




FYZIKA P*, P**



Fyzika - plán

- Fyzika, teorie (dnes)
 - Fyziologie
 - Plánování ponorů, dekompresní postupy
- 

Fyzika – osnova výcviku

P☆: T4 Základy potápěčské fyziky

(2 x 45 min)

- Základní fyzikální pojmy spojené s potápěním (veličiny a jednotky, vysvětlení pojmů).
- Atmosférický, hydrostatický a celkový tlak, přetlak, podtlak (vysvětlení pojmů, vzájemná souvislost, výpočet celkového tlaku v určité hloubce).
- Vliv tlaku na plyny, kapaliny a tuhé látky.
- Složení vzduchu, hustota vzduchu.
- Boyleův-Mariotteův zákon (izotermický děj) ve vztahu k potápěčské praxi (praktické příklady a výpočty).
 - Tělesné a přídavné dutiny, nebezpečí jejich poškození, nutnost vydechování při výstupu.
 - Kompenzace tlaku ve středouší a v masce.
 - Nebezpečí malých hloubek.
- Archimedův zákon, vyvážení potápěče, změny vyvážení během ponoru.

Fyzika – osnova výcviku


P☆☆: T1 Potápěčská fyzika.

(2x45 min)

- ❑ opakování Boyleův – Mariottův zákon, rozšíření na stavovou rovnici ideálního plynu, důsledky jednotlivých dějů (isotermický, isochorický, isobarický) na potápěčskou praxi (výpočty jednoduchých příkladů s využitím stavové rovnice ideálního plynu, přepouštění plynů)
- ❑ parciální tlak plynu (vysvětlení pojmu), výpočet parciálního tlaku
- ❑ šíření světla a zvuku ve vzduchu a pod vodou, přechod z jednoho prostředí do druhého
 - vidění na vzduchu, pod vodou, s potápěčskou maskou
 - změna intenzity a barvy světla ve vodním prostředí
 - slyšení na vzduchu a pod vodou
- ❑ teplo, teplota, vedení a sdílení tepla, tepelné ztráty při potápění
- ❑ rozpouštění a vylučování inertních plynů z roztoku
 - Henryho zákon
 - dynamika procesu
 - přesycení, kritické přesycení
 - souvislost s dekompresními procesy



Fyzika - literatura


- Fyzika (Jahns)
 - Potápění s přístrojem (Vrbovský, Jahns, Štětina, Růžička, Nachtigal, Hrdina)
 - Přístrojové potápění
 - Deco for Divers (Powel)
- 

Fyzika - proč

- Praktické situace
 - Jak hluboko můžu?
 - Co mám dělat když chci hloub?
 - Jak dlouho tam můžu být?
 - Jak mám naplánovat ponor? Jak rychle dolů, jak zpátky?
 - Jak dlouho mi vydrží vzduch v lahvi?
 - Jak předcházet nehodám
 -



Obsah :

- Hustota
 - Tlak
 - Stlačování plynů
 - Archimédův zákon a kontrola vztlaku
 - Složení vzduchu
 - Daltonův zákon
 - Rozpouštění plynů v kapalinách
 - Vidění pod vodou
 - Slyšení pod vodou
 - Přenos tepla
- 

Hustota

Definována jako hmotnost tělesa na jednotku objemu

$$\rho = \frac{m}{V} [kg/m^3]$$

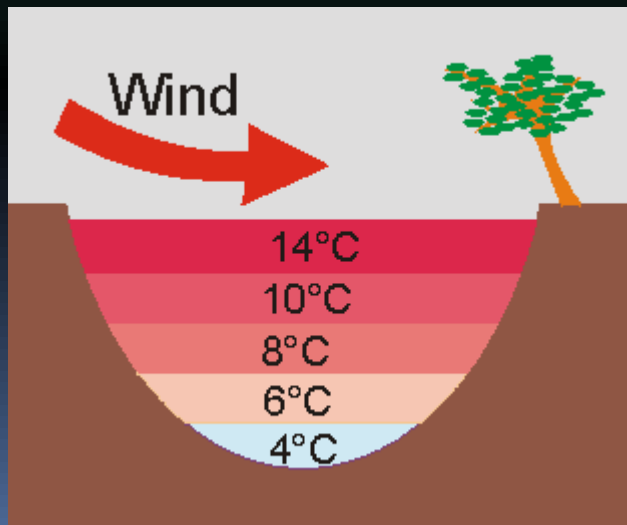
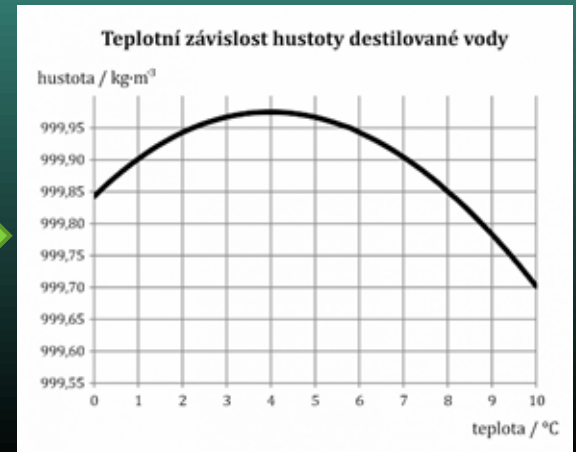
Příklady látek:

| Látka | Hustota [kg/m ³] |
|-------------|------------------------------|
| Voda sladká | 1000 |
| Voda slaná | 1020 - 1030 |
| Led | 920 |
| Vzduch | 1,25 |
| Olovo | 11 340 |
| Ocel | 7850 |

Závislost hustoty na teplotě

- Většina látek při ochlazování zvětšuje hustotu
- **Anomálie vody**

Voda má největší hustotu při 4°



← "Těžká" voda vlivem gravitace klesá dolů
Proto V zimě promrzá voda od hladiny a
To umožňuje rybám přežít zimu

← Led je lehčí než voda, plave na hladině
a dokonce funguje jako izolace proti
ochlazování vody výměnou tepla se
vzduchem



Fyzika

Tlak

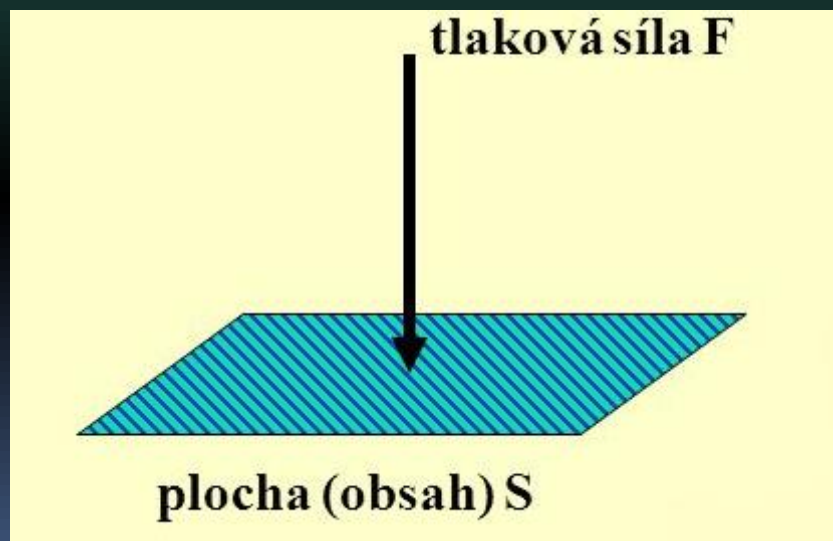
Fyzika

Tlak



Tlaková síla (zkráceně tlak) je nejzávažnější ze všech vlivů působících při potápění.

Tlak je definován velikostí síly působící na plochu



$$p = \frac{F[N]}{S[m^2]} [Pa]$$

Fyzika

Tlak – jednotky, příklady



Stejná síla působící na různě
velkých plochách



Síla 5 N na ploše hrotu jehly $0,1 \text{ mm}^2$
vyvine tlak 50 MPa

Jednotka Pascal (Pa) je (nejen) pro účely potápění malá

$1 \text{ MPa} = 1\,000 \text{ kPa} = 1\,000\,000 \text{ Pa}$

$100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MPa} = 1 \text{ bar}$

$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ KPa} \approx 1 \text{ bar}$



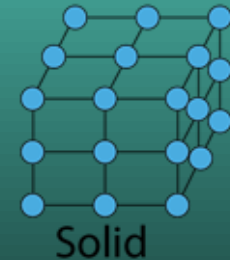


Fyzika

Tlak a skupenství

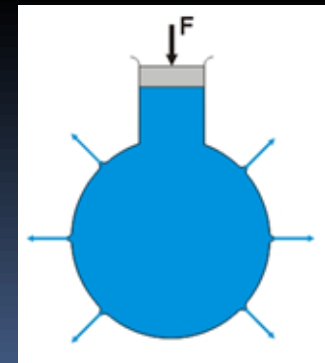
- **Pevné látky**

- Částice blízko sebe, vázány v krystalické mřížce
- Při působení tlaku nemění tvar ani objem



- **Kapaliny**

- Částice víc od sebe vzdáleny než u pevných látek
- Tvoří hladinu
- Mají stálý objem, ale tvar mění podle nádoby, kde jsou umístěny
- Tlak vyvolaný vnější silou, která působí na kapalně těleso v uzavřené nádobě, je ve všech místech kapaliny stejný (Pascalův zákon)
- Jsou nestlačitelné

