

Stickstoff plus Sauerstoff = Nitrox?

Diese Präsentation wurde bei der TSVÖ Tauchlehrertagung 2015 in Traunkirchen vorgetragen.

Markus A. Schafheutle (familie.schafheutle@aon.at)

Unsere Atemluft, die wir auch gerne als Pressluft in unsere Tauchflaschen füllen, setzt sich zusammen aus Stickstoff und Sauerstoff, plus noch einige andere Gase. Weichen wir vom Standardverhältnis $N_2:O_2$ von ca. 79:21 ab und geben mehr Sauerstoff hinzu, sprechen wir von Nitrox. Aufgrund des reduzierten Stickstoffanteils in diesem künstlichen Gemisch, versprechen wir uns reduzierte Dekompressionszeiten bzw. verlängerte Nullzeiten. Vordergründig betrachtet sind die Vorteile somit wohl offensichtlich:

Länger und / oder sicherer Tauchen bei weniger Deko!

Gilt dieses einfache Statement immer? Ist die lange Grund-Zeit und kurze Deko-Zeit immer das Einzige, was einen Taucher interessiert? Gibt es auch eine Qualität der Dekompression? Wenn ja, wie würden wir sie definieren? Wann würden wir Ausnahmen von der o.g. Grundannahme machen? Und warum?

In diesem Artikel werden drei „gleiche“ Tauchgänge, die sich nur durch die Verwendung verschiedener Gase unterscheiden, exemplarisch Schritt für Schritt analysiert. Dabei wird untersucht, welche Unterschiede sich bezüglich der Stickstoff-Sättigung und der Blasenbildung ergeben.

Inhalt

1. Sättigungsphase - Kompartimente und Halbsättigungszeiten
2. Entsättigungsphase
 - 2.1 Blasenbildung und ihr Wachstum bzw. Schrumpfen
 - 2.1.1 Binnendruck und Oberflächenspannung
 - 2.1.2 Kritischer Radius
 - 2.2 Stickstoffgradienten und Übersättigung im Blut
 - 2.3 Sauerstofffenster
 - 2.3.1 Definition
 - 2.3.2 Auf- und Entsättigung von Blut und Blasen unterschiedlicher Größe und welche kritischen Radien sich ergeben
 - 2.4 Schlussfolgerungen
 - 2.4.1 Vergleich der 3 Szenarien
 - 2.4.2 Sauerstofftoxizität
 - 2.4.3 Jo-Jo-Tauchen
3. Schluss
4. Referenzen

1. Sättigungsphase – Kompartimente und Halbsättigungszeiten

In der Abtauch- oder Sättigungsphase erhöhen wir den Umgebungsdruck. Dadurch kann Stickstoff aus der Atemluft über die Lunge ins Blut diffundieren und von dort in die anderen Körpergewebe. Die Löslichkeit von Stickstoff als Funktion des Umgebungsdrucks wird in den verschie-

**Welches Gas würdet Ihr bei einem
Lufttauchgang als Sicherheitsreserve unter
das Boot auf Deko-Tiefe hängen?**

denen Flüssigkeiten durch das Henry'sche Gesetz ($pp_{Gas} \propto c_{Gas}$; pp_{Gas} : Partialdruck des betrachteten Gases; c_{Gas} : Konzentration des betrachteten Gases in der Lösung) beschrieben. Entsprechend wird angenommen, die Löslichkeit

Zur besseren Lesbarkeit wird in diesem Artikel das Wort Taucher geschlechtsneutral verwendet.

von Gasen in Körpergeweben sei proportional zum Partialdruck des betreffenden in der angrenzenden Gasphase. Der Partialdruck ist der Anteil des betreffenden Gases am Gesamtdruck in der Gasphase. Bei Normal-Luftdruck (1013 hPa \approx 1 bar) in Meereshöhe beträgt der Partialdruck von N₂ beispielsweise 0,79*1013 hPa = 800 hPa). Dieses Gesetz beschreibt aber nur den Gleichgewichtszustand, also die komplette Sättigung. Der Weg dorthin, die Kinetik, wird vom Fick'schen Gesetz

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (J: \text{Massenstrom}, D: \text{Diffusionskoeffizient}, x: \text{Weg})$$

beschrieben. Die Stickstofflöslichkeit im Gleichgewicht, aber auch die Diffusionsgeschwindigkeit (beschrieben durch D), ist abhängig vom Gewebe selbst und der Durchblutung des Gewebes. In den mathematischen Dekompressionsmodellen (Haldane, Bühlmann¹) und andere wird dieses unterschiedliche Verhalten durch Halbsättigungszeiten beschrieben. Die Halbsättigungszeiten geben die Zeit an, die ein gegebenes Gewebe braucht, um vom Zustand vor der Druckerhöhung oder -reduktion aus, die Hälfte der neuen Gleichgewichtskonzentration zu erreichen. In Abbildung 1 ist dieses Sättigungsverhalten des Blutes für eine Umgebungsdruckzunahme von 1 auf 2 bar mit Luftatmung exemplarisch dargestellt. Blut wird eine Halbsättigungszeit von ca. 4 bis 5 Minuten zugeschrieben. Nach ca. 5 bis 6 Halbsättigungszeiten auf dem neuen Druckniveau hat man annähernd den Gleichgewichtszustand erreicht. In der Praxis spricht man dann von 100% Sättigung, bzw. Entsättigung. Für das Blut ist dieser Zustand nach ca. 25 bis 30 Minuten erreicht. Blut ist das „schnellste“ Gewebe in unserem Körper. Die anderen brauchen entsprechend länger. Bühlmann nimmt für das langsamste eine Halbsättigungszeit von 635 Minuten an²).

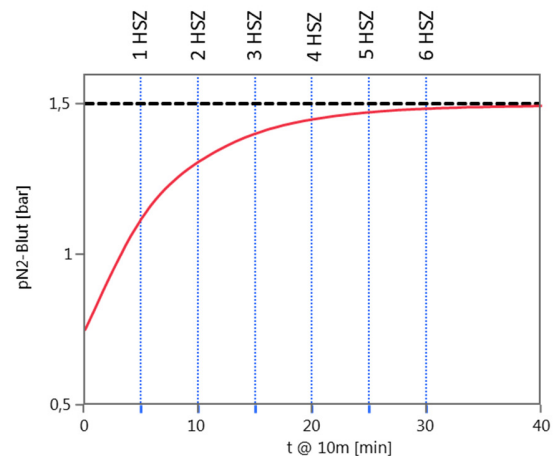


Abb. 1: Anstieg des Stickstoffpartialdrucks (pN₂) im Blut bei einem Drucksprung von 1 auf 2 bar. Die Halbsättigungszeit (HSZ) von Blut ist ca. 5 Minuten. Nach 5 bis 6 HSZ ist das Blut praktisch gesättigt.

Entsättigungsphase

In der Auftauchphase des Tauchgangs findet eine Druckentlastung statt. Der während des Tauchgangs gelöste Stickstoff ist jetzt zu viel im Körper. Wir sprechen von einer Übersättigung. Dieser zu viel gelöste Stickstoff muss jetzt wieder abgegeben werden. Kritisch für eine schnelle und symptomfreie Dekompression sind:

- Der Stickstoffgradient: Er sollte möglichst groß sein, um eine schnelle Diffusion zu erzielen.
- Die Stickstoffübersättigung: Sie sollte möglichst klein sein, um ein Blasenwachstum zu verhindern.

Die Kunst besteht also darin, den besten Kompromiss zwischen diesen beiden Größen zu finden.

2.1 Blasenbildung und ihr Wachstum bzw. Schrumpfen

Symptomlose Blasen sind immer im Körper vorhanden. Sie entstehen an „rauen“ Oberflächen in den Blutgefäßen (Narben, Ablagerungen, etc.) oder an Kavitäten (Unterdruckbereiche) wie z.B. hinter den Herzklappen. An der Oberfläche oder bei Druckniveaus, bei denen wir gesättigt sind, verschwinden diese Blasen wieder nach sehr kurzer Zeit.



Abb. 2: Entstehung von Gasblasen aus einer flüssigen Lösung an Oberflächendefekten des Gefäßes. Die Blasen wachsen an diesen Stellen, bis der Auftrieb die Adhäsion überwiegt. Dann lösen sie sich ab und eine neue Blase kann sich an dieser Stelle bilden. Diese Abbildung ist von J. Mair³⁾.



