

# Rad na visokom tlaku i životinjski modeli prilagođeni na visoki tlak

---

**Livaić, Anja Eloise**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:662225>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2021-07-26**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
BIOLOŠLI ODSJEK

**RAD NA VISOKOM TLAKU I ŽIVOTINJSKI MODELI  
PRILAGOĐENI NA VISOKI TLAK**  
**WORK ON HIGH PRESSURE AND ANIMAL MODELS  
ADJUSTED TO HIGH PRESSURE**

SEMINARSKI RAD

Anja Eloise Livić

Preddiplomski studij biologije

Undergraduate study of biology

Mentor: doc. dr. sc. Duje Lisičić

Zagreb, 2016.

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	3
2. FIZIOLOGIJA DUBINSKOG RONJENJA.....	3
2.1. ODNOS DUBINE MORA PREMA TLAKU.....	3
2.2. BOYLEOV ZAKON.....	3
2.3. DJELOVANJE VISOKIH PARCIJALNIH TLAKOVA NA ORGANIZAM.....	4
2.3.1. NARKOTIČNO DJELOVANJE DUŠIKA PRI VISOKOM TLAKU.....	5
2.3.2. TOKSIČNOST KISIKA POD VISOKIM TLAKOM.....	5
2.3.3. TOKSIČNOST UGLJIČNOG DIOKSIDA NA VELIKIM DUBINAMA...	5
2.4. STISKANJE ŠUPLJINA ISPUNJENIH ZRAKOM PRILIKOM URANJANJA.	6
2.5. ŠIRENJE ŠUPLJINA ISPUNJENIH ZRAKOM TIJEKOM IZRANJANJA.....	6
2.6. DEKOMPRESIJA NAKON IZLOŽENOSTI VISOKIM TLAKOVIMA.....	6
2.7. DEKOMPRESIJSKA BOLEST.....	7
3. SCUBA.....	8
4. MODELNI ORGANIZMI.....	9
4.1. ADAPTACIJE VEDELOVE FOKE NA DUBINSKO RONJENJE.....	10
4.1.1. POHRANA I DISTRIBUCIJA KISIKA.....	10
4.1.2. DISTRIBUCIJA KRVI U RAZLIČITE ORGANE.....	11
4.1.3. RESPIRATORNI SUSTAV VEDELOVE FOKE.....	11
5. USPOREDBA MODELNIH ORGANIZAMA SA ČOVJEKOM.....	12
5.1. ODGOVOR NA RONJENJE.....	12
5.2. PRILAGODBA NA TLAK.....	12
6. LITERATURA.....	13
7. SAŽETAK.....	13
8. SUMMARY.....	14

## 1. UVOD

Ronjenje je danas jedan od popularnijih sportova sa sve većim interesom populacije. Oduvijek je postojala čovjekova želja da se spusti ispod površine mora bilo u svrhu spašavanja, lova, rekreacije ili vojne svrhe. Ljudi se danas sve dublje spuštaju u more pa sve važnije postaje i shvaćanje učinka plinova pod visokim tlakom. Kada se čovjek spušta u more, tlak oko njega se izrazito povećava. Kako bi se spriječio plućni kolaps, zrak se čovjeku također mora dopremiti pod visokim tlakom. Pritom se krv u plućima izlaže krajnje visokim tlakovima alveolarnih plinova, što se naziva hiperbarizam. Iznad određenih granica ti visoki tlakovi mogu uzrokovati velike promjene tjelesnih funkcija te može doći do dekompresijske bolesti i plućne embolije. Ove bolesti su danas sve više istraživane i nastoji im se doskočiti proučavanjem fiziologije dubinskog ronjenja. (Guyton, 1995.)

