



FYZIKA P*, P**

Fyzika - plán

- Fyzika, teorie (dnes)
- Fyziologie
- Plánování ponoru, dekomprezní postupy

Fyzika – osnova výcviku

P☆: T4 Základy potápěcké fyziky

(2 x 45 min)

- Základní fyzikální pojmy spojené s potápěním (veličiny a jednotky, vysvětlení pojmu).
- Atmosférický, hydrostatický a celkový tlak, přetlak, podtlak (vysvětlení pojmu, 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 potápěcké 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
- Archimedův 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

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

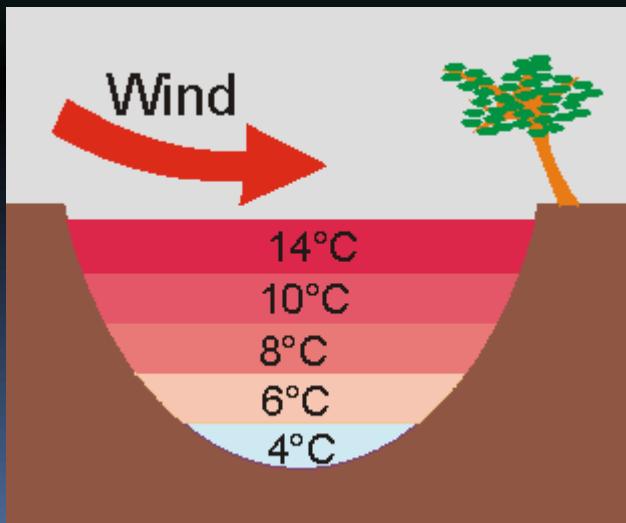
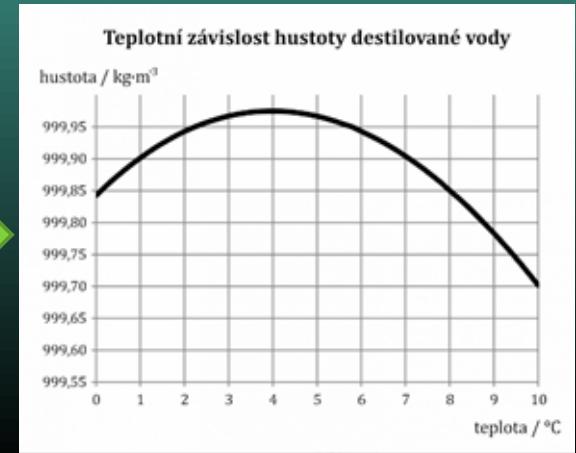
Příklady látek:

| 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



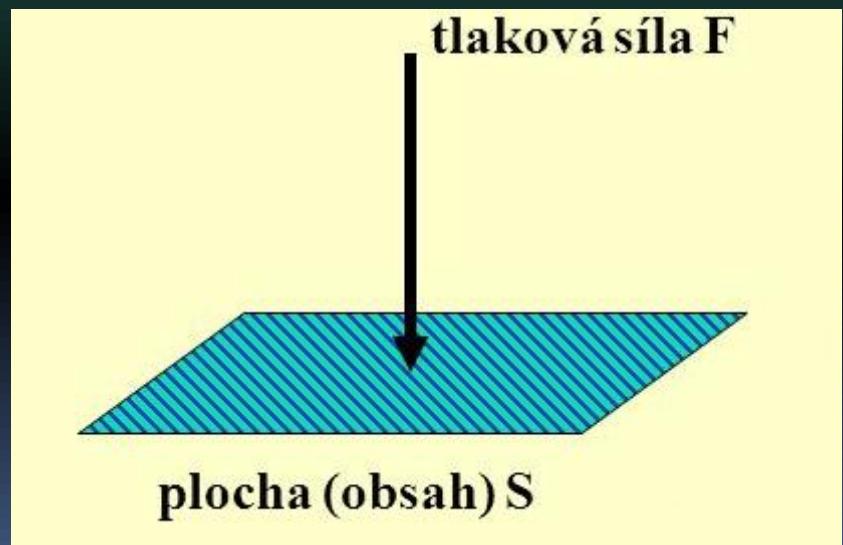
Fyzika

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

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

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

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



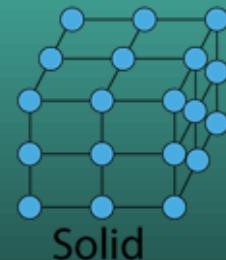


Fyzika

Tlak a skupenství

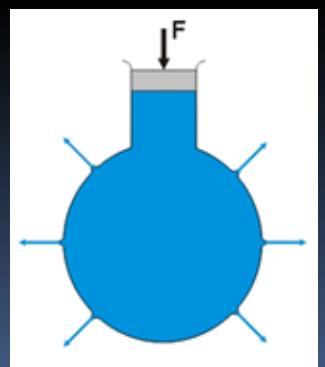
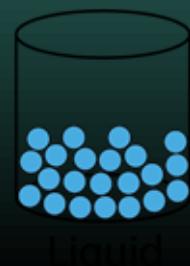
- **Pevné látky**

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



- **Kapaliny**

- Částice více 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 kapalné těleso v uzavřené nádobě, je ve všech místech kapaliny stejný (Pascalův zákon)
- Jsou nestlačitelné

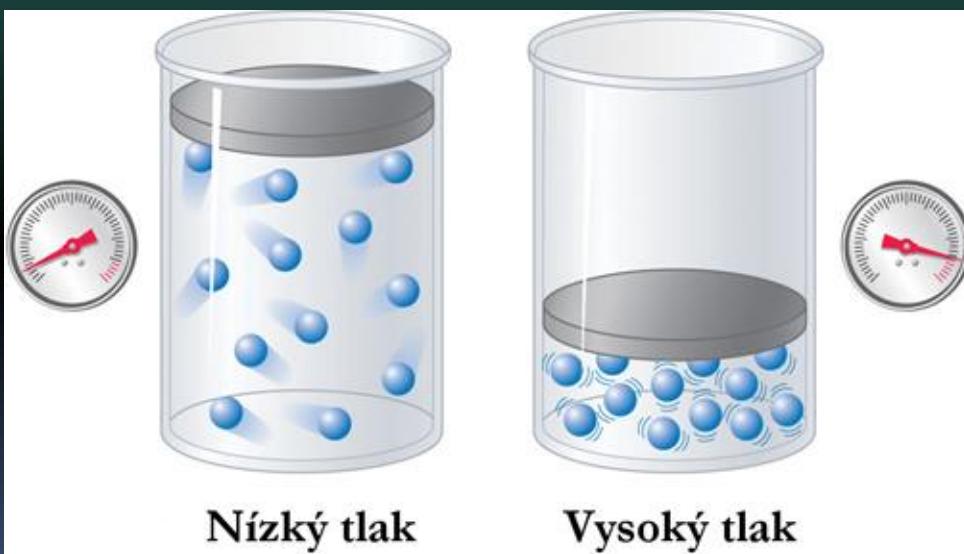
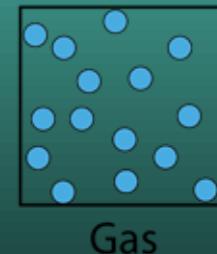


Fyzika

Tlak a skupenství

- **Plyny**

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





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 $p = p_a + p_h$**

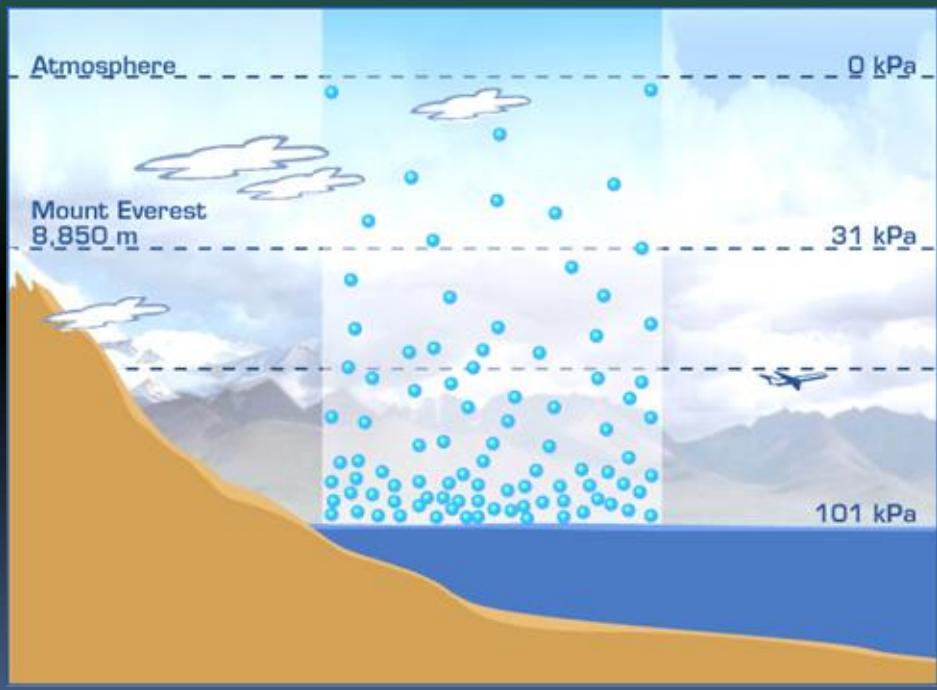
(Celkový tlak působící na potápěče pod vodou)



