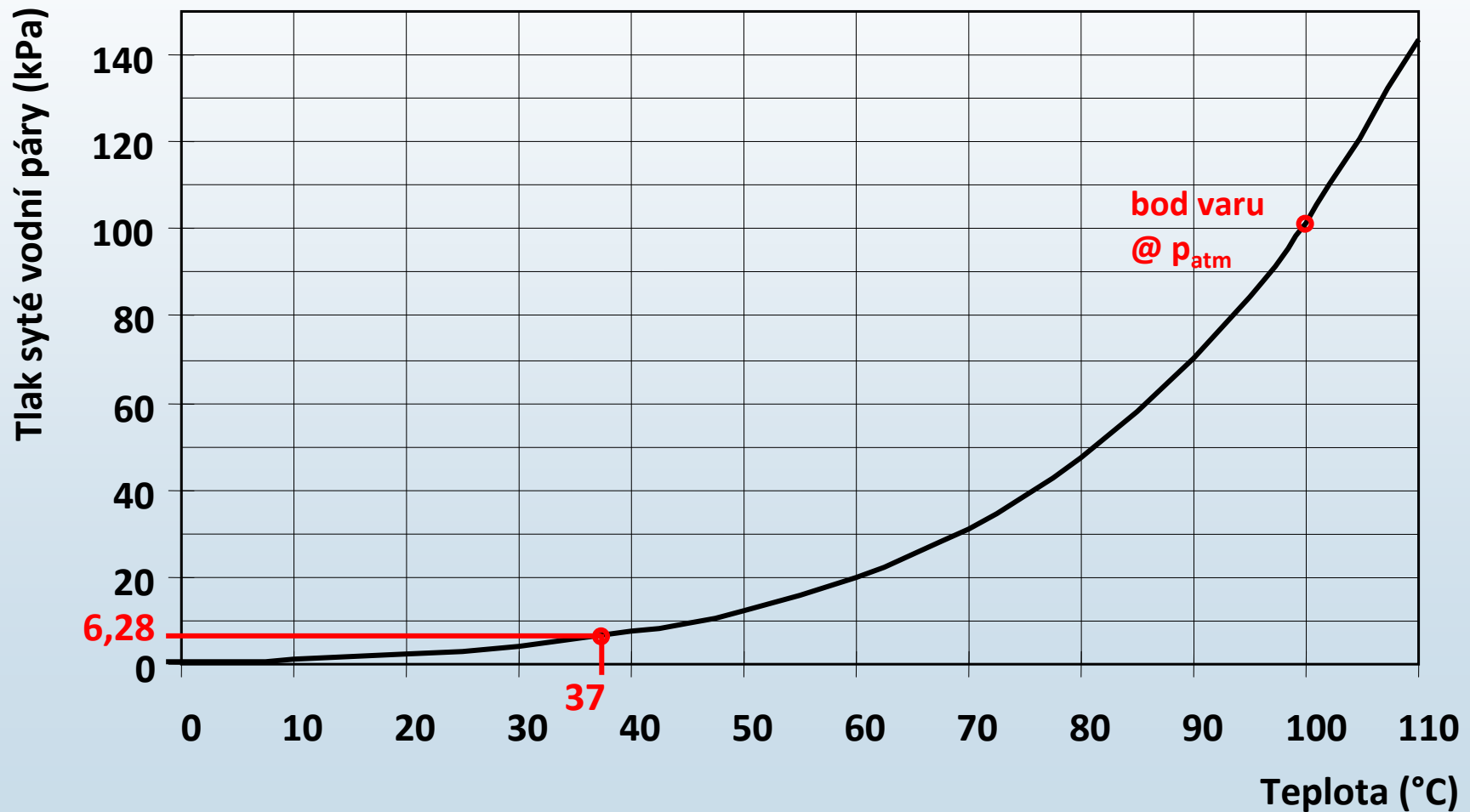
A.T.P.S. Ambient temperature and pressure, saturated

...

