

MICHAEL-N.INFO

**MICHAEL
NEDWED**

**IMMERSIONSEFFEKTE,
LEERE LUNGE, FRC,
REVERSAL PACKING,
BLOODSHIFT**

JULI 2009

Das Apnoetauchen hat im Bereich des Leistungssportes selbst erfahrene Tauchsportmediziner gelehrt, das der Mensch die bislang theoretisch möglichen Tiefen weit überschreiten kann.

Die Taucher entwickeln bei den Vorstößen in neue Tiefen hierbei oft neue Trainingsmethoden um die Leistungsfähigkeit zu steigern. In diesem Artikel gehe ich etwas genauer auf einige Begriffe ein, damit der Einsteiger oder Interessierte Leser sich ein Bild von diesen Vorgängen und Methoden machen kann.

Immersionseffekte, die Abhängigkeit der Tieftauchfähigkeit von der Lunge, was passiert beim Bloodshift, reversal packing, leere Lunge und FRC-tauchen, beschreibe ich hier etwas eingehender.

Da unser Blut und hier insbesondere das Blutvolumen eine wichtige Rolle spielt, finde ich sollte man sich eine einigermaßen individuelle Vorstellung über die Verhältnisse von den verschobenen oder im Umlauf befindlichen Blutmengen machen können. Hier zwei Faustformeln wie das eigene Blutvolumen bestimmt werden kann: 1/13 des Körpergewichtes oder 60-98 ml/Kg Körpergewicht. Dadurch kann man die aufgeführten Mengen einmal ins Verhältnis zu der eigenen Blutmenge (Ansatzweise) setzen.

Das Blutvolumen unterliegt ständig Schwankungen (Dehydratation, Menstruation usw.) deshalb sind genauere Werte nur mit erhöhtem Aufwand zu ermitteln.

Werte die hier explizit für Bloodshift oder reversal-packing genannt werden beziehen sich auf einzelne Personen und stellen KEINE Normwerte dar! Sie vermitteln im Prinzip was bislang als maximale Werte festgestellt wurde, inwiefern es weitere Steigerungen gibt oder möglich sind, ist medizinisch gesehen derzeit absolut offen.

Die Werte, die ich hier nenne beziehen sich auf Feststellungen renommierter, seriöser Tauchmediziner.

Ich beginne mit Effekten, die wohl schon jeder bei sich beobachten konnte, der schon einmal schwimmen war.

Immersionseffekte

Diese treten schon auf, wenn man sich nur bis zum Kopf im Wasser aufhält.

Es sind:

- Hämodynamische Auswirkungen (Hämodynamik = Blutfluss in den Blutgefäßen)
- Pulmonale Einflüsse (die Lunge betreffend)

Bedingt durch die Schwerkraft, haben wir an Land stehend einen Druckunterschied zwischen oberen und unterem Körper von 100 mmHg (13 kPa), allein durch den hydrostatischen Druck unseres Blutes. Durch diesen Umstand befindet sich eine größere Menge Blut in den Beinen. Stellt man sich nun bis zum Hals ins Wasser, findet durch den wirkenden Druck des Wassers eine Umverteilung aus den unteren Extremitäten in den Thoraxbereich statt. Es handelt sich hierbei um venöses Blut und es kann sich um bis zu 1.000 ml betragen. Dies ist natürlich auch von dem vorhandenen Blutvolumen abhängig, wie ich oben kurz erläutert habe und dieser 1 L wird in der Literatur als Maximalwert beschrieben.

Es kommt durch diesen erhöhten Rückfluss zu einer stärkeren Belastung des rechten Herzens. In den rechten Vorhof des Herzens münden beide Hohlvenen und die rechte Kammer pumpt über die Lungenarterie (deshalb ist es nicht richtig, wenn man sagt das Arterien sauerstoffangereichertes Blut und Venen sauerstoffarmes Blut transportieren) zu der Lunge. Durch diesen höheren Volumenauswurf des Herzens kommt es zu einer gleichmäßigeren Durchblutung der Lunge (siehe Artikel Aufbau und Funktion der Lunge). Die erhöhte Dehnung des rechten Vorhofes des Herzens, die durch den erhöhten Rückfluss venösen Blutes verursacht wird, signalisiert dem Zentralen Nervensystem das das Blutvolumen des Körpers insgesamt gestiegen sei. Dies ist jedoch eine Fehlinterpretation, da aber ein konstantes Blutvolumen für ein reibungslos funktionierendes System notwendig ist, reagiert der Körper mit der Freisetzung eines Hormons (ANP), dass die Urinproduktion steigert. Zeitgleich wird das gegensteuernde Hormon (ADH) in der Ausschüttung gehemmt. Sollte die betroffene Person auch noch frieren, kommt es durch die Vasokonstriktion (Gefäßengstellung) in den Extremitäten zu einer weiteren Verstärkung dieses Effektes. Durch die erhöhte Urinproduktion wird dem Körper Flüssigkeit entzogen und das vermeintlich hohe Blutvolumen nach unten korrigiert. Diese Maßnahme ist mit verantwortlich für den relativ hohen Wasserverlust beim Tauchen.

Obwohl hier natürlich eine Blutumverteilung (bloodshift) zum Thorax hin erfolgt, ist damit nicht der von den Freitauchern als Bloodshift bezeichnete Vorgang gemeint oder beschrieben. Dieser Bloodshift begründet sich auf Vorgänge, die einer Verletzung der Lunge durch den steigenden Außen-Druck entgegenwirkt.

Dies lässt sich auch durch die vom System abgekoppelte Regulation der Lungendurchblutung darlegen. In der Lunge befinden sich im Ruhezustand etwa 500 ml Blut und das Kapillarsystem der Lunge hat dann etwa eine Oberfläche von 70m², durch die eigenständige Regulation und unter Belastung kann die Oberfläche des Kapillarsystems der Lunge auf 100m² vergrößert werden. Dies sind nicht die Werte eines trainierten Apnoetauchers, sondern Normwerte! Durch diese Fähigkeit wird das "erhöhte Blutvolumen" zunächst einmal rasch neutralisiert, damit das Leitungssystem nicht überlastet wird und die Gegenmaßnahme Urinproduktion benötigt ja auch eine gewisse Zeit, bis sie effektiv arbeitet um das Blutvolumen in seine konstante Größe zu regulieren.

