

# Fysiologie v extrémních podmínkách II

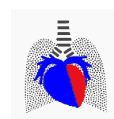
vaclav.hAMPL@lf2.cuni.cz

<http://fyziologie.lf2.cuni.cz>

<http://vh.cuni.cz>



UNIVERZITA KARLOVA  
2. lékařská fakulta



95

## Vysoký tlak: potápění

Taky tunelování  
(přetlak proti prosakování vody)



96

## Potápění – 2 různé situace/problémy

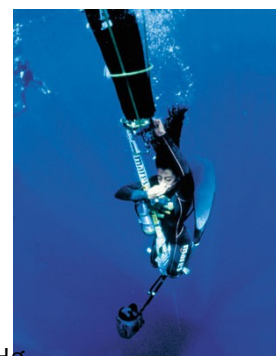
- potápění bez dýchání (freediving)
  - hl. problém: hypoxie
  
- potápění s dýchacím přístrojem
  - hl. problém: tlak




97

## Jak dlouho vydrží pod vodou:

- Vorvani a delfíni: 2 hod
- Velryby a tuleni: 18 min
- Bobr, kachna: 15 min
- Krysa, králek, kočka, pes: 2-4 min
- Člověk: ~1 min
  - Akvabely:  $\text{PaO}_2$  30-35 mmHg
  - Japonské lovkyně perel (Ama): 2 min (20-30 m, 20x/hod)
  - Freedivers: 11 min. 35 sec.
    - 250 m no limits
    - vlastní silou: Pipin Ferreras, Audrey Mestre, Martin Štěpánek, William Trubridge – přes 100 m