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

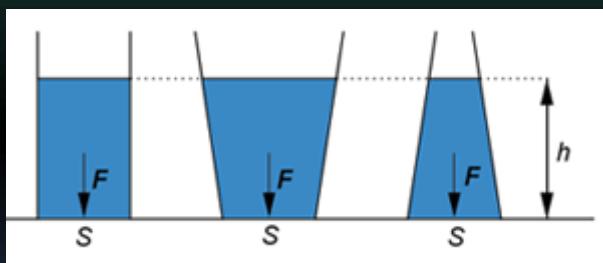
- Vyvolán tíhou kapaliny (vody)

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

- 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 ?

$$p = p_h + p_a$$

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

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

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

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



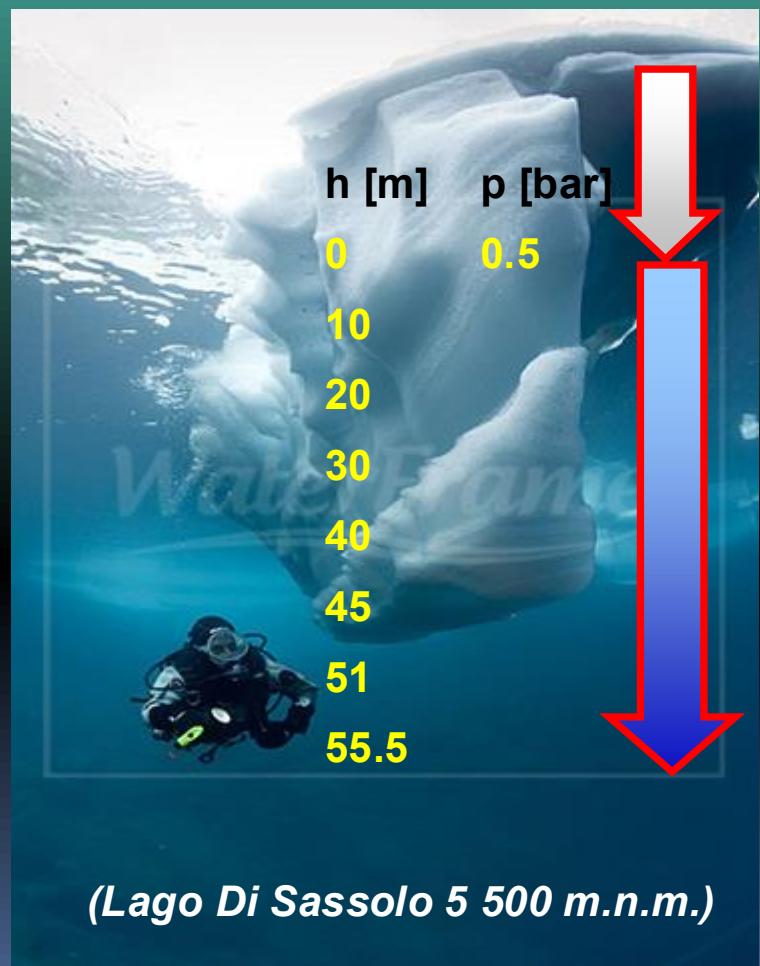
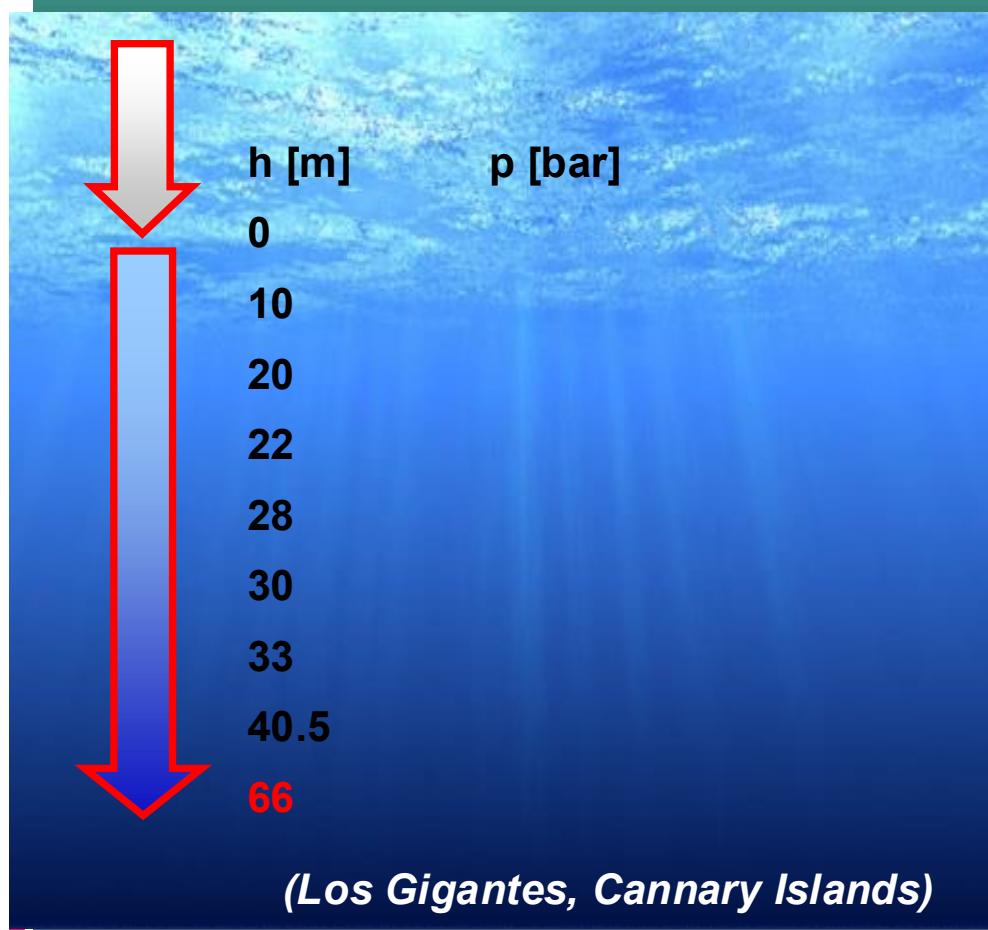
$$p = \frac{h}{10} + 1 \text{ [bar]}$$



Fyzika

Celkový tlak

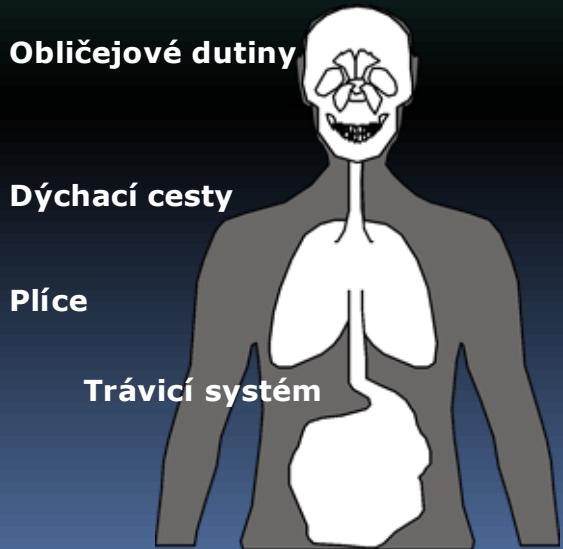
Příklad: doplňme hodnoty celkového tlaku v hloubce



Důsledky zvýšeného tlaku

Proti tlakové síle vyvolané okolním tlakem lze potápěče chránit:

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



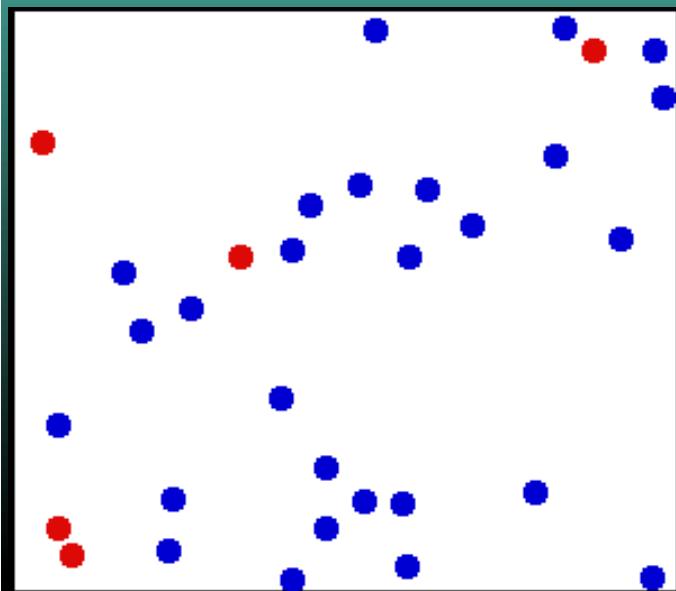
Tlak nemá žádný vliv na ty části těla, které jsou vyplněny tekutinami

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) Větší tlak
- Větší energie částic (T) Větší tlak
- Čím větší objem (V) Menší tlak