Durch das im Wasser stehen, kommt es durch den hydrostatischen Druck des Wassers zu einer Verschiebung des Zwerchfelles nach oben. Dieser Vorgang reduziert die Vitalkapazität und die funktionelle Residualkapazität. Diese Reaktion basiert zum einen auf dem auf dem Thorax lastendem Druck, da dieser höher ist als der intrapulmonale Druck. Die Veränderungen, die durch die Reduzierung der angesprochenen Lungenkapazitäten erfolgen, sind gering und für den Betroffenen kaum wahrnehmbar.

Wovon ist die Tieftauchfähigkeit abhängig?

Es gibt mehrere Faktoren, wie Psyche, aerobe und anaerobe Leistungsfähigkeit, allgemeine körperliche Leistungsfähigkeit, Fähigkeit zum Druckausgleich, Anfälligkeit auf die Wirkung der unterschiedlichen Partialdrücke der beteiligten Gase und einige mehr, die Einfluss auf diese Fähigkeit nehmen.

2 Volumen der Lunge beeinflussen die theoretische Tauchtiefe erheblich.

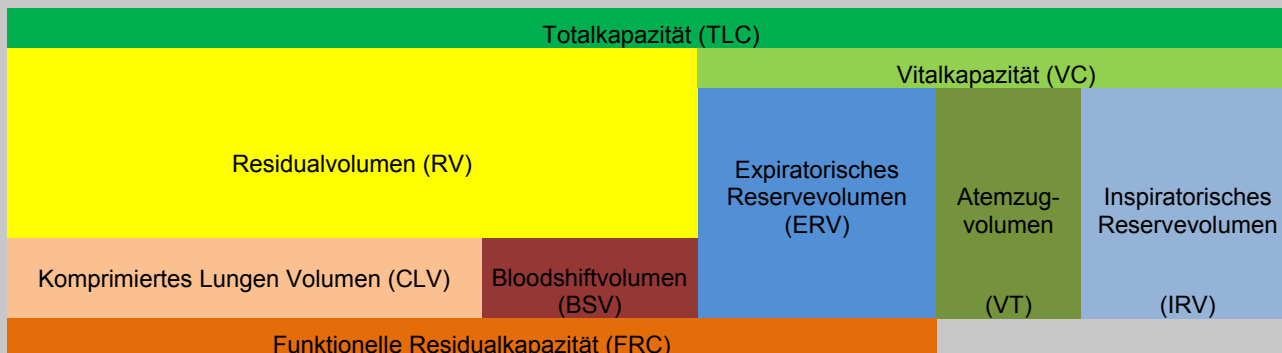
Das Residualvolumen (RV) und die Totalkapazität (TLC).

Es handelt sich hierbei um Bezeichnungen, die aus dem medizinischen Bereich kommen und dementsprechend nicht durch willkürliche, eigene Definitionen ersetzt oder abgeändert werden sollen, damit man sich bei Diskussionen auch auf einer Kommunikationsebene bewegt. Im Freitauchbereich wird dies gern gemacht und löst deshalb auch kontroverse Meinungen zu eigentlich eindeutigen Vorgängen aus.

Das hier auch der Freitauchverband AIDA diesen Weg beschreitet, zeigt das der Begriff Blackout unter anderem sogar für Herzstillstand genommen wird, was absolut daneben ist. Das dem so ist kann man in den Wettkampfreregularien nachlesen.

Aber zurück zum Thema.

Hier noch einmal kurz dargestellt wie sich einzelne Volumen der Lunge ergeben. Bis auf CLV und BSV sind es Begriffe aus dem medizinischen Bereich, die ich aufgrund der Eindeutigkeit hier neu einführe. Die Abbildung ist lediglich als schematische Darstellung zu sehen und entspricht NICHT den tatsächlichen Verhältnissen der einzelnen Volumina zueinander, die gewählten Darstellungsgrößen dienen der besseren Lesbarkeit. Sie sind absolut individuell und unter anderem vom jeweiligen Trainingsstand abhängig.



Ich führe hier nur die Definitionen von RV und TLC auf.

Das RV ist das Luftvolumen, das nach einer maximalen Ausatmung in der Lunge verbleibt und auch willentlich nicht weiter abgeatmet werden kann.

Die TLC beschreibt das Luftvolumen, das sich nach einer maximalen Einatmung in der Lunge befindet. Das Volumen, das durch "karpfen" oder auch "packen" hinzugefügt wird, ist dabei NICHT enthalten.

In der Regel wird das RV per Erfahrungswert bestimmt. Abhängig von Körpergröße, Alter und Geschlecht geht man von etwa 1 L - 1,5 L RV aus.

Ansonsten besteht die Möglichkeit per Messung dieses festzustellen. Derzeit sind mir 2 Methoden bekannt, die Heliumeinwaschmethode, hat den Nachteil das nur die per Bronchialweg belüfteten Lungenabschnitte in die Messung einfließen. Liegt hier eine Verlegung vor sind die Messungen inkorrekt. Bei der Ösophagusdruckmessung kann es bei einem bestehenden Emphysem (air trapping) zu falschen Messwerten kommen.

Nachdieser kurzen Einführung in die Terminologie, kommen wir zu der Abhängigkeit dieser Volumina hinsichtlich der Tauchfähigkeit. In den herkömmlichen Lehrbüchern, wird davon ausgegangen, dass man basierend auf der nachfolgenden Formel und nur die Lunge berücksichtigend, lediglich diese Tauchtiefe in Apnoe erreichen kann.

$$\text{TLC} : \text{RV} = X$$

$$5 \text{ L} : 1,25 \text{ L} = 4$$

X entspricht hierbei dem Druck in bar. Die Tiefe ergibt sich, indem man pro 10 m Wassertiefe 1 bar rechnet und 1 bar Luftdruck der Oberfläche vorher abzieht. Aus Gründen der Vereinfachung, nehme ich hier 1 bar Luftdruck und vernachlässige die Druckunterschiede per Höhenunterschied oder Wetterlage. Auch wird hier nicht die Wasserart oder ihre Temperatur berücksichtigt, was ja ebenfalls Auswirkungen auf den tatsächlich herrschenden Druck hat.

In diesem Beispiel könnte die betreffende Person 30 m tief tauchen ($4 \text{ bar} - 1 \text{ bar} = 3 \text{ bar} \triangleq 30\text{m}$)

Jedem wird klar, dass es hier noch andere Mechanismen geben muss, die die heutzutage erreichten Tiefen ermöglichen, da sie doch um einiges tiefer sind als die der Lehrbücher.

Diese Formel ist im Prinzip auch korrekt, jedoch werden andere Ausgleichsmethoden des Körpers nicht berücksichtigt.

Das RV hat als Volumen seine Beständigkeit als feste Größe lediglich unter normobaren Bedingungen, also an Land, wenn wir kontrolliert abatmen. Hier können wir eindeutig erkennen, wann das RV erreicht ist.