Abb. 3: Ausschnitt aus einem Blutgefäß, in dem sich Blasen gebildet haben⁴⁾.

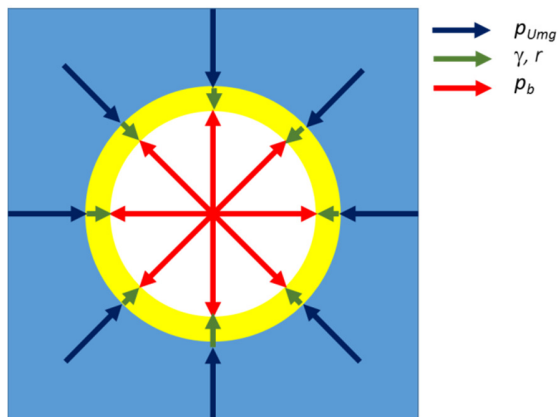


Abb. 4: Modell einer Gasblase. Die roten Pfeile stellen den Innendruck der Blase dar (p_B), die blauen den Umgebungsdruck (p_{Umg}) und die grünen der Druck, der zusätzlich zum Umgebungsdruck dem Innendruck entgegen wirkt. Dieser Druck ist abhängig von der Oberflächenspannung (γ) und dem Radius (r) der Blase.

Abbildungen 2 und 3 zeigen Beispiele von Oberflächen-„Defekten“, an denen Gasblasen entstehen können. Den gleichen Effekt haben wir auch in Trinkgläsern, die mit kohlenstoffhaltigen Getränken gefüllt sind. Dort entstehen die Blasen auch immer an den gleichen Stellen, wachsen, lösen sich ab und dann wächst an der gleichen Stelle die nächste Blase. Der Grund dafür liegt darin, dass die Energie, die benötigt wird, um eine Blase zu bilden, viel zu groß ist, um in der freien Flüssigkeit aufzutreten. Die Defekte dienen als Katalysatoren, die diese Bildungsenergie erniedrigen.

2.1.1 Binnendruck und Oberflächenspannung

Abbildung 4 zeigt das Modell einer Gasblase. Solch eine Blase kann mit einem Luftballon verglichen werden. Solange der Gasdruck im Ballon gleich ist, wie der Außendruck um den Ballon, ist dieser Ballon schlapp und unrunder. Bringt man den Ballon durch Aufblasen auf Spannung, dann ist der Innendruck größer als der Außendruck. Den Unterschied macht der zusätzliche Druck durch die Elastizität des Ballongummis aus. Überträgt man dies auf eine Gasblase, so entspricht die Oberflächenspannung der Grenzfläche zur Flüssigkeit dem zusätzlichen Druck durch die Gummielastizität der Ballonhülle. Sowohl der Luftballon als auch die Gasblase wird immer durch Zugabe von Gas soweit wachsen, bis Innendruck (p_B), Außendruck (p_{Umg}), Radius (r) und Oberflächenspannung (γ) im Gleichgewicht stehen⁵⁾. Mathematisch wird dieses Gleichgewicht so beschrieben:

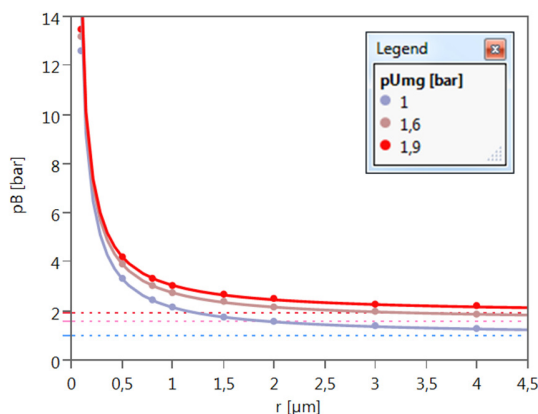


Abb. 5: Verlauf des Innendrucks in einer Gasblase als Funktion des Blasenradius (r) und des Umgebungsdruckes (p_{Umg}). Für sehr kleine Blasen können die Innendrucke (p_B) sehr groß werden. ($\sigma_{Blut}=0,058N/m$)

$$p_B = p_{Umg} + \frac{2\gamma}{r}$$

Anders gesagt: Um den Betrag des Umgebungsdrucks verschoben, ist der Blaseninnendruck umgekehrt proportional zum Blasenradius. Abbildung 5 zeigt dieses Verhalten des Blaseninnendruckes für Blut als Funktion des Radius' der Blase. Für kleine Blasen können dabei sehr hohe Drücke entstehen. Z.B. werden für einen Radius von 0,1 µm ca. 13 bar erreicht. Je größer eine Blase wird, umso kleiner wird die Differenz zwischen Innen- und Umgebungsdruck. In Abbildung 5 sieht man auch sehr deutlich die Parallelverschiebung durch verschiedene Umgebungsdrücke.

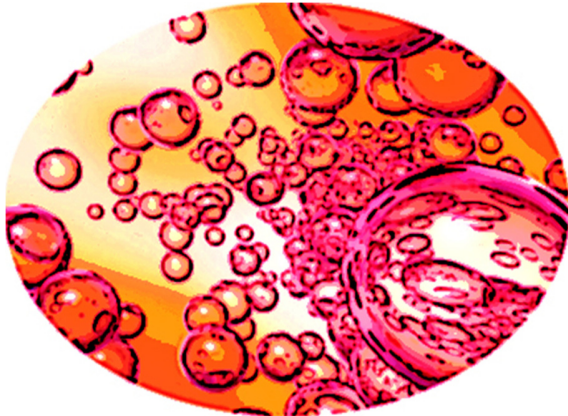


Abb. 6: Ausschnitt aus einem Blutgefäß, in dem sich Blasen gebildet haben. Nicht alle Blasen sind gleich groß. Es gibt viele kleine, einige mittlere und wenige große Blasen.

2.1.2 Kritischer Radius

Eine Gasblase in einer Flüssigkeit wird solange wachsen, bis die Konzentration des gelösten Gases (c_{Gas} oder τ) in dieser Flüssigkeit, im Gleichgewicht zum Innendruck dieses Gases in der Blase steht. Der Radius, der dann erreicht wird (zum Vergleich: Beenden des Aufblasens eines Luftballons) kann dann als Verhältnis aus Oberflächenspannung (γ) und Übersättigung ($p_{\text{Übersätt}} = \tau - p_{\text{Umg}}$) beschrieben werden. Dieser Gleichgewichtsradius wird kritischer Radius genannt:

$$r_c = \frac{2\gamma}{\tau - p_{\text{Umg}}}$$

Durch Umformung dieser Gleichung kann jeder Übersättigung ein kritischer Radius zugeordnet werden:

$$p_{\text{Übersätt}} = \tau - p_{\text{Umg}} = \frac{2\gamma}{r_c}$$

Der kritische Radius ist umgekehrt proportional zur Übersättigung. Würde man die Übersättigung weiter erhöhen, z.B. durch Reduktion des Umgebungsdrucks, würde der kritische Radius kleiner werden. Durch Reduktion der Übersättigung, z.B. durch Abatmen des überschüssigen Gases, wird der kritische Radius größer.