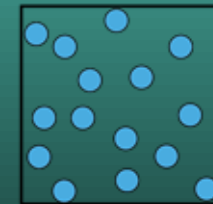


Fyzika

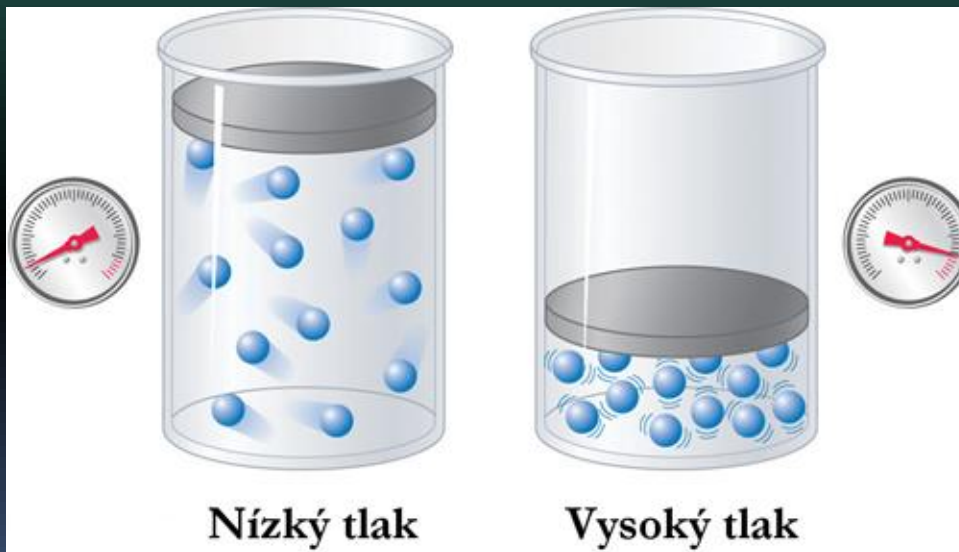
Tlak a skupenství

- Plyny**

- Částice daleko od sebe, menší hustota
- Částice plynu se volně pohybují celým prostorem
- Jsou stlačitelné



Gas





Fyzika

Tlak působící na potápěče

- **Tlak atmosférický** p_a
Způsobený tíhou sloupce vzduchu
U hladiny roven cca 1 bar
- **Tlak hydrostatický** p_h
Způsobený tíhou vody
Jeho hodnota roste s hloubkou
- **Celkový tlak** $p = p_a + p_h$
(Celkový tlak působící na potápěče pod vodou)

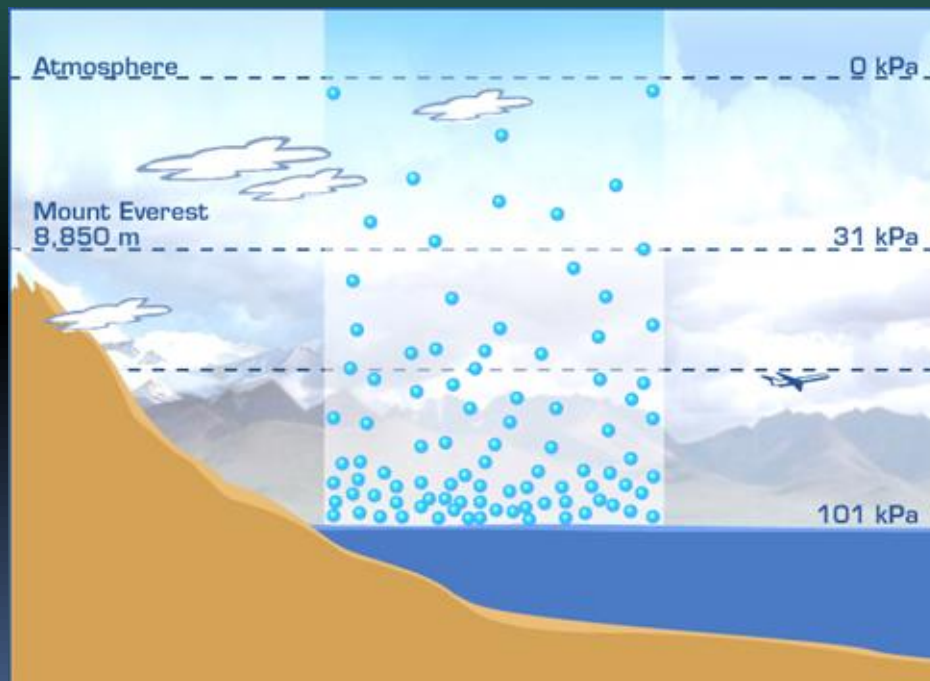


Fyzika

Atmosférický tlak

- Vyvolán tlakem vzdušného obalu země (Torricelli)
- Hodnota na hladině moře:

$$p_a = 0,1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa} = 1 \text{ bar}$$



Závisí na nadmořské výšce

Pro potápění důležité

Závisí na počasí

Pro potápění nedůležité



Fyzika

Atmosférický tlak

| výška [m] | tlak vzduchu [kPa] |
|--------------|-----------------------|
| 10 000 | 26 |
| 9 000 | 30,3 |
| 8 000 | 35,1 |
| 7 000 | 40,5 |
| 6 000 | 46,5 |
| 5 500 | 49,8 |
| 5 000 | 53,3 |
| 4 000 | 60,8 |
| 3 000 | 69,1 |
| 2 000 | 78,4 |
| 1 000 | 88,6 |
| 500 | 94,2 |
| 200 | 97,6 |
| 100 | 98,8 |
| 0 | 100 |

Proč je pro potápěče důležitý

- Odlišný dekompresní postup při potápění > 300 m. n. m.
- Přejezd přes horská sedla
- Odlet letadlem po potápění



- Tlak v přetlakové kabině letadla jako ve výšce asi 2 200 m

Fyzika

Hydrostatický tlak

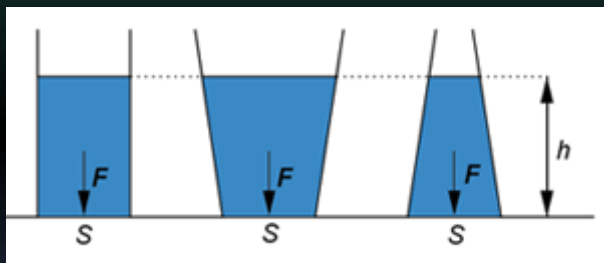
- **Vyvolán tíhou kapaliny (vody)**

$$p_h = h\rho g \text{ [Pa]}$$

- **Tlak není závislý na množství vody, ale pouze na výšce vodního sloupce**

Závisí na:

- Hloubce
- Hustotě (salinita, teplota)
- Gravitační konstantě



→ **Hydrostatický paradox**



Pascalův překvapivý pokus na náměstí v Ruenu. Sud se roztrhl, přestože tíha vody byla nepatrná.





Fyzika

Celkový tlak

- **Příklad:**
- **Jaký je tlak v moři v hloubce 10 m ?**

$$p = p_h + p_a$$

$$p_h = h\rho g \text{ [Pa]}$$

$$p_h = 10 \times 1000 \times 10 \text{ [Pa]} = 100\,000 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$$

$$p_a = 1 \text{ bar}$$

$$p_c = 1 + 1 = 2 \text{ bar}$$



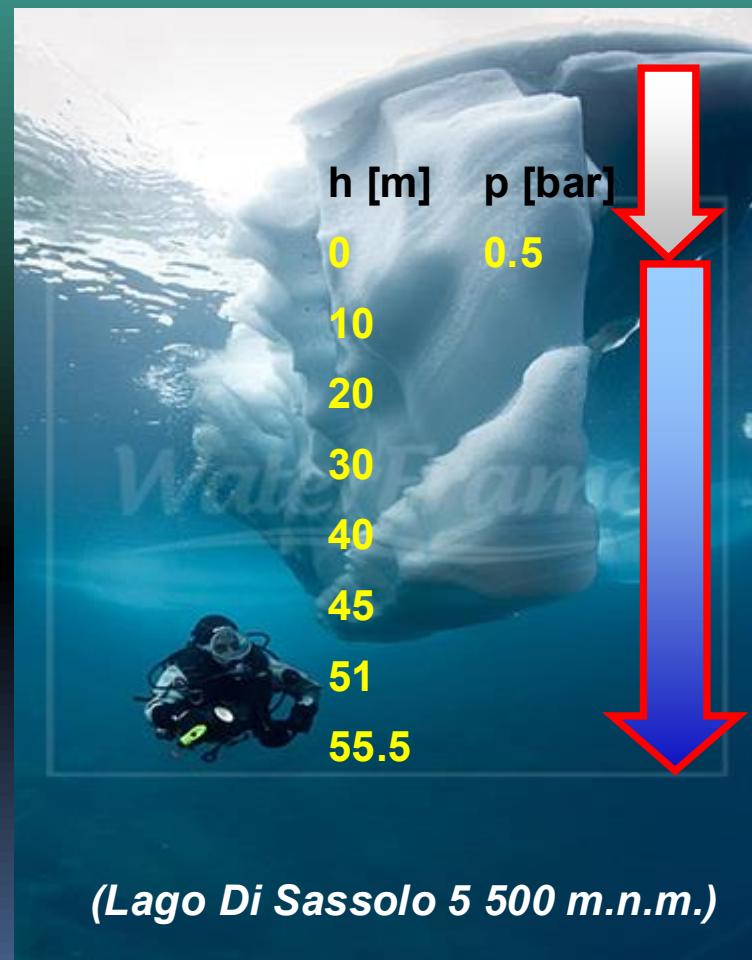
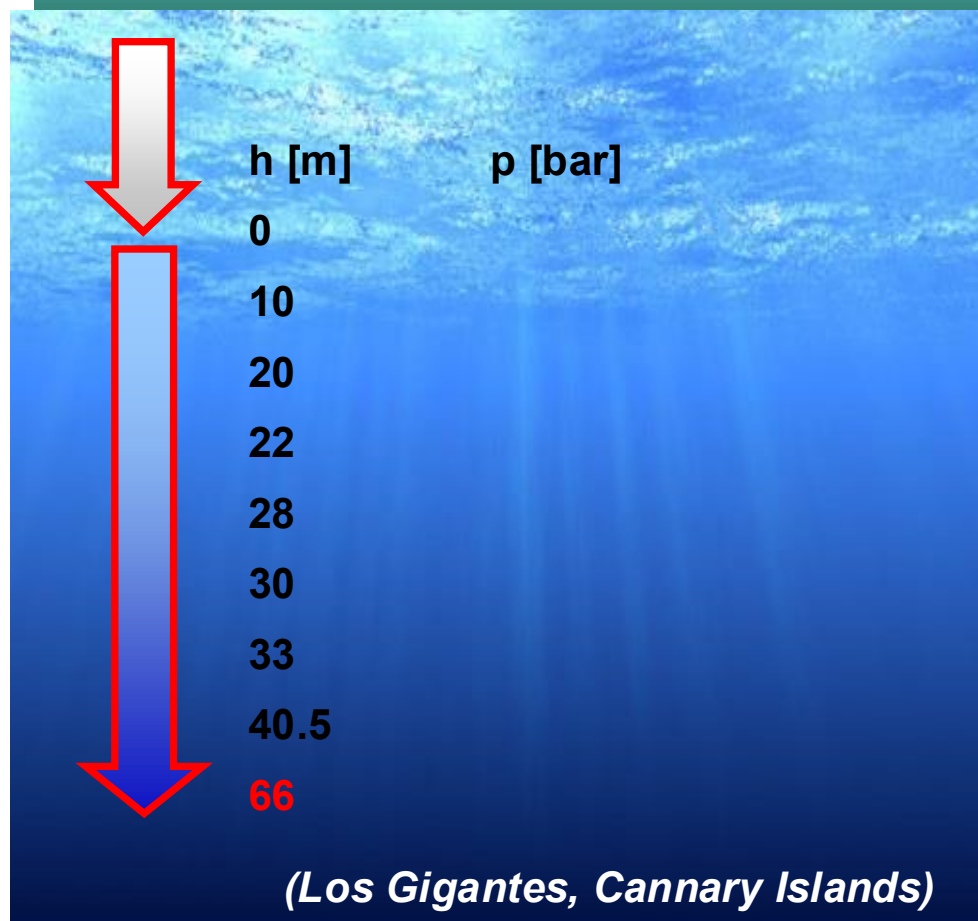
$$p = \frac{h}{10} + 1 \text{ [bar]}$$