98

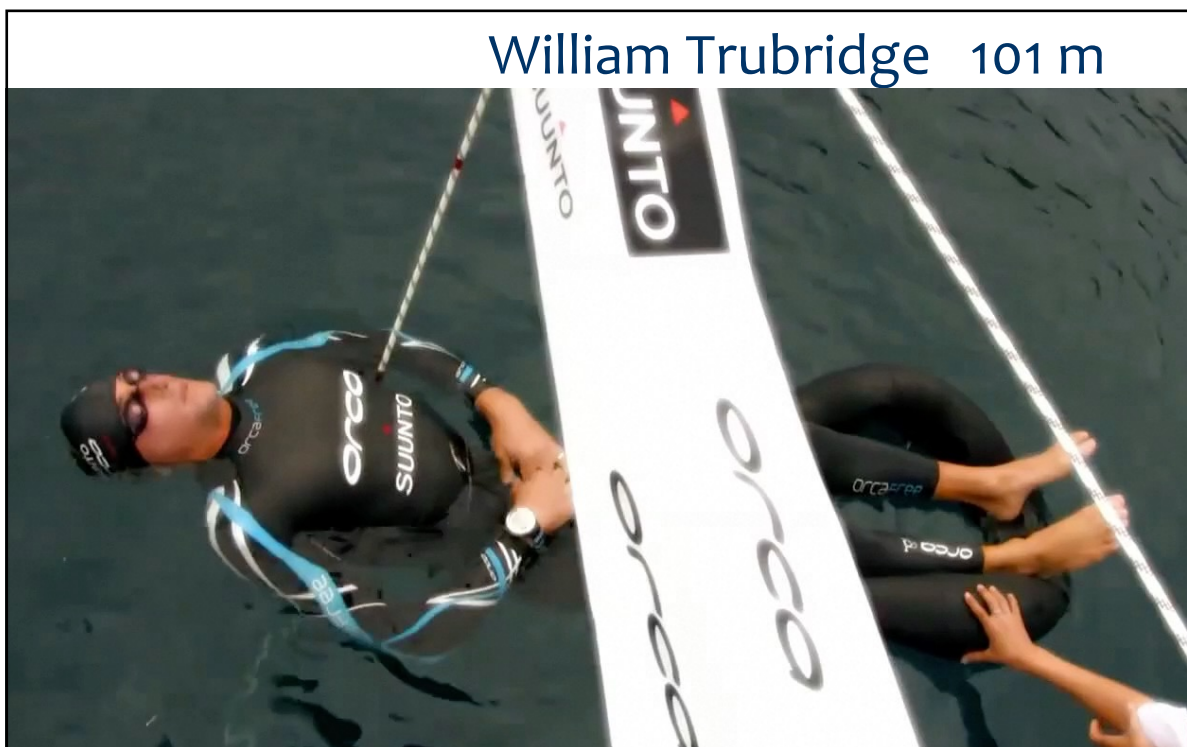


## Freediving records

Constant Weight Apnea (CWT)	The athlete has to dive to the depth following a guide line that he is not allowed to actively use during the dive. The 'Constant Weight': the athlete is not allowed to drop any diving weights during the dive. Fins can be used	130 m 114 m	<a href="#"><u>Alexey Molchanov</u></a> <a href="#"><u>Alenka Artnik</u></a>	2018 2020
CWA Without Fins (CNF)	The same as CWT, but no fins	102 m 73 m	<a href="#"><u>William Trubridge</u></a> <a href="#"><u>Alessia Zecchini</u></a>	2016 2016
Free Immersion Apnea (FIM)	The athlete uses the vertical guiderope to pull himself down to depth and back to the surface. The athlete is still not allowed to release weights	125 m 98 m	<a href="#"><u>Alexey Molchanov</u></a> <a href="#"><u>Alessia Zecchini</u></a>	2018 2019
Variable Weight Apnea (VWT)	The athlete uses a weighted sled for descent. Athletes return to the surface by pulling themselves up along a line or swimming while using their fins	146 m 130 m	Stavros Kastirnakis <a href="#"><u>Nanja van den Broek</u></a>	2015 2015
No-Limits Apnea (NLT)	The athlete can use any means of breath-hold diving to depth and return to the surface, guideline used to measure the distance. Most use a weighted sled to dive down and inflatable bag to return	214 m 160 m	<a href="#"><u>Herbert Nitsch</u></a> <a href="#"><u>Tanya Streeter</u></a>	2012 2002



99



100

## Glosfaryngeální insuflace



101

## Black-outs

- shallow water
  - $\uparrow$  ventilace před ponořením  $\rightarrow$   $\downarrow$   $\text{CO}_2$   $\rightarrow$  hyperkapnický stimul pro nádech později než  $\text{PO}_2$  poklesne pod potřebu mozku
- deep water (těsně před vynořením)
  - dole byl  $\text{PO}_2$  OK, s vynořováním daná koncentrace  $\text{O}_2$  v alveolech (a krvi) nestačí na dostatečný  $\text{PO}_2$  pro mozek



106



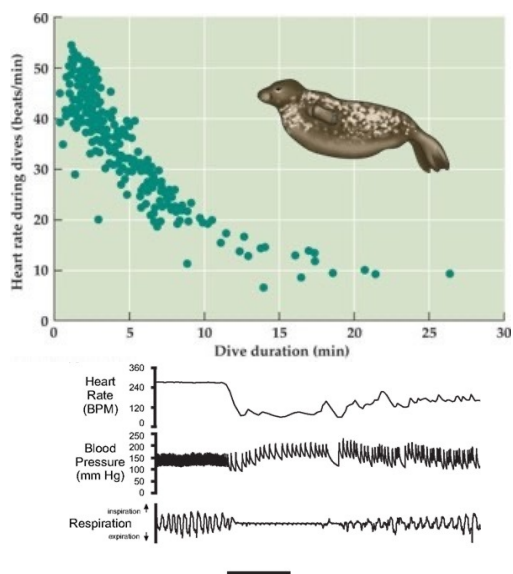
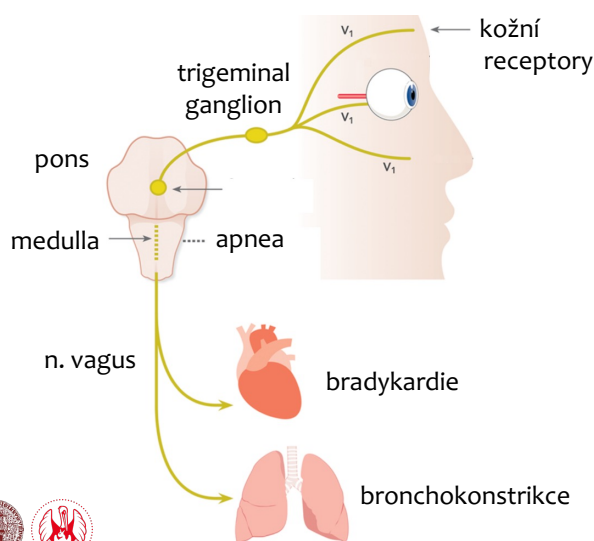
## Ploutvonožci

- Reflexní bradykardie (4/min), perfuse jen nezbytných orgánů
- Tlak ve 30-40 m vymáčkne vzduch z plic → rychlé klesání (šetří energii)
  - taky z periferních kapilár a žil ve prospěch svalů, srdce a mozku
- Ochlazení svalů (20 °C - u lidí by nefungovaly)
  - menší metabolismus, menší ztráty tepla
- Hodně krve, hodně vysoký htc a hodně Hb v RBC
  - jak se brání koagulaci a vysoké viskozitě?
- Větší zásoba O<sub>2</sub> ve svalech (25-30% vs. 12 u nás)