Was bedeutet der kritische Radius für das Wachsen oder Schrumpfen realer Blasen? Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt aus einem Blutgefäß, in dem sich Gasblasen gebildet haben. Wie man leicht sieht, sind nicht alle Blasen gleich groß. Es gibt viele kleine, etwas weniger mittlere und sehr wenige große. Sortiert man diese Blasen nach Größe in Kästchen und zählt nach, wie viele man von jeder Größe hat, und trägt diese Anzahl in ein Histogramm (Abb. 7) ein, so erhält man eine Verteilungsfunktion. Wie man sieht, sind die großen Blasen ($> 7 - 8 \mu\text{m}$) selten – die Säule im Histogramm ist klein. Der kritische Radius (r_c) gibt die Blasengröße an, ab der größere Blasen weiter wachsen und kleinere schrumpfen. Jetzt wird klar, weshalb ein großer kritischer Radius sehr

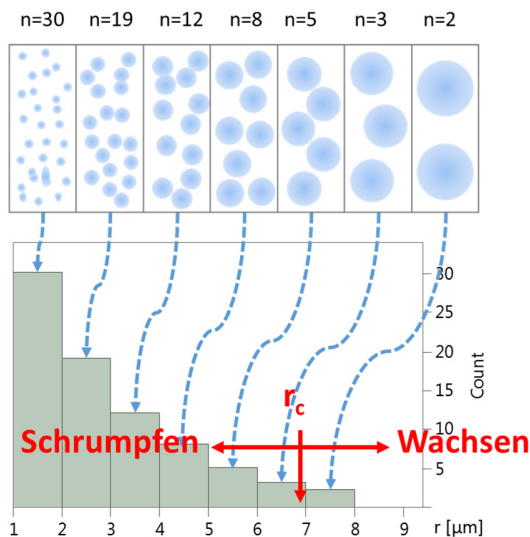


Abb. 7: Histogramm der Gasblasen Größenverteilung (nach⁶). Die Blasen werden in ihrer Größe sortiert und dann gezählt. Je mehr Blasen einer Größe (Radius: r) gezählt werden, umso höher wird die Säule im Histogramm. Der kritische Radius (r_c) zeigt die Grenze an, bis zu der Blasen schrumpfen und ab wann sie wachsen. Ein großer kritischer Radius lässt die meisten Blasen schrumpfen.

viele Blasen schrumpfen lässt. Je kleiner der kritische Radius ist, umso weniger Blasen werden schrumpfen und umso mehr werden wachsen.

Für den Taucher in der Druckentlastungsphase bedeutet das, dass er die Übersättigung klein halten muss. Der Umgebungsdruck darf nur wenig unter dem Druck des gelösten Gases (τ) liegen. Deshalb haben wir eine langsame Auf-tauchgeschwindigkeit und Deep- oder Pyle-Stopps einzuhalten.

Die wenigen größeren Blasen, die größer sind als der kritische Radius, werden mit dem Blut in die Lunge transportiert. Dort bleiben sie aufgrund ihrer Größe in den Kapillaren der Blutgefäße hängen. Da das Blut in den Kapillargefäßen der Lunge in direktem Austausch mit dem Atemgas steht, ist dort die Übersättigung immer am geringsten. Damit ist der kritische Radius am größten und diese Blasen können dort ebenfalls schrumpfen und verschwinden.

2.2 Stickstoffgradient und Übersättigung im Blut

Um die Stickstoffgradienten und Stickstoffübersättigungen im Blut zu vergleichen, betrachten wir einen typischen Sporttauchgang: 30 m Tiefe und 40 Minuten Grundzeit.

Rufen wir uns die Halbsättigungszeit von Blut ins Gedächtnis: Nach 25 bis 30 Minuten auf Druckniveau ist das Blut praktisch gesättigt. Somit ist ein 40-Minuten-Tauchgang ist für das Blut bereits ein Sättigungstauchgang!

Wir betrachten für diesen Vergleich drei verschiedene mögliche Atemgas-Varianten⁷⁾: ein Lufttauchgang mit Sauerstoffdekompression ab 6 m Wassertiefe, ein Lufttauchgang mit Nitrox-80 (N80) Dekompression ab 9 m Wassertiefe und ein Tauchgang, der nur mit Nitrox-32 (N32) durchgeführt wurde. Nitrox-80 ist ein Gasgemisch aus 20% Stickstoff und 80% Sauerstoff. Nitrox-32 bedeutet entsprechend ein Verhältnis von N₂ zu O₂ von 68 zu 32%. In Tabelle 1 sind diese Tauchprofile wiedergegeben.

Tab. 1: Tauchprofile berechnet mit V-Planner Software⁷⁾

Tiefe	Zeit	Run-time	Gas
30	38,5	40	Luft
12	0,5	43	Luft
9	3	46	Luft
6	9	55	O ₂
0		56	

1: Lufttauchgang und Sauerstoff (O₂) Dekompression auf 6 m Wassertiefe

Tiefe	Zeit	Run-time	Gas
30	38,5	40	Luft
12	0,5	43	Luft
9	2	45	N-80
6	4	49	N-80
3	6	55	N-80
0		55	

2: Luft Tauchgang und Nitrox-80 Dekompression ab 9 m Wassertiefe

Tiefe	Zeit	Run-time	Gas
30	38,5	40	N-32
6	0,5	44	N-32
3	5	49	N-32
0		49	

3: Nitrox-32 Tauchgang

Der Gaswechsel von Luft auf Sauerstoff bzw. Nitrox-80 erfolgt an der Tiefe, wo der Sauerstoff einen Partialdruck von ca. 1,6 bar erreicht hat. Dieser Sauerstoffpartialdruck wird allgemein als noch sicher bei Atemdauern unter 45 Minuten angesehen – was hier gegeben ist.

Bei allen 3 Tauchgängen sind wir ca. 38,5 Minuten auf 30 m Tiefe und verlassen diese nach 40 Minuten Gesamtzeit. Wir steigen dann mit 7 m/min zur ersten Stoptiefe auf. Für die beiden Lufttauchgänge ist diese bei 12 m Tiefe und für den N32 Tauchgang bei 6 m. Dort wird für 0,5 Minuten gestoppt.

Da in 30 Sekunden wenig Entsättigung geschieht, handelt es sich hier eher um einer weitere Verlangsamung des Aufstiegs. Die erste „wirkliche“ Dekostufe ist bei Sauerstoffatmung ca. 2 Blut-Halbsättigungszeiten lang, bei N80 ca. eine halbe und bei N32 ca. eine. Für die O₂-Atmung ist eine Entsättigung an dieser Stelle auf 25% des Ankunftswertes