Beim Tauchen wird die Lunge durch den Wasserdruck immer weiter komprimiert und in einer individuellen Tiefe erreicht man eben dieses RV, obwohl wir ja nicht abgeatmet haben. Ab dieser Tiefe können wir aus der Lunge keine Luft mehr willentlich zum Druckausgleich in die Nebenhöhlen befördern.

Von der Formel ausgehend, befinden wir uns in dem Tauchgang, in der theoretischen Tiefe von 30m. Es herrscht hier nun ein Druck der unser Lungenvolumen auf das Volumen zusammengepresst hat, auf das wir an Land maximal ausatmen können. Wir haben die Grenzen der Elastizität von Thorax und Zwerchfell erreicht, die wir an Land durch unsere Atemmuskulatur abatmen können, das RV. Wenn wir nun tiefer tauchen wird die Lunge weiter komprimiert und der von außen einwirkende Druck wird den Thorax und das Zwerchfell noch etwas weiter in Richtung kleinstmögliches Volumen dehnen können. In dieser Übergangsphase des Erreichens der maximalen Elastizität dieser Beiden kommt der sogenannte Bloodshift zur Wirkung, durch den der Druckausgleich innerhalb der Lunge erfolgt. Diesen Bereich habe ich in der oben dargestellten Abbildung noch nicht dargestellt, weil mir noch kein aussagekräftiger Begriff eingefallen ist und eventuell bewegt sich diese Auswirkung auch in einem zu geringem Rahmen.

Da die Lunge über das RV hinaus weiter komprimiert wird und die Volumenauffüllung durch den Bloodshift rein Begriffstechnisch keine Verringerung des RV darstellt, ist es nicht korrekt weiter von RV zu sprechen, da es eine definierte Größe ist und es sich nun um einen anderen Vorgang handelt, als das Abatmen.

Um eben eindeutig zu bleiben führe ich an dieser Stelle den Begriff des CLV (compressed lung volume) ein.

Mit diesem Begriff definiere ich das verbleibende Volumen der Lunge, das durch die Druckverhältnisse über das RV hinaus reduziert wird.

Die Differenz zwischen dem RV und dem CLV bezeichne ich als Bloodshiftvolumen (BSV). Es ist die Menge an Blut, die zum Volumenausgleich (Druckausgleich) in den Blutgefäßen der Lunge benötigt wird.

Ich definiere den Bloodshift wie folgt, er tritt in Aktion sobald sich die Lungenalveolen komprimieren und diese Kompression nicht mehr durch das Nachgeben des Thorax oder des hochrutschen des Zwerchfelles kompensiert werden kann. Der Druckausgleich erfolgt nun durch das verstärkte Füllen der Blutgefäße der Lunge, sowie des angrenzenden Gewebes und deren damit verbundenen Ausdehnung. Der Bloodshift ist somit ein Druckausgleich durch ein erhöhtes Blutvolumen im Gefäßbereich der Lungen. Er setzt ein, wenn alle anderen Möglichkeiten des Druckausgleiches im Thoraxbereich ausgeschöpft sind.

Es findet **KEIN** Übertritt von Flüssigkeit in den mit Luft gefüllten Bereich der Alveolen statt! Die Alveolen werden durch die Ausdehnung der Blutgefäße verengt.

Ich vermeide hier bewusst Formulierungen wie: Flüssigkeit tritt aus der Lunge oder in die Lunge über, damit wird suggeriert, dass sich die Flüssigkeit in dem mit Atemluft gefüllten Bereich befinden würde, was beim Bloodshift natürlich nicht der Fall sein kann. Wenn sich Flüssigkeit in diesem Bereich befindet liegt ein Ödem vor, was wiederum mit dem Bloodshift nichts zu tun hat, sondern dann auftritt wenn man zu schnell ab- oder auftaucht und dabei Zellgewebe beschädigt wird und Körperflüssigkeiten in diesen Raum übertreten. Natürlich kann dies auch während einem Bloodshift passieren, dann sind jedoch 2 unterschiedliche Vorgänge zeitgleich in "Funktion".

Der Bloodshift ist eine Schutzfunktion, die der Zerstörung von Gewebe durch Unterdruck in der Lunge entgegenwirkt. Dieser Protektionsmechanismus funktioniert zwar ohne besonderes Zutun des Tauchers, er muss jedoch seine Gefäße langsam an diese Überdehnung gewöhnen. Man kann in gewisser Hinsicht von einem Trainingseffekt sprechen. Diese Gewöhnung der Gefäße an die Dehnung erfolgt nicht durch ein besonderes Training, als vielmehr durch langsames herantasten an große Tiefen

Zum besseren Verständnis mache ich hier kurz einen Einschub was die Lungenfunktion betrifft. Die Durchblutung der Lunge ist von der Autoregulation des restlichen Körpers ausgenommen. Wenn das Durchblutungsvolumen der Lunge auf das Vierfache ansteigt, erhöht sich der Blutdruck innerhalb der Lunge nur um das Doppelte! Dies beruht unter anderem auf der Tatsache, dass die Blutgefäße der Lunge nicht in umliegendes Gewebe (Interstitium) eingebettet sind und sich somit die Gefäße ohne den Gegendruck von Gewebe ausdehnen können. Ein weiterer Punkt ist, dass der Strömungswiderstand der Lungengefäße lediglich 7% dessen beträgt, der in anderen systemischen Gefäßen des Körperkreislaufes herrscht und sie um einiges dünnwandiger sind als diese und sich dadurch leichter dehnen lassen. Aufgrund des niedrigen pulmonalen Blutdruckes, kommt es zu einer heterogenen (ungleichmäßigen) Durchblutung der Lunge. Man teilt die Lunge in 3 Durchblutzonen ein wobei die erste und oberste, die Lungenspitzen im Ruhezustand nur bei der Systole durchblutet werden, also der Auswurfphase des Herzens. Diese Durchblutzonen werden jedoch allein schon bei körperlicher Anstrengung oder in waagrecht Lage verschoben und der Status der Durchblutung verändert. Die beiden anderen Zonen werden besser durchblutet, da sie aufgrund ihrer Position und durch die Schwerkraft bedingt hier weniger Druck notwendig ist.