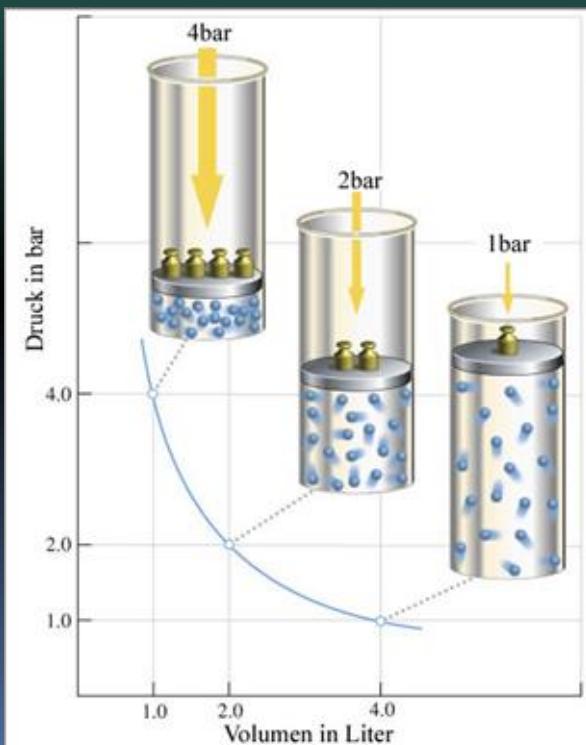


**Stavová rovnice
ideálního plynu**

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

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.



$$pV = \text{konst.}$$



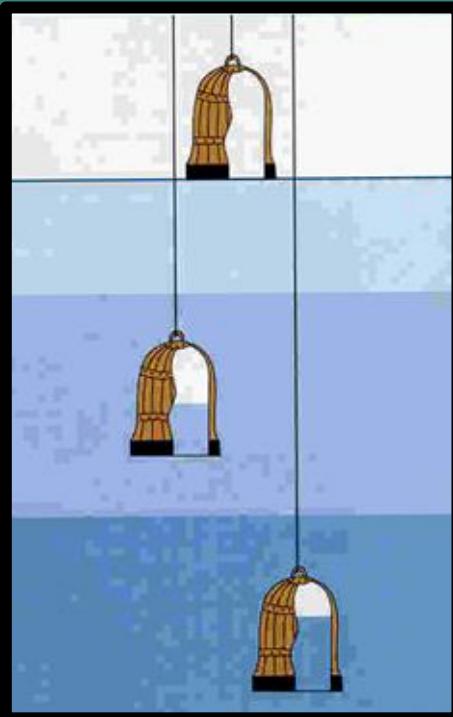
Kolikrát se zvětší tlak, kolikrát se zmenší objem
Kolikrát se zmenší tlak, kolikrát se zvětší objem

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.



$$\text{Tlak v hloubce } 0 \text{ m } p = 1 \text{ bar}$$

$$\text{Objem vzduchu v kesonu } V = 1000 \text{ l}$$

$$\text{Tlak v hloubce } 10 \text{ m } p = 2 \text{ bar}$$

$$\text{Objem vzduchu v kesonu } V = 500 \text{ l}$$

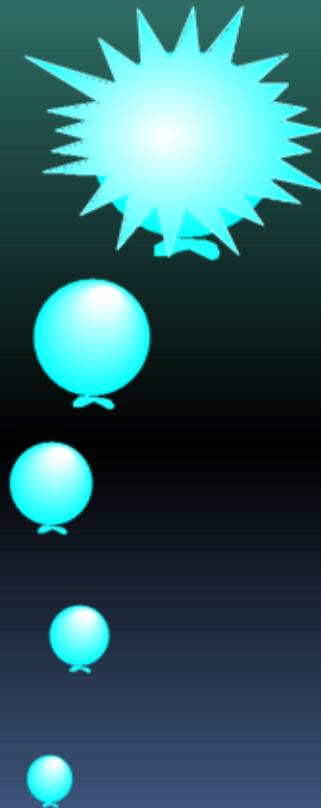
$$\text{Tlak v hloubce } 20 \text{ m } p = 3 \text{ bar}$$

$$\text{Objem vzduchu v kesonu } V = 333,33 \text{ l}$$

Stlačování plynů

- Příklad: Balónek o objemu 6 litrů vypuštěný z hloubky 40 metrů stoupá k hladině. Vypočtěte 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

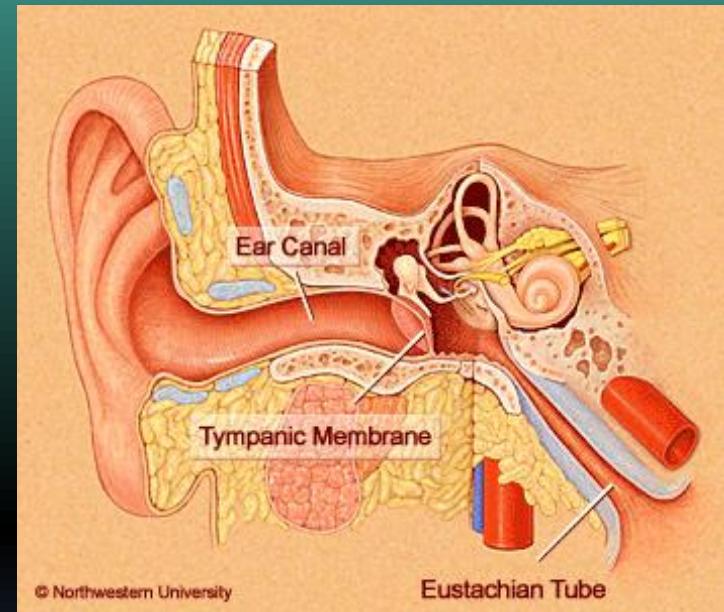
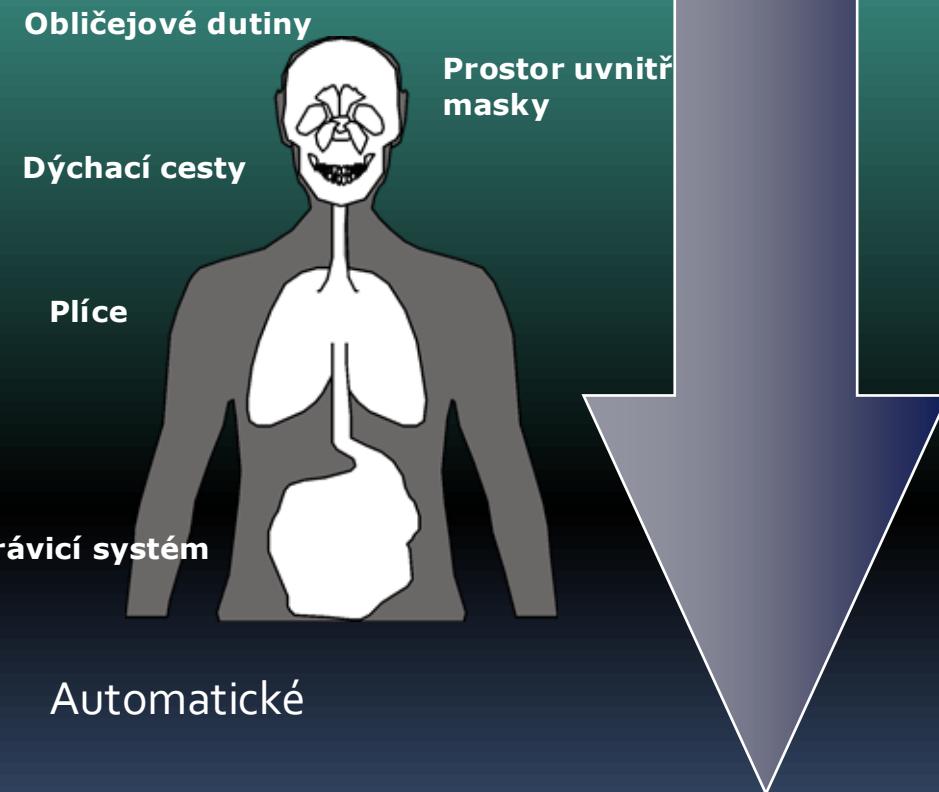
Při výstupu ze 40 do 30 m se balónek zvětšil pouze o 1,5l, rotože poměr tlaků je pouze 5/4

Při výstupu z 10m na hladinu o stejnou vzdálenost se ale jeho oběm 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 potápěč 15l láhev naplněná na začátku ponoru na 200 barů, tak aby se vynořil s rezervou 50 barů v hloubce:

- a) 10m
- b) 30m

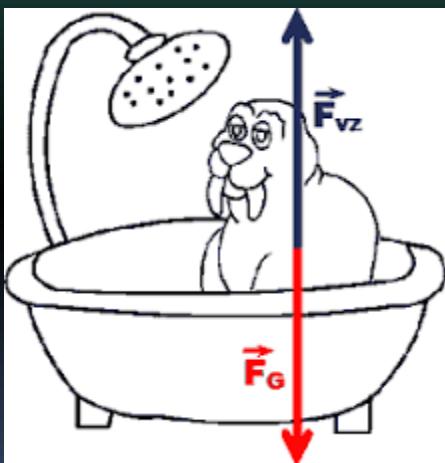
Hladinová spotřeba 30l/min

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

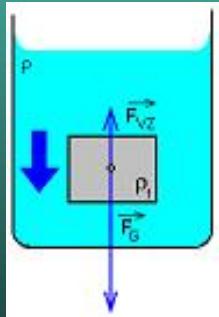
- Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno silou rovnající se tíze kapaliny tělesem vytlačené



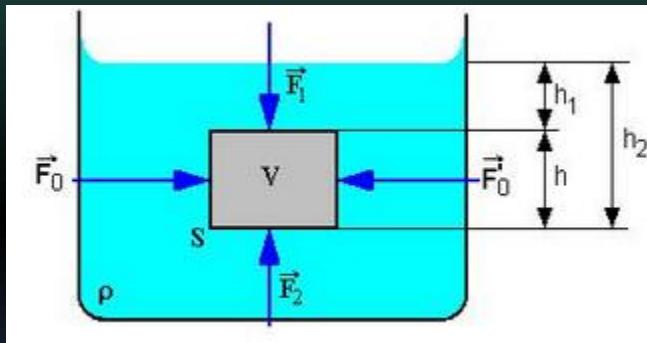
Pokud je tíha tělesem vytlačené vody větší než tíha tělesa samotného (resp. hustota tělesa je menší než hustota vody), pak těleso plove.