109

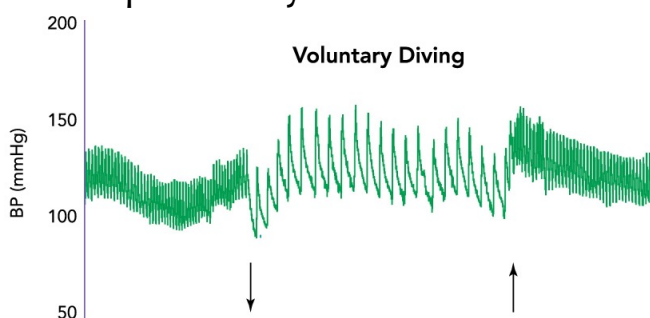
## Savčí potápěcí reflex



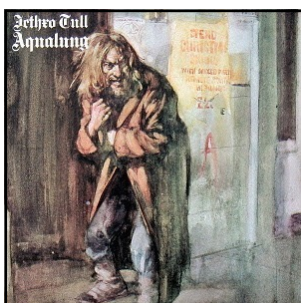
110

## Savčí potápěcí reflex

- silný u mořských savců, slabší u ostatních (vč. lidí)
- spouštěč = kontakt studené vody s obličejem
  - nefunguje voda  $>21^{\circ}\text{C}$
  - nefunguje ponoření jiné části těla
- intenzita nepřímo úměrná teplotě vody
- delší přežití apney ve studené vodě
- využití pro úlevu supraventrikulární tachykardie (?)



111



## Potápění s dýchacím přístrojem (SCUBA = self-contained underwater breathing apparatus)

- tlak  $\uparrow$  o 1 atm na každých 10 m
- aby plíce nekolabovaly, musí vdechovaná směs přicházet pod  $\uparrow$  tlakem



112

## ↑ tlak → ↑ hustota plynu

- proto ve 4 atm 2x ↑ práce dýchacích svalů na pohyb vzduchu dýchacími cestami
- navíc potřeba hýbat vzduchem v přidaném mrtvém prostoru
- spolu se zadržování dechu může vést k retenci CO<sub>2</sub> → bezvědomí
- hustota He ≪ N<sub>2</sub> (0.18 vs. 1.23 kg/m<sup>3</sup>)



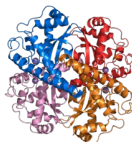
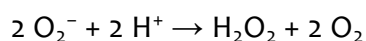
113

## Vysoké PO<sub>2</sub>

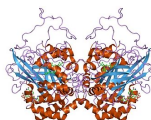
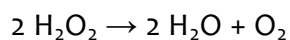
- např. PO<sub>2</sub> v 40 m:  
21% O<sub>2</sub> v 5 atm ~ 100% O<sub>2</sub> v 1 atm

- ↑ tvorba O<sub>2</sub> radikálů (O<sub>2</sub><sup>-</sup>)  
přemůže buněčnou obranu

- superoxid dismutáza



- kataláza



114

## Vysoké PO<sub>2</sub>

- 60% O<sub>2</sub> při 1 atm:
  - OK i dlouho (dospělí)
- PO<sub>2</sub> ≤ 760 mmHg (100% O<sub>2</sub> při 1 atm)
  - pharyngitis, tracheitis po ~8 hod
  - pak atelektázy, plicní edém, ↓ mentální aktivita
- 100% O<sub>2</sub> při >1.7 atm (~30 min):
  - podrážděnost, nausea, závratě, svalové záškuby a křeče, poruchy vidění, dezorientace, bezvědomí



115



## Dusíková narkóza

- dýchání vzduchu ≥4-5 atm
- podobné alkoholu: žovialita, euforie; pak zmatenost, halucinace, ospalost, ↓ motorická koordinace a síla
- rozpuštěním v buněčných membránách neuronů N<sub>2</sub> snižuje jejich dráždivost (~ inhalační anestetika)

116



## Dekompresní (kesonová) nemoc

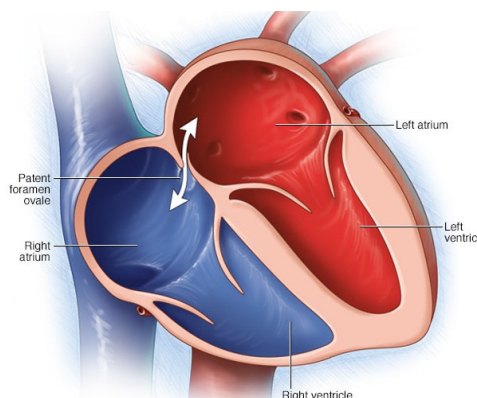
- při vynořování tvorba bublinek 20-700  $\mu\text{m}$  v krvi a tkáních supersaturovaných plynem rozpuštěným během expozice  $\uparrow$  tlaku
- povrch bublinek je thrombogení  $\rightarrow$  vznik komplexů bublinky-proteiny-destičky
- problémy, až když to plicní cirkulace nestačí odfiltrovat (PAP  $\uparrow$  o  $\sim$ 20 mmHg)
- bolesti svalů, kloubů; až i paralýza, kolaps, bezvědomí; dyspnea (často předchází vážnější problémy plicní edém, embolie)