N₂-Übersättigung

$$\tau > p_{Um\ddot{u}g}$$

N₂-Gradient

$$\tau > p_{N_2, Lunge}$$

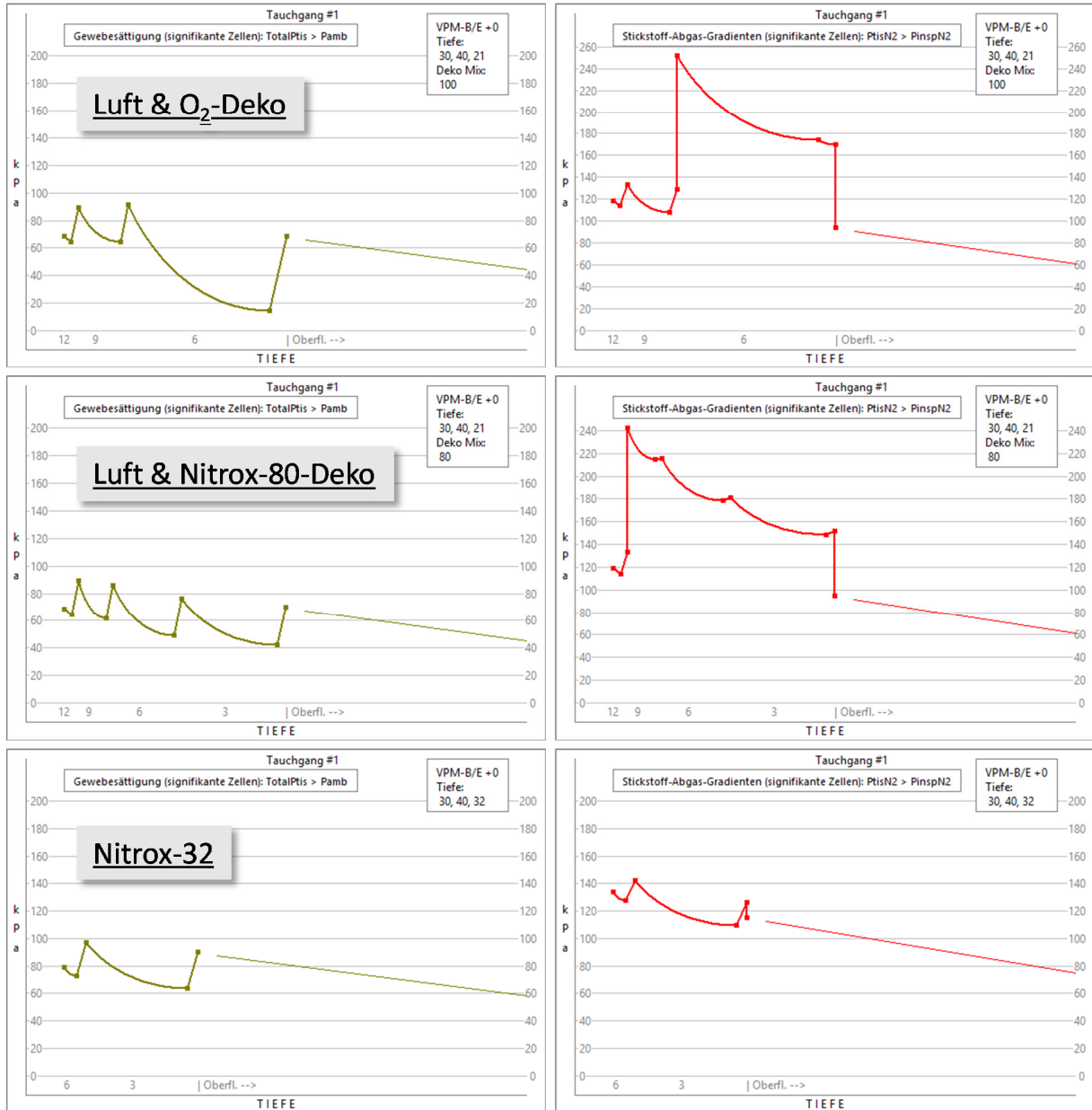


Abb. 8: Abnahme der Übersättigung und der Stickstoffgradienten auf den Dekompressionsstufen für die 3 Vergleichsszenarien. Die Anfangs und Endwerte jeder Stufe wurden in das Histogramm (Abb. 9) eingetragen.

zu erwarten, bei N80 auf ca. 75% und bei N32 auf ca. 50%. Die Dauer dieser drei Tauchgänge ist ungefähr gleich lang: 55 bzw. 56 Minuten für die N80 bzw. O₂ Dekompression und 49 Minuten für den N32 Tauchgang.

Abbildung 8 zeigt die Abnahme der Stickstoffgradienten und der Stickstoffübersättigung als Funktion der Zeit auf den Dekostufen für die drei Vergleichstauchgänge. Deutlich ist die Zunahme der Übersättigung und des Gradienten beim Wechsel auf die nächst höhere Dekostufe sichtbar.

Abbildung 9 zeigt Histogramme, die jeweils die Gradienten und Übersättigungen zu Beginn und am Ende jeder Dekostufe für alle 3 Szenarien zeigen.

Bei Erreichen der 12 m Stufe wird beim N32 Tauchgang nicht gestoppt. Deshalb sind auch keine Werte für dieses Szenario in Abbildung 8 eingetragen. Die beiden Tauchgänge Luft mit O₂- bzw. mit N80-Dekompression sind an dieser Stelle noch gleich. Es hat bis dahin kein Gaswechsel stattgefunden. Da diese 12 m Stufe für diese beiden Tauchgangsvarianten nur 30 Sekunden lang ist, ist auch kaum eine Veränderung der Säulengrößen zwischen Ankunft und Verlassen dieser Stufe sichtbar.

Auf der 9 m Stufe sieht man jetzt die ersten Unterschiede. Für die N80 Deko wird von Luft auf N80 gewechselt. Für den Tauchgang mit geplanter Sauerstoff-Deko verbleiben wir auf dieser Stufe noch auf Luftatmung. Deshalb ist der Stickstoffgradient für die N80-Atmung nun viel größer als für die Luftatmung. Der Gradient ist die Differenz zwischen dem Partialdruck des gelösten Stickstoffes im Blut und dem Partialdruck des Stickstoffs in der Lunge. Für beide Tauchgangsvarianten ist die gelöste Menge Stickstoff bei der Ankunft noch gleich. Aber der Partialdruck in der Lunge ist bei N80 ($0,2 \times 1,9 \text{ bar} = 0,38 \text{ bar}$) und für Luft ($0,79 \times 1,9 \text{ bar} = 1,5 \text{ bar}$). Die Stickstoffübersättigung ($\tau - p_{\text{Umgebung}}$) ist zu Beginn dieser Stufe für beide ebenfalls gleich. Am Ende der Stufe hat sie sich für die N80 Atmung etwas mehr verringert als mit Luftatmung. Da die N80 Atmung nur ca. eine halbe Halbsättigungszeit dauert, ist die Reduktion der Übersättigung auch nur wenig kleiner geworden.

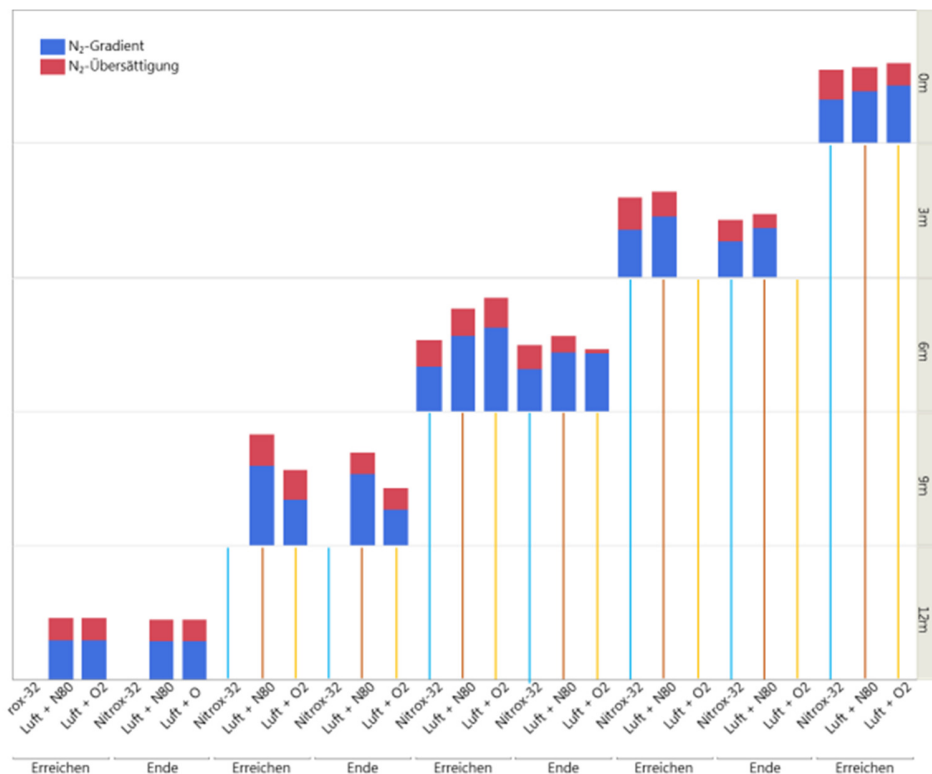


Abb. 9: Histogramme der Stickstoffgradienten (blaue Säulen) und der Stickstoffübersättigungen (rote Säulen) jeweils beim Erreichen der Deko-Tiefe und am Ende der Zeit auf dieser Tiefe für die 3 Beispielszenarien.

Deutliche Unterschiede sind auf der 6 m Dekostufe zu sehen:

Für den N32 Tauchgang entspricht die Entsättigung auf dieser Stufe dem Szenario der beiden anderen Tauchgänge auf der 12 m Stufe. Es wird nur für 30 Sekunden angehalten. Entsprechend gering fällt die Entsättigung bis zum Verlassen diese Stufe aus.

Der Unterschied zwischen den Stickstoffgradienten ist sehr deutlich. Am größten ist er bei Sauerstoffatmung, am zweitgrößten bei N80 Atmung und am geringsten für N32. Zu Beginn der Dekostufe sind die Übersättigungen noch alle etwa gleich groß. Am Ende dieser Stufe sind sie aber deutlich unterschiedlich. Am geringsten ist sie bei O₂-Atmung und etwas größer bei N80 Atmung; am größten bei N32.

Da die Sauerstoff-Deko nur auf der 6 m Stufe stattfindet, haben wir keine Werte auf der 3 m Stufe. Auch hier ist der Stickstoffgradient für die N80 Atmung größer als für N32. Somit ist die Abnahme der Übersättigung während dieser Stufe für N80 ebenfalls größer.