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 4 kg má u hladiny objem 12 l kolik zátěže potřebujeme na kompenzaci vztlakové síly kterou vyvolá?

Archimédův zákon

Jaké množství vzduchu budeme potřebovat abyhom 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 odhadujeme zátěž jen v nejvyšší nouzi

Vyvážení na hladině:

Plně ustrojení vstoupíme do vody s malým množstvím
Vzduchu v BC. Seřídíme hmotnost zátěže tak abchom 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 rychlosť 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 rychlosť výstupu.

Změna vztlaku během ponoru

V důsledku úbytku dýchané směsi (vzduchu)

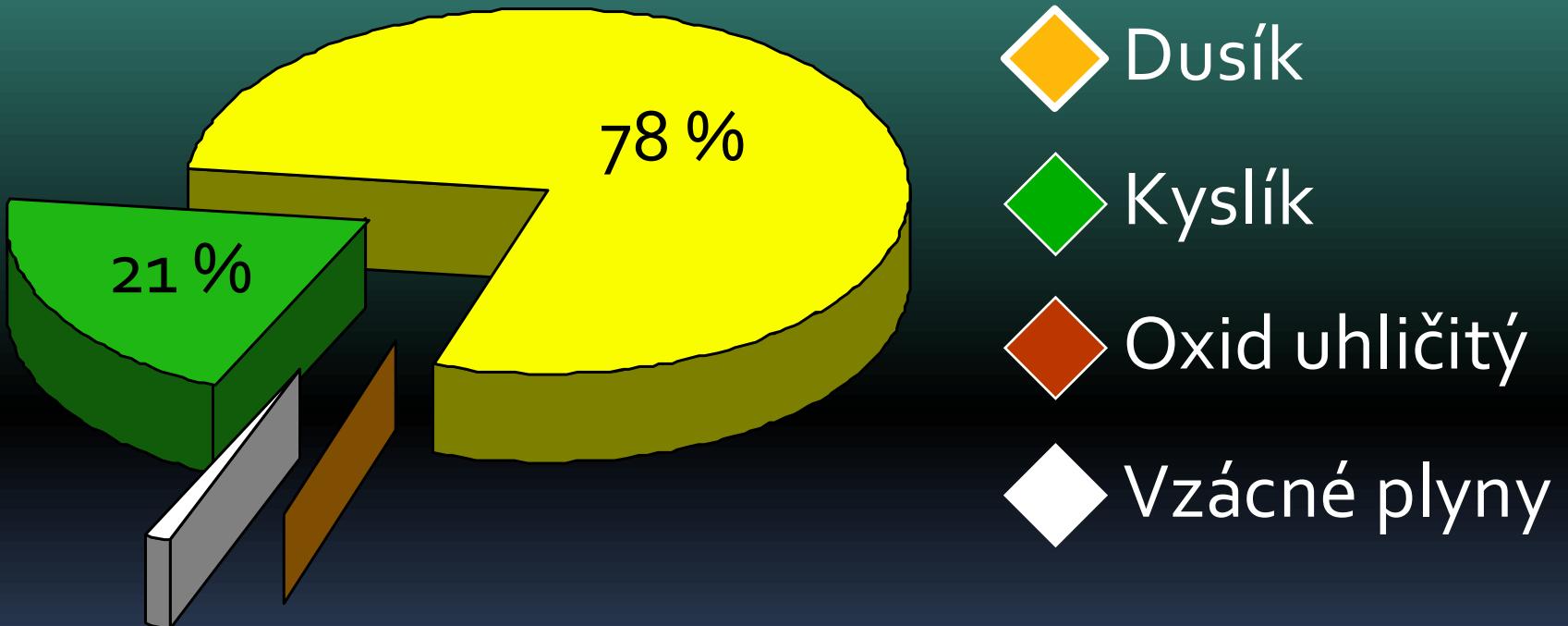
Příklad: Vypočtěte hmotnost vzduchu v potápěcké lahvi s vnitřním objemem 12 l naplněné původně na 200 barů. (Hustota vzduchu je 1,25 kg/m³)

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

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

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

Složení vzduchu



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

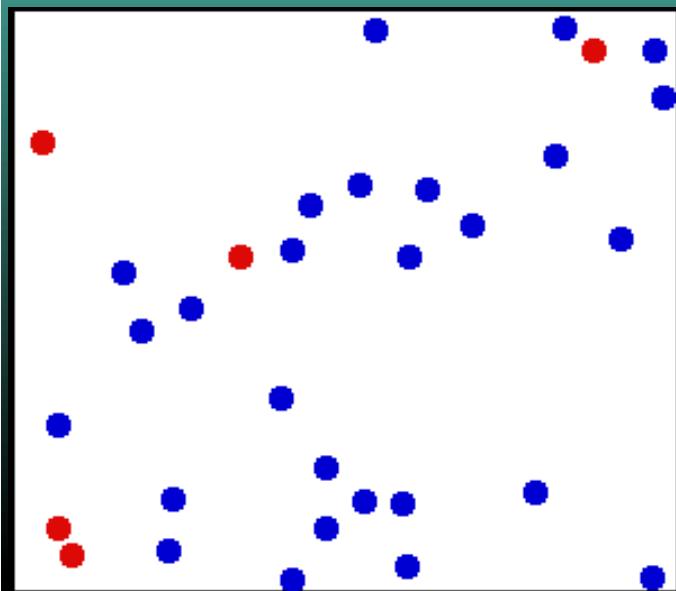
$$p_n = p_c \times f_n$$

$$p_o = p_c \times f_o$$



Fyzika

Tlaku v plynu



Tlak je vyvolán nárazy částic plynu do stěn

Ale na čem závisí? $p = ?$

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



**Stavová rovnice
ideálního plynu**

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

Daltonův zákon, použití

Mezní limity parciálního tlaku kyslíku v dýchané směsi:

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

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

Mezní hodnota parciálního tlaku dusíku ve směsi

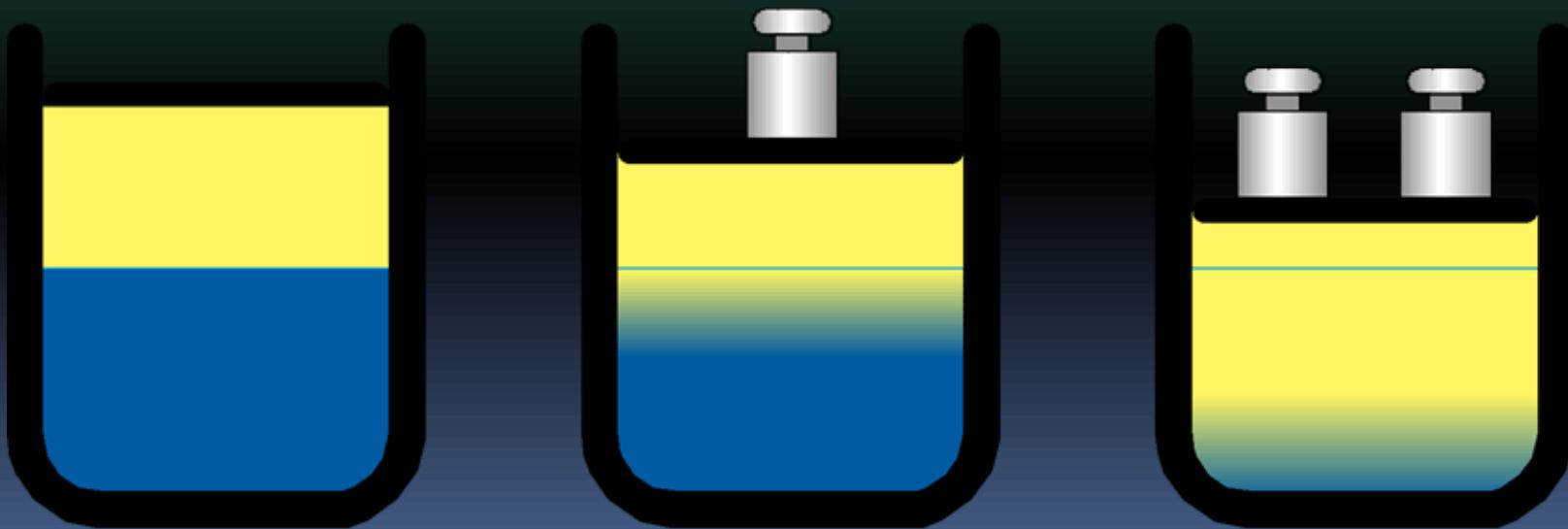
$$p_{N \text{ max}} = 4 \text{ bar (400 kPa)}$$

