

Nitrox und O₂-Deko – eine Übersicht

In dieser Zusammenfassung zu meinem Vortrag ‚Nitrox und O₂-Deko – eine Übersicht‘ möchte ich die wichtigen Aspekte des Nitroxtauchens, die Gefahren des Sauerstoffs, die Möglichkeit der Sauerstoffdekompression aufzeigen und als Abschluss auf die Kurse des SUSV eingehen.

Nitrox

Was ist Nitrox?

Nitrox ist der Name für ein Gasgemisch, bestehend aus **Nitrogen** (Stickstoff, N₂) und **Oxygen** (Sauerstoff, O₂). In diesem Sinne ist auch unsere normale Atemluft ein Nitrox-Gemisch. Wenn wir beim Tauchen von Nitrox sprechen, meinen wir damit aber nur die Gemische, welche einen höheren Sauerstoffgehalt als Luft haben.

Gerüchte über Nitrox:

Mit Nitrox kann ich tiefer Tauchen.

Im Gegenteil: Zwar ist die Gefahr eines Tiefenrausches geringer, dafür wird durch den erhöhten Sauerstoffanteil die Gefahr einer Hyperoxie (Sauerstoffvergiftung) grösser.

Ein Nitrox-Taucher kann keine Dekokrankheit erleiden.

Da das Atemgas immer noch Stickstoff enthält, ist die Möglichkeit eines Dekounfalls nicht auszuschliessen. Richtig angewendet, kann Nitrox aber das Risiko eines Zwischenfalls reduzieren.

Ein Nitrox-Taucher mit einer Dekokrankheit kann nicht in einer Dekokammer behandelt werden.

Es gibt keinen medizinischen Grund für eine Nichtbehandlung.

Nitrox-Tauchen macht blöd.

Wissenschaftlich gesehen, kann diese Frage zwar nicht vorbehaltlos verneint werden; doch bestehen keine Hinweise dafür, dass sich der Nitrox-Taucher einem höheren Risiko als der Pressluft-Taucher aussetzt, und der ist ja eh schon blöd.

Die Verwendung von Nitrox reduziert den Luftverbrauch.

Die Atemfrequenz wird primär durch den Kohlendioxidspiegel im Blut gesteuert; so hat der erhöhte Sauerstoffanteil in der Lunge keinen Einfluss auf den Luftverbrauch.

Das Tauchen mit Nitrox ist sicherer als mit Luft.

Richtig angewendet, macht Nitrox gewisse Tauchprofile sicherer. Doch die komplizierteren Anwendungen wie Tauchgangplanung, Analysieren und Mischen von Gasen, Handhabung der Dekotabelle und vieles mehr, bergen neue Gefahren. Also kann man dieser Aussage nicht zustimmen.

Bezeichnungen:

Es gibt verschiedene Arten, ein Nitrox-Gemisch zu benennen. Grundsätzlich gilt aber, dass nur der Sauerstoffanteil genannt wird. Normale Atemluft lässt sich nun schreiben als: "Nitrox21" oder "EAN21". EAN ist eine alternative Nitrox-Bezeichnung und steht für "Enriched Air Nitrox". Weiter hat man sich für die gängigsten Gemische auch Produktnamen zugelegt, die aus untenstehender Tabelle entnommen werden können; z.B.: Nitrox36 = EAN36 = NOAA II.

Die Verwendung verschiedener Atemgase und zusätzlich noch verschiedener Bezeichnungen stellt ein grosses Gefahrenpotential dar, deshalb muss der Nitrox-Taucher den Sauerstoffanteil seines Atemgemischs vor jedem Tauchgang nachmessen.

