

Biologie des Tauchens

Ulli

07. Dezember 2003

Zusammenfassung

Wie versprochen hier nun also das Pamphlet über die beim Tauchen wichtigen biologischen Grundlagen. Es soll etwas umfangreicher ausfallen, als das vorangegangene Physik-Skript, gewisse Dinge werden aber doch als bekannt vorausgesetzt: So sollte der Leser gewisse anatomische Grundkenntnisse von Atmungs- und Kreislaufsystem mitbringen, über Sinn und Technik des Druckausgleiches bescheid wissen und vorher das Physik-Skript gelesen haben. Da wir schon so viel wissen, und reines Wiederholen dann doch irgendwann langweilig wird, wollen wir mal versuchen, ob wir uns nicht in einigen Bereichen etwas tiefer in die Materie wagen wollen; wem die Abhandlungen über Diffusion dann doch zu speziell sind, der möge sie halt einfach überspringen.

1 Ohr und Druckausgleich

Wenden wir uns als erstes dem Ohr zu. Dabei soll allerdings nicht das Hören, sondern die Anatomie des Ohres - von besonderer Bedeutung beim Tauchen - im Vordergrund stehen.

Da wir die mal als bekannt voraussetzen, sollen uns ein paar Worte zur Erläuterung genügen:

Außenohr: Im weitesten Sinne könnte man die Ohrmuschel und den äußeren Gehörgang als einen Schalltrichter betrachten. Für unsere Betrachtungen genügt das Wissen von deren Existenz, daher wollen wir gleich übergehen zum

Trommelfell: Das Trommelfell ist eine etwa 0,1 mm dicke ovale bis kreisförmige Bindegewebsplatte, welche das Mittelohr, genauer die Paukenhöhle, gegen das äußere Ohr luft- und wasserdicht abschließt.

Mittelohr: Auf der Innenseite des Trommelfells befindet sich die luftgefüllte(!) Paukenhöhle, welche die drei Gehörknöchelchen beherbergt. Die Gehörknöchelchen leiten die durch Schallwellen entstandenen Schwingungen des Trommelfells ins Innenohr (und verstärken

sie dabei). Erwähnen wollen wir auch noch, dass von der Paukenhöhle weitere luftgefüllte Nebenräume abgehen (ähnlich den Nasennebenhöhlen). Die Verbindung zum Nasenrachenraum ist das, was uns hier am meisten interessieren soll: Die **Ohrtrumpete**, oder nach ihrem Entdecker auch **Eustachi-Röhre** genannt (Bartolomeo Eustachi, päpstlicher Leibarzt, 1562).

Das Innenohr beherbergt die Organe für Schallwahrnehmung und Gleichgewicht. Der Schall wird in der Schnecke wahrgenommen, das Gleichgewichtsempfinden entspringt im wesentlichen den Vorhofsäckchen und den 3 Bogengängen des Gleichgewichtsorgans. Dies alles ist ein mit Flüssigkeit gefülltes in den Knochen eingelassenes Labyrinth.

Druckausgleich

Da wir ja alle das Physikskript aufmerksam gelesen haben, oder so schlau sind, dass wir auch ohne Physikskript bescheid wissen, erinnern wir uns an die Kompressibilität von Luft. Auf 10 m Wassertiefe (also bei doppeltem Druck) hat eine bestimmte Luftmenge nur noch die Hälfte ihres *Oberflächenvolumens*. So verhält sich die Luft in unserer Lunge und eben auch das bisschen Luft in der Paukenhöhle. Die Lunge hat kein allzugroßes Problem damit sich um die Hälfte zu verkleinern, aber die Paukenhöhle?

Richtig, sie ist fast komplett von Knochen umgeben - da bewegt sich also nichts. Die einzig flexible Stelle ist das Trommelfell. Aber zugegeben, so flexibel, dass es das Volumen der Paukenhöhle halbieren könnte ist das Trommelfell dann doch nicht. Würden wir ihm derartiges zumuten, würde es wahrscheinlich bereits in weitaus geringerer Tiefe reißen. Das ist erstens schmerzhaft und zweitens unter Wasser lebensgefährlich. Aber die Geschichte kennen wir ja alle.

Und was man dagegen machen kann, sollten wir auch alle wissen. Diejenigen, die jetzt nicht wissen, was gemeint ist, werden bitte umgehend beim Trainer vorstellig!