Plynná H₂O (vodní pára)



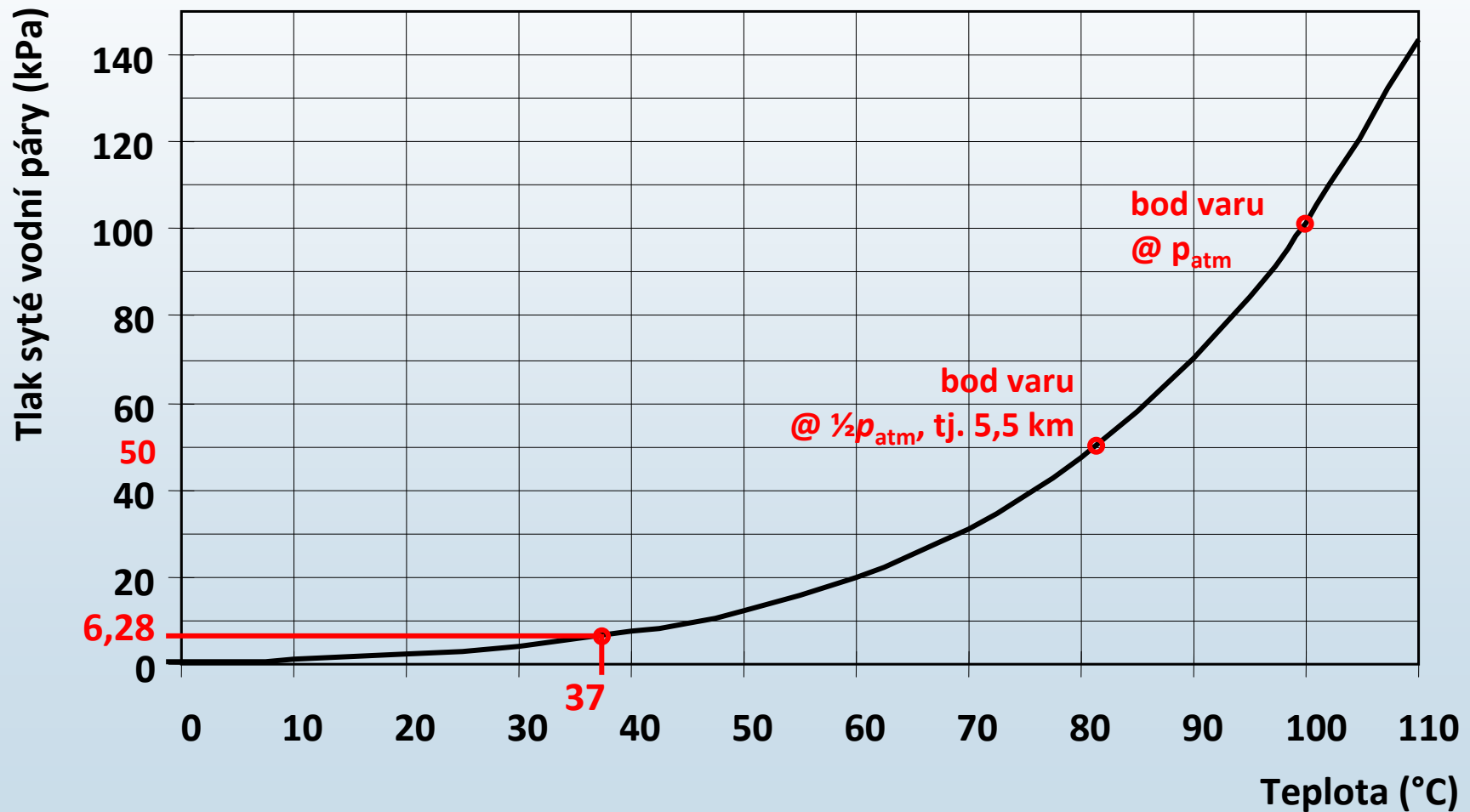
$t_t = 0\text{ }^\circ\text{C}$, $t_v = 100\text{ }^\circ\text{C}$ @ 101.325 kPa



Plynná H₂O (vodní pára)



$t_t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_v = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ @ 101.325 kPa



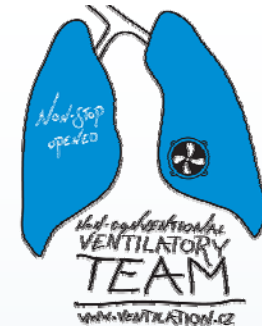
Nestandardní podmínky



Co jsou standardní a co jsou nestandardní podmínky?
(Z pohledu fyziky nebo z pohledu lidského těla?)