Fyzika

Celkový tlak

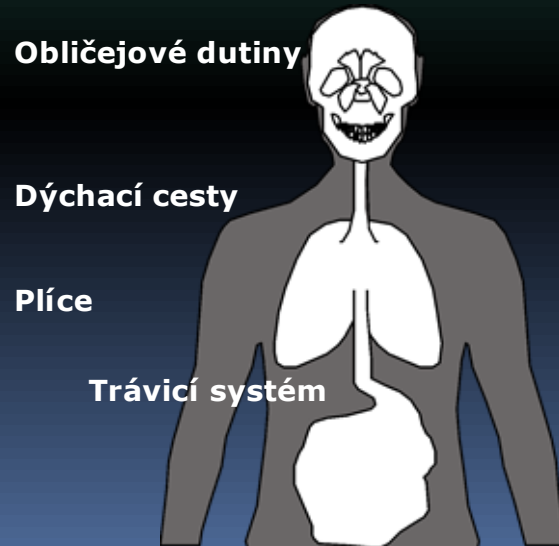
Příklad: doplňme hodnoty celkového tlaku v hloubce



Důsledky zvýšeného tlaku

Proti tlakové síle vyvolané okolním tlakem lze potápěče chránit:

- **Pevnými vnějšími stěnami**
(ponorka, pouzdro na foťák)
- **Vnitřním tlakem** (náš případ)



Tlak nemá žádný vliv na ty části těla, které jsou vyplněny tekutinami

V dutinách s plynným obsahem je nutno vyrovnávat tlak s tlakem okolí

Fyzika

Tlaku v plynu

← Tlak je vyvolán nárazy částic plynu do stěn

Ale na čem závisí? $p = ?$

- Větší počet částic plynu (**n**) \Rightarrow Větší tlak
- Větší energie částic (**T**) \Rightarrow Větší tlak
- Čím větší objem (**V**) \Rightarrow Menší tlak

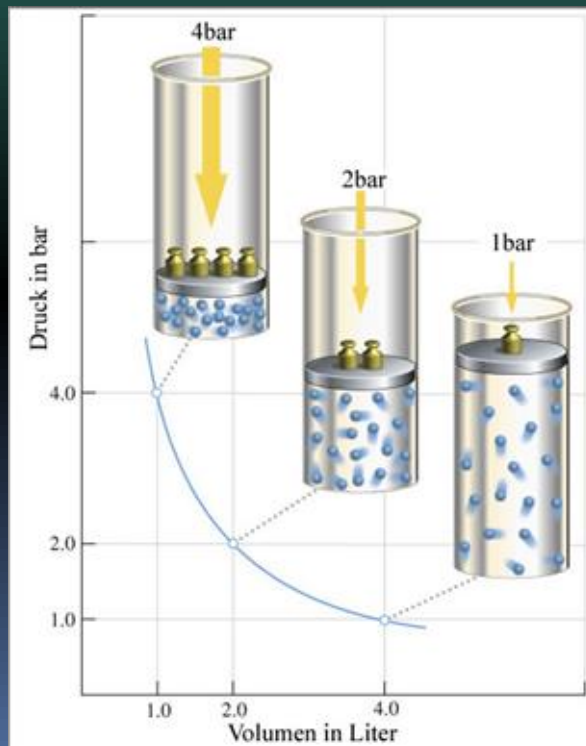


Stavová rovnice
ideálního plynu

$$p = \frac{nRT}{V} \quad pV = nRT$$

Stlačování plynů

- Vlivem zvětšujícího tlaku se plyny stlačují a přitom zmenšují svůj objem. Při poklesu okolního tlaku se opět rozpínají
- **Boyle – Marriotův** zákon říká, že součin tlaku a oběmu plynu je stálý.



$$pV = konst.$$



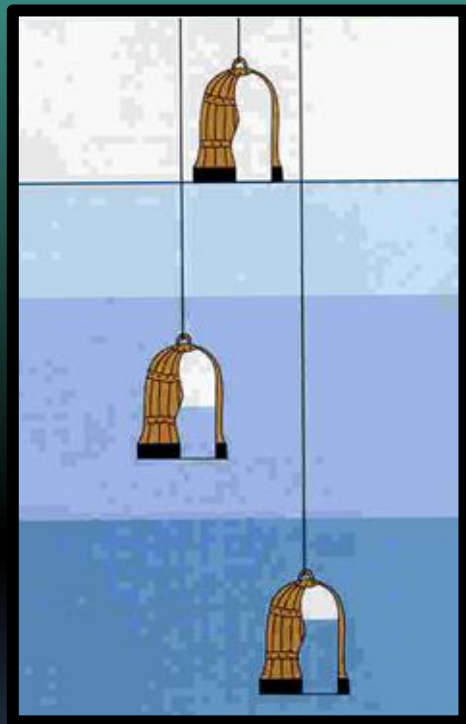
Kolikrát se zvětší tlak, tolikrát se zmenší objem
Kolikrát se zmenší tlak, tolikrát se zvětší objem

Platí pro:

ideální plyn,
stálé množství,
isotermický děj

Stlačování plynů

Příklad: V potápěčském zvonu na hladině je 1000 litrů vzduchu. Spočítejte objem Vzduchu po spuštění kesonu do 10 a do 20 m.



Tlak v hloubce 0 m $p = 1$ bar

Objem vzduchu v kesonu $V = 1000$ l

Tlak v hloubce 10 m $p = 2$ bar

Objem vzduchu v kesonu $V = 500$ l

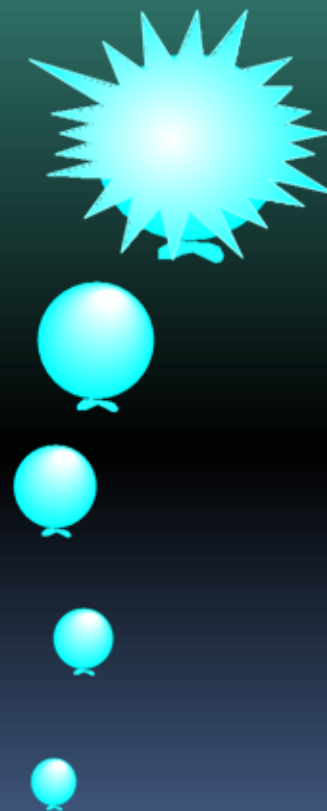
Tlak v hloubce 20 m $p = 3$ bar

Objem vzduchu v kesonu $V = 333,33$ l

Stlačování plynů

- Příklad: Balónek o objemu 6 litrů vypuštěný z hloubky 40 metrů stoupá k hladině. Vypočtete jeho objem v hloubkách 30m, 20m, 10m a na hladině

| Hloubka [m] | Tlak [Bar] | Objem [l] |
|-------------|------------|-----------|
| 0 | 1 | 30 |
| 10 | 2 | 15 |
| 20 | 3 | 10 |
| 30 | 4 | 7,5 |
| 40 | 5 | 6 |