Es ist also keine besondere Fähigkeit von Apnoe-Lungen in venösen Blutgefäßen eine größere Menge Blut aufzunehmen, denn wie oben schon erwähnt kann bis zur vierfachen Menge aufgenommen werden, was bei 500 ml Ausgangswert dann eine Gesamtmenge von 2 L Blut bedeutet. Experimentell sind bisher 1,53 L nachgewiesen worden, die sich im Bloodshift zusätzlich in die Lungengefäße umverteilt haben. Im Prinzip wird das Tiefenlimit eines Tauchers nach Erreichen des RV also auch durch die Dehnungsfähigkeit seiner Lungengefäße festgelegt. Hier beeinflussen dementsprechend die allgemeinen Erkrankungen wie Arteriosklerose oder Raucherlunge die Elastizität der einzelnen Gewebe.

Bei dem zusätzlichen Blut in der Lunge handelt es sich um einen venösen Rückstrom, der durch den hydrostatischen Druck auf das Gewebe der Extremitäten ausgelöst wird und nicht wie manche annehmen durch die Sogwirkung der komprimierten Lunge. Die herrschenden Unterdruckverhältnisse in der Lunge, was man als Sog bezeichnen könnte, sorgen dafür dass das Blut, welches sich schon in der Lunge befindet an die benötigten Stellen verbracht wird um den Druckausgleich herzustellen. Durch diesen Effekt wird jedoch kein Blut aus dem systemischen Kreislauf angesaugt. Dies lässt sich auch durch die

Funktion des Herzens erkennen. Wenn die Lunge in der Lage wäre einen solch hohen Unterdruck aufzubauen, der die Herzklappen öffnen kann, dann hätte der betroffene Taucher wesentlich heftigere Probleme als Lungenverletzungen und müsste sich um den nächsten Tauchgang keine Gedanken mehr machen.

Damit ein Taucher einen Tieftauchgang jenseits der RV Grenze, Lungentechnisch gesehen, ohne Probleme überstehen kann, muss folgende Formel gelten:

$$RV = CLV + BSV$$

Wenn beim Abstieg sich das CLV schneller verkleinert als das BSV diese Differenz auffüllen kann wird es für den Taucher problematisch. Es kann abhängig von der Abstiegsgeschwindigkeit (Schlitten) und der dadurch raschen Verkleinerung des CLV zu Gefäßschäden kommen, da wie gesagt die Lungengefäße wesentlich dünnwandiger sind als die systemischen, wird es hier durch den mangelnden Druckausgleich zu Gefäßrupturen kommen.

Die diversen Schmerzbarrieren (Druckausgleich nicht möglich usw.) sollten diesen Fall eigentlich auf ein Minimum reduzieren und erst wenn man diese massiv überschreitet und ignoriert werden hier Schädigungen die Folge sein. Auch hier ist beim genannten Schlittentauchen die Gefährdung höher als beim Tauchen aus eigener Kraft.

Steigt der Taucher wieder auf, ohne dass es beim Abstieg zu Verletzungen kam und das BSV verringert sich langsamer als sich das CLV vergrößert, können die mechanischen Belastungen durch die sich ausdehnende Luft zwischen Alveolen und Blutgefäßen so stark werden, dass es zu Flüssigkeitsübertritten in die Alveolen (Ödembildung) oder auch zu Gefäß- oder Gewebeerstörungen kommen kann. Da diese Gefäße der Lunge über weniger glatte Muskulatur verfügen und nicht in Gewebe eingebettet sind, gestaltet sich bei der Dekompression der Rückfluss des Blutes in das systemische Gefäßsystem entsprechend verzögert.

Dieses Verhalten ergibt sich durch die Komprimierbarkeit der Luft, das sich Blut auf den wirkenden Druck der sich ausdehnenden Lunge konstant verhält und nicht komprimiert wird, den dünnwandigen Gefäßen und der entsprechenden Auswurfarbeit des Herzens, das auf diese Situation zunächst reagieren muss, denn dieser Faktor bestimmt wie viel Blut aus der Lunge transportiert werden kann. Die Luft dehnt sich schneller aus, als das Blut aus der Lunge transportiert wird, das belastet entsprechend die Stabilität der Gewebe und kann bei zu hoher Ausdehnungsgeschwindigkeit (was einer hohen Aufstiegs geschwindigkeit entspricht) zu Schäden im Lungenbereich führen.

Ein erfahrener Taucher mit dem entsprechenden Körpergefühl wird reagieren indem er seine Aufstiegs geschwindigkeit verringert oder gar pausiert. Die Option sehr dosiert Luft entweichen zu lassen birgt das Risiko beim Auftauchen oder an der Oberfläche einen Blackout zu erleiden.

Die Kapillargefäße der Alveolen sind sehr stark gefüllt und verengen somit den Raum für Atemluft und die Oberfläche, die für den Gasaustausch wichtig ist. Theoretisch könnte der Bloodshift beim Abstieg die Alveolen soweit einschnüren, dass kein Gasaustausch mehr stattfindet. Dies kann auch dazu führen dass sich sehr rasch der pH-Wert des Blutes kippt, was wiederum zusätzliche Gefahren darstellt.

Wenn man also zu schnell aus großer Tiefe aufsteigt und das Blut nicht die Kapillargefäße verlassen kann, kann es auch sein dass der Taucher an der Oberfläche beim Atmen feststellt, dass er in Atemnot ist, obwohl die Lunge keine Schäden hat. An dieser Stelle will ich darauf hinweisen, dass dieses Szenario beim so genannten Schlittentauchen eher der Fall sein wird, als beim Tauchen aus eigener Kraft. Da extreme Atemnot herrscht, sollte man Sauerstoff zum Atmen verabreichen. Dieser Zustand ist reversibel und die normale Atmung stellt sich nach kurzer Zeit wieder ein. In diesem Fall wirkt sich genau der angesprochene Verlust der verringerten Lungenoberfläche aus. Es wird nicht genügend Gas ausgetauscht obwohl die oberen Atemwege frei sind und definitiv genügend Atemluft zur Verfügung steht. Die spontane Regulation äußert sich in einer flachen Hyperventilation, bis sich das Blutvolumen in den Gefäßen wieder normalisiert hat und dadurch die normale Austauschfläche der Lunge wieder hergestellt ist.

Lässt das Atemnotgefühl nicht nach und äußern sich weitere Symptome eines Emphysems oder Lungenrupturen muss umgehend ein Arzt aufgesucht werden.

Stellt man nun, nach dem Auftauchen, bei sich die oben geschilderte Atemnot fest und hat keinen Blutauswurf, so hat man die Erkenntnis dass die momentane Leistungsgrenze erreicht ist. Aus diesem

Grund sollten die nächsten Tauchgänge der Konsolidierung dienen und nicht weiteren Steigerungen. In dieser Phase ist vor Erreichen der bisherigen Maximaltiefe die Abstiegs geschwindigkeit zu verringern und beim Aufstieg sollte man die letzten Meter langsamer aufsteigen, je tiefer man war, desto eher sollte man die Aufstiegs geschwindigkeit reduzieren.