- S nadmořskou výškou se mění parciální tlaky plynů
- Vlhkost snižuje parciální tlaky ostatních plynů ve směsi
- Teplota způsobuje změny objemu plynů

Nestandardní podmínky



Příklad: Pacient vdechuje vzduch z rozvodu o teplotě 18 °C s $MV_{\text{insp}} = 10$ L/min. Jaká je MV_{exsp} ? Zanedbáme výměnu plynů.

Inspirovaný vzduch: 18 °C, $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0$ kPa (A.T.P.D.)

Exspirovaný plyn: 37 °C, $p_{\text{H}_2\text{O}} = 6,28$ kPa (B.T.P.S.)

Teplotní roztažnost: $MV_{\text{tr}} = MV_{\text{insp}} \times (37+273)/(18+273) = 10,65$ L/min

Příspěvek vodní páry: $MV_{\text{exsp}} = MV_{\text{tr}} \times 1,0628 = 11,3$ L/min

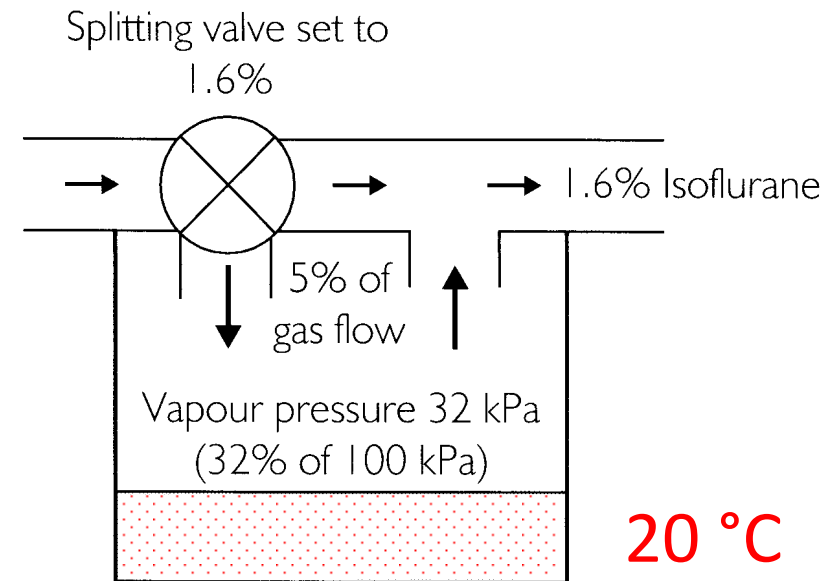
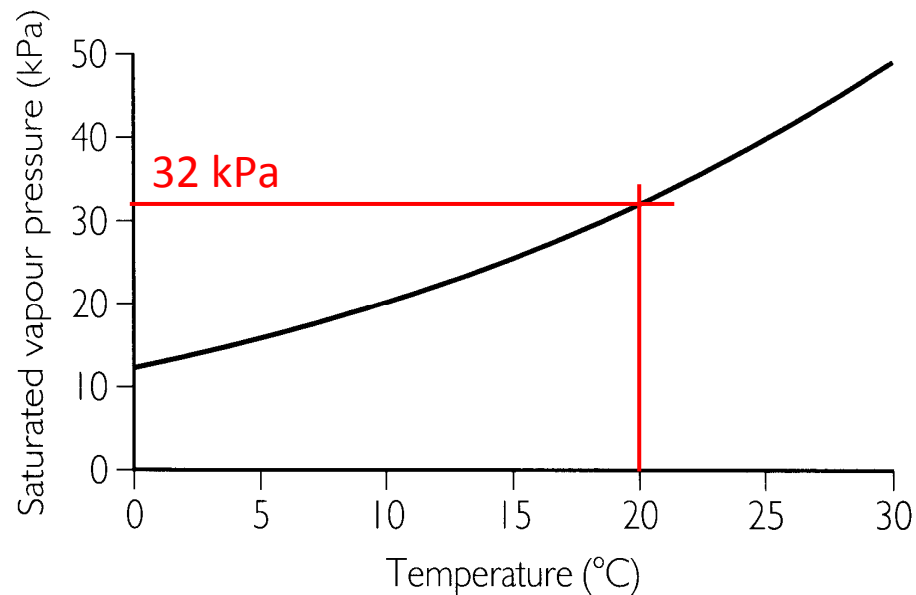
přesněji $MV_{\text{tr}} \times (1+0,0628(1+0,0628)) = MV_{\text{tr}} \times 1,059 = 11,2$ L/min

Pacient vydechuje o více než 11 % vzduchu více, než kolik vdechuje!