## 2. FIZIOLOGIJA DUBINSKOG RONJENJA

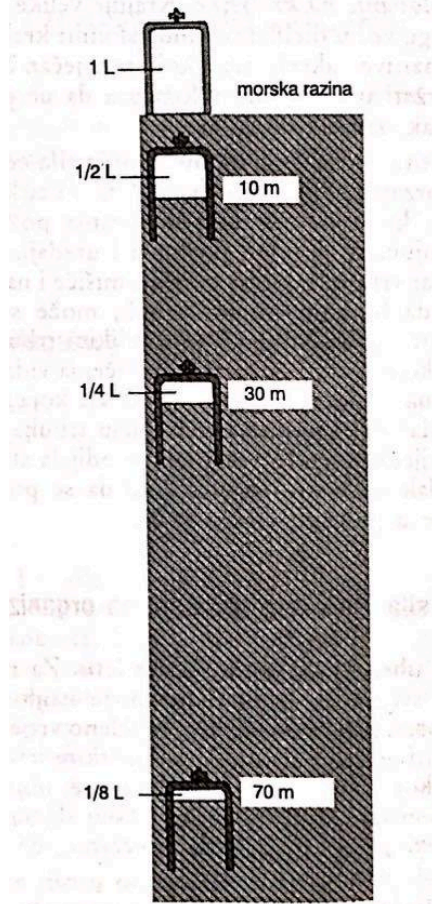
### 2.1. ODNOS DUBINE MORA PREMA TLAKU

Stupac morske vode od 10m pritišće na dno jednakim tlakom kao sva atmosfera iznad Zemlje. Zato će čovjek 10m ispod morske razine biti izložen tlaku od 202,6 kPa (2 atmosfere), od čega je 101,3 kPa (1 atmosfera) uzrokovano tlakom zraka iznad vode, a drugih 101,3 kPa težinom same vode. Na dubini od 20m tlak će iznositi 303,9 kPa (3 atmosfere) itd., u skladu sa slikom 1. (Guyton, 1995.)

### 2.2. BOYLEOV ZAKON

Drugi važan učinak dubine je kompresija plinova na sve manji volumen. Slika 1 prikazuje zvonoliku posudu koja na morskoj dubini sadrži 1 litru zraka. U dubini od 10m, gdje vlada tlak od 202,6 kPa (2 atmosfere), volumen je stlačen na samo pola litre, a pri tlaku od 810,4 kPa (8 atmosfera, 70m) na jednu osminu litre. Prema tome, volumen na koji je stanovita količina plina komprimirana obrnuto je razmjern tlaku. Ili pojednostavljeno, što je tlak viši, plin je više stlačen, odnosno manjeg je volumena. To pravilo fizike se zove *Boyleov zakon* te je izuzetno važno prilikom ronjenja. Naime, povećani tlakovi mogu u tijelu ronioca uzrokovati kolabiranje šupljina ispunjenih zrakom, uključujući i pluća, pa često nastanu velika oštećenja. (Guyton, 1995.)

Dubina (m)	kPa (atmosfera)
morska razina	101,3 (1)
10	202,6 (2)
20	303,9 (3)
30	405,9 (4)
40	506,5 (5)
50	607,8 (6)
60	709,1 (7)
90	1013,0 (10)
120	1316,9 (13)
150	1620,8 (16)



Slika 1.

### 2.3. DJELOVANJE VISOKIH PARCIJALNIH TLAKOVA NA ORGANIZAM

Ronilac koji udiše zrak normalno je izložen dušiku, kisiku i ugljičnom dioksidu. Svaki od tih plinova može pri povišenom tlaku u određenom trenutku uzrokovati ozbiljne fiziološke učinke. (Guyton, 1995.)

### 2.3.1. NAROTIČNO DJELOVANJE DUŠIKA PRI VISOKOM TLAKU

Približno 4/5 zraka čini dušik. Pri tlaku koji vlada na morskoj razini dušik nema poznatih učinaka na tjelesne funkcije, ali pri visokim tlakovima može uzrokovati različite stupnjeve narkoze. Kad ronilac ostane u moru jedan sat ili duže i udiše komprimirani zrak prvi znakovi blage narkoze pojavit će se na dubini od približno 35m. U toj dubini ronilac počinje pokazivati veselost, a opreznost mu znatno popušta. U dubini od 45-60m postaje pospan. Između 60 i 75m ronilacova snaga se jako smanjuje i on često postaje toliko nespretna da ne može obaviti posao koji se od njega očekuje. Ispod 75m (tlak je 861 kPa ili 8,5 atmosfera) ronilac, ako se zadrži predugo, obično zbog narkotičnog djelovanja dušika postaje gotovo posve nesposoban. Narkoza dušikom pokazuje simptome vrlo slične onima koji se pojavljuju prilikom trovanja alkoholom, pa se zbog toga narkoza dušikom često naziva „opijenost dubinom“. Drži se da je mehanizam djelovanja narkotičnog učinka jednak mehanizmu djelovanja ostalih plinovitih anestetika. To znači da se dušik lako otapa u tjelesnim mastima, pa se vjerojatno, kao i većina ostalih plinovitih anestetika, otapa u neuronskim membranama, gdje svojim fizičkim učinkom na promjenu električne vodljivosti membrane smanjuje njenu podražljivost. (Guyton, 1995.)

### 2.3.2. TOKSIČNOST KISIKA POD VISOKIM TLAKOM

Udisanje kisika pri vrlo visokim parcijalnim tlakovima može pogubno djelovati na središnji živčani sustav te ponekad uzrokovati epileptične grčeve nakon kojih nastupa koma. Izlaganje tlaku kisika od 303,9 kPa u većine ljudi uzrokuje grčeve i komu u približno 1 sat. Te konvulzije često nastaju bez ikakvog predhodnog znaka, pa je jasno da mogu uzrokovati ronilacovu smrt u moru. Uzrok toksičnosti kisika nije još poznat, ali je dokazano da poremeti stanične metaboličke sustave. (Guyton, 1995.)