Příklad:

- Vypočítejte maximální hloubku pro ponor se vzduchem aby nedošlo k překročení mezního parciálního tlaku kyslíku.
- 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

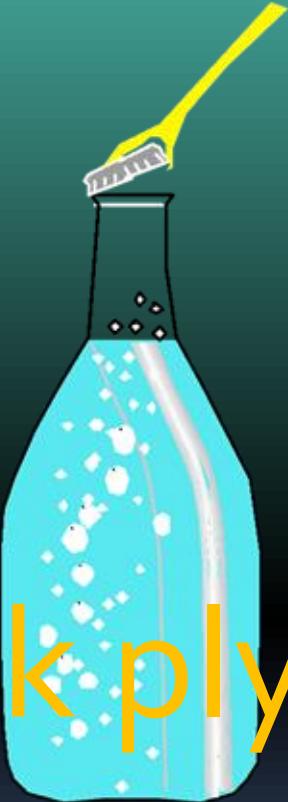
Vyšší
vnitřní
tlak



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

Rozpuštěný
plyn

Henryho zákon

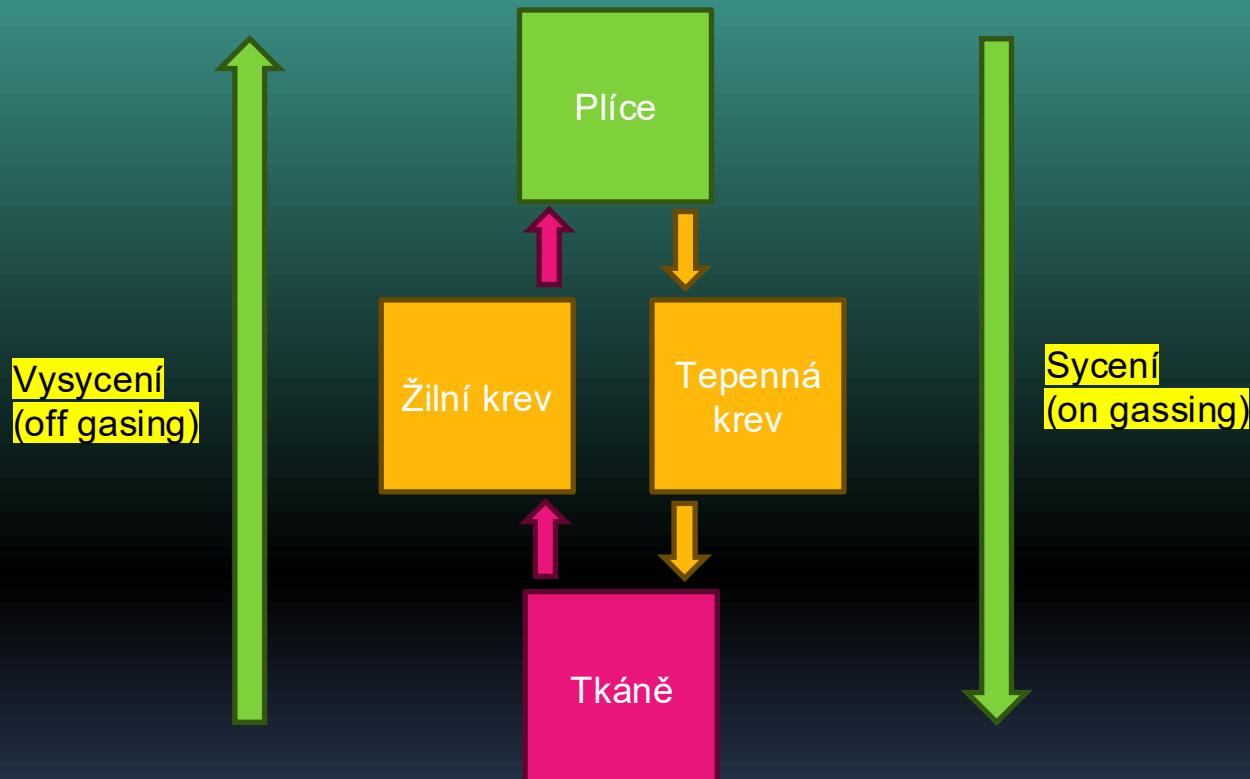


Analogie - při nedodržení dekomprezního režimu může dojít k vytvoření bublin dusíku v těle potápěče.

Při ponorech v nulovém čase je dekomprese zajištěna dodržením výstupové rychlosti