Stlačování plynů



- Nebezpečí malých hloubek

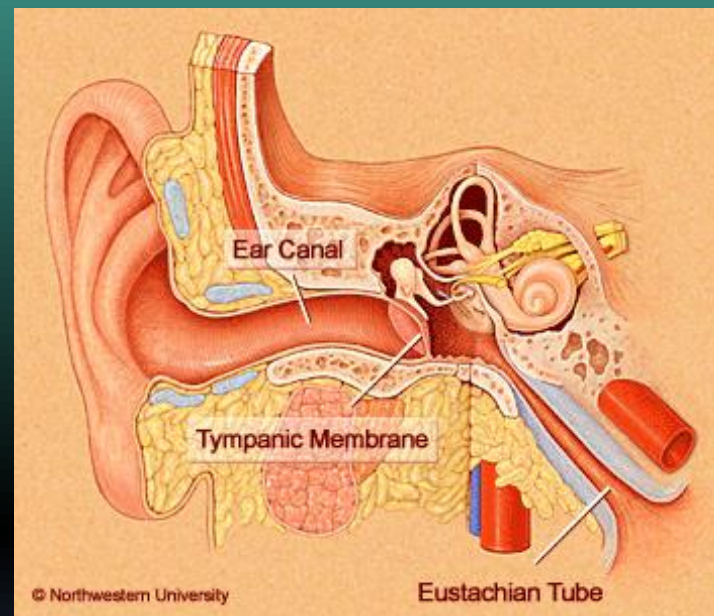
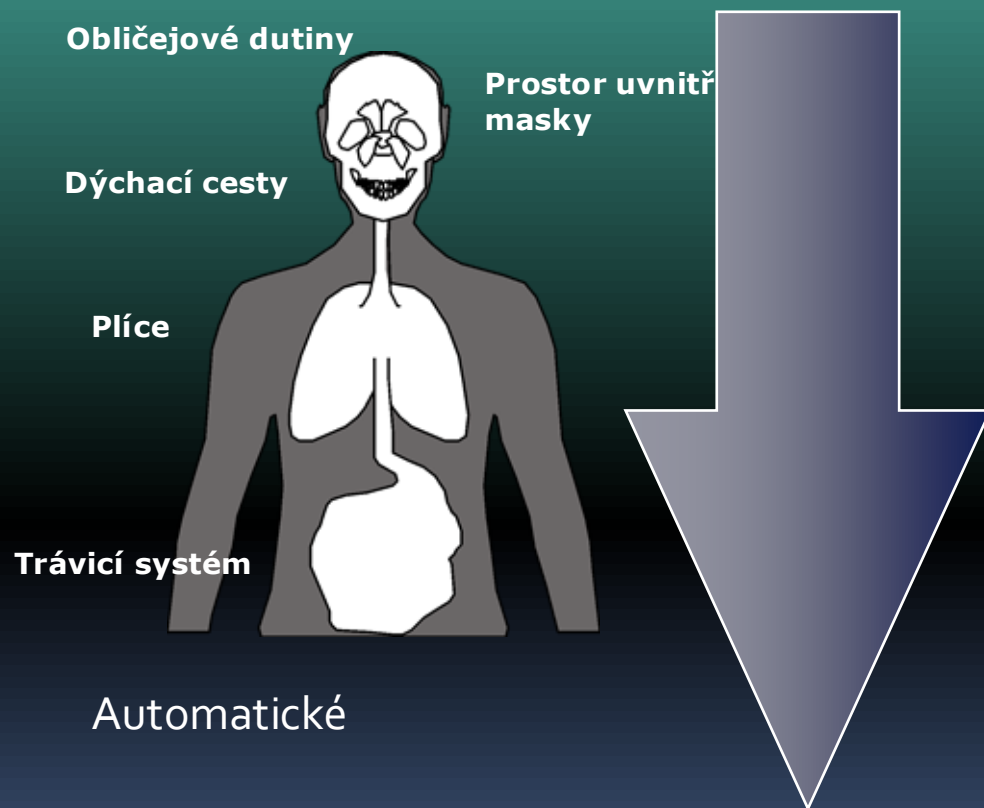
Při výstupu ze 40 do 30 m se balónek zvětšil pouze o 1,5l, protože poměr tlaků je pouze 5/4

Při výstupu z 10m na hladinu o stejnou vzdálenost se ale jeho objem zvýšil **2x** (odpovídá poměru snížení tlaku 2/1)

Nikdy nezadržujte dech !

Dýchejte normálně !

Stlačování plynů, tělní dutiny



Viz stran SP, pan Eustach

Násilné

Stlačování plynů, výpočet spotřeby

Příklad: Kolik litrů vzduchu spotřebuje potápěč za 20 min. v hloubce 25 m, je-li jeho hladinová spotřeba 30 l/min?

Stlačování plynů, výpočet spotřeby

Příklad: Jak dlouho vydrží potápěči 15l láhev naplněná na začátku ponoru na 200 barů, tak aby se vynořil s rezervou 50 barů v hloubce:


a) 10m b) 30m

Hladinová spotřeba 30l/min



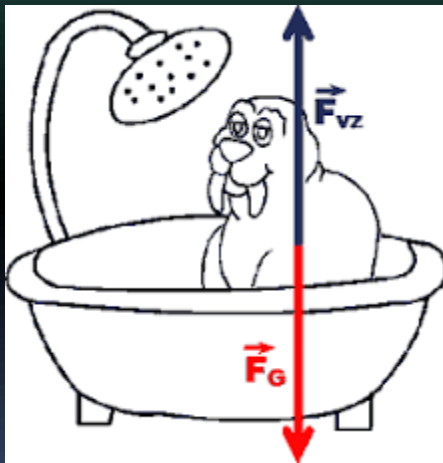
Stlačování plynů, výpočet spotřeby

Příklad: Potápěč vydýchal z 10 l přístroje za 20 minut 100 barů v hloubce 20 m. Stanovte jeho hladinovou spotřebu.



Archimédův zákon

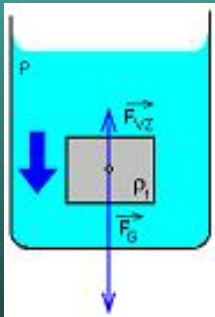
- Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno silou rovnající se tíze kapaliny tělesem vytlačené



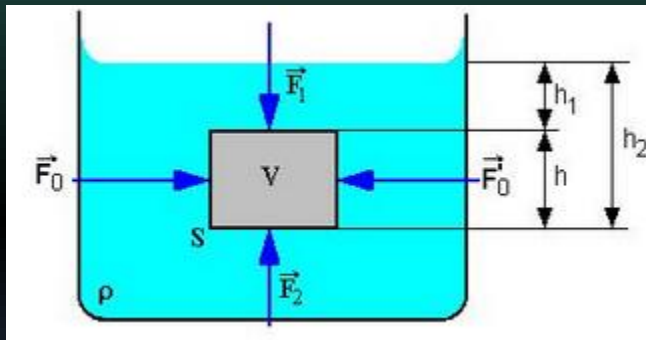
Pokud je tíha tělesem vytlačené vody větší než tíha tělesa samotného (resp. hustota tělesa je menší než hustota vody), pak těleso plove.

Pokud je tíha tělesem vytlačené vody menší než tíha těles (resp. hustota tělesa je větší než hustota vody), pak těleso klesá ke dnu.

Archimédův zákon



$$F_g = m_t g = V \rho_t g$$



$$F_1 = h_1 \rho_v g S$$

$$F_2 = h_2 \rho_v g S$$

$$F_{vz} = F_2 - F_1$$

$$F_{vz} = h_2 \rho_v g S - h_1 \rho_v g S$$

$$F_{vz} = (h_2 - h_1) \rho_v g S$$

$$F_{vz} = V \rho_v g$$

$$F_{vz} = m_v g$$

Archimédův zákon

- Neoprenový oblek o hmotnosti 4kg má u hladiny objem 12l kolik zátěže potřebujeme na kompenzaci vztlakové síly kterou vyvolá?



Archimédův zákon

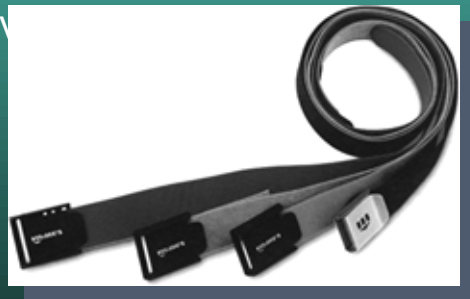
Jaké množství vzduchu budeme potřebovat abychom s pomocí zvedacího vaku vynesli na hladinu utopenou kotvu z hloubky 20m, pokud kotva váží 15 kg?

- Nikdy nic nevynášíme vlastní silou ani na vlastní BCD !
- 

Kontrola vztlaku



Pomocí BCD snadno měníme svůj objem a tedy



Zátěžovým opaskem kompenzujeme vztlak neoprénu
Během ponoru odhazujeme zátěž jen v nejvyšší nouzi

Vyvážení na hladině:

Plně ustrojení vstoupíme do vody s malým množstvím
Vzduchu v BC. Seřídíme hmotnost zátěže tak abychom při
Nádechu zůstali na hladině a při výdechu zvolna klesali.

Změna vztlaku během ponoru

V důsledku změny hloubky

Během sestupu:



- Vlivem zvyšování tlaku dochází ke stlačení neoprénu,
- stlačení vzduchu v BC

Důsledkem je ztráta vztlaku => zrychlení sestupu. Potápěč si proto do BC doplňuje vzduch, aby mírnil rychlost sestupu.

Během výstupu:



- Vlivem snižování tlaku dochází k rozpínání neoprénu,
- rozpínání vzduchu v BC

Důsledkem je zvýšení vztlaku => zrychlení výstupu. Potápěč si proto z BC upouští vzduch, aby mírnil rychlost výstupu.

Změna vztlaku během ponoru

V důsledku úbytku dýchané směsi (vzduchu)

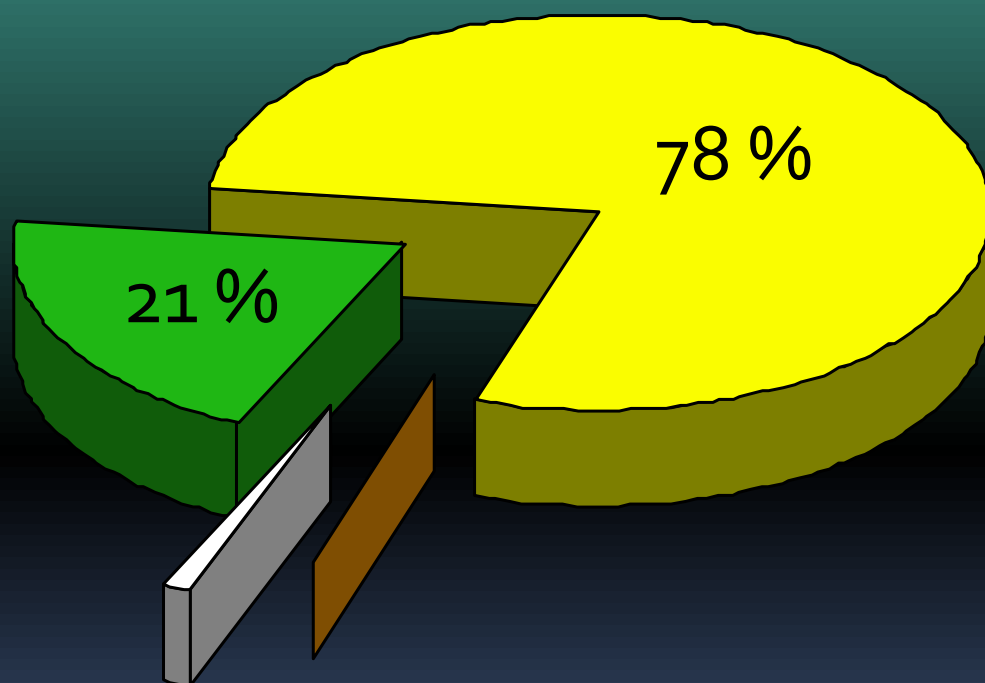
Příklad: Vypočtete hmotnost vzduchu v potápěčské lahvi s vnitřním objemem 12l naplněné původně na 200 barů. (Hustota vzduchu je 1,25 kg/m³)

$$V_r = 12 * 200 = 2400 \text{ l} = 2,4 \text{ m}^3$$

$$m = V\rho = 2,4 * 1,25 = 3 \text{ kg}$$

Hmotnost vzduchu, který během ponoru vydýcháme není zanedbatelná! Je důležité se vyvážit tak aby na konci ponoru bylo možné provést případnou dekompresní / bezpečnostní zastávku v malé hloubce.