### 2.3.3. TOKSIČNOST UGLJIČNOG DIOKSIDA NA VELIKIM DUBINAMA

Ako je ronilačka oprema dobro konstruirana i radi kako valja, za ronilaca nema opasnosti od toksičnosti ugljičnog dioksida, jer sama dubina ne povećava PCO<sub>2</sub> u alveolama. Razlog tome je taj što se na dubini ne povećava stvaranje ugljičnog dioksida u tijelu, a sve dok ronilac udiše normalan respiracijski volumen, i dalje će udisati onoliko ugljičnog dioksida koliko ga stvara, pa će parcijalni tlak tog plina u alveolama ostati na normalnoj vrijednosti od gotovo točno 5,3 kPa. Nažalost, ipak se u nekim vrstama ronilačke opreme ugljični dioksid može

nagomilavati odakle ga ronilac ponovno udiše. Ronilac podnosi to nagomilavanje CO<sub>2</sub> do alveolarnog parcijalnog tlaka ugljičnog dioksida od oko 10,7 kPa, tj. dvostruko većeg nego što je normalno u alveolama. Tada se minutni volumen disanja povećava do maksimuma koji je 8-11 puta veći od normalne vrijednosti pa se time kompenzira povećana koncentracija CO<sub>2</sub>. No, iznad razine 10,7 kPa stanje postaje nepodnošljivo te počinje depresija centra za disanje, pa disanje počinje zataljivati umjesto da djeluje kompenzacijski. Pritom se razvijaju teška respiracijska acidoza, različiti stupnjevi letargije, narkoza i na kraju anestezija. (Guyton, 1995.)

#### 2.4. STISKANJE ŠUPLJINA ISPUNJENIH ZRAKOM TIJEKOM ZARANJANJA

Sve se šupljine tijela ispunjene zrakom tijekom uranjanja stišću, budući da je plin lako stlačljiv, a okolni tlak raste. Da bi se održali normalni volumeni potrebno je u šupljine uvesti dodatnu količinu zraka. Zato ronilac mora udisati smjesu pod tlakom koji drži prsni koš napuhanim. Ostane li bez dovoda smjese pod tlakom dolazi do zgnječenja, ulublivanja prsnog koša i moguće smrti. Zrak u probavnom sustavu ne stvara poteskoće pri komprimiranju, ali stiskanje zraka u srednjem uhu i sinusima može izazvati ostećenja. (Guyton, 1995.)

#### 2.5. ŠIRENJE ŠUPLJINA ISPUNJENIH ZRAKOM TIJEKOM IZARANJANJA

Tijekom izranjanja sve se šupljine tijela ispunjene zrakom šire, ako se iz njih ne odvodi zrak. To može biti posebno opasno u plućima gdje može doći do ruptura i posljedične zračne embolije. I u probavnom se sustavu mogu javiti vrlo opasne rupture. (Guyton, 1995.)

#### 2.6. DEKOMPRESIJA NAKON IZLOŽENOSTI VISOKIM TLAKOVIMA

Kad čovjek duže udiše zrak pod visokim tlakom, količina dušika otopljena u tjelesnim tekućinama se povećava. Uzrok je taj što se krv koja protječe kroz plućne kapilare zasiti dušikom do istog tlaka koliki je u smjesi za udisanje. Idućih se sati dušik u tijelu raznosi u sva tkiva, pa se i ona zasite otopljenim dušikom. Dakle, krv i sva tkiva su zasićena dušikom. Budući da dušik ne ulazi u metaboličke procese, on ostaje otopljen dokle god mu se tlak u plućima ne snizi, a nakon toga se može ukloniti disanjem. Na morskoj razini je u gotovo čitavom organizmu otopljena litra dušika. Od toga je više od polovice otopljeno u tjelesnoj masti, a ostatak u tjelesnoj vodi. Iako mast čini samo 15% tjelesne mase, razdioba je takva zato što je topljivost dušika pet puta veća u masti nego u vodi. Međutim, potrebno je nekoliko