Da diese Anpassung auf dem Trainingseffekt basiert, ist besonders nach langen Zeiträumen, wie der Saisonpause zur Vorsicht geraten, wenn man gleich wieder seine maximale Tiefe angehen will!

Ich vermeide hier absichtlich konkrete Tiefenwerte anzugeben, da der Bloodshift erst bei Unterschreiten des Residualvolumens einsetzt und das ist individuell verschieden. Je größer die Tiefen sind, die man erreicht, desto leichter wird die Adaption des Bloodshiftes bei noch größeren Tiefen, da sich die auszugleichenden Volumen ja auch immer kleiner gestalten. Wie schnell diese Adaption vonstatten geht, kann man nicht vorhersagen. Jedoch sind Geduld und Zeit hier die besten Ratgeber, denn mit der Brechstangenmethode wird man sich wahrscheinlich Verletzungen zuziehen, die entweder sehr langwierig sein werden oder sogar zur Aufgabe dieser Sportart zwingen.

Wie wirkt sich das BSV auf die Tauchtiefe aus?

Beziehe ich mich auf das Beispiel aus der Ausgangs- Formel und gebe der Person ein willkürlich festgelegtes Bloodshiftvolumen von 500 ml um dass das RV verringert wird, dann haben wir folgende Situation:

$$\begin{aligned} \text{RV} - \text{BSV} &= \text{CLV} \\ 1,25 \text{ L} - 0,5 \text{ L} &= 0,75 \text{ L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TLC} : \text{CLV} &= X \\ 5 \text{ L} : 0,75 \text{ L} &= 6,7 \end{aligned}$$

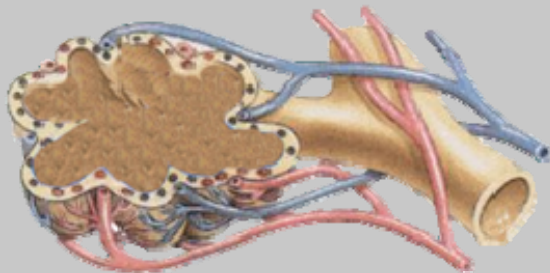
Jetzt erreicht die Person schon eine Tiefe von 57m.

Allein diese Verringerung um 0,5 L (- 40%) des RV auf das CLV von 0,75 L hat die die theoretische Tauchtiefe fast verdoppelt!

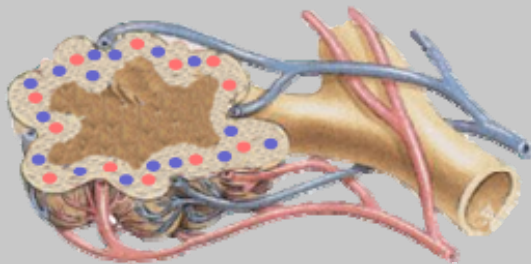
Um den gleichen Effekt durch eine Vergrößerung des TLC zu erreichen müsste die Person einen Volumenzuwachs von fast 3,4 L (+ 68%) erbringen.

Bei uns sind durch die begrenzte Dehnfähigkeit des Brustkorbes sowie des Zwerchfelles nach unten die ersten Grenzen der Lungendehnung erreicht. Diese kann man durch entsprechende gymnastische Übungen und Atemtraining verbessern. Übrigens in beide Richtungen also hinsichtlich maximaler, sowie minimaler Ausdehnung. Der Volumenzuwachs ist jedoch durch den relativ starren Thorax und hinsichtlich des Abquetschens der Hohlvenen am rechten Vorhof beim Anwenden des Packens durch die sich ausdehnende Lunge begrenzt.

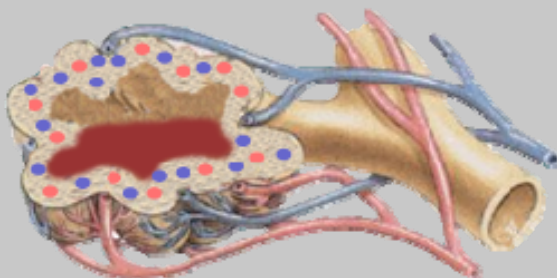
Durch dieses Training und der daraus resultierenden Optimierung der TLC (Vergrößerung) und des RV (Reduzierung) kann die Tauchtiefe beeinflusst werden. Rechnet man die oben genannte Formel mit 8,4 L TLC und 0,75 L CLV, kommt man schon auf eine Tauchtiefe von 102 m!



Alveole im Normalbetrieb



Alveole beim Bloodshift

Alveole beim Bloodshift mit Ödem
(NICHT REGELFALL sondern
Schädigung!)

Nun komme ich zu den Möglichkeiten das RV zu optimieren. Dazu möchte ich anmerken, das die Begriffe Leere Lunge und FRC tauchen zwar in der Umgangssprache der Freitaucher sich etabliert haben, jedoch sind auch sie irreführend. Es gibt keine leere Lunge (empty lung), denn in der gesunden menschlichen Lunge befindet sich immer Luftgemisch und bei der FRC ist es sehr schwierig dies entsprechend einzuhalten. Wie schon angesprochen wird genau das in der Freitauchszene gemacht was ich oben moniere, es wird ein feststehender, definierter Begriff genommen und wenn man den Diskussionen folgt, dann wird da noch etwas eingeatmet oder mehr ausgeatmet usw. In diesem Moment ist es eben kein FRC mehr. Nur um dem ganzen einen wissenschaftlichen Touch zu geben oder weil es an eigener Begriffsbildungskreativität mangelt, nimmt man hier einen bequemen Weg. Habe ich beim Bloodshift auch gemacht.

Leere Lunge ist ein Begriff aus dem Training des Apnoetauchens. Dieses Training kann teilweise trocken, im Schwimmbecken, sowie im Freiwasser auf unterschiedlichen Tiefen durchgeführt werden. Hierzu wird vor dem Abtauchen entsprechend ausgeatmet. Bei diesem Training atmet man bis maximal zum RV aus, demnach hätte man in diesem Fall nur noch den Mouthfill zum Druckausgleich zur Verfügung und das ist sehr wenig wenn man von der Oberfläche tieftaucht.

Da bei diesem Training der Sauerstoffvorrat bewusst reduziert wird, besteht hier natürlich eine wesentlich höhere Gefahr einer Synkope (Ohnmacht), als bei einem Standardtraining, in dem man in solchen Tiefen, Tauchzeiten oder Strecken normalerweise keine Probleme hat. Deshalb muss der Tauchpartner bei dieser Art Übung extrem wachsam sein!