2 Atmung

Auch hier wollen wir die funktionelle Anatomie der Atemwege als bekannt voraussetzen und nur eine kurze Stichwortliste durchgehen:

obere Atemwege:

- Nasenhöhle: hierbei wollen wir noch kurz die luftgefüllten Nasennebenhöhlen erwähnen, welche bei z.B. Erkältung derart

zuschwellen können, dass kein Druckausgleich mehr möglich ist.

- Nasenrachenraum: hier mündet die Eustachi-Röhre
- Mundhöhle
- unterer Rachenraum

Kehlkopf: Grenze der oberen zu den unteren Atemwegen

- Kehldeckel
- Stimmritze

untere Atemwege:

- Luftröhre
- Bronchien
- Bronchiolen
- Alveolen = Lungenbläschen: Surfactant!

3 Kreislauf

Kurze anatomische Wiederholung:

Lungenkreislauf oder auch kleiner Kreislauf

- Kapillaren an den Alveolen: hier findet der Gasaustausch statt (äußere Atmung).
- Lungenvenen: Hier führen die Venen (zum Herzen hinführende Gefäße) sauerstoffreiches Blut

linkes Herz bzw. linke Herzseite, nicht dass jemand denkt es gäbe zwei getrennte Herzen!

- linker Vorhof
- Mitralklappe (oder einfach nur Herzklappe = Rückschlagventil)
- linke Herzkammer
- Aortenklappe (oder wieder einfach nur Herzklappe merken)

Körperkreislauf oder auch großer Kreislauf

- Aorta = Hauptschlagader

- Arterien (= vom Herzen wegführende Gefäße)
- Arteriolen
- Kapillaren: hier findet wieder ein Gasaustausch statt (innere Atmung).
- Venulen
- Venen (= zum Herzen hinführende Gefäße)
- Hohlvenen

rechtes Herz: Es wird immer gerne gesagt, die rechte Herzseite sei kleiner als die linke. Jein! In der Tat sind die Wände und damit der Herzmuskel auf der rechten Seite deutlich dünner als auf der linken Seite (das rechte Herz muss ja nur den kleinen Lungenkreislauf versorgen, während die linke Seite den sehr viel größeren Körperkreislauf beumpfen muss). Aber: Das Volumen beider Herzseiten ist natürlich gleich; denn beide Seiten pumpen ja die gleiche Menge Blut pro Herzschlag. Sonst würde es auf einer Seite einen Stau geben und irgendwann wäre auf der anderen Seite fast gar kein Blut mehr.

- rechter Vorhof
- Herzklappe
- rechte Herzkammer
- Pulmonalklappe

zurück im Lungenkreislauf:

- Lungenarterien (führen sauerstoffarmes Blut!)
- Kapillaren: und wir sind wieder am Anfang.

Auch zur Funktion des Kreislaufs kann man an dieser Stelle wohl nicht allzuviel neues erzählen.

Das Herz pumpt das Blut durch den Körper. Es schlägt in Ruhe etwa 60 - 80 Mal pro Minute und pumpt mit jedem Schlag etwa 70 ml Blut. Praktischerweise kann es bei körperlicher Anstrengung sowohl sein Schlagvolumen vergrößern als auch seine Schlagfrequenz deutlich erhöhen.

Das Blut (ein erwachsener Mensch hat etwa 5 - 7 l, ungefähr 8% des Körpergewichtes)

- versorgt unsere Körper mit Sauerstoff und entsorgt Kohlendioxid,

- bringt Nährstoffe zu den Zellen und entsorgt die Abfallprodukte des Stoffwechsels,
- spielt eine wichtige Rolle bei der Regulation der Körpertemperatur,
- ist zentraler Pool bei der Regulation des Flüssigkeitshaushaltes,
- ist wichtigster Transportweg der Körperabwehr

und macht noch so einige andere nützliche Dinge, welche wir hier aber nicht näher beleuchten wollen.

4 Diffusion

Jetzt kennen wir den Weg der Luft bis in die Alveolen und auch den Weg des Sauerstoffes im Körper. Wie allerdings der besagte Sauerstoff aus dem Alveolarraum in die angrenzenden Kapillaren gelangt, das wird uns oft verschwiegen. Sicherlich wird hin und wieder das Wort *Diffusion* in den Raum geworfen. Aber was ist das eigentlich?