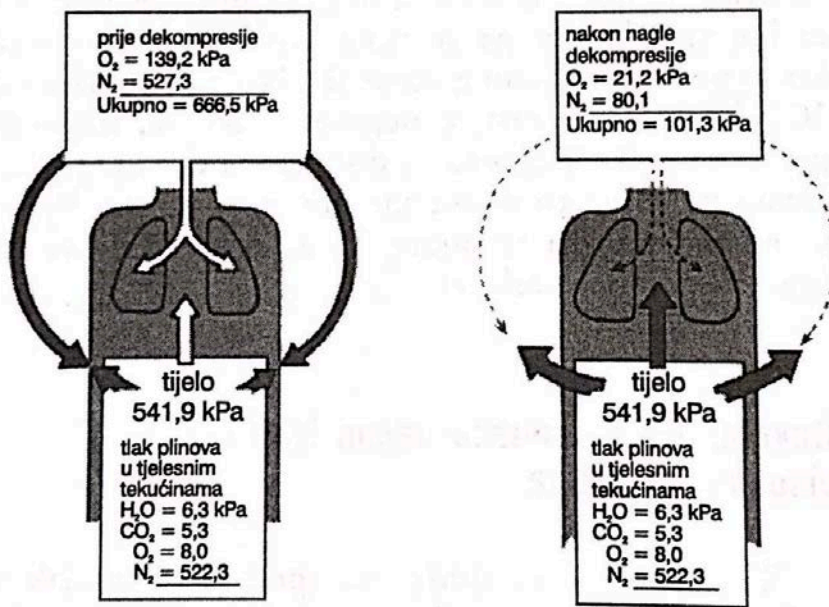
sati da se tlak dušika u svim tjelesnim tekućinama izjednači s tlakom dušika u alveolama (odnosno da se dušik otopi u svim tjelesnim tekućinama), jednostavno zato što krv ne protječe dovoljno brzo, a ni dušik ne difundira dovoljno brzo da bi se ravnoteža postigla trenutačno. Zbog toga se u tjelesnim tekućinama i u tkivima čovjeka koji ostaje na velikoj dubini samo nekoliko minuta neće otopiti mnogo dušika. Međutim, ako u velikoj dubini ostane nekoliko sati, tjelesne tekućine i tkiva će mu se gotovo potpuno zasititi dušikom. (Guyton, 1995.)

## 2.7. DEKOMPRESIJSKA BOLEST

Ako ronilac u moru provede toliko vremena da se u njegovu tijelu stignu otopiti velike količine dušika, a zatim naglo izroni na površinu mora, posljedično se u njegovim tjelesnim tekućinama (i u staničnoj i u izvanstaničnoj) mogu stvoriti znatne količine dušičnih mjehurića. Ti mjehurići mogu uzrokovati veća ili manja oštećenja u gotovo svakom dijelu tijela, ovisno o količini mjehurića. To zovemo dekompresijskom bolesti. Slika 2. prikazuje načela na kojima se osniva stvaranje mjehurića. Na lijevoj strani slike su prikazana tkiva ronioca koja su došla u ravnotežu sa vrlo visokim tlakom dušika. Dokle god ronilac ostaje duboko u moru, vanjski tlak na tijelo (666,5 kPa) toliko komprimira sva ostala tkiva da plinovi ostanu otopljeni. Zatim, kad ronilac naglo izroni na morsku površinu, vanjski tlak na tijelo iznosi samo 101,3 kPa, a tlak u tjelesnim tekućinama je jednak zbroju tlaka vodene pare, ugljičnog dioksida, kisika i dušika, što ukupno iznosi oko 542 kPa, a to je mnogo više od vanjskog tlaka na tijelo. Zbog toga plinovi ne moraju više biti otopljeni pa mogu stvarati mjehuriće u tkivima, a osobito u krvi gdje mogu začepiti male krvne žile. (Guyton, 1995.)



## Tlak izvan tijela



Slika 2.

Većinu simptoma dekompresijske bolesti uzrokuju mjehurići plina koji začepe krvne žile u različitim tkivima. Mali mjehurići plina začepe najmanje krvne žile, dok oni veći koji su nastali spajanjem više manjih mjehurića mogu začeptiti i veće krvne žile što može uzrokovati ishemiju, a kadkada i odumiranje tkiva. Česti simptomi osoba sa dekompresijskom bolešću su bolovi u zglobovima i u mišićima udova. U nešto manje oboljelih se javljaju živčani simptomi kao što su omaglica, paraliza te gubitak svijesti. Paraliza može biti prolazna, ali u nekih bolesnika i trajna. Kod malog postotka oboljelih, samo 2%, je zabilježeno „gušenje“ uzrokovano velikim brojem sićušnih mjehurića koji začepe plućne kapilare. Nakon toga se često razvija težak plućni edem koji može uzrokovati smrt.