Složení vzduchu



- ◇ Dusík
- ◇ Kyslík
- ◇ Oxid uhličitý
- ◇ Vzácné plyny

Daltonův zákon

Říká že celkový tlak p_c směsi n plynů můžeme definovat jako součet dílčích tlaků jednotlivých plynů obsažených ve směsi.



$$p_c = p_n + p_o$$

Výpočet dílčího tlaku složky směsi

$$p_n = p_c \times f_n$$

$$p_o = p_c \times f_o$$

Fyzika

Tlaku v plynu

← Tlak je vyvolán nárazy částic plynu do stěn

Ale na čem závisí? $p = ?$

- Větší počet částic plynu (**n**) \Rightarrow Větší tlak
- Větší energie částic (**T**) \Rightarrow Větší tlak
- Čím větší objem (**V**) \Rightarrow Menší tlak



Stavová rovnice
ideálního plynu

$$p = \frac{nRT}{V} \quad pV = nRT$$

Daltonův zákon, použití

Mezní limity parciálního tlaku kyslíku v dýchané směsi:

$$p_{O_2 \min} = 0.16 \text{ bar (16 kPa)}$$

$$p_{O_2 \max} = 1.6 \text{ bar (160 kPa)}$$

Mezní hodnota parciálního tlaku dusíku ve směsi

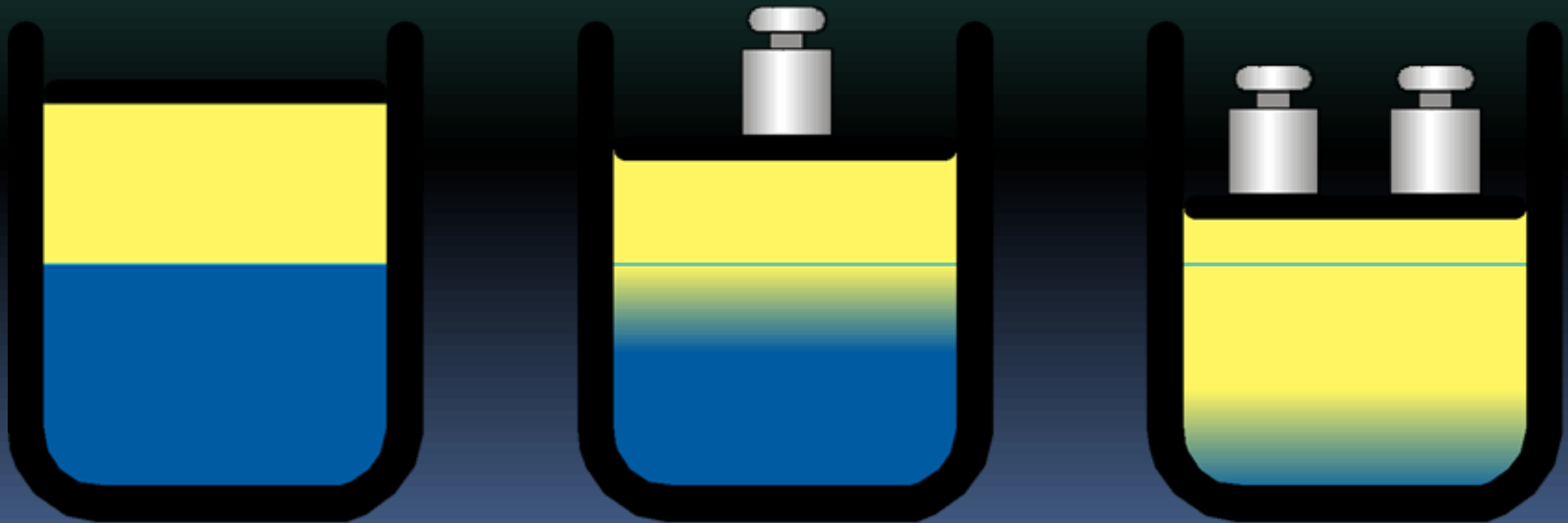
$$p_{N \max} = 4 \text{ bar (400 kPa)}$$

Příklad:

- a) Vypočítejte maximální hloubku pro ponor se vzduchem aby nedošlo k překročení mezního parciálního tlaku kyslíku.
- b) maximální hloubku aby nedošlo k překročení hranice parciálního tlaku dusíku

Henryho zákon

Množství plynu rozpuštěného v kapalině je přímo úměrné tlaku plynu nad kapalinou



Henryho zákon



Analogie - během ponoru se organismus potápěče sytí dýchacími plyny (dusík).

Rozpuštěný plyn

Henryho zákon

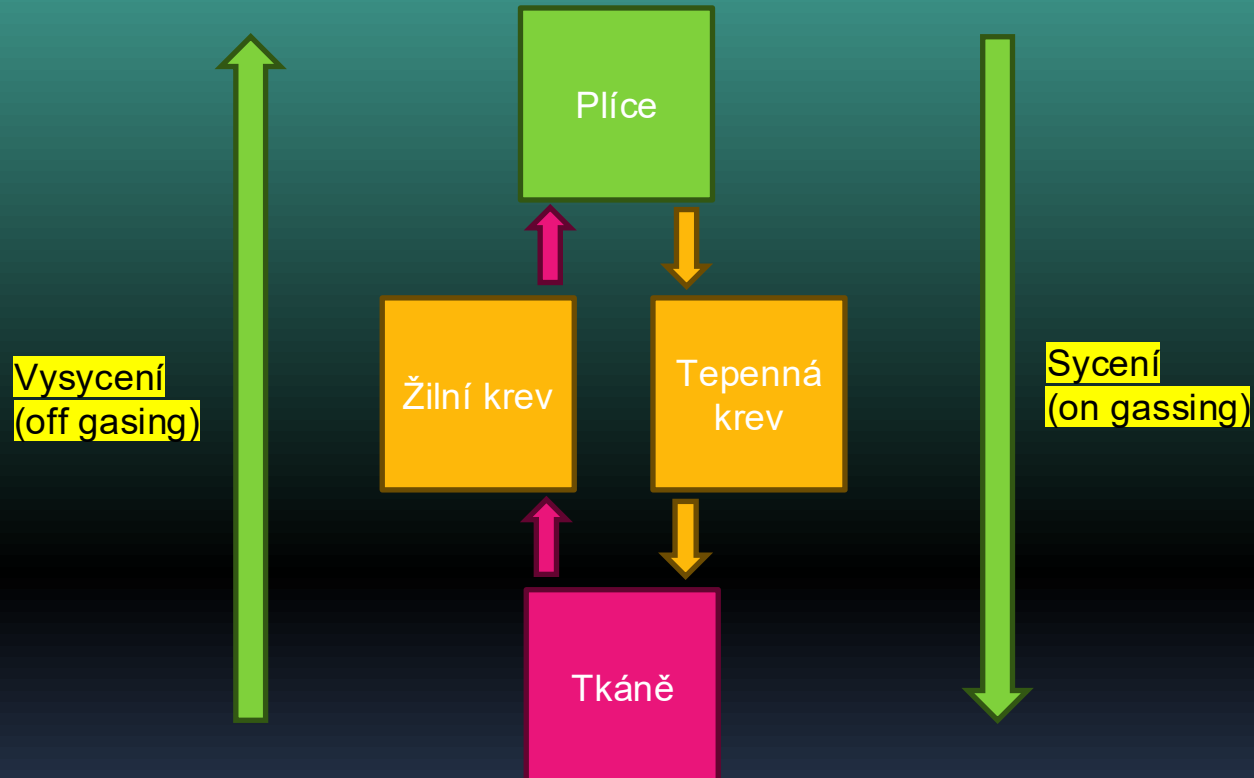


Analogie - při nedodržení dekompresního režimu může dojít k vytvoření bublin dusíku v těle potápěče.

Při ponorech v nulovém čase je dekomrese zajištěna dodržáním výstupové rychlosti

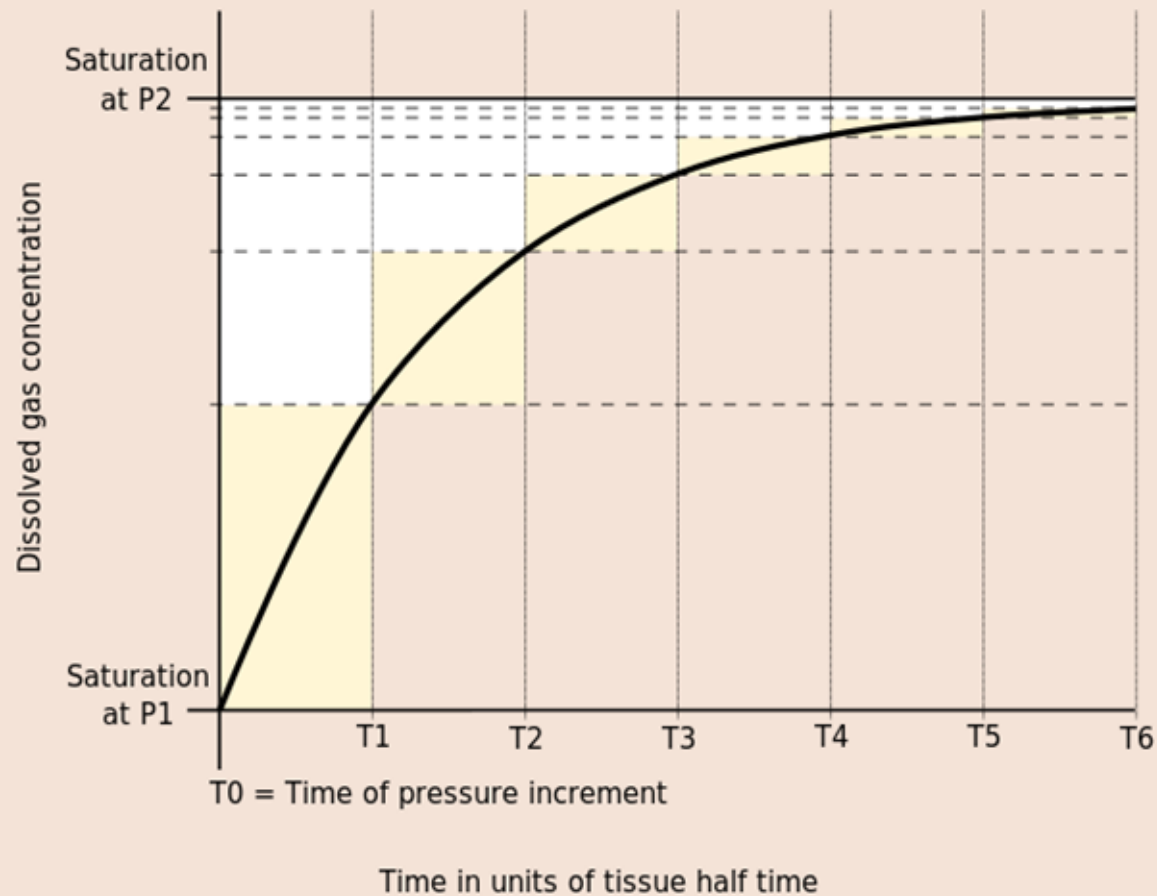
Únik plynu

Henryho zákon - sycení



Saturace v čase

Dissolved gas concentration change over time
for a step increment in pressure in an initially saturated solvent