Äquivalente Stickstofftiefe:

Durch den erniedrigten Stickstoffanteil im Atemgemisch beim Nitrox-Tauchen verlängern sich die Nullzeiten. Wie kann ich nun die Nullzeit für meinen Nitrox-Tauchgang aus meiner Dekotabelle bestimmen? Dazu ein kleines Beispiel:

Wenn ich mit NOAA-II (36% O₂ / 64% N₂) auf 34m bin, habe ich 2.8 bar N₂-Partialdruck (4.4bar x 0.64 = 2.8bar pN₂). Den gleichen N₂-Partialdruck habe ich, wenn ich mit normaler Luft tauche, auf 26m, denn 3.6 bar Umgebungsdruck mal 0.78

Stickstoffanteil gleich 2.8 bar N₂-Partialdruck. Von der Stickstoffsättigung entspricht also ein Tauchgang mit NOAA-II auf 34m einem Tauchgang mit Normalluft auf 26m.

Diese 26m nennt man nun die äquivalente Stickstofftiefe (END) von 34m für dieses Nitrox-Gemisch. Das heisst, dass ich die Nullzeiten und die Dekostopps für einen 34m-Tauchgang mit dem NOAA II-Gemisch in der Dekotabelle bei 26m nachschlagen kann. Die Tiefe der Dekostufen bleiben dabei gleich. Dass die Entsättigung schneller verläuft, stellt ein weiteres Sicherheitsplus dar.

Sauerstoffvergiftung:

Stellt beim Presslufttauchen der Stickstoffpartialdruck und der damit verbundene Tiefenrausch eine natürliche Tiefengrenze dar, so sind wir beim Nitrox-Tauchen durch die Gefahr der Sauerstoffvergiftung eingeschränkt. Diese tritt auf, wenn der O₂-Partialdruck einen gewissen Wert überschreitet. In der Sporttaucherei gilt als Obergrenze für den Sauerstoff-Partialdruck 1,6 bar. Mehr davon im nächsten Abschnitt. Die Tiefe, in welcher für ein bestimmtes Gemisch dieser O₂-Partialdruck von 1,6 bar erreicht wird, heisst maximale Nutzungstiefe, die Bezeichnung dafür ist "MOD". **Wichtig:** die Auswirkungen des Stickstoffs werden bei der MOD nicht berücksichtigt.

Die gängigsten Gemische mit MOD und END:

Gemisch:	Inhalt in % N ₂ / O ₂	max. Tauch- tiefe (MOD)	Nullzeit auf MOD	äquivalente Tiefe (END)
Pressluft	79 / 21	(66 m)	0'	66 m
Nitrox-0	71 / 29	45 m	10'	39 m
NOAA-I	68 / 32	40 m	14'	33 m
Nitrox-D	67.5 / 32.5	39 m	14'	32 m
NOAA-II	64 / 36	34 m	20'	26 m
Nitrox-C	60 / 40	30 m	35'	21 m
SaveAir	50 / 50	22 m	125'	11 m
Nitrox-B	40 / 60	16 m	unbegrenzt	3 m

Der **Vorteil** des Nitrox-Tauchens ist in erster Linie die geringere Stickstoffbelastung des Organismus gegenüber Pressluft-Tauchgängen:

- längere Nullzeiten, kürzere Dekompressionszeiten
- geringere Gefahr der Stickstoffnarkose (Tiefenrausch)
- verminderte Mikroblasenbildung während und nach dem Tauchgang

Die **Nachteile** liegen primär darin, dass alles noch ein bisschen komplizierter wird. Das heisst, auch die Ansprüche an den Nitrox-Taucher und dessen Material sind höher:

- Atemgemisch muss vor jedem Tauchgang von neuem bestimmt werden.
- Spezielle Ausrüstung: z.B. brauchen Automaten und Flaschen eine spezielle Sauerstoff-Zulassung, weiter sind nur bestimmte Fette zugelassen, da der erhöhte Sauerstoff-Partialdruck (pO₂) eine Explosionsgefahr darstellt.
- Nitrox gibts nicht an jeder beliebigen Füllstation, die Füllung kostet ca. 10.- Fr.

Für wen ist der Einsatz von Nitrox sinnvoll?