Ako se ronilac polagano vraća na površinu, otpljeni dušik se uklanja dovoljno brzo da se spriječi dekompresijska bolest. Izračunato je da je ukupno vrijeme dekompresije tri sata za samo jedan sat rada na dubini. (dubina od 57m). Kada ronionci moraju raditi u velikim dubinama - između 75 i 300m – često tjednima žive u velikom kompresijskom spremniku u kojemu su izloženi razini tlaka sličnoj onoj na kojoj rade. To uzrokuje zasićenje tjelesnih tkiva i tekućina plinovima kojima su izloženi pri ronjenju. Kada se nakon obavljena rada vrate u spremnik, nema znatnih promjena tlaka, pa nema ni stvaranja dekompresijskih mjehurića.

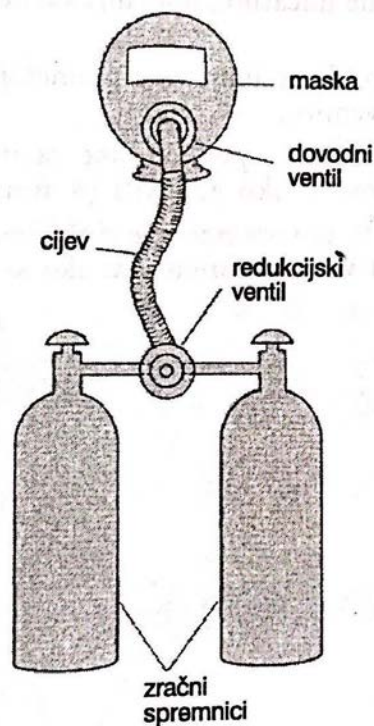
Često se kod ronjenja u velikim dubinama u smjesu plinova umjesto dušika stavlja helij jer on ima pet puta manji narkotični učinak od dušika, helij se manje otapa u tijelu i ima manju

gustoću što omogućuje minimalan otpor strujanju zraka u dišnim putevima. To je važno jer komprimirani dušik ima takvu gustoću da otpor strujanju zraka može postati krajnje velik, pa rad pri disanju kadkad postaje neizvediv. Također, jako je važno i da se pri ronjenju u velikim dubinama u smjesi plinova smanji koncentracija kisika kako nebi došlo do trovanja kisikom. Sa dubinom se povećava i  $PO_2$  kisika što znači da kada bi u smjesu stavili 21% kisika (postotak kakav postoji u zraku)  $PO_2$  u postao bi veći od 400 kPa, što bi uzrokovalo konvulzije za samo tridesetak minuta. (Guyton, 1995.)

### 3. SCUBA

SCUBA je naziv za uređaje sa zračnim spremnicima za disanje pod vodom. Sastoje se od ovih dijelova: 1) jedan ili više spremnika sa komprimiranim zrakom ili s nekom drugom smjesom za disanje, 2) „redukcijski“ ventil prvoga stupnja za smanjivanje tlaka iz spremnika na stalnu nisku razinu, 3) kombinirani ventil za udisanje i izdisanje koji omogućuje uvlačenje zraka u pluća pri vrlo malom negativnom tlaku i njegovo ispuštanje u more pri vrlo malom pozitivnom tlaku i 4) maska i sustav cijevi sa malim „mrtvim prostorom“. Cijeli uređaj radi tako da redukcijski ventil prvog stupnja smanjuje tlak iz spremnika na približno 1 000 kPa. Cijela smjesa plinova ne struji neprestano već se sa svakim udisajem propusti samo onoliko zraka koliko je potrebno za udisanje. Prilikom izdisanja zrak se ne može vraćati u spremnik, već se izdiše kroz ventil za disanje. (Guyton, 1995.)

Problem kod ovog uređaja je taj što je s porastom dubine potrebna sve veća količina zraka jer su na dubinama svi plinovi stlačeni na manji volumen. Zbog toga ronionc na dubini od 60 m može ostati samo nekoliko minuta, jer je za ispiranje ugljičnog dioksida iz pluća potrebna golema količina zraka iz spremnika. (Guyton, 1995.)



Slika 3.