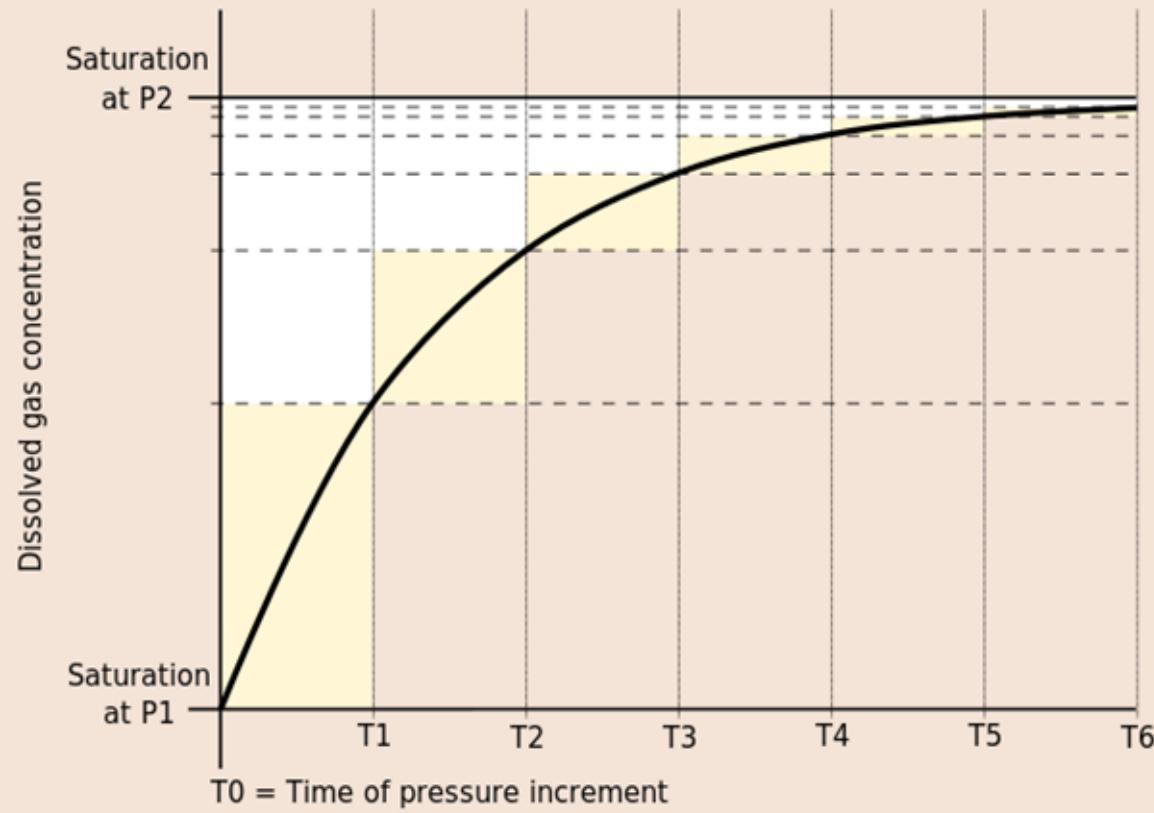
Únik plynu

Henryho zákon - sycení



Saturace v čase

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



$T = 4 \text{ min} - 600 \text{ min}$

$6 \times T \Rightarrow 98.4 \% \text{ sat}$

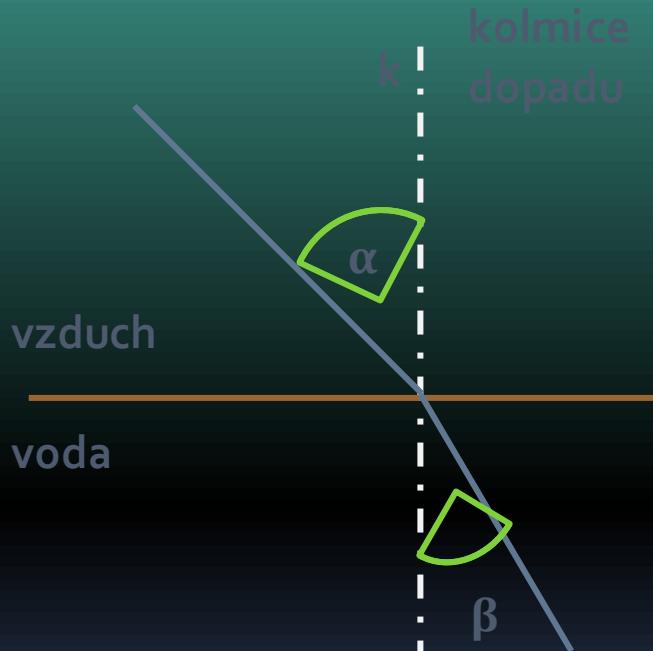
Rozpouštění plynu v kapalině

| | 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 stupní celsia

Vidění pod vodou

Intenzita světla

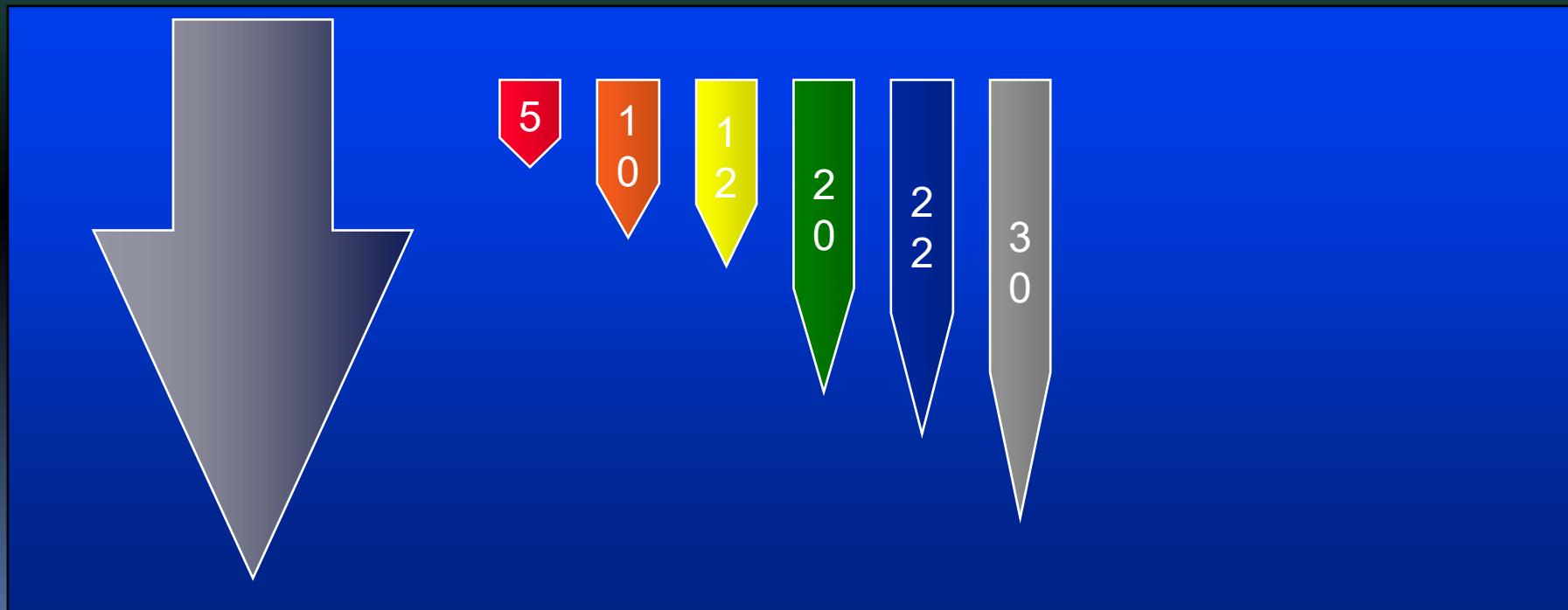


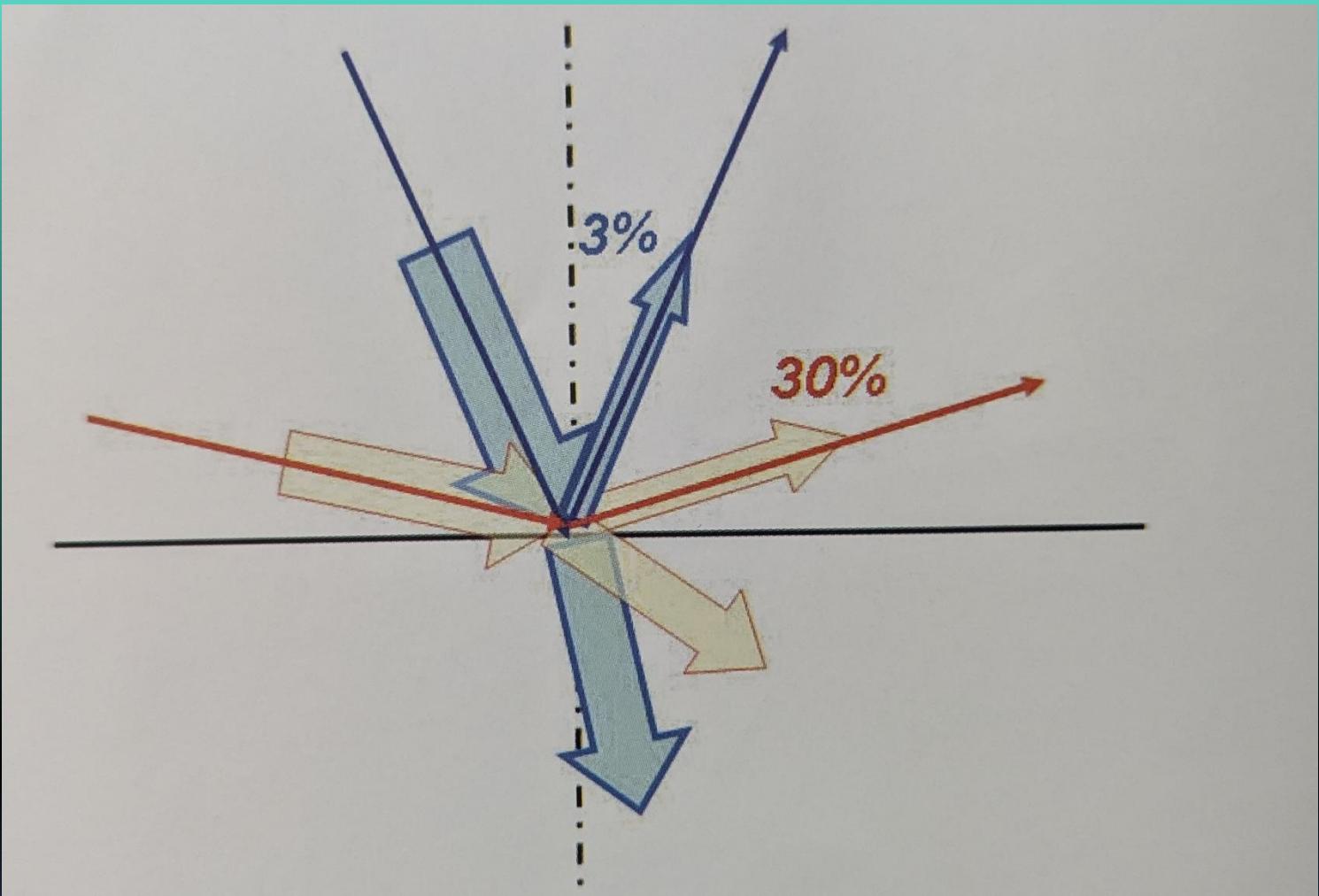
- Paprsek dopadající na vodní hladinu se částečně odráží.
- Světlo se při přechodu z prostředí opticky říšího do hustšího láme ke kolmici
- Naopak při přechodu z vody na vzduch se světlo láme od kolmice