Vorteile ergeben sich für diejenigen Taucher,

- welche längere Tauchgänge in mittleren oder geringeren Tiefen planen (z.B. Ferientauchgänge im Meer),
- welche häufig zur Oberfläche zurückkehren müssen (Jojo- und Repetivtauchgänge), vor allem Tauchlehrer und Berufstaucher, oder
- welche, unter Einhaltung von Nullzeiten und Dekos, bereits einmal Schwierigkeiten mit der Dekompressionskrankheit bekundet haben.

Sauerstoffvergiftung

Einführung:

Beim Tauchen mit Pressluft wird die maximale Tiefe durch den Stickstoff bestimmt. Dies ist anders beim Nitroxtauchen; dort wird bei den meisten Gemischen die Tiefenlimite durch den Sauerstoff festgelegt. Beschäftigt wir uns mit Nitroxtauchen, werden wir immer wieder mit dem Begriff der Sauerstoffvergiftung (Mediziner und Möchtegern-Fachmänner reden gerne von der Hyperoxie) konfrontiert.

Was ist eigentlich Sauerstoff?

Sauerstoff - O₂ in der Sprache des Chemikers - ist ein durchsichtiges, farb-, geruch- und geschmackloses Gas. Es kommt in der Luft und in vielen chemischen Verbindungen vor.

Organische Stoffe wie Holz, Öl oder Benzin brauchen Sauerstoff, um zu verbrennen. Einen ähnlichen Vorgang beobachten wir in den Zellen unseres Körpers, wo unsere Nahrung mit dem Sauerstoff "verbrannt" wird. Dieser Verbrennungsvorgang in unseren Zellen liefert uns Wärme und Energie für die Fortbewegung.

Führen wir einem Feuer vermehrt Sauerstoff zu (Pusten beim offenen Feuer oder das Gaspedal im Auto durchdrücken), dann wird die Verbrennung verstärkt und es wird mehr Energie freigesetzt; vielleicht etwas zu viel, was zu einer Explosion führen kann. Denselben Effekt können wir auch in unserem Körper beobachten, wenn der Sauerstoff-Partialdruck (ppO₂) erhöht wird, was ja beim Tauchen der Fall ist.

Wo liegen nun aber die Gefahren?

Der Sauerstoff-Partialdruck:

Beim Tauchen ist oft von den Limiten des Sauerstoff-Partialdruckes die Rede: 1,6 bar ppO₂ in warmen Gewässern und ohne Anstrengung; 1,4 bar ppO₂ in kaltem Wasser. Was viel nicht wissen, ist, dass schon bei viel kleineren Partialdrücken (bereits ab 5 m Tauchtiefe) Veränderungen im Körper festgestellt werden können.

Praktische Grenzen der Sauerstoffatmung:

bis 0,12 bar = 4000 m ü.M.	ohne Anpassung zu niedrig (Ohnmacht, Tod)
0,16 bar = 2400 m ü.M.	Minimum für uneingeschränkte normale Funktion
0,21 bar = Meeresspiegel	für diesen Druck hat Gott uns vorgesehen ☺
bis 0,3 bar = 4 m Tiefe	Langzeitaufenthalt ohne Probleme möglich
0,5 bar = 14 m Tiefe	Maximalwert für Langzeit-Tauchgänge (24 Stunden), erste Symptome der Sauerstoffvergiftung möglich
1,4 bar = 57 m Tiefe	Limite bei kaltem Wasser oder Anstrengung
1,6 bar = 66 m Tiefe	Limite bei warmem Wasser und keiner Anstrengung
2,0 bar = 85 m Tiefe	Hyperbare Sauerstoff-Therapie, Dekompressionskammer maximal 3 Stunden
3,0 bar = 133 m Tiefe	Behandlung Deko-Unfälle, Dekompressionskammer maximal 2 Stunden
4,0 bar = 180 m Tiefe	Dekompressionskammer maximal 40 Minuten

Aber was geschieht nun eigentlich in unserem Körper? - Wir unterscheiden zwei grundsätzlich verschiedene Effekte, die bei unterschiedlichen Bedingungen auftreten. Dies sind der Lorrain Smith- und der Paul Bert-Effekt.