In der Tat sind der Alveolarraum und das blutgefüllte Kapillarlumen nur durch eine Membran getrennt, die so dünn ist, dass sie für bestimmte Moleküle durchlässig ist. Sie wird auch gerne als *semipermeabel* (=halb-durchlässig) bezeichnet, denn sie ist für Gasmoleküle wie O_2 , CO_2 , N_2 und auch für eher unerwünschte Zeitgenossen wie CO durchlässig. Für Wasser oder andere höhermolekulare Stoffe wie Bluteiweiße, Blutkörperchen oder eingeatmeter Staub ist sie hingegen undurchlässig.

Nun zur Diffusion: Als erstes halten wir fest, dass Diffusion ein passiver Vorgang ist. Es gibt also keine kleinen O_2 - oder CO_2 -Pumpen in der semipermeablen Membran. Diffusion geschieht entlang eines Konzentrationsgefälles.

Die freien Gasmoleküle sind ständig in Bewegung, so dass sich die Konzentration ausgleicht. Zunächst ist das Konzentrationsgefälle sehr groß, die Diffusion von links nach rechts also entsprechend stark. Nun nimmt natürlich das Konzentrationsgefälle und mit ihm die Diffusionsgeschwindigkeit ab, bis am Ende auf beiden Seiten die gleiche Konzentration herrscht und in der Summe gar keine Diffusion mehr stattfindet. So wie es auf dem Bild ohne Barriere funktioniert, geht das natürlich auch mit z.B. einem Fliegengitter in der Mitte; das ist nämlich für Gasmoleküle durchlässig. Ähnlich kann man sich die semipermeable Membran vorstellen, nur das da eben die Gitterabstände so klein sind, dass ein Wassermolekül schon nicht mehr durchpasst.

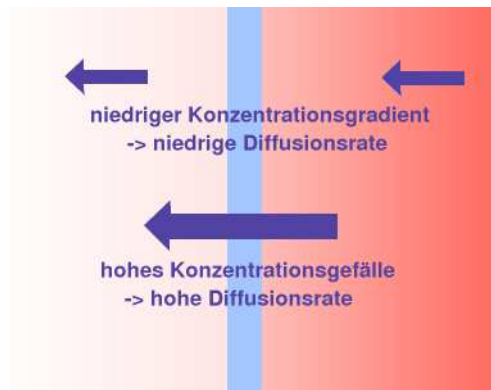


Abbildung 1: Der Grad der Rotfärbung zeigt die Konzentration des Diffundierenden Stoffes. Er diffundiert immer in Richtung und in Abhängigkeit von der Stärke des Konzentrationsgefälles.

Die Natur hilft dieser an sich rein passiven Diffusion nun mit einem kleinen Trick auf die Sprünge: Dadurch, dass die ins Blut übergetretenen freien O_2 -Moleküle sofort ans Hämoglobin in den roten Blutkörperchen gebunden werden, wird die Konzentration von freiem O_2 im Blut ständig auf niedrigem Niveau gehalten. Es bleibt also immer ein relativ großes Konzentrationsgefälle erhalten, so dass die Diffusionsgeschwindigkeit konstant hoch bleibt. Durch diese *erleichterte Diffusion* kann sehr viel mehr O_2 in sehr viel kürzerer Zeit ins Blut befördert werden, als das mit normaler Diffusion der Fall wäre, so dass zu jeder Zeit (außer beim Atemstillstand) eine 100%ige Sättigung des Blutes mit O_2 erreicht wird.

Ein ähnliches Prinzip verbessert die Aufnahme von CO_2 aus den Körperzellen ins Blut. Jedoch gibt es keinen vergleichbaren Vorgang in der Lunge, welcher beim Übertritt des CO_2 aus dem Blut ins Lungenvolumen erleichtern würde. Daher bleibt bei normaler Atmung (5% CO_2 in der Ausatemluft) immer ein deutlich von Null verschiedener Restspiegel von CO_2 im Blut!

5 Hyperventilation

Gehen wir mal davon aus, dass jeder weiß, was Hyperventilation ist, und vermutlich weiß auch jeder, dass man es vor dem Tauchen nicht machen darf und vermutlich weiß auch jeder, was passieren kann, wenn man es doch macht (diejenigen, die es nicht wissen, melden sich jetzt bitte ebenfalls demutsvoll beim Trainer). Nur, weiß auch noch jeder warum das so ist wie es ist?