#### 4. MODELNI ORGANIZMI

Mnogo kralježnjaka sa razvijenim plućima i potrebama sa zrakom živi pod vodom i roni na različite dubine u različitim periodima. Dupini i kitovi izranjaju na površinu kako bi udahnuli zrak, ali ipak većinu svog života provode pod vodom. (Eckert, 2001.) Morski slonovi uobičajeno rone do dubina od 400m te se pritom izlažu tlaku većem i od 40 atmosfera. Maksimalna dubina ronjenja koja je zabilježena za jedinku sjevernog morskog slona je 1581 m. Tlak na tim dubinama bi bez sumnje slomio prsište čovjeka. Neke životinje poput vedelove foke izdahnu prije zaranjanja te na taj način smanje zalihe kisika u njihovim plućima. Porast tlaka tijekom ronjenja dovodi do kompresije (sažimanja) pluća. Kod životinja koje smanje volumen pluća prije samog zaranjanja, prilikom ronjenja zrak je potisnut iz alveola kolapsom pluća, te je zadržan u trahejama i bronhijama koji su krući (rigidni), ali i manje propusni za plinove. Kada bi se plinovi zadržali u alveolama oni bi sa povećanjem tlaka difundirali u krv. Pri završetku ronjenja parcijalni tlak dušika u krvi bi bio visok te bi brzo plivanje prema površini moglo rezultirati stvaranjem mjehurića u krvi, što bi bio ekvivalent dekompresijskoj bolesti kod ljudi. Važno je imati na umu da je samo oko 7% ukupnih zaliha kisika vedelove foke smješteno u plućima tako da je izdah prije zarona upotpunosti razuman i isplativ. Uz to, izdisanje smanjuje i potisak životinje te povećava energiju potrebnu za plivanje u dubinama. (Castellini, 2002.)

#### 4.1. ADAPTACIJE VEDELOVE FOKE NA DUBINSKO RONJENJE

Vedelova foka je vrsta koja živi na Antartici i izvrsno je adaptirana na život u oceanu. Također, njezine sposobnosti plivanja i ronjenja su impresivne u usporedbi sa ostalim morskim sisavcima. Zabilježeni rekordi upućuju na to da foke mogu zaroniti do 600m dubine i zadržati dah pune 83 minute. (Castellini, 2002.)

##### 4.1.1. POHRANA I DISTRIBUCIJA KISIKA

Jedna od najvažnijih adaptacija za Vedelove foke je njihov veliki kapacitet pohrane i distribucije kisika te njihova sposobnost da se nose s visokim tlakom tijekom ronjenja.

Foke posjeduju visoku koncentraciju hemoglobina u krvi i mioglobina u mišićima. Kisik može biti pohranjen kao plin u plućima, može biti otopljen u krvi i tjelesnim tekućinama ili ga vežu za molekule hemoglobina u eritrocitima, odnosno mioglobina u mišićima. Ipak, najviše kisika je pohranjeno u krvi te njihova krv zbog veće količine hemoglobina ima 1,60 puta veći kapacitet za kisik od ljudske krvi. Volumen krvi po jedinici tjelesne težine iznosi 150ml/kg, tj. duplo više nego kod ljudi. Na kraju, rezultat je taj da su zalihe kisika u krvi 3.0-3-5 puta veće po jedinici tjelesne težine nego kod ljudi.-->imaju više krvi i više hemoglobina (Kooyman, 1981.)

Mioglobin primarno nalazimo u mišićima te mu je glavna funkcija da veže kisik. Radi se o hem-proteinu koji sadrži željezo. Zbog svoje strukture mioglobin ima veći afinitet za kisik od hemoglobina (Butler, 2001). Kada krv prolazi kroz mišić, kisik se jednostavno prenosi iz krvi u mišiće. Više kisika vezanog za mioglobin znači veću izdrživost na aerobnom nivou u kontinuiranom vježbanju kao što je ronjenje. U odsutstvu kisika, metabolizam mora prijeći na anaeroban način gdje se kao otpadni produkt javlja mliječna kiselina. Usljed toga se pH krvi zakiseli i javlja se umor.

##### 4.1.2. DISTRIBUCIJA KRVI U RAZLIČITE ORGANE

Kako bi što bolje iskoristile dostupan kisik i zalihe energije, foke su se prilagodile na jedinstveni način distribucije kisika tijekom ronjenja. Istraživanja su pokazala da ove životinje mogu dugo zadržati dah zahvaljujući tome što stegnu krvne žile u tkivima koja se mogu nositi sa nedostatkom kisika (vazokonstrikcija). Na taj način se zalihe kisika sačuvaju za organe kojima je neophodan kao što su mozak i srce (Butler, 2001). Cirkulirajuća krv vedelove foke je tada ograničena na mozak, srce i pluća. (Kooyman, 1981). Ovakve promjene u cirkulaciji se

javljalju odmah nakon zaranjanja. Uz spomenute promjene u cirkulaciji, popratno se javlja i smanjena stopa kucanja srca. Što životinja duže roni, to se kucanje srca još više dodatno usporava. Sve ove prilagodbe su za foku toliko prirodne da pritom dolazi do minimalnih promjena u krvnom tlaku.

Znanstvenici smatraju da se usporavanje srca ne događa refleksno, već da foka to iskontrolira i uskladi sa svojim „planom ronjenja“, odnosno sa time koliko dugo namjerava biti pod vodom.