Lorrain Smith (Lunge)

Das Atmen von Sauerstoff bei einem Partialdruck von mehr als 0,3 bar über mehrere Stunden führt zu einer Entzündung der Atemwege, insbesondere der Lunge. Die Lungenbläschen sind nur bis zu einem gewissen Sauerstoffpartialdruck und einer

bestimmten Einwirkungsdauer fähig, den Einfluss durch den aggressiven Sauerstoff zu kompensieren; anschliessend werden sie beschädigt. Dies zeigt sich in der Reduktion der Vitalkapazität, also der Differenz des Lungenvolumens zwischen Ein- und Ausatmung. Durch die Veränderungen in der Lunge wird der Gasaustausch stark behindert, dies führt zu einem Sauerstoffmangel; wir ringen nach Luft und die Reizung der Atemwege zwingt uns zum Husten. Wird der Sauerstoffpartialdruck nicht verringert, besteht die Gefahr des Erstickens.

Unter Normalbedingungen, das heisst bei einem Sauerstoffpartialdruck von 0,21 bar, regenerieren sich Lunge und Atemwege in einigen Stunden.

Paul Bert (ZNS)

Erreicht der Sauerstoffpartialdruck mehr als 1,6 bar, kann ohne Vorwarnung Bewusstlosigkeit eintreten. Diese wird durch die toxische Wirkung des Sauerstoffes auf unser Gehirn ausgelöst. Die erforderliche Einwirkungsdauer ist deutlich kürzer als beim Lorrain Smith-Effekt, dafür wird ein viel höherer Sauerstoffpartialdruck benötigt. In kaltem Wasser oder bei Anstrengungen tritt der Paul Bert-Effekt bereits bei weniger als 1,6 bar ppO₂ auf.

Falls Symptome vor der Bewusstlosigkeit auftreten, zeigen sie sich durch unkontrollierte Entladungen von Nervenimpulsen, wie epileptische Anfälle, Zucken, Krämpfe, Sehstörungen und akustische Täuschungen, sowie durch Übelkeit und Erstickungsgefühle.

Die Symptome verschwinden kurz nach Reduktion des Sauerstoffpartialdruckes.

Zusammenfassung:

Wir haben gesehen, dass zwei Effekte durch den erhöhten Sauerstoffpartialdruck ausgelöst werden, wobei die Beeinträchtigung auf die Lunge eine sehr lange Einwirkungsdauer voraussetzt und somit nicht von Relevanz für das Tauchen mit Luft oder Nitrox ist. Der Einfluss auf unser Gehirn tritt schon nach kurzer Zeit auf, so müssen wir beim Nitroxtauchen auf die Einhaltung der maximalen Tauchtiefe (MOD) achten; für Lufttauchgänge wird die Tiefe schon früher, durch die Stickstoffsättigung, limitiert.

Die Sauerstoffvergiftung spielt für Lufttaucher also nur eine untergeordnete Rolle. Es ist jedoch interessant, zu sehen, dass der Sauerstoff, sozusagen das Gas des Lebens, unter gewissen Umständen auch zu einer ernstzunehmenden Gefahr werden kann.

Sauerstoffdekompression

Der Einsatz von Sauerstoff während der Dekompression dient zur Verkürzung der Aufstiegszeit. Bei einer Dekompressionszeit von 30' kann so etwa 10' eingespart werden. Mit dieser Verkürzung kann so eine Unterkühlung verhindert oder das Erreichen der Oberfläche vor Einsetzen der Gezeiten ermöglicht werden. Der Einsatz von Sauerstoff drängt sich so bei Tauchgängen auf, die den Rahmen des Sporttauchens sprengen, dabei denke ich an Wracks oder Höhlen mit langen Grundzeiten (grösser 20 Minuten) im 40m-Bereich.