T = 4 min – 600 min

6 x T => 98.4 % sat

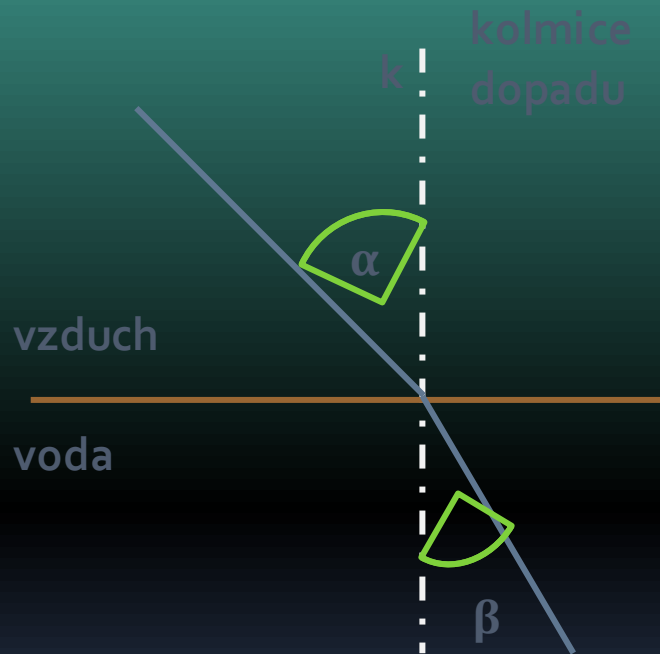
Rozpouštění plynu v kapalině

| | dusík | helium | kyslík |
|--------------------|-------|--------|--------|
| Voda (krev) | 12.3 | 8.6 | 23.9 |
| Olivový olej (tuk) | 66.1 | 15.7 | 110.5 |

ml / l / 1 bar při 37 stupňů celsia

Vidění pod vodou

Intenzita světla

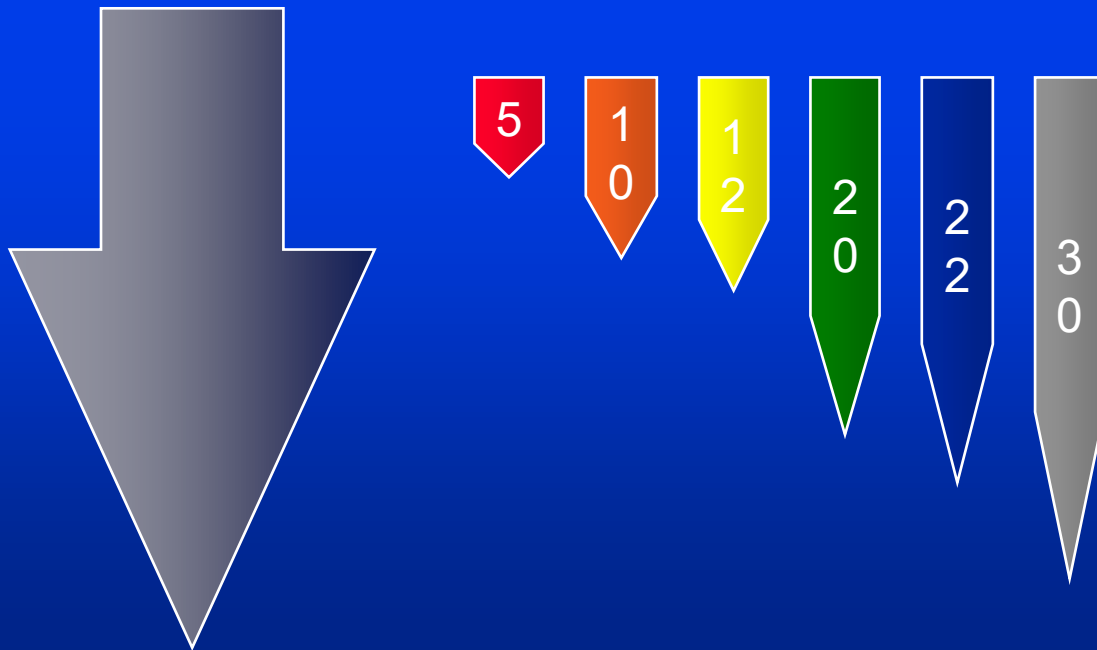


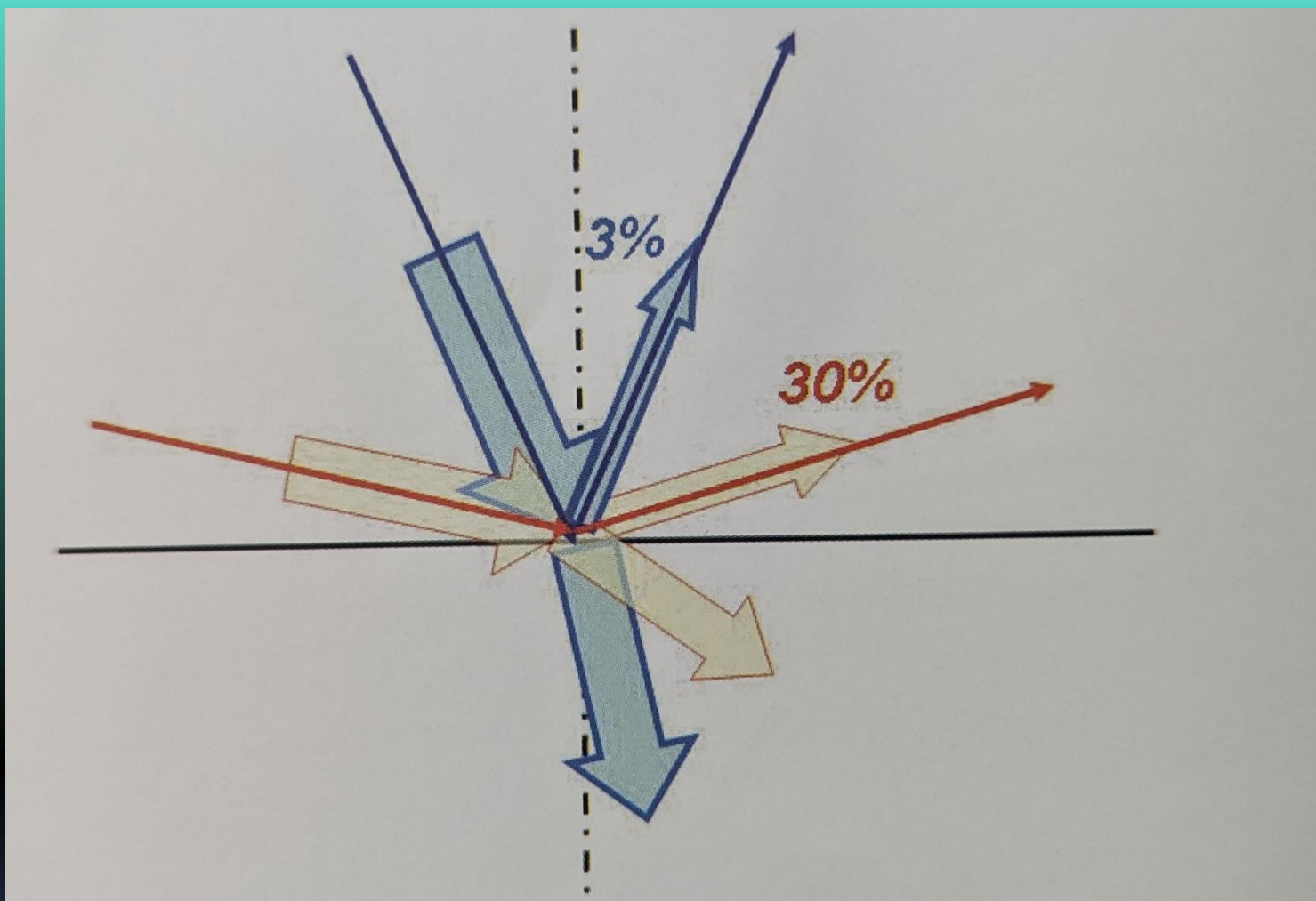
- Paprsek dopadající na vodní hladinu se částečně odráží.
- Světlo se při přechodu z prostředí opticky řidšího do hustšího láme ke kolmici
- Naopak při přechodu z vody na vzduch se světlo láme od kolmice