Direkt vergleichbar werden die Werte der drei Szenarien bei Erreichen der Oberfläche (0 m). Betrachtet wird hier den Moment des Erreichens bevor der Lungenautomat aus dem Mund genommen wird und wir wieder Luft atmen. Deshalb sind die Stickstoffgradienten unterschiedlich. Wichtig sind aber die unterschiedlichen Übersättigungen. Nach Sauerstoffatmung ist diese am kleinsten. Nach N80 Deko ist sie etwas größer. Am größten ist sie für den N32 Tauchgang.

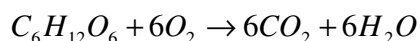
Da die Übersättigung umgekehrt proportional zum kritischen Radius ist, sind deshalb für den N32 auch die größte Blasenanzahl und –größe zu erwarten. Etwas weniger Blasen für die N80 Deko und am wenigsten für die Sauerstoff-Deko.

Zusammenfassend kann man sagen, dass je größer der Stickstoffgradient ist, umso schneller wird der Stickstoff aus dem Körper diffundieren und je kleiner die erreichte Stickstoffübersättigung ist, umso weniger Blasen werden wachsen. Die größte Dekompressionsqualität im Sinne der Blasenanzahl hat man somit nach der Sauerstoff-Deko, gefolgt von der N80-Deko. Mit N32 ist die Qualität deutlich niedriger, obwohl in der Tiefe durch den reduzierten N₂-Anteil wesentlich weniger gesättigt wurde! Sollte man diesen Tauchgang nur mit Luft, ohne Gaswechsel auf der Dekostufe, durchführen, ist die Dekompressionsqualität entsprechend noch niedriger.

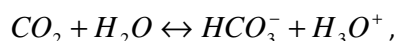
2.3 Sauerstofffenster

2.3.1 Definition

Das Sauerstofffenster entsteht aufgrund der unterschiedlichen Löslichkeit bzw. chemischen Umsetzung von Sauerstoff und Kohlendioxid im Blut. Der Stoffwechsel des Menschen kann sehr stark vereinfacht am Beispiel von Traubenzucker (Glukose) so dargestellt werden:



Ein Teil Glukose (C₆H₁₂O₆) reagiert mit 6 Teilen Sauerstoff (O₂). Dabei entstehen 6 Teile Kohlendioxid (CO₂) und 6 Teile Wasser (H₂O). Man sollte erwarten, dass genauso viel freies CO₂ Gas entsteht wie O₂ Gas verbraucht wurde. Dadurch, dass CO₂ aber mit Wasser eine Folgereaktion zu im Wasser chemisch gelöster Kohlensäure eingeht,



fehlt dieser Gasanteil als physikalisch gelöstes Gas und es entsteht ein Defizit.

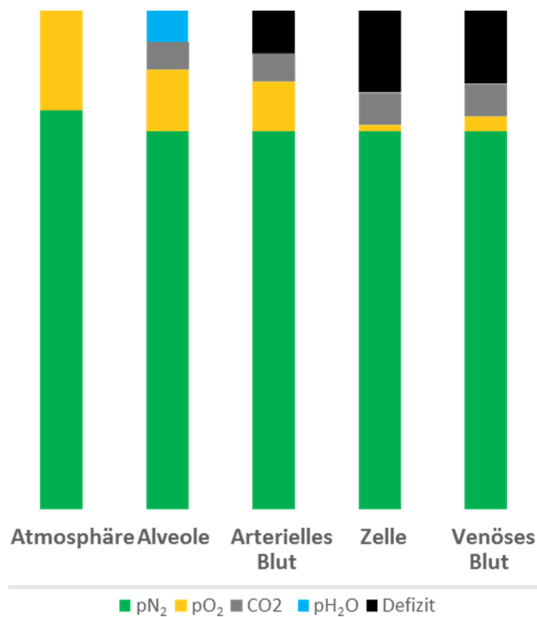


Abb. 10: Schematische Darstellung der Gaskonzentrationen in den verschiedenen Bereichen des Körpers. Durch die Reaktion des Sauerstoffs mit dem Hämoglobin der roten Blutkörperchen, sowie durch seine Verstoffwechslung, bzw. der chemischen Reaktion des Kohlendioxids (CO_2) mit Wasser zu Kohlensäure verringert sich der Partialdruck von Sauerstoff und Kohlendioxid, sodass der Gesamtdruck (= Summe aller Partialdrücke) geringer ist als der Umgebungsdruck. Die hier schwarz dargestellten Bereiche entsprechen den fehlenden Partialdruck-Anteilen. Da der Effekt hauptsächlich von Sauerstoff verursacht wird, spricht man vom „Sauerstofffenster“. Quelle⁸⁾⁹⁾.

Ein entsprechender Effekt ist in Abbildung 10 dargestellt⁸⁾⁹⁾. Im Vergleich zur atmosphärischen Luft reduzieren sich die Partialdrücke von Sauerstoff und Stickstoff in der Lunge (Alveole) etwas, da dort immer ein kleiner Anteil CO_2 vorliegt, der nicht vollständig ausgeatmet werden kann, und die Luft mit Wasser angefeuchtet wird, wodurch das Gas einen Anteil an Wasserdampf enthält. Nach dem Übertritt ins arterielle Blut ist das Wasser ausschließlich flüssig, d. h. es hat keinen Dampfanteil mehr. Dabei entsteht ein Defizit an Gesamtgas. Die Summe aller Partialdrücke ist jetzt nicht mehr gleich dem Umgebungsdruck!

Zwischen Lunge und restlichem Körper ist der Stickstoffpartialdruck im Gleichgewicht und somit überall gleich.

Diese o. g. Differenz zwischen dem Atmosphärendruck und dem Gesamtdruck im Körper wird in der Zelle noch größer, da hier praktisch sofort aller Sauerstoff, der herein kommt, verbraucht wird. Im venösen Blut ist der Sauerstoffanteil wieder etwas größer, da ein Teil O_2 an den Zellen vorbei geht. Auch der Kohlendioxidanteil wächst leicht, da ein kleiner Anteil im Gleichgewicht mit der Kohlensäure auch physikalisch als Gas gelöst vorliegt.

Die in Abb. 10 schwarz dargestellten Bereiche der Säulen entsprechen der Verringerung des Gesamtdruckes im Vergleich zum Umgebungsdruck. Diese Verringerung des Gesamtdruckes wird als „Sauerstofffenster“ bezeichnet.

2.3.2 Auf- und Ent sättigung von Blut und Blasen unterschiedlicher Größe und welche kritischen Radien sich ergeben.

In den Abbildungen 11a-d sind ähnlich wie in Abbildung 10 die Stickstoff- und Sauerstoffpartialdrücke als Säulen wiedergegeben. Diese Partialdrücke wurden für 4 verschiedene Umgebungen berechnet:

- Lunge
- Venöses Blut
- Blasen mit einem Radius von 1 und 3 μm

Die Anteile des Wasserdampfes und des Kohlendioxids wurden dabei nicht berücksichtigt. Es sind also jeweils nur der Stickstoff- (grüne Säule) und der Sauerstoffdruck (gelbe Säule) angegeben.

In Abbildung 11a sind die Situationen bei Luftatmung gezeigt: Gleichgewicht an der Wasseroberfläche (GGew, 0 m), sofort nach Erreichen von 10 m Wassertiefe nach einem schnellen Abtauchen (Ankunft, 10 m), die Gleichgewichtssituation in dieser Tiefe (GGew, 10 m), sowie in 30 m Wassertiefe (GGew, 30 m). Ebenfalls wurde die Situation berechnet, die sich ergibt, wenn der Taucher in sehr kurzer Zeit aus 30 m Tiefe an die Oberfläche aufsteigt (Ankunft, 0 m n.TG).