60-Prozent-Regel

Verwendet man Sauerstoff während der Dekompression, ist der Stickstoffanteil auf Null reduziert, so kann die Dekompressionszeit deutlich verkürzt werden. Die Verkürzung erfolgt nach der 60-Prozent-Regel, die ursprünglich von der französischen Firma Comex stammt. Um die Dekompressionszeit mit Sauerstoffatmung zu bestimmen, werden die Dekompressionszeiten der 3m und 6m Stufen aus der Pressluft-, Nitroxtablette oder dem Tauchcomputer addiert und mit dem Faktor 0.6 multipliziert. Die Dekompression mit Sauerstoff wird dann mit der so ermittelten Dekompressionszeit auf 6m Tiefe durchgeführt. Allfällige tiefere Dekompressionsstufen als 6m müssen mit dem Tauchgangsgas absolviert werden, so wird der maximal tolerierte Sauerstoffpartialdruck von 1.6bar nicht überschritten.

Blasenbildung – Sauerstoff-Fenster

Das "Sauerstoff-Fenster" beschreibt eine Druckdifferenz zwischen den Alveolen und dem venösem Blut, diese Differenz entsteht durch den Stoffwechsel. Der Sauerstoff wird durch das Blut zu den Zellen transportiert, wo der Stoffwechsel den Sauerstoff in Kohlendioxid umwandelt, dieses ist ca. 21-mal löslicher als Sauerstoff, dies führt dazu, dass der Druck der gelösten Gase abnimmt. Betrachten wir die Verhältnisse am Beispiel von Luftatmung auf Meereshöhe:

	Atemluft	Alveoläres Gas	Körpervene
Sauerstoff (O ₂)	152 mmHg	104 mmHg	40 mmHg
Kohlendioxid (CO ₂)		40 mmHg	45 mmHg
Stickstoff (N ₂)	608 mmHg	570 mmHg	570 mmHg
Wasserdampf (H ₂ O)		46 mmHg	46 mmHg
Totaldruck	760 mmHg	760 mmHg	701 mmHg

In unserem Beispiel beträgt das Sauerstoff-Fenster 760mmHg - 701mmHg =59mmHg, in der Literatur wird für diese Druckdifferenz auch der Begriff ‚inhärente Untersättigung‘ verwendet.

Die Deko-technische Relevanz liegt darin, dass diese Druckdifferenz dem Blasenwachstum entgegen wirkt. Je größer die Differenz desto schneller verschwinden Blasen und um so schwerer ist es, dass weitere Blasen entstehen.

Da der grösste Teil des Sauerstoffs ans Hämoglobin gebunden ist und sehr wenig physikalisch gelöst transportiert wird, ist verständlich, dass selbst bei hohen Sauerstoffpartialdrücken im Atemgemisch den Sauerstoffpartialdruck im venösen Blut nicht stark beeinflusst wird, d.h. dieser beträgt immer noch ca. 41mmHg, das ‚Oxygen Window‘ vergrössert sich. Bis zu einem Sauerstoffpartialdruck von einigen bars wird der Sauerstoffbedarf zum grössten Teil durch den ans Hämoglobin gebundenen Sauerstoff gedeckt, so fällt der Sauerstoffpartialdruck in den Körpervenen immer auf einen sehr kleinen - quasi konstanten - Wert ab. Fasst man diese Aussage zusammen, finden wir, dass mit einem hohen Sauerstoffpartialdruck im Atemgemisch das Sauerstoff-Fenster geöffnet wird.

Dekomprimieren wir mit reinem Sauerstoff auf 6m, ist das Sauerstoff-Fenster maximal geöffnet. Dies zeigt sich so, dass nur sehr wenige Mikroblasen gebildet werden. Nach Tauchgängen mit Sauerstoffdekompression nach der 60-Prozent-Regel fühlte ich mich deutlich besser (weniger müde), als bei Tauchgängen mit ähnlichem Profil und Dekompression nach Tauchcomputer.

Tauchrüstung

Tauchmaterialien die zur Dekompression mit 100% Sauerstoff benutzt werden, müssen absolut sauerstofftauglich sein. Sie müssen speziell gekennzeichnet sein und dürfen auf keinen Fall mit normaler Luft benutzt werden. Bei der Wahl der Ausrüstung müssen folgende Vorschriften befolgt werden.