Nestandardní podmínky



Příklad: Funguje odpařovač isofluranu stejně na horách jako na hladině moře?



V nulové nadmořské výšce:
Ve výšce 5 500 m n. m.

$$\rho_{\text{atm}} = 100 \text{ kPa}$$
$$\rho_{\text{atm}} = 50 \text{ kPa}$$

$$F_{\text{isofluran}} = 1,6 \%$$

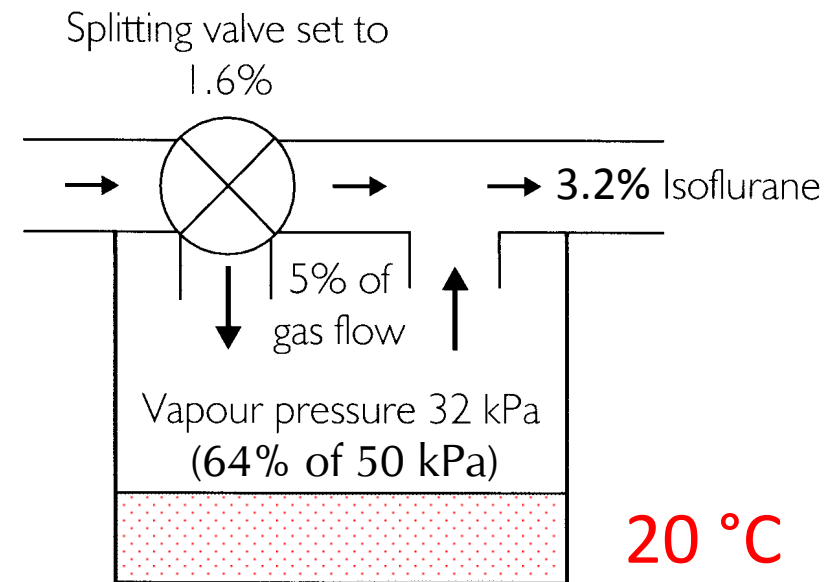
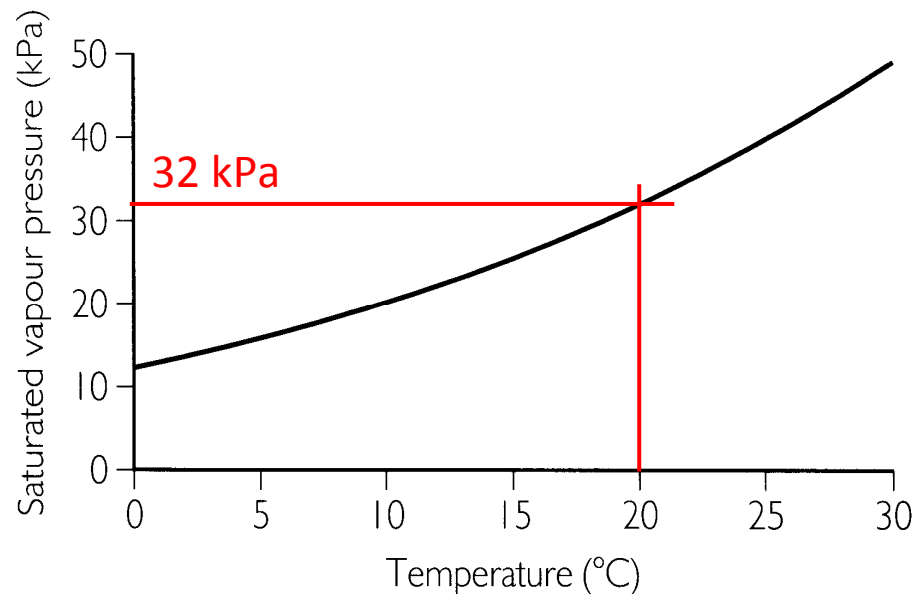
...

$$\rho_{\text{isofluran}} = 1,6 \text{ kPa}$$

Nestandardní podmínky



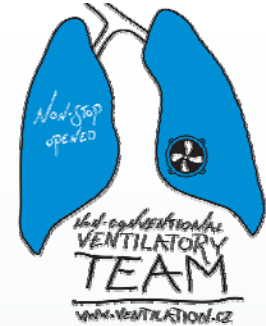
Příklad: Funguje odpařovač isofluranu stejně na horách jako na hladině moře?