117

## Dekompresní nemoc

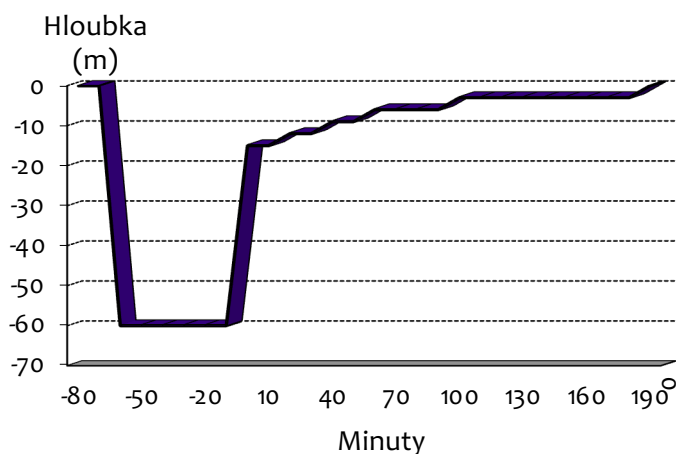
- až po delší expozici
  - dusíku to trvá dlouho, než saturuje tělesné tekutiny (špatná rozpustnost)
  - zejména málo vaskularizovaný tuk ( $\text{N}_2$  se v něm rozpouští nejvíc)
- pohyb to zhoršuje
- He se hůř rozpouští než  $\text{N}_2$
- srdeční zkraty  $\rightarrow$   $\uparrow$  riziko (plíce nevychytají bublinky)
  - $\frac{1}{4}$  lidí má PFO



119

## Dekompresní nemoc: prevence

- pomalé vynořování
- dny/týdny v přetlakové nádrži



120



## Dekompresní nemoc - léčba

- rekompresa a pomalá dekomprese v hyperbarické komoře
- lze zrychlit hyperbarickým  $O_2$ 
  - nedodává se žádný další  $N_2$
  - $\uparrow$  gradient  $N_2$  mezi bublinkami a okolím
  - $\uparrow$  difuze  $O_2$  do ucpaných oblastí



121

## He místo N<sub>2</sub>

- ↓ hustota  
(0.18 vs. 1.23 kg/m<sup>3</sup>)
  - ↓ dechová práce → ↓ retence CO<sub>2</sub>
  - ↑ hlas → ↓ komunikace
- ↓ rozpustnost  
(0.0015 vs. 0.02 g/l při 20°C)
  - ↓ narkotický účinek
  - ↓ dekompresní choroba
- ↑ tepelná vodivost  
(0.151 vs. 0.026 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)
  - ↑ riziko podchlazení

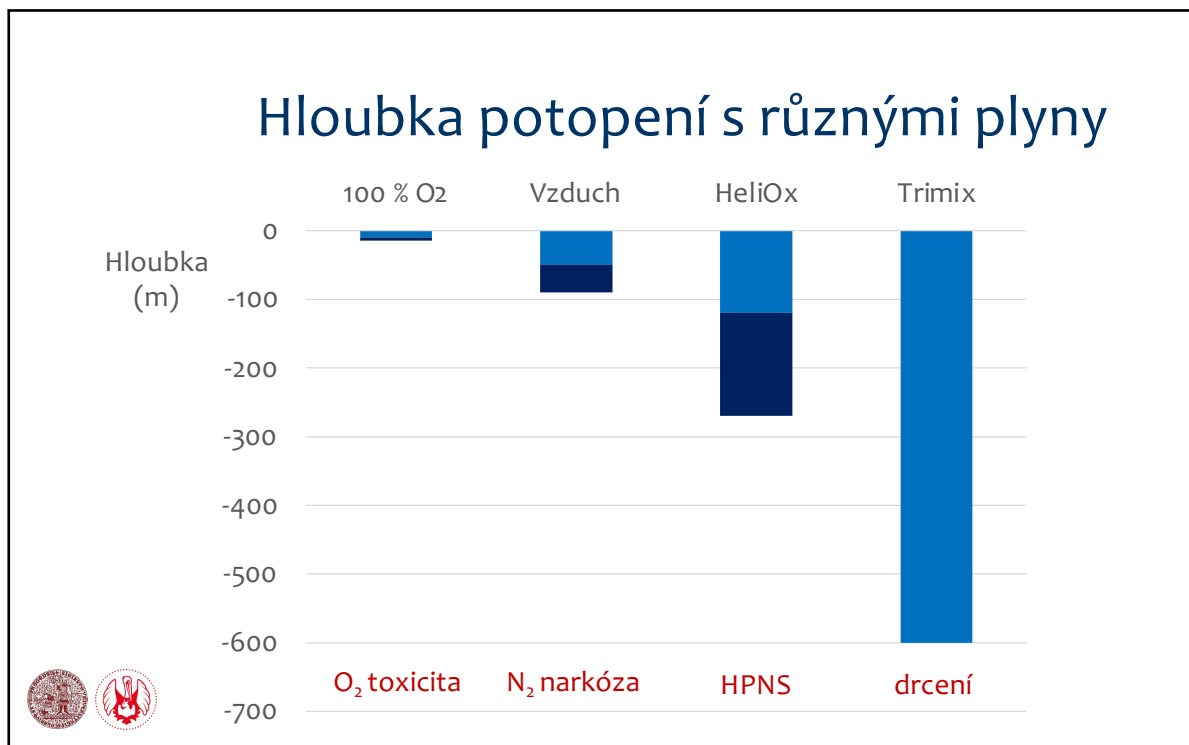
Teplota (°C)	Rozpustnost N <sub>2</sub> (g/l)	Rozpustnost He (g/l)
0	0.028	0.0015
10	0.024	0.0015
20	0.018	0.0015
30	0.014	0.0015
40	0.012	0.0015
50	0.011	0.0015
60	0.010	0.0015