FRC steht für funktionale Residualkapazität und ist das Luftvolumen, das nach einer normalen Ausatmung noch in der Lunge verbleibt.

Bei der Erforschung von Robben und Delfinen hat man beobachtet, dass diese vor dem Abtauchen ausatmen. Durch diese Maßnahme stellt die Lunge nur noch einen reduzierten Auftriebskörper dar, dessen Auftriebskraft nicht mehr überwunden werden muss. Auch lassen sich diese Tiere ab bestimmten Tiefen einfach sinken und sparen durch die minimierte Muskelarbeit Sauerstoff für die Jagd in der Tiefe.

Einige Freitaucher kamen nun auf die Idee dieses Verhalten zu kopieren und versahen diese Art des Tauchens mit dem Begriff FRC-Tauchen. Eine Kopie 1:1 zur Tierwelt kann natürlich nicht realisiert werden, da der Mensch auf seine Lunge als Sauerstoffspeicher angewiesen ist und auch noch eine Menge anderer Faktoren dagegen sprechen. Ein kleiner aber nicht unwichtiger Hinweis, ist die unterschiedliche Evolutionsgeschichte und es belustigt mich doch wie hier verzweifelt nach Gemeinsamkeiten zwischen Meeressäugern oder tauchenden Säugetieren und dem Menschen gesucht und teilweise einfach mal visionäre Fantasien entwickelt werden, dass hier identische Ressourcen auch nur annähernd angezapft werden könnten.

Man stelle sich nur vor, jemand rupft einen Albatros, wiegt ihn und dann seine Federn. Danach rechnet

diese Person die für sein Körpergewicht benötigte Masse an Federn aus und befestigt diese an seinem Körper. Wie sehen wohl seine Chancen aus tausende von Meilen über den Ozean zu fliegen? Ich gebe zu das die Landung der Albatrosse mit der dieser Person verblüffende Ähnlichkeit haben wird, aber sonst werden sich nicht viele Gemeinsamkeiten ableiten lassen. Die Sache mit den Wasserraffen will ich hier erst gar nicht aufgreifen. Genug gescherzt.

Manche vertreten die Meinung, das FRC Tauchen wird eine neue Ära im Wettkampfbereich einläuten. Grob gesagt glauben sie das durch den geringeren Energiebedarf beim Abtauchen, durch den geringeren Auftrieb und das reduzierte mitgeführte Bleigewicht und der nicht benötigten oder mäßigen Flossenarbeit in der Zukunft größere Tiefen erreicht werden. Das reduzierte Bleigewicht soll den Aufstieg erleichtern, was nachvollziehbar ist, jedoch wird durch die Reduzierung des Bleigewichtes auch die Sinkgeschwindigkeit verlangsamt. Man befindet sich hinsichtlich der Sinkgeschwindigkeit, auf dem gleichen Level wie zuvor, oder die Gewichtsreduzierung fällt so geringfügig aus, dass sie beim Aufstieg nicht zur Wirkung kommt. Lässt man das Gewicht gleich, so verliert man beim Aufstieg den Vorteil den ein geringeres Gewicht mit sich bringt.

Als weitere Vorteile werden ein verringertes Risiko hinsichtlich des Tiefenrausches, der CO2 Problematik und der O2 Toxizität angeführt. Da alles hier abzuhandeln sprengt den Rahmen des Artikels und wurde von mir auch in anderen Artikeln dargelegt.

Durch das Packen und die dadurch mögliche Abquetschung der Hohlvenen und der daraus resultierenden Minderdurchblutung des Gehirns wird als wesentlicher Nachteil des hergebrachten Apnoetauchens angeführt, die nicht prall gefüllte Lunge wird dementsprechend als Vorteil des FRC Tauchens dargestellt. Letzteres mag für den Freizeittaucher ein interessanter Aspekt sein, nicht für die bisherigen Athleten der Tiefenrekorde. Ich persönlich packe auch nicht und tauche mit TLC, ich habe auch den Vorteil über eine große Lunge zu verfügen und ich seit dem zwölften Lebensjahr nur noch passiv geraucht habe.

Wenn ich bei den Darlegungen des FRC mich auf eben nur das Atemzugvolumen beziehe, dann sprechen wir hier von Mengen im Bereich von 0,5 L Luft. Es mag sich nun jeder selbst ausrechnen wie stark sein Risiko einen Tiefenrausch, eine Sauerstoffvergiftung oder Probleme mit dem CO2 zu erfahren, verringert.

Wird hingegen über das FRC hinaus abgeatmet, dann wird durch diese Reduzierung des Lungenvolumens auch der Sauerstoffvorrat des Tauchers entsprechend minimiert und da der Mensch im Gegensatz zu tauchenden Säugetieren außer der Lunge über keine weiteren Sauerstoffspeicher verfügt, wird somit auch die Tauchzeit reduziert. Das Blut sehe ich nicht als Speichermedium an sondern als Transportmedium. Die Legende des Sauerstoffspeichers Milz ist, für den Menschen, wissenschaftlich widerlegt. Es ist korrekt, dass die Milz bei Problemen mit dem blutbildenden Knochenmarks auch im Alter wieder zu einem blutbildenden Organ reaktiviert werden kann, jedoch muss dieses ja zunächst zur Lunge um dort mit Sauerstoff angereichert zu werden. Das sich in der Milz befindliche Blut ist durchfließend und nicht gespeichert (die Milz in ihrer Filterfunktion), dieses ist schon mit Sauerstoff angereichert, stellt aber keine zusätzliche Erhöhung der Sauerstoffreserve dar, denn wie erwähnt befindet sich dieses Blut im Umlauf.

Als weiteres Argument wird die Reduzierung des DCS (Dekompressionserkrankung) Risiko als weiterer positiver Nebeneffekt angepriesen, da der Taucher eine geringere Menge Stickstoff aufnimmt. Das DCS Risiko wird in dem Artikel Dekompression ausführlich behandelt und auch hier kann ich nur auf die "eingesparte" Menge verweisen, die nicht in das Gewebe eingelagert wird.

Die höhere Aufstiegs geschwindigkeit als bei normalen Aufstiegen, sowie die Faktoren Auskühlung und mögliche Muskelverletzungen mit einhergehender Vernarbung spielen eine Rolle, die meiner Meinung nach die Risiken hinsichtlich der DCI eher erhöhen, als sie zu verringern.