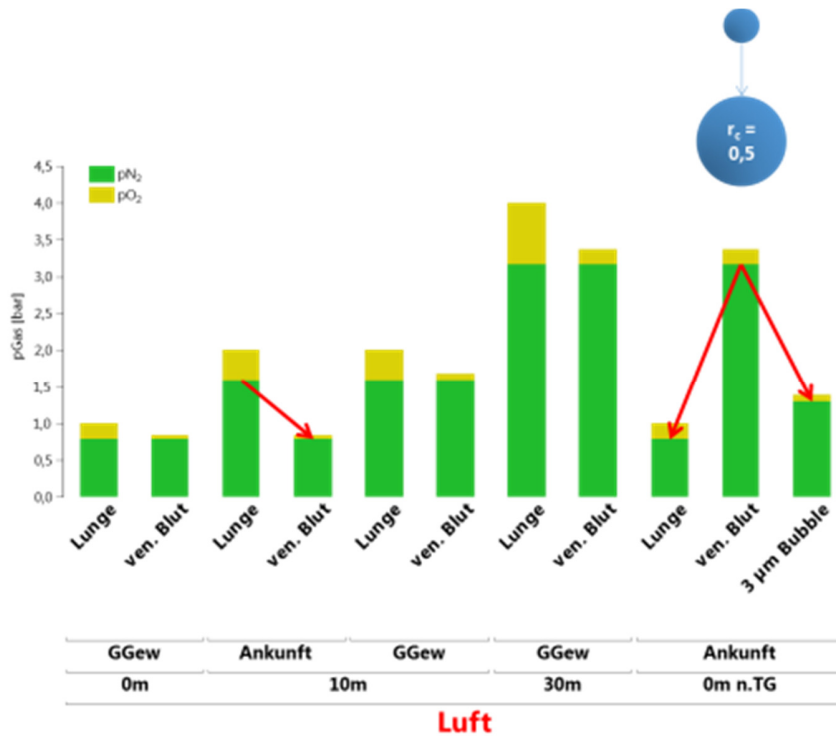


Abb. 11a: Stickstoff- und Sauerstoffkonzentration beim Abtauchen mit Luft und Gleichgewichtszustände auf Tiefe, sowie ein sehr schneller Aufstieg aus 30m zur Oberfläche.

An der Wasseroberfläche ist im Gleichgewichtszustand der Stickstoffdruck in der Lunge und im venösen Blut annähernd gleich. Deutlich ist dabei die Gasunter-sättigung (Sauerstofffenster) an dem kleineren Anteil des Sauerstoffs sichtbar. Nach dem Abtauchen auf 10 m Tiefe hat sich in der Lunge die Summe der Partialdrücke von Sauer- und Stickstoff sofort auf den Gesamtdruck eingestellt. Das Blut allerdings ist als Flüssigkeit nicht kompressibel. Der Stickstoff muss erst ins Blut diffundieren damit sich das Gleichgewicht einstellen kann. Wie schon gesagt, wird dafür ca. 25 bis 30 Minuten Zeit benötigt. Dann sind im Gleichgewicht die Stickstoffpartialdrücke in Lunge und Blut wieder etwa gleich. Das Sauerstofffenster hat sich wegen des höheren Gesamtdrucks

ebenfalls etwas vergrößert. Entsprechend, nur auf höherem Druckniveau, ist die Situation in 30 m Wassertiefe, wenn sich das Gleichgewicht eingestellt hat.

Nach einem sehr schnellen Aufstieg an die Wasseroberfläche ist das venöse Blut noch immer auf dem Druckniveau in der Tiefe (starke Übersättigung). Die Lunge passt sich entsprechend dem Boyle-Mariott'schen Gesetz sofort an. Der Druck in den entstandenen Gasblasen berechnet sich nach deren Radius. Hier ist als Beispiel der Druck einer Blase mit 3 µm Radius angegeben. Da das venöse Blut stark übersättigt ist, kann der Stickstoff jetzt in die Lunge diffundieren, was erwünscht ist, aber auch in die Blase, was diese zum Wachsen bringt. Berechnet man für diese Übersättigung den kritischen Radius, so liegt dieser bei ca. 0,5 µm. D.h. praktisch alle Blasen werden wachsen. Man spricht dann auch von Aufschäumen (= Mineralwassereffekt beim schnellen Öffnen der Flasche).

Im linken Teil von Abbildung 11b ist die Situation angegeben, die zu erwarten ist, wenn ein verunfallter Taucher in der Druckkammer auf 18 m Tiefe gefahren wird und dort reinen Sauerstoff zu atmen bekommt (US-Navy Behandlungstabelle 6). Durch die Kompression der Blasen auf einen Umgebungsdruck von 2,8 bar stellt sich ein Binnendruck in den Blasen ein, der viel größer ist als im venösen Blut und der Lunge. In der Lunge ist reiner Sauerstoff. Das venöse Blut liegt etwa auf dem Gleichgewichtswert des Oberflächenniveaus der Stickstoffsättigung. Folglich diffundiert der Stickstoff aus der Blase ins Blut und von dort in die Lunge und aus dem Körper hinaus. Berechnet man für diese Verhältnisse den kritischen Radius so erhält man einen negativen Wert, da keine Über- sondern eine Untersättigung vorliegt. Der kritische Radius ist quasi unendlich groß. Alle vorhandenen Blasen werden schrumpfen!

Betrachtet man die Verhältnisse bei unserem Beispieltauchgang (30 m, 40 Minuten, Luft und ab 6 m Sauerstoff), so haben wir ähnliche Verhältnisse wie bei der Tabelle-6 Behandlung. Die Blasen mit 1 µm Radius haben einen höheren

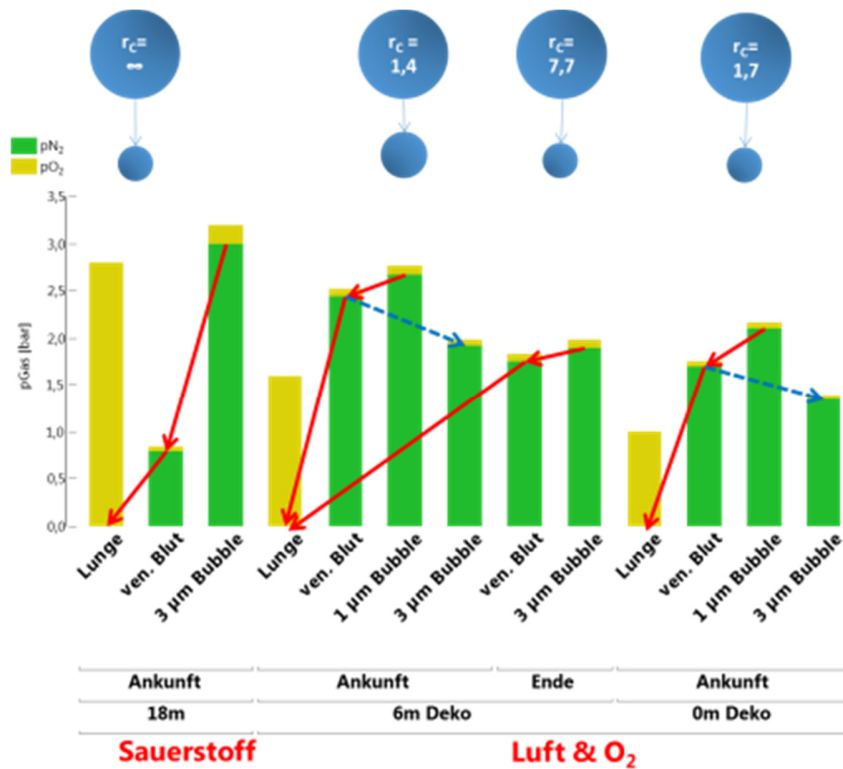


Abb. 11b: US-Navy Behandlungsprozess bei 18 m mit O₂-Atmung. Ebenfalls sind die Stickstoff- und Sauerstoffpartialdrücke für den Beispiel-Lufttauchgang mit Sauerstoff-Deko dargestellt.

Die roten Pfeile stellen die Diffusionsrichtung des N₂ dar, die zum Schrumpfen der Blasen führen. Die blauen, gestrichelten, zeigen die Diffusion an, die zum Wachstum der Blasen führen. Über den jeweiligen Szenarien sind die kritischen Radien abgebildet. Diese Partialdrücke wurden nach Bennett und Elliot berechnet¹⁰.

Innendruck als das venöse Blut und dieses liegt weit über dem in der Lunge (großer Stickstoffgradient). Blasen dieser Größe und die kleineren werden schrumpfen.