122

## Vysokotlakový nervový syndrom (HPNS)

- pod 130 m
- hyperexcitace nervů tlakem
  - třes rukou
  - nausea, závratě
- horší při rychlejším ponořování
- omezují to tlumivé účinky N<sub>2</sub> (“Trimix”)

123



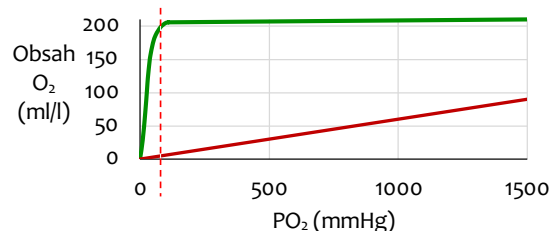
128



129

## Hyperbarická oxygenoterapie

- intoxikace CO
- vzduchová embolie
- anaerobní infekce
- traumatická ischémie (crush syndrom)
  - po těžkém zranění končetiny a jejího oběhu, často s infekcí
- ischemická choroba dolních končetin



130

## Barotrauma

změnou objemu plynu tam,  
kde se nevyrovná tlak s okolím:

- nosní dutiny
- zubní kazy
- střední ucho (při ucpání Eustachovy trubice)
- střevní plyny
- alveoly
  - přílišné tlaky při mechanické ventilaci
  - pokud se při vynořování nevydechuje



131

## Ponorky



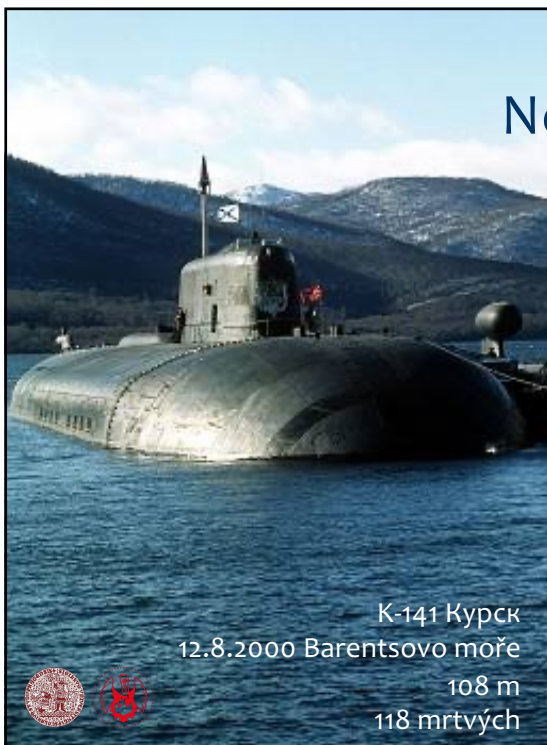
- nouzový únik
- vnitřní prostředí  
(např. CO v kouři  
z cigaret)



132

## Nouzový únik z ponorky

- ze ~100 m lze bez ničeho
- při výstupu plyn v plicích expanduje
- proto nutno pořád exhalovat
- to odstraňuje CO<sub>2</sub> →  
↓ potřeba nadechnutí



K-141 Курск  
12.8.2000 Barentsovo moře  
108 m  
118 mrtvých



133



## Gravitační přetížení

- Rakety (3-9 G), letadla, pády z výšky, srážky
- $G$  = násobek normálního gravitačního přetížení

+ přetížení od hlavy k nohám

- opačně (od nohou k hlavě)

136

## Pozitivní podélné G

### ■ člověk vydrží v sedě:

- 4 G asi 40-50 sec

- 15-20 G asi 1 sec

(ve stoje míň, vleže trochu víc)



137

## Pozitivní podélné G

### 2 G:

- těžké, hůř ovládané končetiny

### 3-4 G:

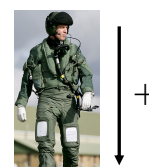
- vzpřímená poloha je problém
- udržet otevřené oči je namáhavé
- dýchání je namáhavé

### 4-6 G:

- gray-out za několik vteřin, pak black-out

### 20 G:

- fraktura obratlů



138



## “Gray-out/black-out”

+5G: tlak v žilách nohou a břicha

- distenze žil nohou a břicha
- přesun krve dolů
- drasticky ↓ žilní návrat
- tlak krve ↓ (k ~20 mmHg; přechodně, pak to částečně upraví baroreceptory)
- odkrvuje se mozek a sítnice
- zšednutí zorného pole
- po desítkách sec ztráta vidění, pak vědomí