V nulové nadmořské výšce:	$p_{\text{atm}} = 100 \text{ kPa}$	$F_{\text{isofluran}} = 1,6 \%$	$p_{\text{isofluran}} = 1,6 \text{ kPa}$
Ve výšce 5 500 m n. m.	$p_{\text{atm}} = 50 \text{ kPa}$	$F_{\text{isofluran}} = 3,2 \%$	$p_{\text{isofluran}} = 1,6 \text{ kPa}$

Biologický účinek je nezměněn. Pozor! Odpařovače na jiném principu ???

Nestandardní podmínky



Hodnoty změřené při různých teplotách se liší.

Hodnoty změřené za různého obsahu vodní páry se liší.

Hodnoty změřené za různých okolních tlaků se liší.

Přístroje mohou pracovat odlišně a mohou odlišně měřit v závislosti na výše uvedených podmínkách.

Okamžitý stav organismu × hodnocení funkce organismu

S.T.P.D. Standard temperature (0 °C) and pressure (101,325 kPa), dry

S.T.P.S. Standard temperature and pressure, saturated

B.T.P.S. Body temperature (37 °C) and (ambient) pressure, saturated

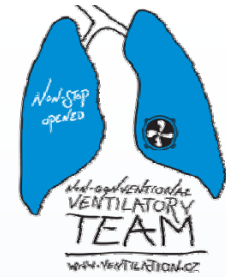
A.T.P.S. Ambient temperature and pressure, saturated

...

Úskalí: Vzorce pro výpočty obsahující konstanty.

Příklad: výrazy ($p_{\text{atm}} - 47$) a ($p_{\text{atm}} - 6,28$) jsou ekvivalentní. První však vyžaduje dosadit atmosférický tlak v mm Hg a druhý v kilopascalech.

Rozpustnost plynů v kapalinách



*Následující neplatí pro kapalinu a její páru,
ale dvě různé chemické látky!*

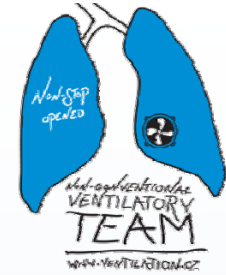
V ustáleném stavu je parciální tlak plynu nad kapalinou stejný jako parciální tlak tohoto plynu v kapalině.

Toto pravidlo neříká nic o tom, jaké množství plynu je v kapalině rozpuštěné. Není v něm nic o rozpustnosti plynu v kapalině.

Popisuje rovnováhu z hlediska parciálních tlaků. V rovnováze neprobíhá transport plynu do/z kapaliny.



Rozpustnost plynů v kapalinách



Množství plynu rozpuštěného v kapalině je přímo úměrné parciálnímu tlaku plynu v kapalině (v rovnováze i nad kapalinou).

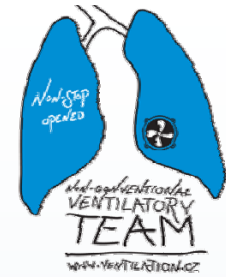
Rozpustnost plynů se výrazně liší.

Rozpustnost CO_2 ve vodě je přibližně 20× větší než rozpustnost kyslíku O_2 .

Rozpustnost plynů klesá se vzrůstající teplotou.

Čím je větší rozpustnost plynu v kapalině, tím je větší i jeho difuzní koeficient.

Rozpustnost plynů v kapalinách



Množství plynu rozpuštěného v kapalině je přímo úměrné parciálnímu tlaku plynu v kapalině (v rovnováze i nad kapalinou).

Rozpustnost má různé jednotky.

Základní:

$$n_i = H_i \times p_i \quad [H_i] = \text{mol/kPa}$$

Následující platí pro parciální tlak plynu = 1 atm.

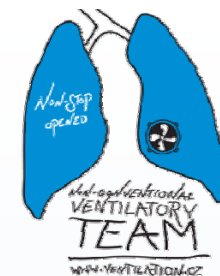
g / 100 g vody

mL / 100 mL krve

%

...