#### 4.1.3. RESPIRATORNI SUSTAV VEDELOVE FOKE

Također, jedna od zadivljujućih prilagodbi Vedelove foke je njihova sposobnost da se nose sa izuzetno visokim tlakom koji se javlja usljed ronjenja na velikim dubinama. U trenutku kada se životinja nalazi na 600m dubine tlak s kojim se mora nositi iznosi 60 atmosfera. Tjelesne tekućine su relativno nestlačive, stoga tako visoki tlak neće imati utjecaja na većinu unutarnjih organa izuzev pluća i ostatka dišnog sustava koji su ispunjeni sa zrakom.

Posljedično, sa porastom dubine se moraju smanjiti pluća, traheje, šupljina srednjeg uha i ostali prostori u tijelu ispunjeni zrakom (Milius, 2000). Vanjski i unutarnji tlak životinje moraju ostati u ravnoteži jer bi u suprotnom membrane i krvne žile koje oblažu tjelesne šupljine puknule te bi se šupljine ispunile krvlju i ostalim staničnim tekućinama. To je jedan od problema s kojim se ljudi susreću tijekom dubinskog ronjenja. Proučavanjem anatomije dišnog sustava foke razjašnjeno je kako se one nose s ovim problemom. Utvrđeno je da im je srednje uho obloženo sa sustavom venskih sinusa. Kada foka zaroni ukupni tlak venske krvi se počinje povećavati te usljed toga dolazi do širenja sinusa. To uzrokuje „ispupčenje“ membrana srednjeg uha u prostor srednjeg uha pri čemu dolazi do smanjenja njegovog volumena i kompresije plinova. Time se izjednače vanjski i unutarnji tlak (Kooyman, Ponganis, 1993). Zanimljivo je to kako Vedelove foke ne trebaju opskrbu dodatnim zrakom kroz Eustahijevu cijev kao što je to slučaj sa ljudima.

Kod kopnenih sisavaca postoji limit od oko 25% rezidualnog volumena koji mora postojati u plućima. Pri tom volumenu rebra se ne mogu dalje skupljati i volumen prsišta je stalan. Nasuprot tome, kod Vedelove foke ne postoje takva ograničenja. Volumen prsišta im se može dodatno smanjivati jer imaju izuzetno fleksibilna rebra. Veliki udio hrskavičnog tkiva u rebrima i fine strukture bronhiola omogućavaju kompresiju te dopuštaju da gotovo sav zrak iz pluća izdahne. Ovakav izostanak rezidualnog volumena je zabilježen kod nekoliko vrsta morskih sisavaca kao što su kitovi i tuljani. Stoga, kako se hidrostatski tlak povećava sa dubinom, zrak napušta pluća i potisnut je u gornje dišne puteve gdje se izmjena plinova ne

može odvijati. To omogućava fokima da zaranja do dubina gdje je kompresija toliko velika da i najveći dišni putevi dožive slom (Butler, 2001).

## 5. USPOREDBA MODELNIH ORGANIZAMA SA ČOVJEKOM

### 5.1. ODGOVOR NA RONJENJE

Odgovor na ronjenje je jako dobro proučen kod sisavaca koji puno vremena provode pod vodom (Kooyman, 1989). Dolazi do automatske promjene toka krvi kako bi se osiguralo da su srce i mozak neprestano opskrbljeni kisikom. Organizam tako može biti duže pod vodom bez opasnosti od hipoksije. Osim toga, srce počinje sporije kucati, dolazi do vazokonstrukcije, krv iz udova i ostalih dijelova tijela odlazi u prsište kako bi se smanjio povišeni tlak.

Odgovor na ronjenje dokazano postoji i kod ljudi (Gooden, 1994), ali i kod drugih testiranih sisavaca se javlja u nekoj mjeri, što pokazuje da je to jedan primitivan mehanizam zaštite od hipoksije. Svakako, odgovor je jači kod morskih nego kod kopnenih sisavaca (Elsner i Gooden, 1983). Kod ljudi odgovor uključuje smanjenu brzinu odkucaja srca za 20-30% kod neiskusnih ronilaca, te 40-50% kod utreniranih ronilaca (Schagatay, 1991).

### 5.2. PRILAGODBA NA TLAK

Kao što je već spomenuto, način na koji tijelo odgovara na povišeni tlak je taj da krv potisne iz udova i ostalih dijelova tijela u abdomen. Na taj način se sprječava kolaps do kojeg bi inače došlo usljed povišenog tlaka. Također, znanstvenici su otkrili da se tijekom ronjenja dijafragma izboči prema gore, da se plućne krvne žile začepi te da se poveća promjer srca (Ferretti, 2001).