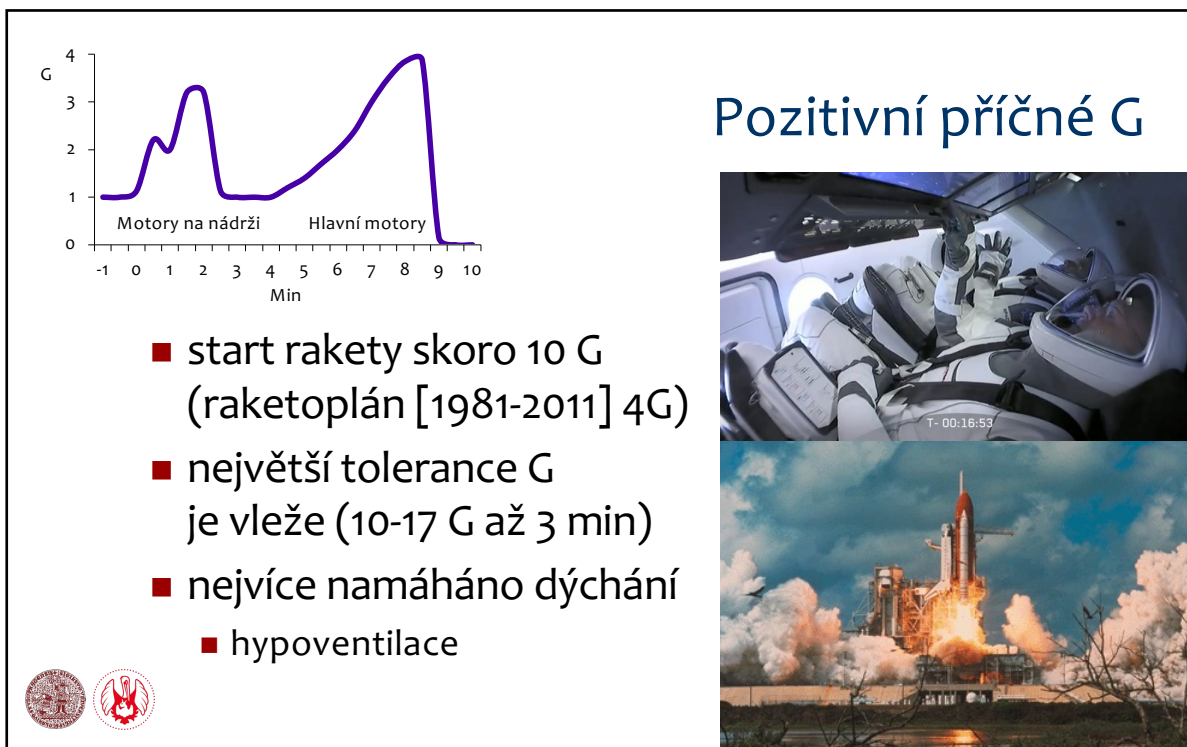
139

## Pozitivní podélné G

- trochu pomáhá anti-G oblek
  - tlačí vodou nebo motorizovanými polštáři na nohy a břicho
  - nezabrání posunu srdce a bránice směrem k břichu (proto limit ~10 G)
- trénink:
  - komprese břicha předklonem a stahem břišních svalů
  - ↑ nitrohrudní tlak



140



141

### Negativní G

- hl. letecká akrobacie
- snáší se hůř než +G
- vysoké tlaky v mozkových cévách
  - i když proti působí mozkomíšní mok
  - to ale neplatí pro sítnici - proto red-out
- otok obličeje, nebezpečí krvácení do mozku

142

## "Red-out"

- nával krve do sítnice
- zčervenání zorného pole
- rychle následuje ztráta vidění (a pak vědomí)



143

## Starosti při vesmírném letu

- přetížení při startu a návratu
- beztíže
  - na oběžné dráze ~200 km zbytek gravitace vyvažován odstředivou silou
- radiace
  - ale třeba při letech Apollo menší než při rtg vyšetření
  - při delších letech horší



147

## Beztíže (mikrogravitace)



- vnímání polohy
- přesuny vody
- kosti a svaly
- spousta dalšího...

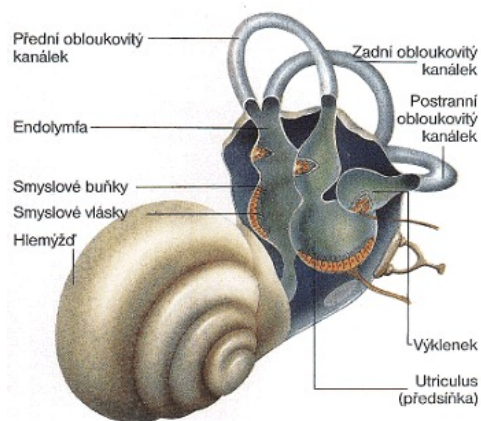
148



149

## Vnímání polohy

- mechanoreceptory ve svalech a šlachách
- vnitřní ucho
  - polokruhové kanálky
  - otholity
- taktilní receptory v kůži (hl. ploska nohy)
- vizuální podněty