Diese Art des Tauchens wird im Spitzensport keine Rekordtiefen ermöglichen und bislang sind die Vertreter dieser Tauchtechnik auch den Beweis schuldig geblieben, dass mit dieser Technik größere Tiefen erreicht werden könnten. Für das Jahr 2009 hat der größte Verfechter dieser Tauchtechnik angekündigt den Weltrekord im CNF neu aufzustellen. Der Rekord liegt derzeit bei 86 m und die Person hat bislang 67 m getaucht und dafür seit 2005 trainiert und will sich innerhalb eines Jahres um 20 m steigern, Respekt.

Ich beende diese Exkursion hier und wende mich wieder den praktischen Dingen des Apnoetauchens zu.

Was wird durch das "leere Lunge" Training erreicht?

- Üben des Druckausgleiches unter annähernd Residualvolumenbedingungen bei wesentlich geringeren Tiefen
- Dehnung der betroffenen Muskeln und Adaption der Dehnungsrezeptoren an die Volumenreduzierung des Brustraumes
- Erfahrung des Gefühles der maximalen Volumenreduzierung auf geringerer Tiefe

Der Taucher atmet vor dem Abtauchen aus, wie viel er ausatmet hängt von seinem Trainingszustand ab. Hierdurch verringert er seine verfügbare Lungenkapazität und seine Lunge wird dadurch natürlich früher an das Residualvolumen herangeführt als dies bei einem Tauchgang mit normal gefüllter Lunge der Fall wäre. Wenn man nur mit 50% gefüllter Lunge abtaucht erreicht man in 10 Meter Tiefe eine theoretische Trainingstiefe von 20 Metern. Wenn man entsprechend mehr abatmet, kann man auf 3 Meter Tiefe im Schwimmbad den Druckausgleich auf einer dann wesentlich höheren Trainingstiefe üben. Nicht das wir uns hier falsch verstehen, es wird der Ablauf des Druckausgleiches mit weniger Luft geübt. Die Druckdifferenz zu 10 oder 20 Meter kann so natürlich nicht geübt werden. Die Druckausgleichstechnik muss man intuitiv beherrschen, denn in größeren Tiefen funktioniert eine Methode eventuell nicht mehr. Im Artikel Druckausgleich wird auf die unterschiedlichen Methoden näher eingegangen.

Die Atemhilfsmuskulatur des Thorax wird unter diesen Bedingungen anders belastet, als wenn man bei Trockenübungen komplett abatmet, da hier nur die eigene Muskelkraft und der herrschend Luftdruck als Minimierungsfaktoren wirken. Beim Tiefentraining wirkt zusätzlich der Wasserdruck, der die Komprimierung noch etwas verstärkt, was natürlich auch von der entsprechenden Wassertiefe abhängig ist. Man kann sich auch ein Behältnis konstruieren, das mit einer Absperrvorrichtung versehen ist und auf Tiefe diese in das Gefäß abatmen. Danach etwas tiefer tauchen und dabei den Druckausgleich üben oder sich an das Gefühl der Kompression gewöhnen. Diese Methode hat den Vorteil, dass man bei "Problemchen" die Luft wieder aufnehmen kann und ohne Hast den Aufstieg angehen kann. Trockenübungen sind eine hervorragende Vorbereitung und werden durch das Nasstraining ergänzt und vervollkommen. Dieses Training reduziert durch den Gewöhnungseffekt auch den Atemreiz durch die Dehnungsrezeptoren des komprimierten Thorax.

Hier spielt nun auch das Yogatraining hinein, da durch bestimmte Atemtechniken diese Flexibilität erreicht wird. Die wenigsten Freitaucher leben Yoga, die meisten praktizieren lediglich einige Übungen daraus.

Die Psyche spielt beim Freitauchen eine wesentliche Rolle und der Mensch kann auf Situationen am Besten reagieren wenn er mögliche Situationen in einer kontrollierten Umgebung schon einmal erfahren hat und sich nicht erst im Moment der unkontrollierten Konfrontation mit einer neuen Situation befassen muss.

Mit diesem Training erlebt man die Reaktion des Körpers und kennt das Gefühl schon, wenn die Lunge auf das Residualvolumen reduziert wird und sich Thorax und Zwerchfell extrem verformen.

Diese gesamten Erfahrungen versetzen den Taucher in die Lage mental einen Tauchgang durchzugehen um auf bestimmte Situationen vorbereitet zu sein. Je weniger unbekannte Faktoren sich bei dieser Tauchgangsimulation für den Taucher ergeben, desto besser ist man vorbereitet, denn Überraschungen beeinträchtigen immer die Reaktionszeit oder sogar ein korrektes Reaktionsvermögen.

Theoretisches Wissen ist zwar wichtig, jedoch ist die praktische Erfahrung in diesem Fall nicht zu ersetzen.

Mit diesem Training kann man im Flachwasser das Bloodshiftverhalten der Lunge, wenn überhaupt, nur in einem sehr geringen Maße verbessern. Dies ergibt sich neben der Abhängigkeit des Residualvolumens, dadurch dass primär der herrschende Druck den Bloodshift beeinflusst und der Druck kann mit diesem Training nicht simuliert werden. Beim Trockentraining kann man über das RV nicht abatmen und damit erfolgt auch kein Bloodshift.

Das umgeschichtete Blutvolumen von den Extremitäten in den Thorax ist ja schon durch den Immersionseffekt relativ hoch und bedingt durch die durch die Komprimierung der Alveolen entstehende Unterdruck wird dadurch die schon vorhandene Blutmenge ja ausgeglichen. Hier wird dann eher der Diurese-Effekt gemildert.

Den Trainingseffekt für den Bloodshift in geringen Tiefen (Schwimmbad) muss man somit als wertlos einstufen, da die auslösenden Faktoren nicht vorhanden sind. Wenn man also die KapillargefäÙe an den Bloodshift-Effekt gewöhnen will, wird um das langwierige Tiefentraining am Anfang nicht herumkommen. Allerdings hat man den Vorteil, dass die Atemmuskulatur schon auf die entsprechende Volumenänderung trainiert ist und die Druckausgleichstechnik beherrscht wird.