Vidění pod vodou

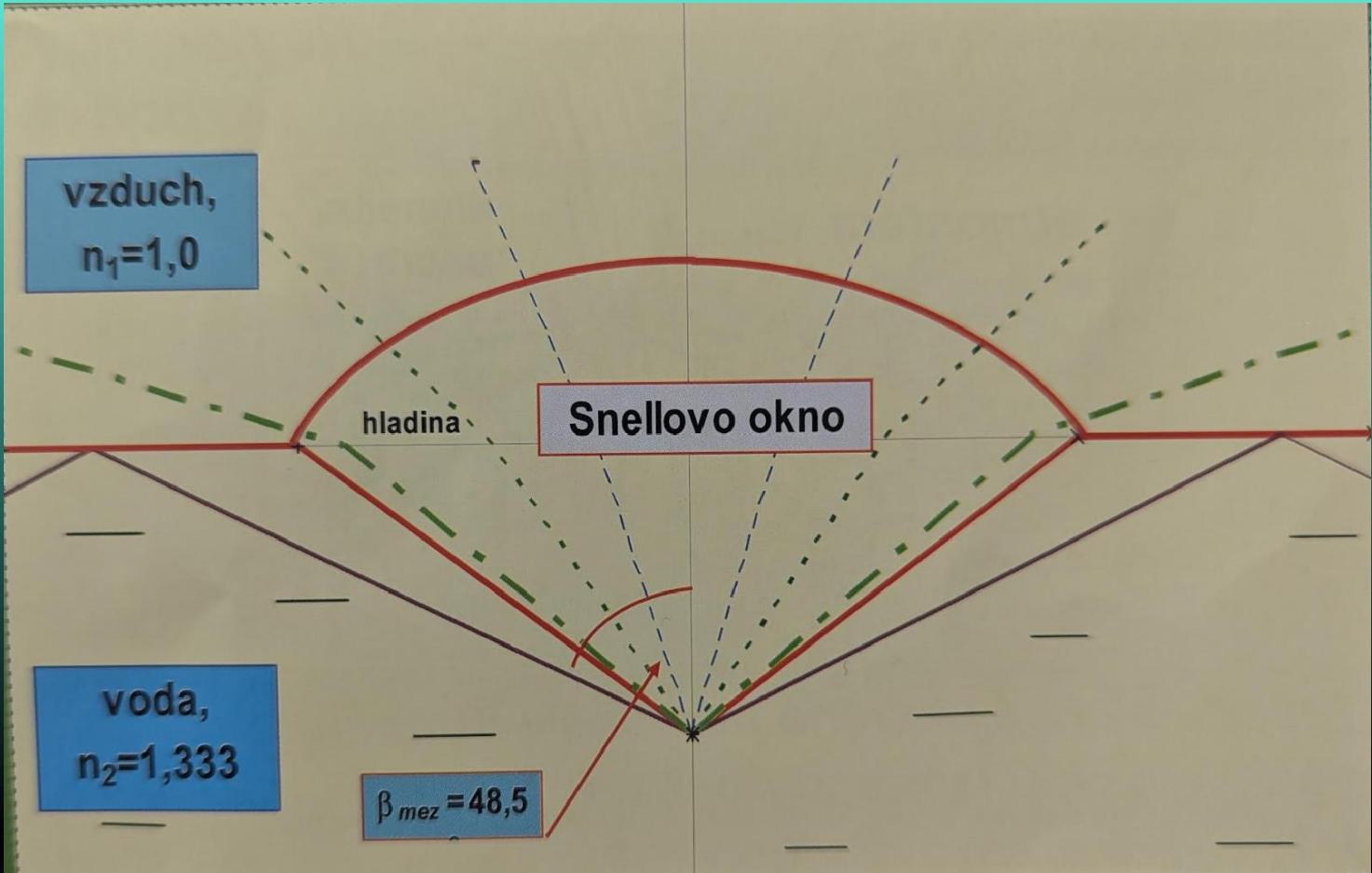
Pohlcování světla

- Nejdříve se ztrácejí teplé složky spektra
- Nejhloběji 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

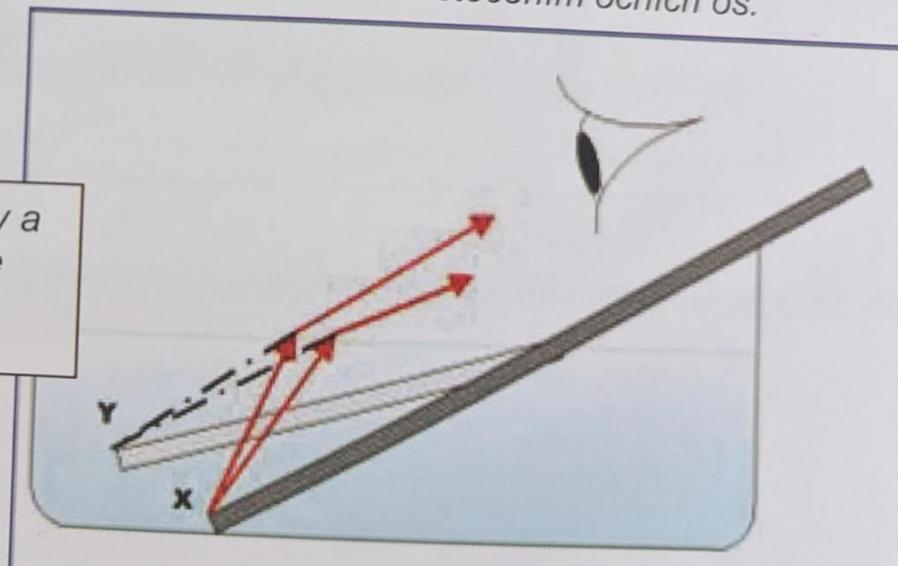


Při pohledu zpod hladiny se do oka sbíhají paprsky přicházející jak ze vzduchu tak i z vody.

Tyč do vody ponořená . . .

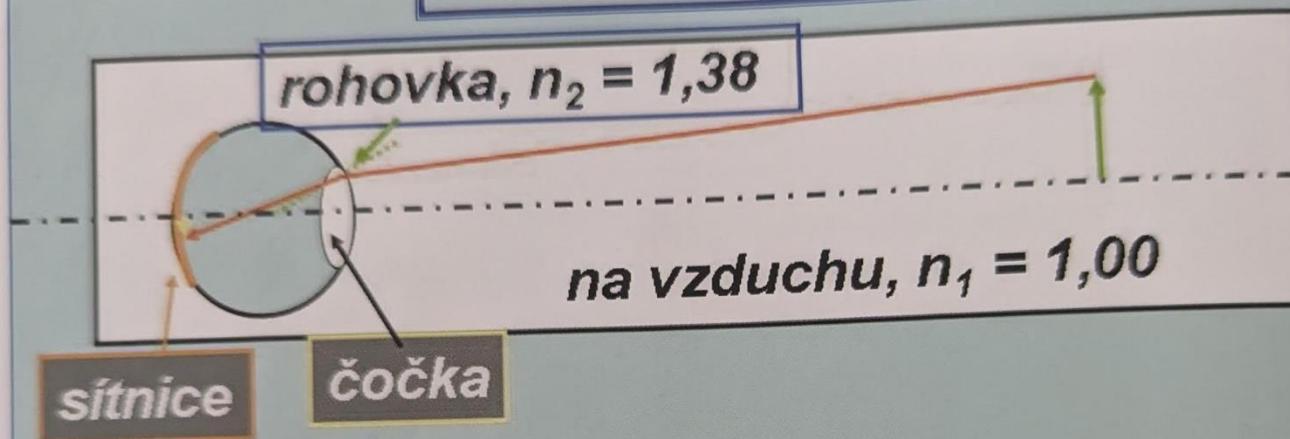
Obr. 55. Zkreslení vzdáleností při binokulárním vidění stočením očních os.

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

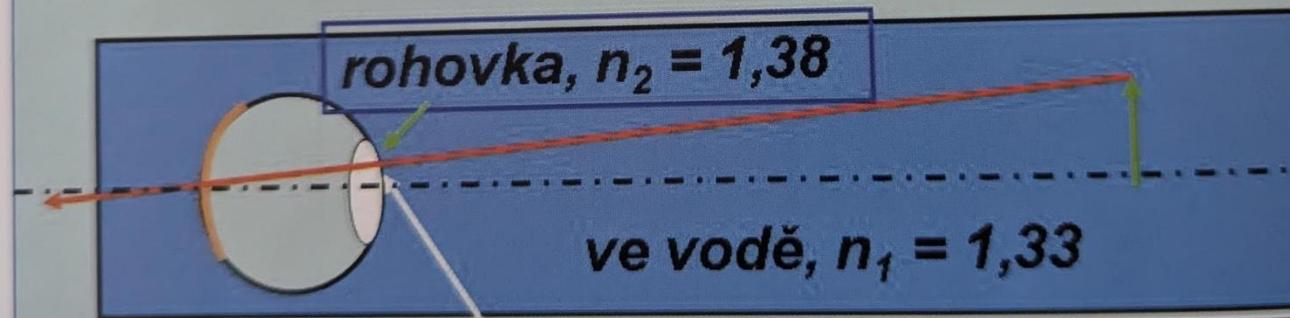


Zdá se býti nalomená

Vidění bez masky



a)