Rozpouštění plynů



t (°C)	Rozpustnost kyslíku (g / 100 g vody)	Rozpustnost oxidu uhličitého (g / 100 g vody)
0	0,006945	0,3346
5	0,006072	0,2774
10	0,005368	0,2318
15	0,004802	0,1970
20	0,004339	0,1688
25	0,003931	0,1449
30	0,003588	0,1257
35	0,003315	0,1105
40	0,003082	0,0973

Rozpustnost plynů v kapalinách



Důsledky:

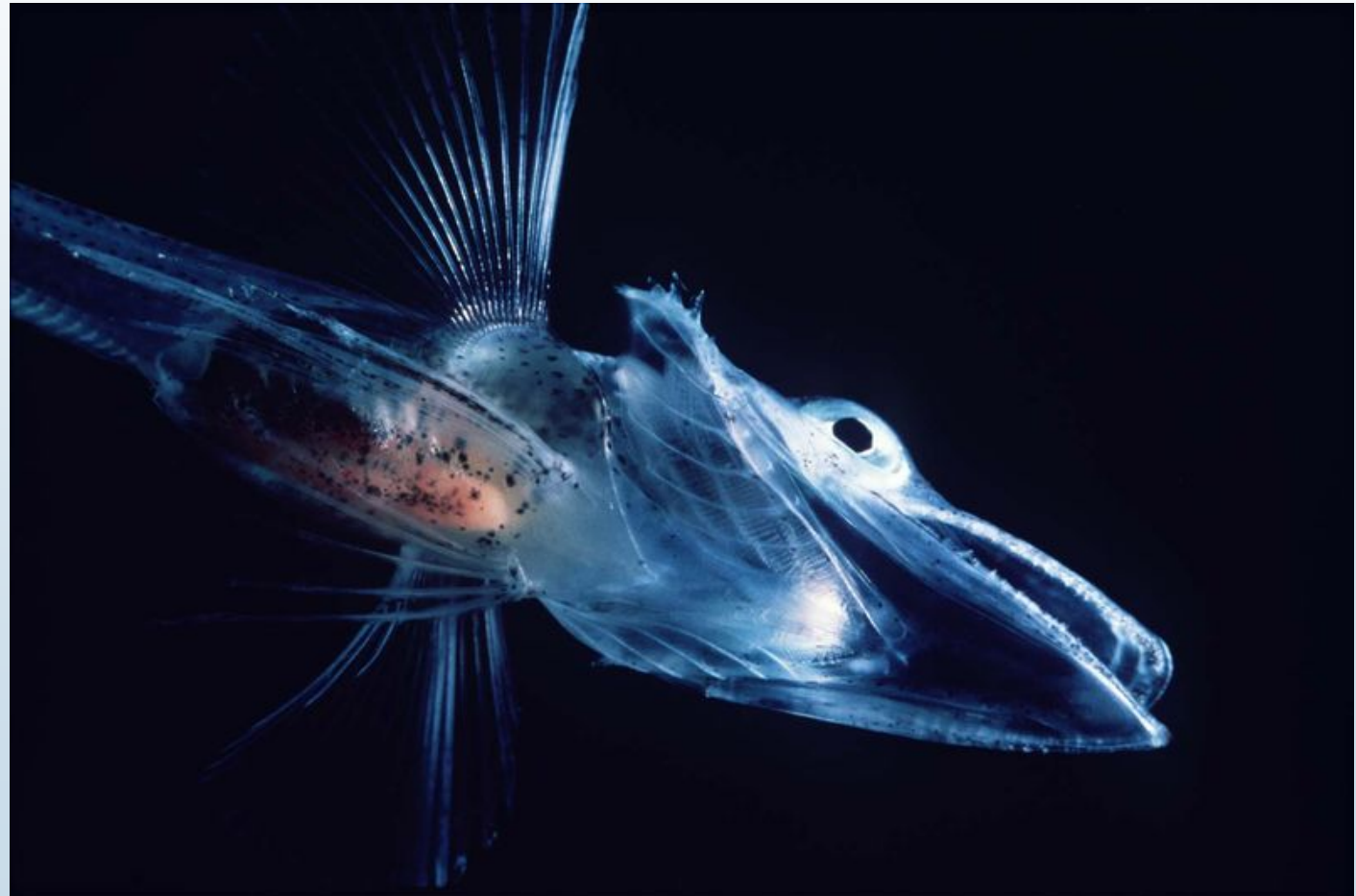
Bubliny v okruzích

Plicní edém

Hemoglobin

Chcíplé ryby

...