150

## Vnímání polohy: polokruhové kanálky



151

## Vnímání polohy: otholity



152

## Vnímání polohy v beztlíži

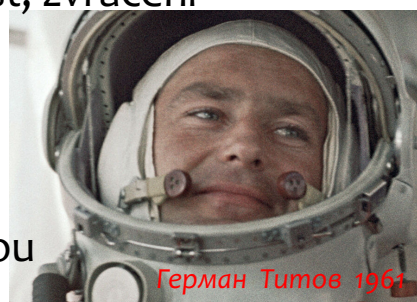
- disociace gravitačně závislých a vizuálních vjemů
- poruchy prostorové orientace
  - „cloumání s raketou“ místo kliků
  - náhlý obrat vzhůru
  - nohama při vstupu do beztlíže
  - posléze: dole je tam, kde jsou nohy
- syndrom adaptace na vesmír



155

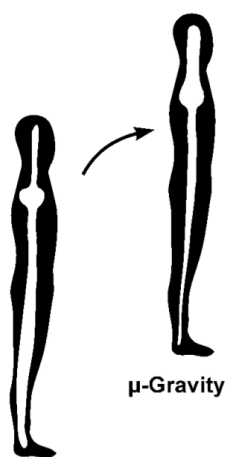
## Syndrom adaptace na vesmír (SAS = Space Adaptation Syndrome)

- “mořská” nemoc z nesouladu mezi vizuálními, taktilními a gravitačními vjemy
- nechutenství, pocení, závratě, bolest hlavy, poruchy soustředění, nevolnost, zvracení
- $\geq 45\%$  astronautů
- odeznívá spontánně (3-4 dny)
- může se vrátit při návratu
- dá se simulovat virtuální realitou



156

## Přesuny vody



- voda se přesunuje  $\uparrow$  (hlava, hrudník)
- každá noha ztrácí  $\sim 1$  l tekutiny (10% objemu) během 1. dne
- napomáhá tomu  $\uparrow$  objemu hrudníku ( $\downarrow$  váha jeho stěny)
- otok obličeje („puffy face“), nosní kongesce, "rýma" po celou dobu beztlíže

Ground

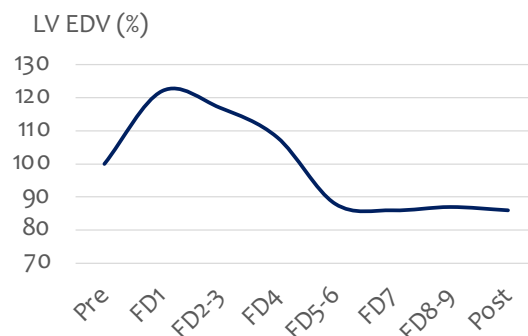
Space



158

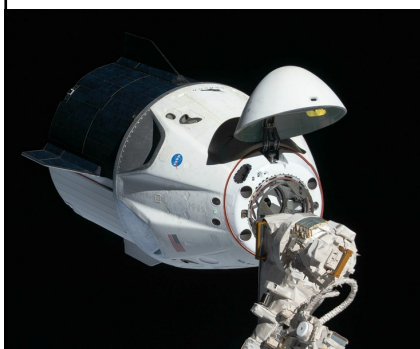
## Přesuny vody v beztíži

- ↑ objem krve v hrudníku  
→ ↑ tepový objem a srdeční výdej
  - CO ale posléze ↓  
(neaktivní svaly ho méně potřebují)
- distenze atrií → ↑ ANP  
→ ↑ diuréza „koriguje“  
vnímanou hypervolémií
  - celková H<sub>2</sub>O ↓ o 2-4%



159

## ↑ H<sub>2</sub>O v horní polovině těla



- ↑ tlak v renálních arteriolách
- ↑ glomerulární filtrace (až +20%)  
↓ RAS
- ↓ aldosteron → ↓ objem plasmy (o 10-20%)  
dehydratace tkání

- Normalizace brzy po návratu  
Nejdřív ale ortostatická intolerance  
(↓ tepový objem ve stoje, protože  
↓ objem krve a přesun do nohou)



160



## Přechodná anémie

- nejdříve dehydratace  
→ ↑ relativní hematokrit
- pak ↓ erythropoesa  
(↓ potřeba  $O_2$  kvůli  
↓ aktivitě svalů)
- krvinky dokonce nejasným způsobem  
odbourávány
- po 2 měsících  
téměř normalizace




The background image shows two astronauts in white space suits floating in the void of space against a backdrop of Earth's blue and white clouds. One astronaut is in the foreground, and another is further back, both appearing to be working on or near a piece of equipment.

161

## Srdce v beztíži

- ↓ objem krve
- ↓ namáhavost pohybu a postoje  
→ ↓ nároky na srdce
- ↓ velikost a výkonnost srdce



The diagram shows two anatomical illustrations of a human heart. The heart on the left is larger and more muscular, representing a normal heart. The heart on the right is significantly smaller and less developed, representing a heart in a state of hemodynamic unloading. A blue arrow points from the larger heart to the smaller one, with the text 'Hemodynamio unloading' written above it.