Schauen wir uns an, wie sich der O_2 - und der CO_2 -Gehalt des Blutes während des Luftanhaltens verändern:

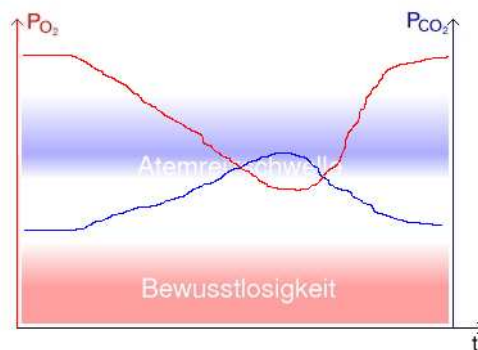


Abbildung 2: Nach Einsetzen des Atemstillstands sinkt der Sauerstoff- und steigt der Kohlendioxidgehalt des Blutes.

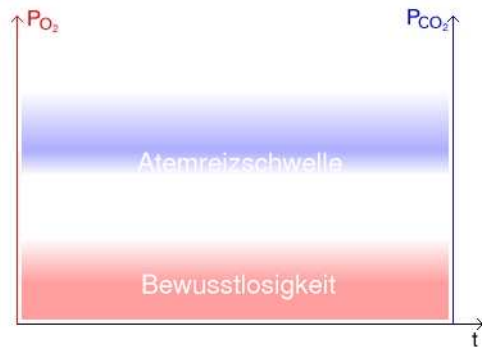
Beim Luftanhalten ist der O_2 -Vorrat der Lunge ziemlich schnell erschöpft und, da es kein freundliches Hämoglobinpendant in der Lunge gibt, welches den CO_2 mal so eben verschwinden lässt, steigt sehr bald die CO_2 -Konzentration in der Lunge. Der O_2 -Gehalt des aus der Lunge kommenden *Frischblut* nimmt also immer weiter ab, während der CO_2 -Spiegel immer weiter steigt. Irgendwann sagt ein kleiner Sensor in den großen Körperarterien (also da, wo das Blut normalerweise immer noch *frisch* sein sollte), dass er sich von dem vielen CO_2 aber langsam belästigt fühle und man doch bitte anfangen solle zu Atmen. Diesem von zu hoher CO_2 -Konzentration (und nicht etwa von zu niedriger O_2 -Konzentration) ausgelösten Atemreiz, kann man nun nicht besonders lange widerstehen, so dass man tatsächlich auftaucht und wieder anfängt zu atmen, bevor der Sauerstoff zur Neige geht.

Überlegen wir jetzt mal, was bei der Hyperventilation mit dem Sauerstoffgehalt des Blutes passiert: Bereits bei normaler Atmung ist soviel O_2 ins Blut übergetreten, dass mehr einfach nicht reinpasst - mit dem Sauerstoffspiegel passiert gar nichts. Hyperventilation vor dem Tauchen bringt also nicht den gewünschten *Ich-pump-mich-jetzt-mit-Sauerstoff-auf-Effekt* und damit auch keine tatsächliche Tauchzeitverlängerung!

Wenn nichts passiert, so könnte man sich fragen, warum ist die Hyperventilation dann so gefährlich? Denken wir nun mal nach, was denn mit dem CO_2 -Spiegel des Blutes passiert: Durch die massiv verstärkte Belüftung der Lunge senken wir natürlich die CO_2 -Konzentration der Lunge - und das kontinuierlich solange wir hyperventilieren. Wir führen also künstlich eine erleichterte Diffusion für CO_2 herbei, so dass wesentlich mehr CO_2

aus dem Blut in die Lunge abgegeben werden kann. Folglich bleibt weniger CO₂ im Blut zurück!

Was nun passiert, kann sich jeder selbst auf malen:



Hyperventilation verlängert also nicht die,
sondern die

Wer das jetzt nicht konnte... naja ihr wisst schon.

6 Partialdruck

Obwohl wir uns bisher erfolgreich um den Begriff Partialdruck herumgedrückt haben, scheint es jetzt ratsamer ihn doch einzuführen. Wir wissen, dass Luft aus verschiedenen Gasen zusammengesetzt ist (Welche? Welche Anteile? Nein, halt! Stop! Erst die Fragen beantworten, dann weiterlesen!).