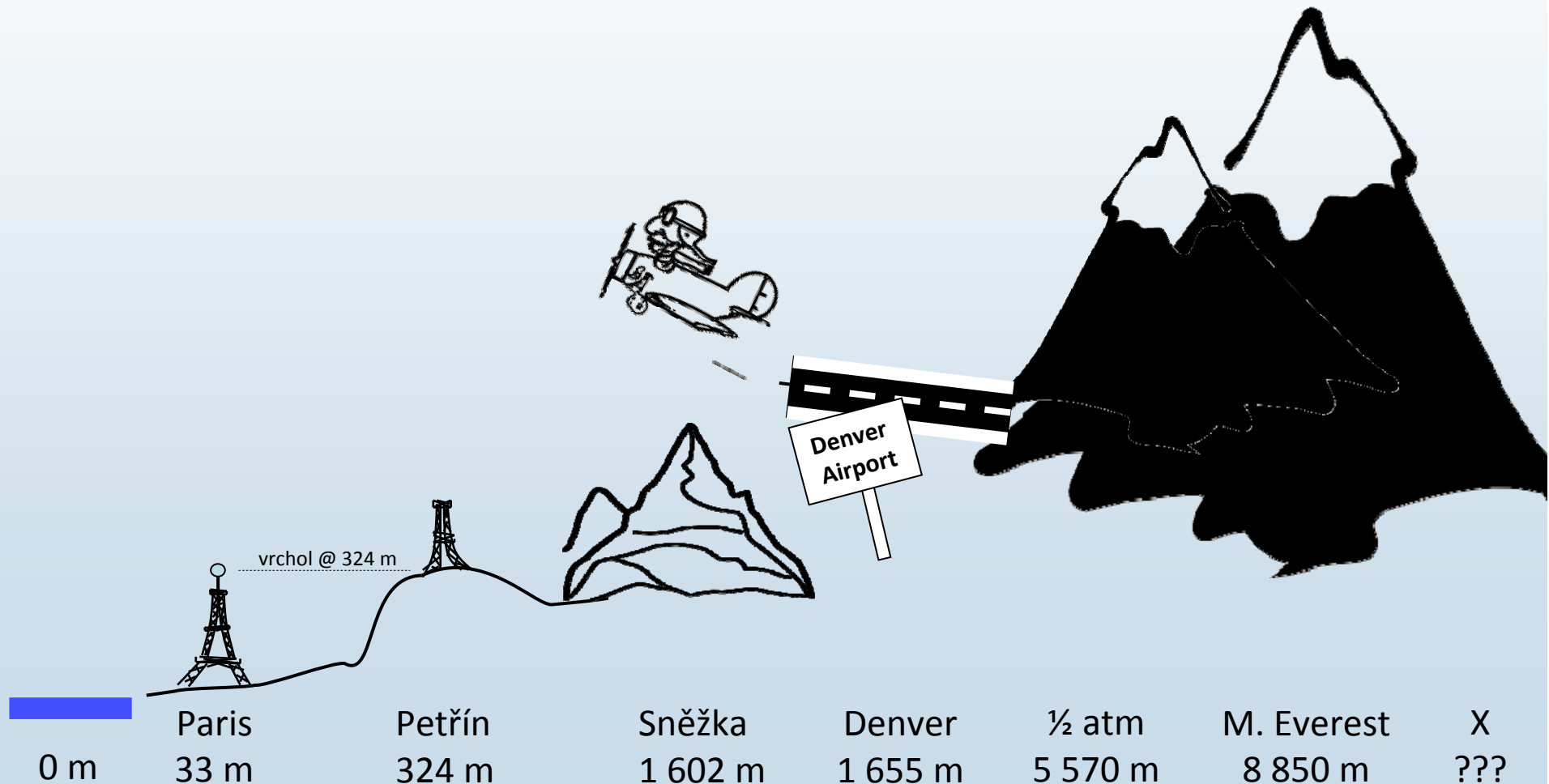


Ice fish

Vertikální změny v atmosféře



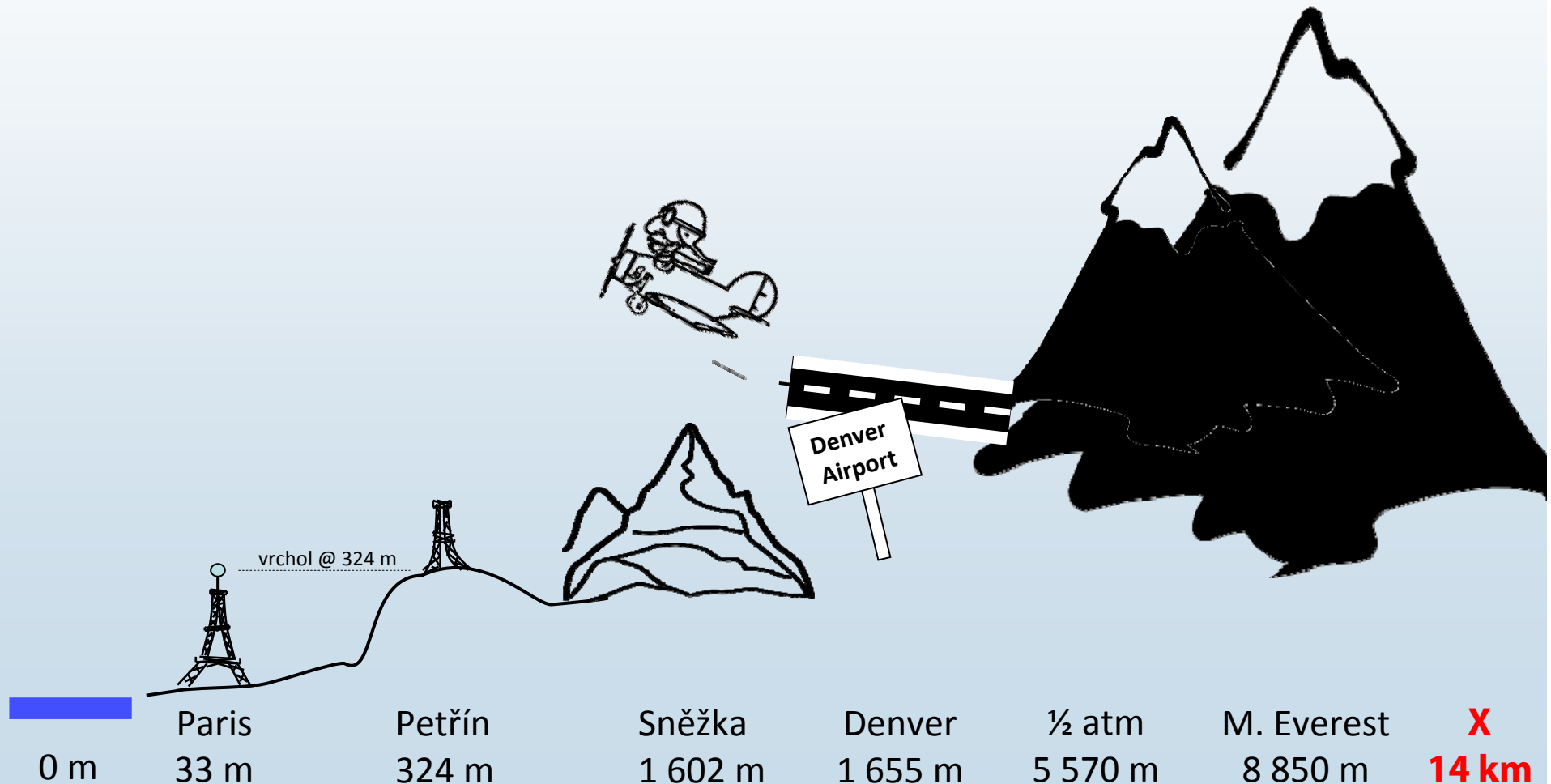
p_{atm} (kPa)	101	97	84	83	50	31	???
c_{O_2} (%)	21	21	21	21	21	21	???
p_{O_2} (kPa)	21	20	18	17	10,5	6,5	???



Vertikální změny v atmosféře



p_{atm} (kPa)	101	97	84	83	50	31	6.28
c_{O_2} (%)	21	21	21	21	21	21	kPa
p_{O_2} (kPa)	21	20	18	17	10,5	6,5	



Děkuji za pozornost

roubik@fbmi.cvut.cz

www.ventilation.cz