Dekompresijska bolest čovjeku prijete već na dubini od 10-20m. Nasuprot tome, Vedelove foke nemaju problema sa ovom bolesti. Razlog tomu je taj što kada ove životinje dosegnu dubinu od samo 50-70 metara njihova pluća dožive kolaps i ne napuhuju se ponovno sve dok životinja ne dopliva do plićih dubina. To znači da većinu vremena dok rone njihova pluća nisu u funkciji. Pošto nema izmjene plinova, većina dušika iz pluća ne uđe u krvotok (Kooyman, Castellini i Davis, 1981).

## 8. LITERATURA

Burns J.M. and Castellini M.A., 1996. Physiological and behavioral determinant of the aerobic dive limit in Weddell Seal (*Leptonichotes weddellii*) pups. *Journal of Comparative Physiology B* 166, 473-483.

Butler, Patrick, J., 2001. Diving Beyond the Limits. News in Physiological Science Vol 16 No. 5, 222-227.

Castellini M., 2002. Cold, hard facts: Diving records. The Antarctic Sun, 24 Nov, 2002.

Kooyman, Gerald L., 1981. Weddell Seal, consummate diver, Cambridge University Press

Kooyman, Gerald L., Castellini M.A., Davis R.W. 1981. Physiology of diving in marine mammals. Annual Review Physiology 1981. No. 43, 343-356

Kooyman, Gerald L., Poganis Paul 1993. The Challenges of Diving to Depth, World Wide Web

Milius, Susan. 2000. How whales, dolphins, seals dive so deep, Science News Online, Vol. 157, No. 15

C. Guyton, Fiziologija čovjeka i mehanizmi bolesti, Medicinska naklada Zagreb 1995.

Eckert, Animal physiology: mechanisms and adaptations, W. H. Freeman and company. 2001.

## 8. SAŽETAK

Sa porastom dubine raste tlak, a plinovi se tlače na manji volumen. U tim uvjetima se u tijelu čovjeka javljaju razne komplikacije. U dubinama dušik ima narkotično djelovanje, kisik pogubno djeluje na živčani sustav, a ugljični dioksid kod neispravne ronilačke opreme izaziva narkozu i anesteziju. Ako ronilac u moru provede toliko vremena da se u njegovu tijelu stignu otopiti velike količine dušika, a zatim naglo izroni na površinu u tjelesnim tekućinama se stvara velika količina dušičnih mjehurića. Oni izazivaju razna oštećenja i ovu pojavu zovemo dekompresijskom bolesti. Kod ljudi se ona javlja već na 10-20m dubine, no postoje organizmi koji su cijelu svoju fiziologiju prilagodili životu u dubinama. Primjer je Vedelova foka koja ima prilagodbe koje joj omogućavaju da zaranja do čak 600 m. Tijekom ronjenja njezina pluća nisu u funkciji, pa većina dušika iz pluća ne uđe u krvotok. Time je spriječen nastanak mjehurića i embolije. Osim toga, foke imaju veliku količinu hemoglobina i mioglobina,

kontroliraju dotok krvi u različite organe ovisno o njihovoj potrebi za kisikom te nemaju rezidualni volumen u plućima. Pitanje je kako bi se u usporedbi sa ovim modelom i ljudi mogli bolje prilagoditi na život u dubinama. Proučavanjem fiziologije ronjenja kopnenih sisavaca utvrđeno je da postoji „odgovor na ronjenje“. To je automatska pojava promjene toka krvi i smanjenih otkucaja srca kako bi se osiguralo da su srce i mozak neprestano opskrbljeni kisikom. Uz to se tijekom ronjenja dijafragma izboči prema gore, plućne krvne žile se začepi i poveća se promjer srca.

## SUMMARY

With increase of depth pressure increase too and gasses are compressed. Gases at elevated pressure can disturb normal functions of organism. Nitrogen has narcotic effect, oxygen has detrimental effect on the nerves and carbon dioxide in case of damaged diving equipment can cause narcosis and anesthesia. If diver spend so much time in sea that large amounts of nitrogen are dissolved, and than suddenly emerge to the surface nitrogen create a large number of bubbles in body fluids - decompression disease. In humans this can happen at the depths of 10-20 meters, but there are organisms which are adjusted to life in depths. Weddel seal has adjustments that help her to dive very deep (600 meters) without complications. During the dive their lungs are not in function so most nitrogen don't enters the blood circulation. This prevent occurrence of bubbles. Seals also have a large amount of myoglobin and hemoglobin, they can control blood supply in organs, and they don't have residual volume in lungs. The question is how we can apply this knowledge on humans so that people can better adjust to life in great depths. While studying physiology of diving in humans it's find out that there is „answer to dive“ - change in blood flow and reduction in heart rate. As a result, brain and heart are constantly supplied with oxygen. Also, during the dive diaphragm becomes convex, pulmonary arteries are clogged and diameter of the heart is increased. These adjustments can be improved during the practise.