Am besten aufschreiben:

Bleiben wir zunächst einmal an der Oberfläche, also bei einem Bar Umgebungsdruck. Der Partialdruck z.B. des Sauerstoffs ist dann einfach der Anteil, den Sauerstoff am Gesamtumgebungsdruck hat. D.h.:

$$\text{Sauerstoffpartialdruck} = \text{Umgebungsdruck} \cdot \text{Sauerstoffanteil} = 1\text{bar} \cdot 0,21 = 0,21\text{bar}$$

Das mag auf den ersten Blick vielleicht etwas befremdlich wirken und auch der Sinn hinter einer solchen Schreibweise bleibt uns zunächst noch etwas schleierhaft, es ist aber sehr praktisch. Dann nämlich wenn man in die Tiefe geht, z.B. auf 10 m. Dann beträgt der Umgebungsdruck ... bar. Und der Sauerstoffpartialdruck?

$$\text{Sauerstoffpartialdruck} = \dots \text{bar} \cdot \dots = \dots \text{bar}$$

Genauso kann man das für beliebige Tiefen ausrechnen. Nun ist uns aber immer noch nicht klar, wohin uns das führen soll.

Sauerstoffvergiftung

Unserem Körper ist der Anteil des Sauerstoffes in der Luft egal. Für ihn zählt die absolute Sauerstoffmenge, die ihm zur Verfügung steht - und dafür ist der Partialdruck eine sinnvolle Einheit. Wir könnten also genauso gut den Stickstoff weglassen und in einer Atmosphäre von 0,21 bar und 100% Sauerstoffanteil leben. Der Sauerstoffpartialdruck beträgt immer noch 0,21 bar. Oder aber einem Patienten mit Sauerstoffmangelversorgung stellen wir mit 100%igem Sauerstoff bei Umgebungsdruck einen Sauerstoffpartialdruck von 1 bar zur Verfügung.

Würden wir unsere Tauchflasche mit reinem Sauerstoff füllen, so würde uns in 10 m Wassertiefe ein Sauerstoffpartialdruck von 2 bar zu Teil. Wunderbar, mag jetzt der eine oder andere denken - nicht ganz. Denn irgendwann wird dem Körper das Treiben zu bunt. Nun mag es verwundern, dass der lebenspendende Sauerstoff auf einmal auch giftig sein kann.

Wir wissen aber, dass reiner Sauerstoff, z.B. auf einen brennenden oder nur noch glühenden Gegenstand geblasen, zu ziemlich heftigen Reaktionen führt; so gesehen ist Sauerstoff auch ein recht aggressiver Stoff. Auch im Körper kann Sauerstoff, sofern er in ausreichender Menge vorliegt, seine aggressive Wirkung entfalten und Schäden anrichten. Z.B. kann der Surfactant, welcher die Alveolen auskleidet geschädigt oder sogar zerstört werden. Im weiteren Verlauf können auch die Membranen der Körperzellen geschädigt werden. Bevor es zu dauerhaften Schäden kommt, machen sich jedoch zunächst vor allem reversible Effekte auf das Nervensystem bemerkbar:

- Augenflimmern
- Übelkeit
- Muskelzuckungen
- epilepsieähnliche Anfälle
- Bewusstlosigkeit

Es gibt keinen absoluten Grenzwert, ab dem dieser Effekt eintritt, da außer dem Sauerstoffpartialdruck auch noch andere Faktoren eine Rolle spielen. Im allgemeinen kann man sagen, dass bei einem Partialdruck von 1,6 bar nach 45 Minuten Einwirkzeit die giftige Wirkung des Sauerstoffs einsetzt. Die entsprechende Wassertiefe können wir ja jetzt einfach selbst ausrechnen:

$$\text{Umgebungsdruck} = \frac{\text{Sauerstoffpartialdruck}}{\text{Sauerstoffanteil}} = \frac{1,66\text{bar}}{0,21} \approx 7,9\text{bar}$$

Das entspricht einer Wassertiefe von m. Da beim Sporttauchen mit normaler Pressluft keine Aufenthaltsdauer von über 45 Minuten in solchen Tiefen erreicht wird, besteht also für uns kein Risiko eine Sauerstoffvergiftung zu erleiden.

Anders ist dies bei mit Sauerstoff angereicherten Gasgemischen. Würden wir mit 100%igem Sauerstoff tauchen, so wäre der kritische Sauerstoffpartialdruck bereits in 6 m Wassertiefe erreicht.

Stickstoffnarkose (Tiefenrausch)

Auch Stickstoff hat ab einem Partialdruck von etwa 3 bar (grob gesagt etwa 30 m Wassertiefe; selber ausrechnen!) Wirkungen auf den Organismus. Der genaue Wert hängt stark von der Konstitution des jeweiligen Menschen ab, die Wirkung kann daher in sehr unterschiedlichen Tiefen einsetzen. Spätestens ab 60 m Tiefe muss bereits bei kurzem Aufenthalt mit ziemlicher Sicherheit mit dem Auftreten einer Stickstoffnarkose gerechnet werden. Dieser ist jedoch, anders als die Sauerstoffvergiftung, reversibel, hinterlässt keine Folgeschäden, und verschwindet sofort nach auftauchen in geringere Wassertiefen.