Vidění pod vodou

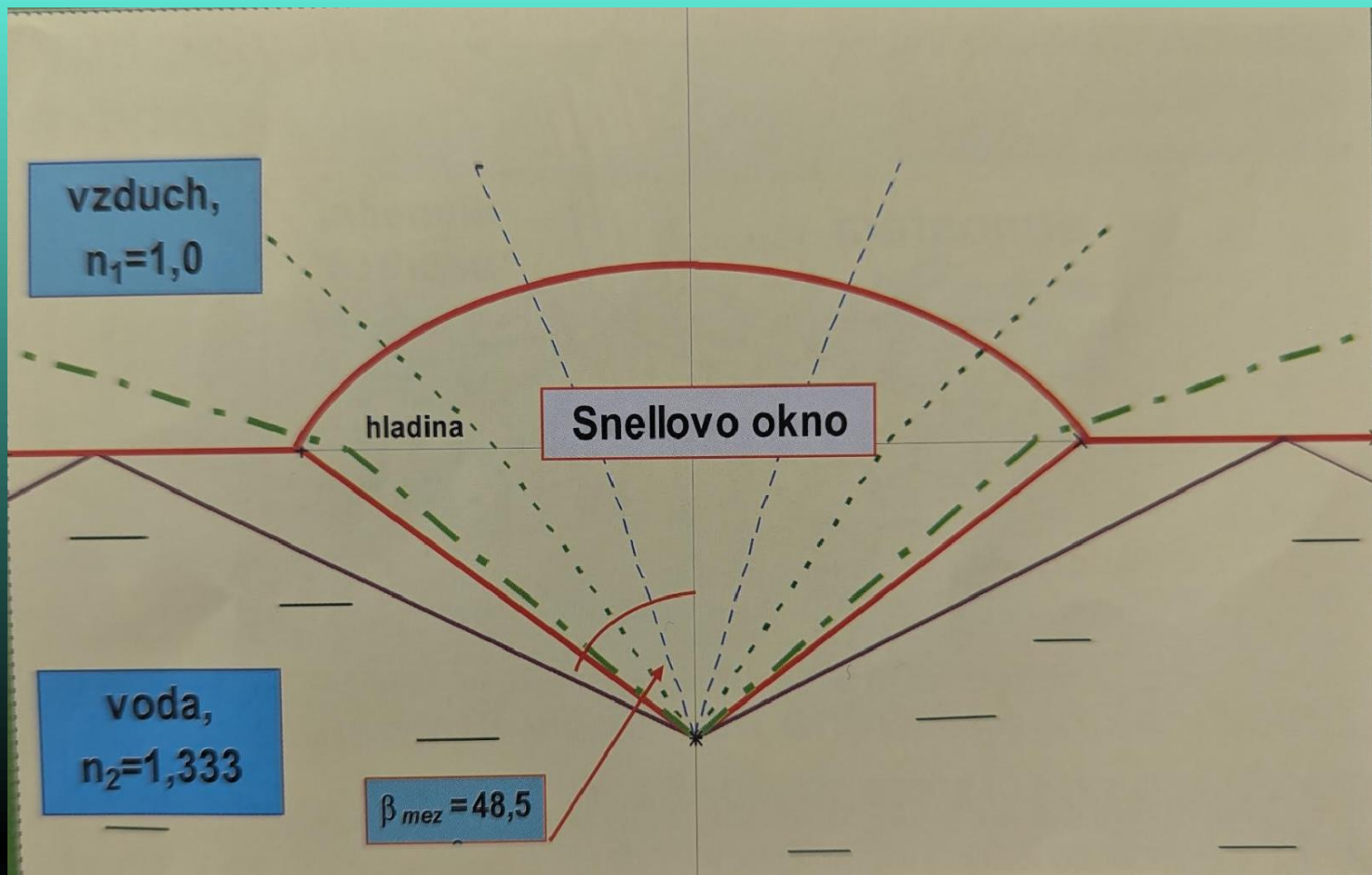
Pohlcování světla

- Nejdříve se ztrácejí teplé složky spektra
- Nejhlouběji proniká modrá
- Při nízké intenzitě světla ale oko vnímá černobíle
- Vyplatí se nosit si baterku i ve dne





Množství světla které pronikne pod hladinu je silně závislé na úhlu dopadu

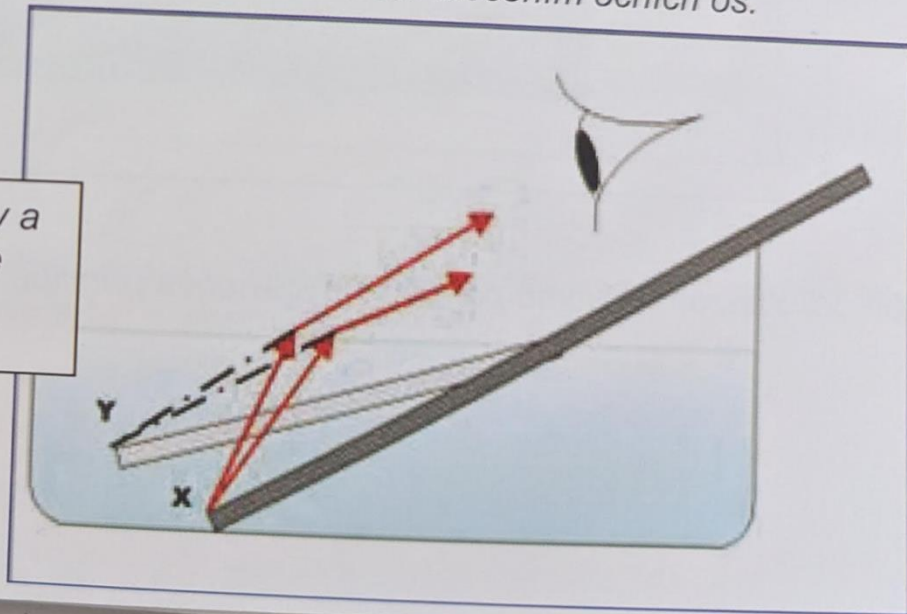


Při pohledu zpod hladiny se do oka sbíhají paprsky přicházející jak ze vzduchu tak i z vody.

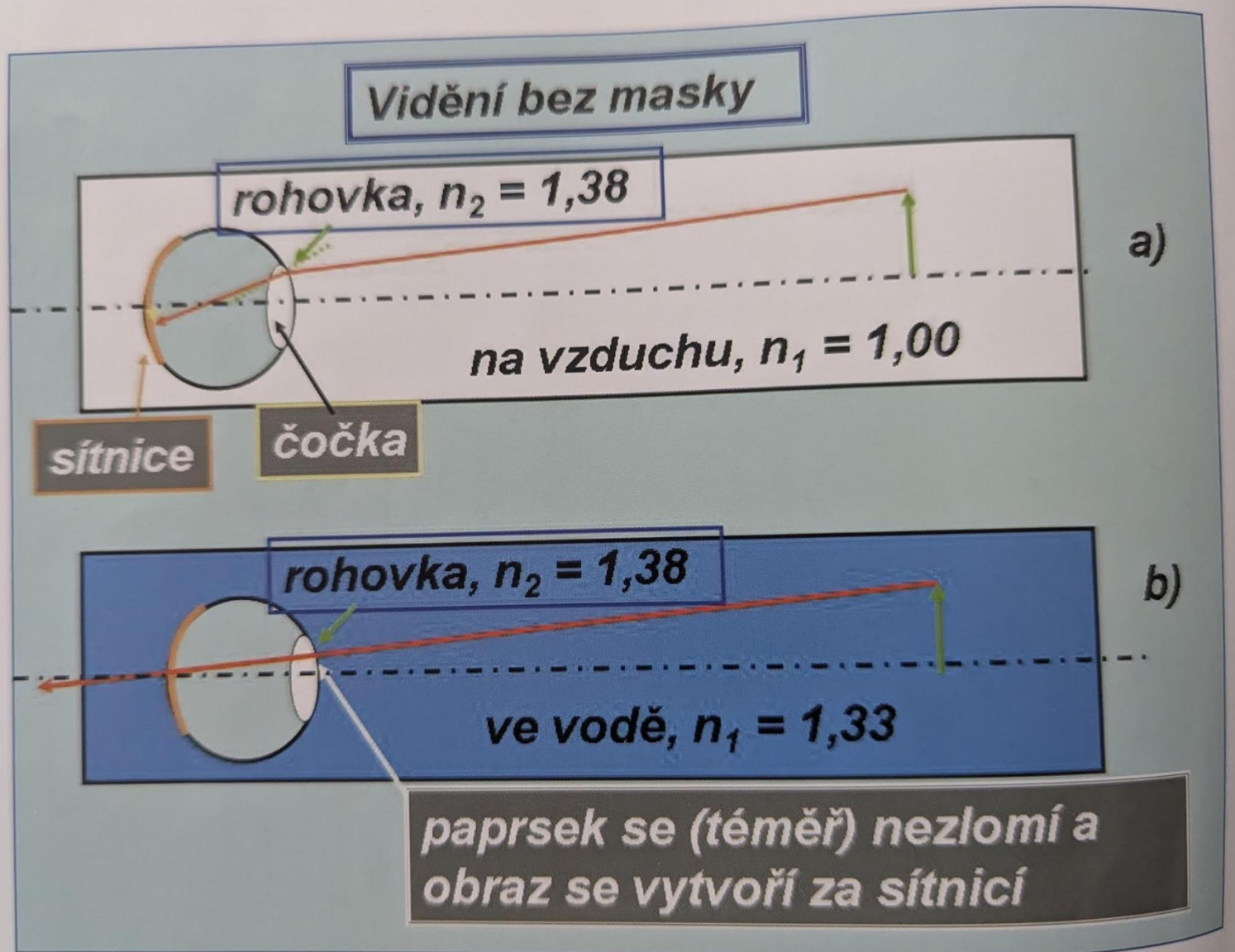
Tyč do vody ponořená ...

Obr. 55. Zkreslení vzdáleností při binokulárním vidění stočením očních os.

Obr. 56. Zkreslení hloubky a vzdáleností při pohledu ze vzduchu do vody.