- normalizace během pár týdnů po návratu

163

## Kosti a svaly

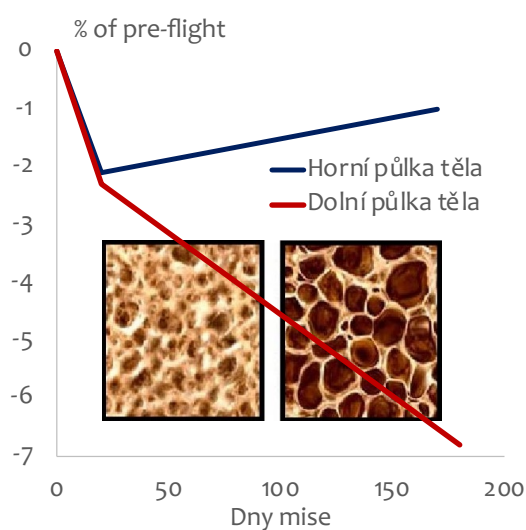
- kosmonauti "povyrostou" (na páteř nic netlačí)
- ztráta asi 1-1.5 % kostní hmoty (a  $\text{Ca}^{2+}$ )/měsíc po celou dobu letu
- usilovné cvičení to nezastaví, jen trochu zpomalí
  - nejúčinnější: běhátko s nohama v podtlakové komoře



164

## Ztráta kostní hmoty (osteopenie)

- hl. nohy
- žádný přiroz. vitamín D
- zastavuje se až asi měsíc po návratu
  - ne zcela reverzibilní ???
- osteolýza:  $\uparrow \text{Ca}^{2+}$  v plazmě  $\rightarrow$   $\uparrow$  riziko ledvinových kamenů



165



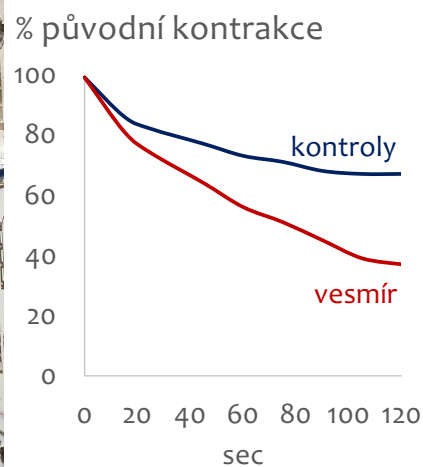
## Svaly v beztíži

- atrofují
- pomalé (na podporu váhy těla) se mění na rychlé
- ↓ myosin
- ↓ proteosyntéza
- ve svalech ubývá cév a nervových zakončení
- podobné dlouhodobému upoutání na lůžko



166

## Svaly se v beztíži snáz unaví



168

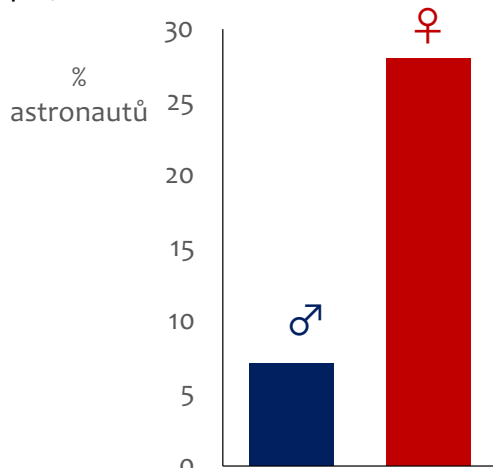
## Spánek

- mizí chrápání a poruchy spánku dané špatnou průchodností horních dých. cest
- narušení cirkadiálního rytmu
- hluk (ventilátory)



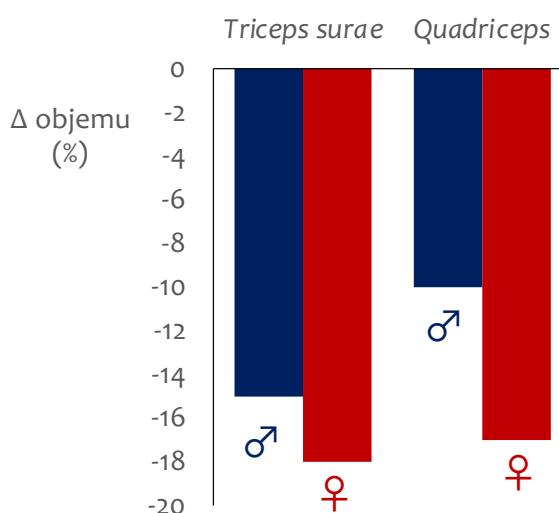
169

incidence presynkopy při 10-min stoji po 5-16 dnech ve vesmíru



retrográdní nitrobřišní krvácení při menstruaci → endometrióza

## Pohlavní rozdíly



170



## Návrat

- ortostatická intolerance
  - ↓ objem krve
  - ↓ arteriální tonus v nohách
  - rozumná normalizace během hodin
  
- před návratem pijí  $\geq 2$  l slané vody
- pomohou  $\alpha_1$  agonisté
  
- muskuloskeletální slabost

173