Ausgelöst wird die Wirkung vermutlich über die Beeinflussung der Ausschüttung bestimmter Botenstoffe im Gehirn. Sie äußert sich ähnlich der Wirkung von Alkohol oder leichter Halluzinogene;

- optische Sinnestuschungen wie falsches Farbsehen, Tunnelblick
- akustische Sinnestuschungen, Fische beginnen zu sprechen
- Euphorie
- eingeschränkte Urteilskraft bis zur Sorglosigkeit
- Angstgefühle, Beklemmungen
- Bewusstseinsstörungen bis hin zur Bewusstlosigkeit

Die wesentliche Gefahr besteht hierbei in der Tat an riskantem Verhalten der betreffenden Person: zu schneller Aufstieg, Herausnehmen des Lungenautomaten (man kann ja unter Wasser atmen...), sogar von Versuchen Fische mit Luft aus dem Lungenautomaten zu versorgen wird berichtet.

Beim Abstieg in betrefene Tiefen beugt man am besten dadurch vor, dass sich die Tauchpartner intensiv beobachten und bei auffälligem Verhalten sofort in geringere Tiefen aufsteigen. Unter Umständen kann der Betroffene selbst das Einsetzen von Symptomen bemerken und entsprechend reagieren.

7 Dekompressionskrankheit

Auch hier kommt uns der Stickstoff in die Quere. Gase können in nahezu allen Flüssigkeiten aufgenommen, oder auf schlaue *physikalisch gelöst* werden. So kommt es, dass nicht nur Sauerstoff und Kohlendioxid, für welche bestimmte Speichermechanismen im Körper existieren, sondern auch Stickstoff, wenn auch in geringeren Mengen, im Blut vorhanden ist. Die gelöste Stickstoffmenge hängt dabei hauptsächlich vom Stickstoffpartialdruck und vom Umgebungsdruck ab.

D.h. je höher der Stickstoffpartialdruck ist, desto mehr Stickstoff kann im Blut gelöst werden. Das heißt aber auch andersherum, dass bei sinkendem Umgebungsdruck die Aufnahmefähigkeit des Blutes für gelösten Stickstoff ebenfalls sinkt.

In der Praxis bedeutet das Folgendes: Sind wir in größere Tiefen getaucht, hat sich mit dem gestiegenen Umgebungsdruck natürlich auch der Stickstoffpartialdruck ganz entsprechend vergrößert. Über die Diffusionsstrecke in der Lunge gelangt also so lange Stickstoff ins Blut und von dort in alle anderen flüssigen Körperanteile, bis sich im gesamten Körper der Stickstoffpartialdruck angeglichen hat. Das dauert natürlich seine Zeit. Dementsprechend dauert der umgekehrte Vorgang, also das Ausscheiden von Stickstoff über die Lunge beim Auftauchen, auch seine Zeit. Tauchen wir sehr schnell auf, sinkt der Umgebungsdruck ziemlich abrupt. Die Abgabe von Stickstoff über die Lunge dauert möglicherweise länger, als die mit Stickstoff angereicherten Körperbestandteile es hergeben, so dass es letztendlich zum Ausscheiden von Stickstoff aus dem Blut noch innerhalb des Blutkreislaufes kommt.

Die dabei entstehenden kleinen Stickstoffbläschen setzen sich bevorzugt an den engsten Stellen des Kreislaufes, in den Kapillaren fest. Dabei sind also genau die Bereiche, in denen die innere Atmung geschieht, blockiert. Man bedenke, dass sich natürlich auch im Gehirn solche Blockaden bilden, und wie empfindlich das Gehirn auf Sauerstoffmangelversorgungen

reagiert. Symptome eines Schlaganfalls und sogar bleibende Schäden sind daher nicht auszuschließen.

Vorbeugung (Dekotabelle, Dekostops,...), Erste Hilfe und weitere Therapie der Dekompressionskrankheit wollen wir aber nicht bei den biologischen Grundlagen, sondern in einem anderen Kapitel genauer anschauen.

8 Noch Fragen?

Dann an ulrich.velte@sehnde.dlrg.de mailen oder beim Training direkt an den Inhaber dieser Mailadresse stellen! Sehr gerne sind auch Lob, Kritik, Verbesserungsvorschläge oder gar Hinweise auf Fehler willkommen.