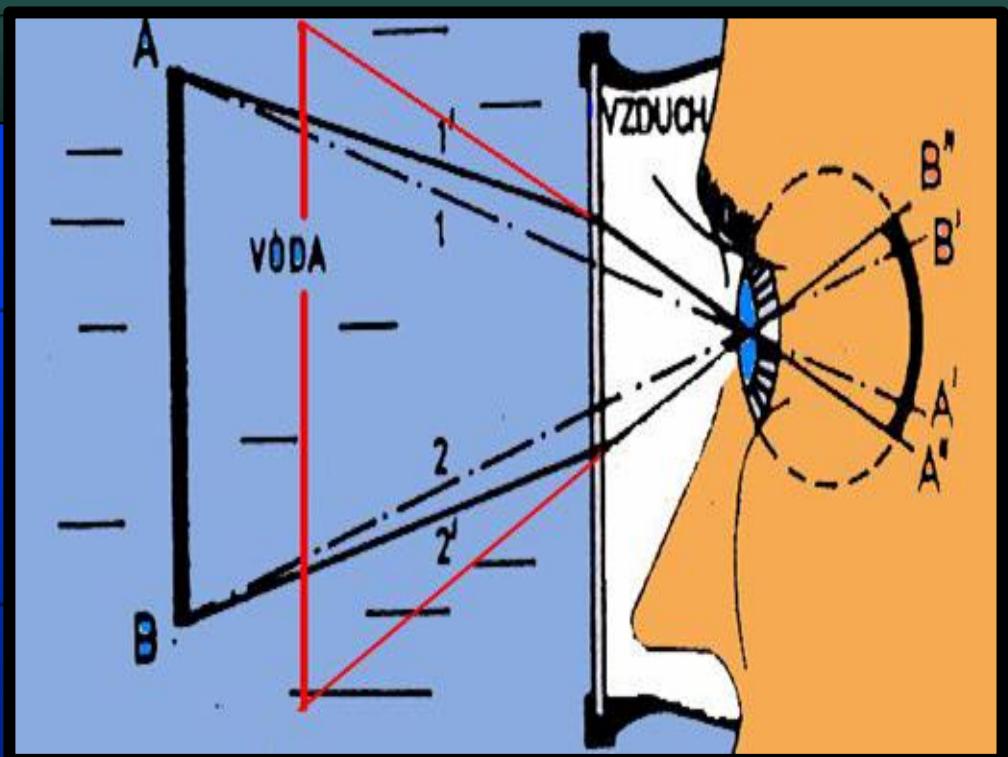
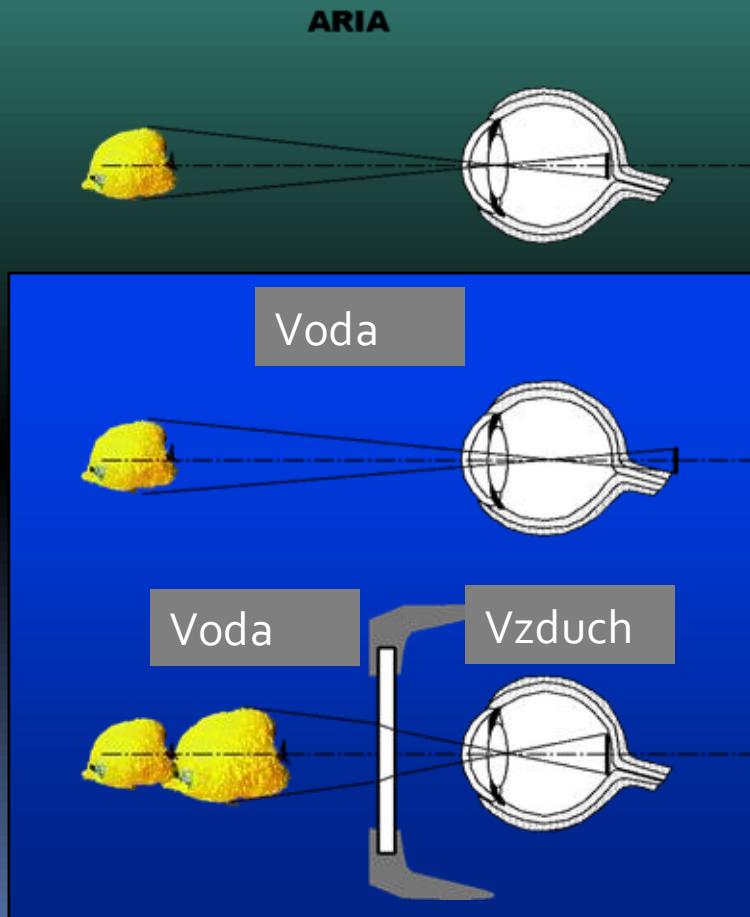
b)

*paprsek se (téměř) nezlomí a
obraz se vytvoří za sítnicí*

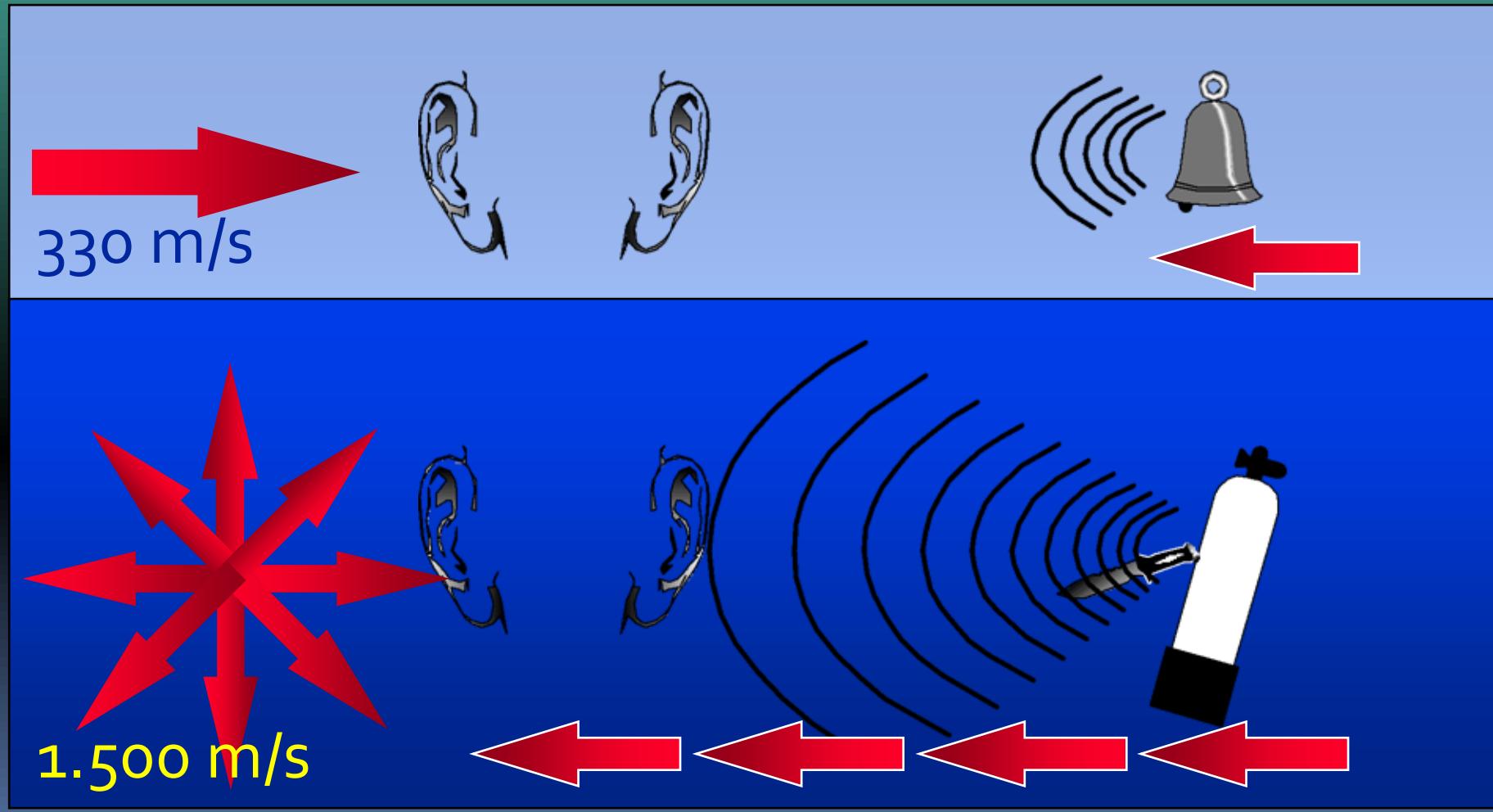
Obr. 53. Vidění na vzduchu a pod vodou bez masky.

Vidění pod vodou

Předměty se jeví o $1/3$ větší a o $1/4$ 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)

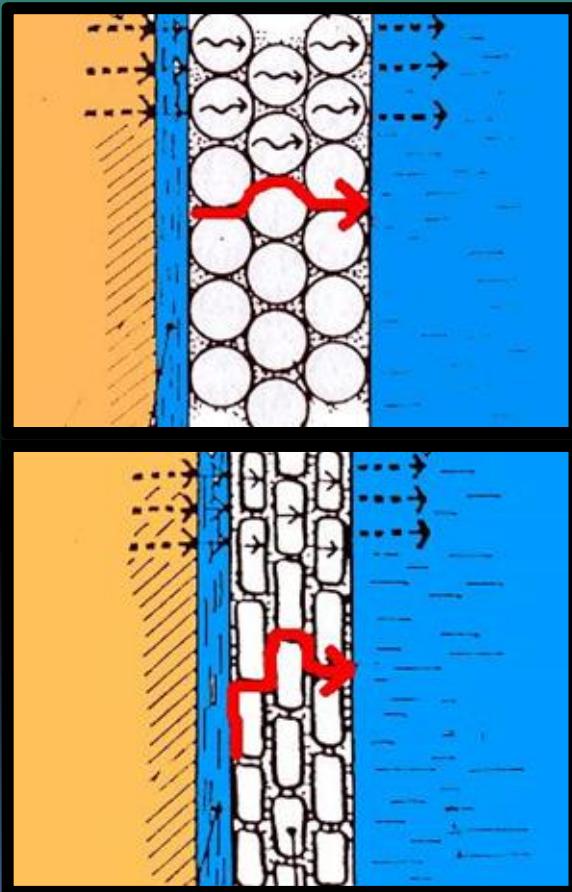
Přenos tepla

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