Allerdings liegt der Innendruck der Blasen mit einem Radius von 3 µm bei Anknunft auf der Dekostufe noch unter dem des venösen Bluts. Diese Blasen können zunächst noch wachsen. Dies drückt sich in einem kritischen Radius von 1,4 µm zu diesem Zeitpunkt auf dieser Tiefe aus. Am Ende dieser Dekostufe ist das venöse Blut aber soweit entsättigt, dass der kritische Radius auf 7,7 µm gewachsen ist. Somit werden die 3 µm Beispielpblasen am Ende dieser Dekostufe auch verschwunden sein. Bei Erreichen der Oberfläche ist der kritische Radius zwar wieder bei 1,7 µm. Da aber zuvor alle Blasen bis 7,7 µm Radius geschrumpft und verschwunden sind, können jetzt nur noch die Blasen weiter wachsen, die größer sind, oder die beim Aufstieg

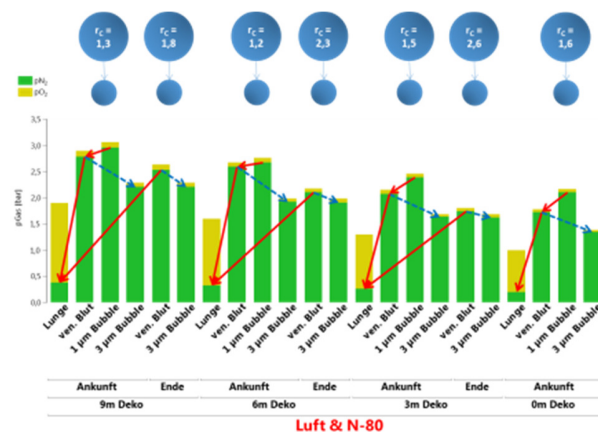


Abb. 11c: Stickstoff- und Sauerstoffpartialdrücke für den Beispiel-Lufttauchgang mit N₈₀-Deko

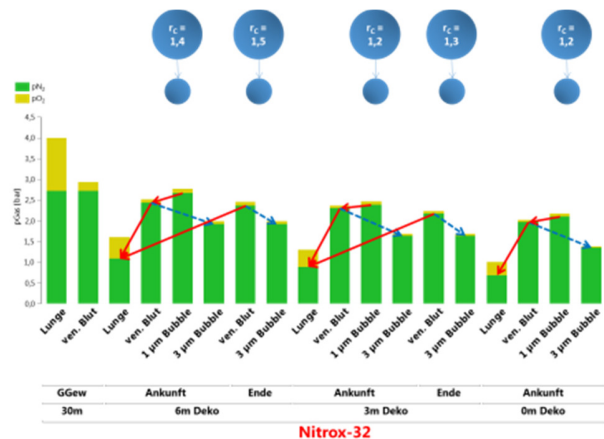


Abb. 11d: Stickstoff- und Sauerstoffpartialdrücke für den Beispiel-N₃₂-Tauchgang.

aus 6 m Tiefe neu entstanden sind. Wurde dieser Aufstieg aber langsam genug gemacht, so konnten diese neuen und noch kleinen Blasen nicht wachsen. Der Taucher kommt praktisch blasenfrei an der Oberfläche an. Wie wir wissen, sind die sehr großen Blasen selten. Sollten sie doch entstanden sein, haben sie sich wahrscheinlich in der Lunge gefangen, wo die Übersättigung nahe Null ist. Damit sind auch diese Blasen verschwunden.

Die Sauerstoff-Deko wird deshalb auch als „vorweggenommene Deko-Therapie“ bezeichnet.

Bei der Deko mit Nitrox-80 (Abb. 11c) kommt der kritische Radius zu keinem Zeitpunkt über 2,6 μm hinaus. D.h. die Blasen mit einem Radius von 3 μm werden zu keiner Zeit schrumpfen. Das wird zu Folge haben, dass der Taucher bei dieser Deko wesentlich mehr Blasen bei Erreichen der Oberfläche hat, als wenn er Sauerstoff zur Deko eingesetzt hätte.

Noch schlechter sieht es aus, wenn der ganze Tauchgang mit Nitrox-32 durchgeführt wurde (Abb. 11d). Hier wird der kritische Radius nie größer als 1,5 μm . Die Blasenanzahl wird deshalb bei diesem Tauchgang noch größer sein als bei Luft und N80 Deko oder gar der mit der Sauerstoff-Deko.

2.4 Schlussfolgerungen

2.4.1 Vergleich der 3 Szenarien

Zusammenfassend kann man sagen: Je größer der Sauerstoffanteil im Atemgas bei der Entsättigung bzw. der Stickstoffgradient ist, umso schneller sinkt die Übersättigung und umso schneller wächst der kritische Radius. Das lässt Mikroblasen kollabieren! Das ist quasi eine „vorweggenommene Deko-Therapie“.

Ein langsamer Aufstieg ist unabhängig vom verwendeten Atemgas immer notwendig. Dann ist die Übersättigung kleiner als der Blaseninnendruck. Das hält die Anzahl der Gasblasen von Anfang des Aufstieges an niedrig.

Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Gase bei diesen Beispiels-Tauchgängen kann man so zusammenfassen:

Nitrox-32

- Weniger N_2 -Anreicherung
- Dadurch weniger Dekozeit notwendig
- Besserer N_2 Gradient auf Dekostufen als mit Luft aber viel schlechter als mit O_2 oder N-80
- Kleiner kritischer Radius. In der Folge viele Mikroblasen möglich.

Luft und N80-Deko

- Starke N_2 Anreicherung durch hohen N_2 -Anteil in der Luft (ca. 79%), dem Atemgas in der Tiefe.
- Dekompressionszeit ist durch den Gaswechsel etwas verkürzt.
- Sauerstofffenster ist bei $p_{\text{Umg}} = 2$ bar gleich groß wie bei reinem O_2 bei 1,6 bar.
- N_2 -Gradient ist aber kleiner, was das Schrumpfen der Blasen verlangsamt.
- Kritischer Radius ist größer als bei Nitrox-32 aber viel kleiner als bei O_2 . Die Menge und Größe der Blasen kann etwas niedriger sein.
- Leichte Verbesserung der Deko-Qualität durch Schrumpfen evtl. vorhandener mittelgroßer Blasen.

Luft und O_2 -Deko

- Starke N_2 Anreicherung durch die Luft als Atemgas in der Tiefe.
- O_2 -Deko verkürzt die Dekompressionszeit deutlich.
- Man hat den größten möglichen Stickstoffgradienten auf der Deko-Stufe.
- Dadurch ergibt sich die beste Ausnutzung des Sauerstofffensters.
- Größter kritischer Radius, was praktisch alle Blasen verschwinden lässt.
- Das führt zur größten möglichen Deko-Qualität
- Sauerstoff-Deko ist quasi eine vorweggenommene Dekompressionstherapie.

Mit einem reinen Lufttauchgang hat man zwar ein billiges Gas. Jedoch im Sinne der Dekompressionsqualität auch die schlechteste Wahl getroffen. Mit Nitrox-32 hat man schon eine etwas bessere Qualität, ist jedoch mit der maximalen Einsatztiefe limitiert. Die Kombination aus Luft und Nitrox-80 Dekompression ist ein guter Kompromiss zwischen Tiefentauglichkeit und Dekompressionsqualität. Mit N80 ist man aber auf maximal 10 m Wassertiefe limitiert. Der beste Kompromiss zwischen Einsatztiefe und Dekompressionsqualität ist bei Luft mit Sauerstoff-Deko zu finden. Der Sauerstoff macht quasi schon während der Dekompression eine Therapie und lässt dabei nahezu alle eventuell vorhandenen Blasen verschwinden.

2.4.2 Sauerstofftoxizität

In dieser Konsequenz könnte man sagen, dass die Durchführung des tiefen Teils des Tauchgangs mit Nitrox-32 mit anschließender Sauerstoff-Deko die höchste Qualität liefern müsste. Man hätte die geringste Aufsättigung mit Stickstoff während des Tauchgangs im Körper, den größten Stickstoffgradienten bei der Deko und den größten Sauerstoffanteil mit entsprechend großen kritischen Radius für die Reduktion der Mikroblasen. Das bedeutete die geringste Wahrscheinlichkeit Blasen zu bilden. Wenn sie sich gebildet haben, sollte man sie wieder sehr gut loswerden.