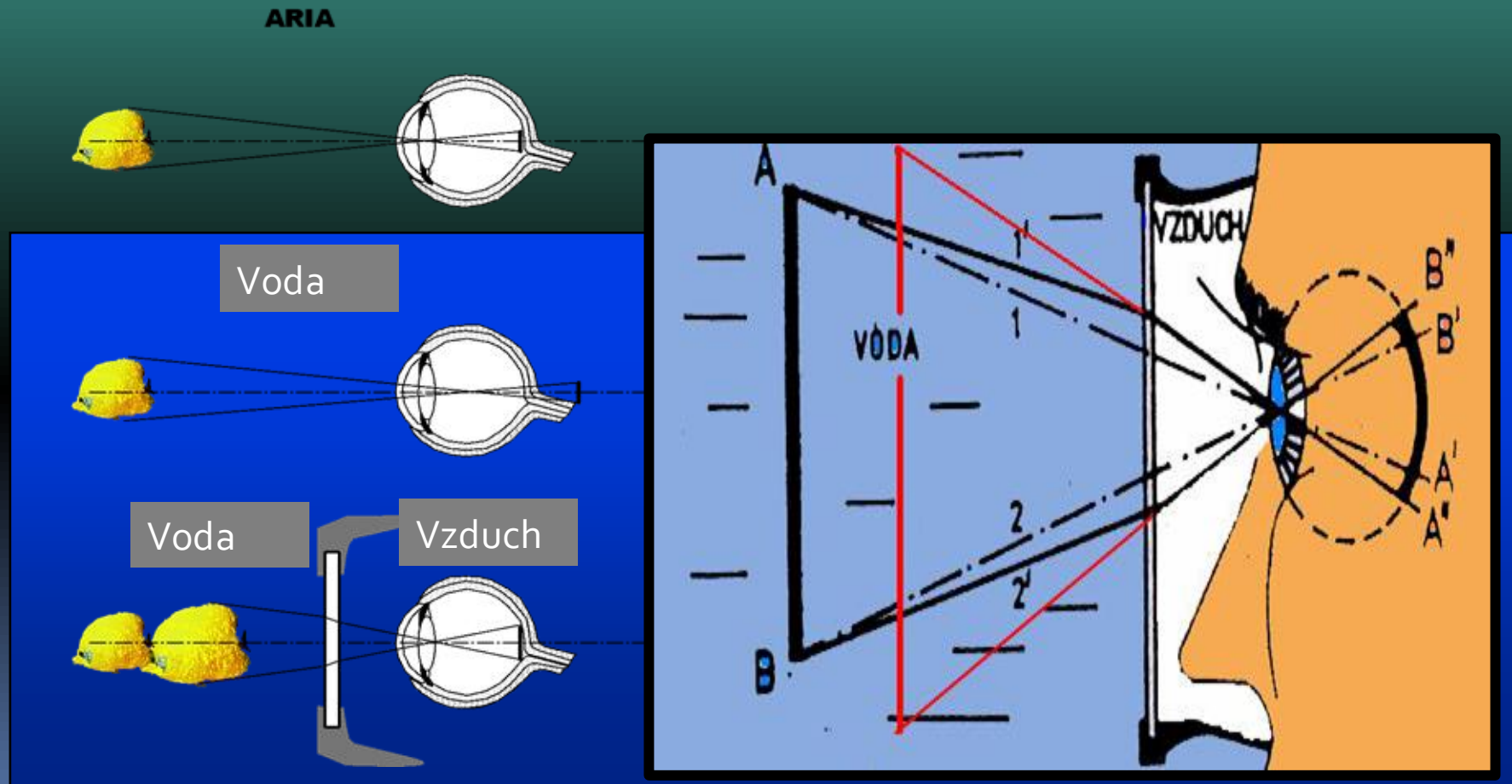
Zdá se býti nalomená



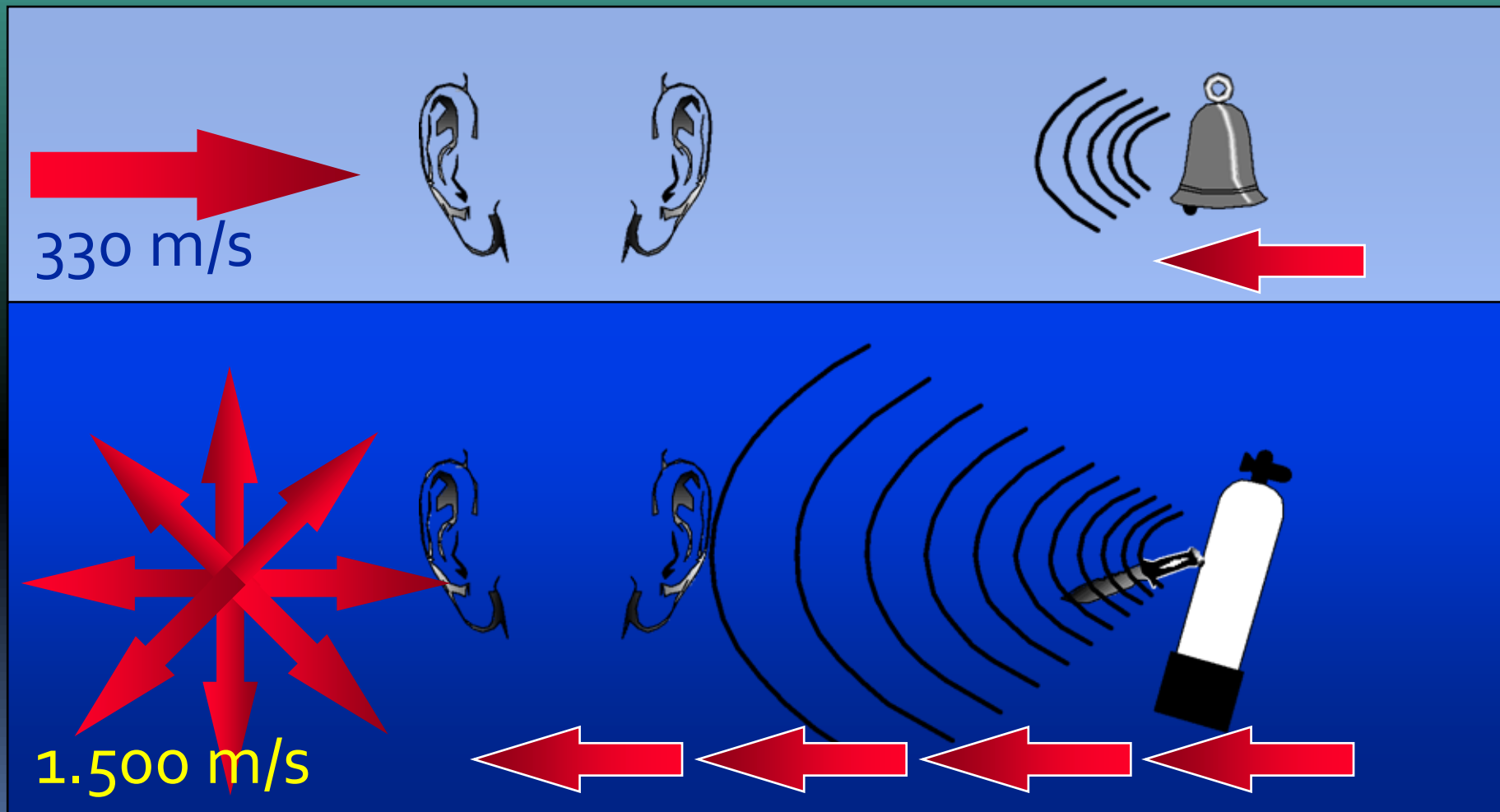
Obr. 53. Vidění na vzduchu a pod vodou bez masky.

Vidění pod vodou

Předměty se jeví o $\frac{1}{3}$ větší a o $\frac{1}{4}$ blíž




Slyšení pod vodou





Slyšení pod vodou

RYCHLEJŠÍ




Není jasné
odkud zvuk přichází



Přenos tepla

Proč je nám ve vodě zima?

- Voda má velkou tepelnou kapacitu – k ohřátí 1 kg vody o 1 stupeň Celsia je v porovnání se vzduchem potřeba 3000x většího množství tepla
 - Voda velmi dobře vede teplo (asi 30x lépe než vzduch)
- 

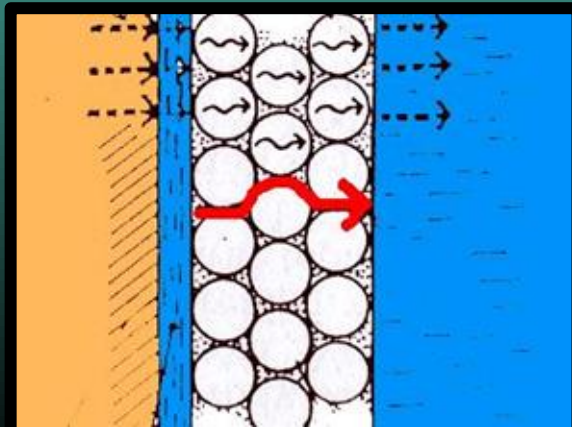
Přenos tepla

Základní způsoby přenosu tepla:

- Vyzařováním
 - Teplo je do okolí odváděno pomocí elektromagnetického záření.
Pro potápění je bezvýznamné
- Vedením
 - Uplatňuje se hlavně v tuhých tělesech, např.: prostup tepla izolačním oblekem
- Prouděním
 - Velmi účinné. Proudění vody kolem těla plavce by měl zabránit izolační oblek

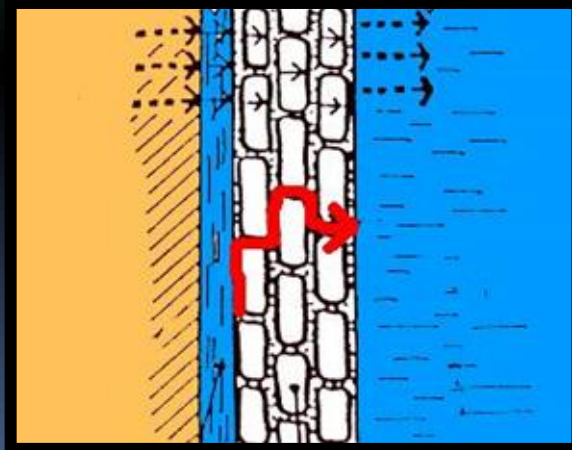
Přenos tepla

Prostup tepla mokrým neoprenovým oblekem



Teplo je vedeno jednak plynem v bublinkách, jednak materiálem

Bublinky mají trojí význam. Prodlouží dráhu, kterou musí teplo procházet, zmenší průřez pryže, který vede teplo a mají podstatně nižší tepelnou vodivost než pryž



Při stlačení neoprénu se nezmění délka dráhy, kterou prochází teplo pryží. Proto tepelná funkce neoprénu se významně nezmění

Nemá cenu vylézat z vody na malou chvíli, dojde ke zbytečné výměně ohřáté vody za studenou.

Je dobré před ponorem zalít oblek teplou vodou.

Konec . . .



A hurá do vody