Sauerstoffflasche

Der Behälter für Sauerstoff muss nach alter Vorschrift (noch gültig bis 1.Juli 2006) ganzheitlich die Farbe blau aufweisen und die Bezeichnung Sauerstoff muss eingestempelt sein. Nach der neuen Norm ist der Behälter weiss und während der Dauer der Umstellung zusätzlich mit einem ‚N‘ gekennzeichnet.

Lungenautomat

Alle Hochdruckteile an einem Lungenautomaten müssen sauerstofftauglich sein. Dies muss vom Hersteller schriftlich bestätigt sein.

Finimeter

Es gelten die gleichen Bestimmungen wie für Lungenautomaten.

Probleme

Der Sauerstoffpartialdruck beträgt während der ganzen Dekompressionszeit den maximal tolerierten Wert von 1,6bar. So müssen verschiedene Massnahmen zur Verhinderung einer Sauerstoffvergiftung ergriffen werden.

Der Einfluss des erhöhten Sauerstoffpartialdruckes muss in der Tauchgangsplanung berücksichtigt werden, dies erfolgt mit Hilfe der CNS-O₂%. Zum Beispiel ergibt eine Minute bei einem Sauerstoffpartialdruck von 1.6bar eine CNS-O₂% von 2.2%, bei 100% ist mit einer Sauerstoffvergiftung zu rechnen.

Bei der Dekompression im freien Wasser müssen geeignete Mittel eingesetzt werden, um ein Absinken unter die Tiefe von 6m zu verhindern, unterm Boot kann eine Dekostange montiert werden, im Freiwasser kann eine Boje mit einem Reel eingesetzt werden. Die Boje sollte einen Auftrieb von mindestens 15-20kg haben, eine Signalfarbe ist von Vorteil.

Die Verwendung einer Vollgesichtsmaske bringt eine zusätzliche Sicherheit. Sie verhindert ein Aspirieren von Wasser bei Bewusstseinsverlust oder bei Krampfständen durch eine Sauerstoffvergiftung. Der Einsatz eines Sicherheitstauchers, welcher sich während der Dekompression bei den Tauchern befindet, erhöht ebenfalls die Sicherheit.

Zusammenfassung

Durch die Verwendung von Sauerstoff für die Dekompression reduziert sich die Dekompressionszeit um etwa 40%. Dies ermöglicht dem Taucher, von folgenden **Vorteilen** zu profitieren:

- Längere Grundzeit gegenüber der Dekompression mit Luft oder Nitrox möglich.
- Dekompression bei relativ hohem Umgebungsdruck, d.h. geringere Neigung zur Mikrogasblasenbildung während der Dekompression.
- Durch kürzere Dekompression kleinere Auskühlung während der Dekompression.

Dem gegenüber stehen auch einige **Nachteile** von Sauerstoff als Dekompressionsgas:

- Sauerstoffpartialdruck während der Dekompression dauernd auf dem Maximalwert.
- Hoher Aufwand bezüglich Material und Tauchgang-Planung.
- Hohe Ansprüche an Sauberkeit und Wartung der Sauerstoffflaschen und –Automaten.

Ausbildung im SUSV

Nitrox Diver: min. Alter: 18 Jahre
Ausbildung: T*-Taucher oder äquivalent

Nach Kursabschluss kann der "Nitrox Diver" selbständig Tauchgänge mit Nitrox bis zu 40% Sauerstoff planen und durchführen (Bergsee ausgenommen).

Advanced Nitrox Diver: min. 5 Nitrox-Tauchgänge
Ausbildung: T**-Taucher oder äquivalent

Nach dem Abschluss des Kurses kann der „Advanced Nitrox Diver“ selbständig Tauchgänge mit allen Nitroxmischungen in verschiedenen Höhenlagen planen und durchführen und Sauerstoff zur Dekompression einsetzen.