Tab. 2: Tauchprofile und Sauerstofftoxizitätsdaten für die 4 Beispieltauchgänge⁷⁾

Tiefe	Zeit	Run-time	Gas
30	38,5	40	Luft
12	0,5	43	Luft
9	3	46	Luft
6	9	55	O ₂
0		56	

Tiefe	Zeit	Run-time	Gas
30	38,5	40	Luft
12	0,5	43	Luft
9	2	45	N-80
6	4	49	N-80
3	6	55	N-80
0		55	

Tiefe	Zeit	Run-time	Gas
30	38,5	40	N-32
6	0,5	44	N-32
3	5	49	N-32
0		49	

Tiefe	Zeit	Run-time	Gas
30	38,5	40	N-32
6	3,5	47	O ₂
0		48	

% ZNS	OTU
23	46
15	43
21	58
27	66

Sauerstofftoxizität für die 4 Tauchprofile

Tauchprofile von:

- Luft & O₂-Deko
- Luft & N80-Deko
- N32
- N32 & O₂-Deko

Das ist im Prinzip richtig. Jedoch muss man sich für solch einen Tauchgang die Sauerstoffgiftigkeit (Toxizität) genau ansehen. In der Literatur sind zwei Arten der Sauerstoffgiftigkeit beschrieben¹¹⁾:

Paul-Bert Effekt:

Dabei handelt es sich um eine neuronale Vergiftung, die im Wesentlichen durch den hohen Sauerstoffdruck ausgelöst wird. Die verträgliche Dosis berechnet sich mit der ZNS-Uhr. Man darf dabei die Dosis von 100% nicht überschreiten. Diese wird z.B. nach 45 Minuten erreicht wenn man Sauerstoff bei einem Partialdruck von 1,6 bar atmet. Geringere Partialdrücke verlängern die Zeiten 100% erreicht wird.

Lorrain-Smith Effekt:

Dabei handelt es sich um eine pulmonale (die Lunge betreffend) Vergiftung, die im Wesentlichen ein Zeiteffekt ist. Die Dosis wird mit den OTU (Oxygen Tolerance Units) oder UPTD (Unit of Pulmonary Toxicity Dose) Werten berechnet. Durch den erhöhten Sauerstoffdruck kommt es zu einer „Verätzung“ der Oberflächen der Alveolen, was eine Verringerung der Gasdurchlässigkeit zur Folge hat. Bei längerer Exposition kann sich dadurch die Dekompressionszeit insgesamt wieder verlängern, da das gelöste Gas quasi durch ein „kleineres Loch“ aus dem Körper hinaus muss.

In der Tabelle 2 ist der Tauchplan eines Tauchgangs mit N32 und O₂-Deko zusammen mit den anderen angegeben. Man stellt fest, dass dieser Tauchgang nur eine Minute kürzer ist, als ohne die Verwendung von Sauerstoff zur Dekompression. Die Qualität sollte aber trotzdem höher sein. In Tabelle 2 sind auch die ZNS und OTU Dosisdaten für diese vier Tauchgangsszenarien aufgelistet. Sowohl die ZNS Werte als auch die OTU Werte sind für diese Tauchgänge weit von ihren maximal zulässigen Werten entfernt. Die Obergrenze für die ZNS Werte ist 100%. Hier liegen sie nur

zwischen 15 und 27%. Die Obergrenzen der OTUs liegen bei ca. 850 bei einer einmaligen Exposition und 300 bei Langzeitbelastung. Hier liegen die OTUs zwischen 43 und 66.

Vorsicht sollte man aber trotzdem bei längeren und intensiven Urlaubstauchgängen walten lassen. Bei Non-Limit Tauchen und täglicher Exposition können sich die OTUs schnell aufsummieren!

2.4.2 Jo-Jo-Tauchen

Beim Jo-Jo-Tauchen taucht man zunächst tief und sättigt dabei auf. Beim Aufstieg wächst die Übersättigung des Stickstoffs an und der kritische Radius wird kleiner. Das hat zur Folge, dass mehr Blasen wachsen können. Diese werden sich wahrscheinlich im Lungenfilter verfangen. Taucht man jetzt wieder tiefer, so werden diese Blasen durch die Reduktion der Übersättigung schrumpfen. Sie werden aber nicht verschwinden. Sind sie klein genug, können sie den Lungenfilter passieren und sind jetzt auf der arteriellen Seite des Blutkreislaufs. Tauchen wir jetzt wieder höher, wird die Übersättigung wieder zunehmen, der kritische Radius kleiner werden und die Blasen werden wieder wachsen. Jetzt können sie sich vor die Kapillaren setzen, die Organe mit Blut und Sauerstoff versorgen. Je nach dem wo sie sitzen, kann dies Lebensgefahr bedeuten.

Der Effekt des Jo-Jo-Tauchens ist derselbe wie derjenige beim Tauchen mit offenem Foramen-Ovale (PFO): Es kommen Gasblasen auf die arterielle Seite des Blutkreislaufs.

Eine Sauerstoff-Deko kann diese Gefahr nicht beseitigen. Aber im Sinne einer vorweggenommenen Therapie etwas verringern. Besser ist es, auf **Jo-Jo-Tauchen zu verzichten!**

Ein gewisser positiver Effekt kann auch bringen, dass man die Aufstiegsgeschwindigkeiten extrem verlangsamt. Dadurch ist die Übersättigung immer relative klein und es wachsen weniger Blasen. Aber auch das ist keine Garantie für einen unfallfreien Tauchgang!

2. Schluss

Eingangs wurde die Frage gestellt: Welches Gas würdet Ihr bei einem Lufttauchgang als Sicherheitsreserve unter das Boot auf Deko-Tiefe hängen?

Die Reserve wird man brauchen, wenn durch irgendwelche Umstände ein Atemgasmangel aufgetreten ist. Eine (fast) leere Flasche heißt auch, dass wahrscheinlich mit zu hoher Aufstiegsgeschwindigkeit herauf getaucht wurde. Das wiederum führt wahrscheinlich zu einem erhöhten Blasenauftreten im Blut.

Da Sauerstoff der beste „Blasenkiller“ ist, würde ich Sauerstoff unter das Boot hängen. Allerdings sind ein paar Vorkehrungen zu treffen:

- Es muss sichergestellt werden, dass nicht tiefer als in 6 m Wassertiefe aus der Flasche geatmet werden kann; z.B. durch Befestigen der Flasche durch ein unter Wasser nicht lösbares Seil.
- Alle Teilnehmer des Tauchgangs müssen über die Gefahren der Sauerstoffatmung unter erhöhtem Druck aufgeklärt werden / sein.

3. Referenzen

- 1) A.A. Bühlmann, Tauchmedizin, Springer Verlag, 3. Aufl. (1993).
- 2) A.A. Bühlmann, Tauchmedizin, S. 37, Springer Verlag, 3. Aufl. (1993).
- 3) J. Mair, <http://gtuem.org/content/986/97/dekokrankheit.html>

- 4) M. Sedlak, HTSV Dekompression 2012, <https://htsv.org/upload/13/Deko2012.pdf>
- 5) D.E. Yount, R.H. Strauss, J. Appl. Phys. 47(11) 5081ff (1976).
- 6) C. Bonucelli, Calculating Deco Schedule with VPM, http://www.hhssoftware.com/v-planner/vpm_expl_corado.pdf
- 7) Dekompressions-Software: V-Planner 3.93, Nominal VPM-B/E mit krit. Vol. Algorithmus, 0m NN, O₂-Fenster: an, Aufstiegs geschwindigkeit: 7 m/min
- 8) B.A. Hills, "A fundamental approach to the prevention of decompression sickness". South Pacific Underwater Medicine Society Journal 8(2) 20–47 (1978).
- 9) M. Powell: "Deco for Divers", AquaPress: Southend-on-Sea, Essex SS2 5RY, UK, (2010), S.57-59
- 10) R.D. Vann u. E.D. Thalmann in P. Bennett u. D. Elliot (ed.), The Physiology and Medicine of Diving, 4th Ed., 391-395 (1993).
- 11) J.M. Clark in P. Bennett u. D. Elliot (ed.), The Physiology and Medicine of Diving, 4th Ed., 121-169 (1993).