Noch ein Hinweis zum Training: Wenn man sich mit Gewicht auf Tiefe bringen will, dann muss man dafür Sorge tragen, dass bei auftretenden Problemen die Trennung von diesem Gewicht unverzüglich erfolgen kann. Sollten erst einige Sekunden vergehen um den Ballast abwerfen zu können, kann es schon zu spät sein. Im Freiwasser kann man zum Beispiel die gewünschte Trainingstiefe mit der entsprechenden Seillänge und Gewicht am Ende des Seiles fixieren und dadurch auf Tiefe kommen. Man selbst hält sich dabei dort am Seil fest, deren Tiefe man gut beherrscht und taucht dann die letzten Meter aus eigener Kraft. Bei Problemen kann man das Seil loslassen und bleibt auf der Problemtiefe und das Blei geht auch nicht verloren. Dann besteht die Möglichkeit etwas aufzutauchen, bis sich das Problem beheben lässt. Anfangs sollten diese Tiefe langsamer erreicht werden und erst wenn diese Tiefe beherrscht wird, kann die Geschwindigkeit mit der ab- und aufgetaucht wird, schrittweise angepasst werden. Übrigens sollte man das Einziehen des Seiles mit dem Gewicht nicht als lästiges Übel, sondern als zusätzliches Muskeltraining sehen. Und dabei auf die richtige Körperhaltung achten, damit der Rücken geschont wird und ist beim Bojentauchen weniger geeignet. Wenn ein Schlitten verwendet wird muss entweder das eigene Lösen vom Schlitten oder die Handhabung der Bremse quasi im Schlaf beherrscht werden, damit Schädigungen vermieden werden.

Seit einiger Zeit haben sich Begriffe wie **Reversal-Packing** oder **Forced expiration** entwickelt. Beide Begriffe beziehen sich auf eine Trainingsmethode, die nichts anderes bewirkt, als dass das RV weiter reduziert wird. Obwohl die reduzierte Menge sich in einem Bereich von wenigen ml bewegt und geübte Apnoeisten im Durchschnitt 100 ml einer weiteren Reduzierung des RV erreichen, ergeben sich hierdurch verhältnismäßig große Schritte, was die theoretische Tauchtiefe angeht. Die Formel bleibt gleich, da es keinen zusätzlichen Wert in dem Sinn gibt, da dieses Training lediglich eine verschärfte Art der Dehnung durch die Erzeugung eines relativen Unterdruckes ist. Aus Darstellungsgründen, nenne ich sie hier RV_{Δ} . Wenn ich Bezug auf das neu erreichte RV nehme, werde ich RV_{Δ} schreiben. RV_{Δ} stellt also keinen neuen Begriff dar, sondern soll das neue RV des Athleten symbolisieren, das durch dieses Training erreicht wird.

Ich nehme die Ausgangswerte der Ausgangswerte und eine Verringerung des RV um 100 ml an.

$$TLC : (RV_{\Delta} - BSV)=X$$

$$5 L : (1,15 L - 0,5 L)= 7,7$$

Die Reduzierung um 100 ml brachte in diesem Fall einen Tiefenvorteil von 10 m!

Diese Methode muss man sich wie das umgekehrte Lung-Packing vorstellen. Anstatt zusätzliche Luft in die Lunge zu pressen wird hier nun versucht soviel Luft wie möglich aus der Lunge herauszupressen und zu saugen.

Man atmet soweit aus bis man dies nicht mehr kann. In dem Moment des Erreichens des RV verschließt man die Luftröhre. Da man in der Regel die Atemmuskulatur zum Ausatmen verwendet, merkt man dann schon beim Entspannen der Muskulatur wie sich ein Sog am verschlossenen Kehlkopf bildet. Anfangs ist dies natürlich ein mehr oder weniger unangenehmes Gefühl und man sollte versuchen es so lange wie möglich zu halten. Mit der Zeit "gewöhnen" sich die beteiligten Körperteile daran und man wird feststellen, dass man etwas mehr Luft herauspressen kann. Anhand der geringen Menge, die von Profis erreicht wird bitte ich zu bedenken, dass wir bei diesem Training über Luftmengen reden, deren Steigerungswerte sich in Bereichen des Volumens eines Schnapsglases bewegen!

Da die Alveolen ja jetzt etwas mehr komprimiert werden als gewohnt, stellt sich bei manchen die Frage ob dies einen Bloodshift bewirkt.

Wenn wir etwas mehr Luft aus der Lunge herauspressen können, dann sind das ja nur wenige ml und nicht 100 ml auf einmal. Das bedeutet zunächst einmal, dass wir uns im RV Limit bewegen und es erfolgt noch kein Bloodshift. Was hier abläuft ist dem Spagat üben nicht ganz unähnlich, die Dehnung der beteiligten Muskeln und Organe wird optimiert.

Die Lunge wird bekannter weise permanent durchblutet, wenn wir nun ausatmen wird ja nicht sofort das komplette Blut aus der Lunge befördert und die Lunge kann sich ja wie oben erläutert entsprechend anpassen.

Auch wenn man sich nun bis zum Hals ins Wasser stellt, stellt sich die Situation nur geringfügig verändert dar.

Das Herz reagiert auf das venös anströmende Blut und löst durch die Sensorik diverse Programme aus. Die Lunge kann ohne Probleme zunächst die anfallende Blutmenge auffangen und wird dann durch die Diurese entlastet. Hier wird auch der Zustand der Lunge eine Rolle spielen, ist sie aus irgendwelchen Gründen, sei es nun durch Tabakkonsum oder Krankheitsbedingt, im Aufnahmevolumen begrenzt, wird die Diurese früher einsetzen und dadurch den Volumenausgleich vollziehen.

Auch wenn man in dieser Situation abatmet und wenn es gelingt das RV in diesem Moment etwas zu verringern, steht genügend Blut zur Verfügung und es wird kein zusätzliches Blut "angesogen".

Obwohl sich die Lungenvolumina nur geringfügig durch den Druck ändern, steht ausreichend Blut zur Verfügung und selbst im RV Zustand bestünde nicht die Notwendigkeit zusätzliches Blut zu beschaffen. Die Theorie mit dem Verbessern des Bloodshiftverhaltens steht hier auf sehr wackeligen Beinen.

Für mich ist dieses Training eine effektive Komprimierungsübung, die die Beteiligten Organe/Körperteile weiter in ihrer Elastizität fördert und durch die Verringerung des RV, die nachweislich erbracht werden kann, ermöglicht es dieses Training in größere Tiefen zu tauchen ohne das "Feature" Bloodshift schon zu benötigen. Dadurch setzt der Bloodshift später ein, der durch den Vorgang des Volumenfüllens die weitere Reduzierung der Lunge durch den externen Druck ausgleicht.

QUELLEN:

- Prof. Dr. Reinhard Haidmayer Atmung und Gasaustausch
- Moderne Tauchmedizin (Klingmann, Tetzlaff) ISBN 9 783872 476456
- Bau und Funktion des menschlichen Körpers ISBN 9 783437 261909