

PATD

Nitrox-Manual



Albrecht Salm
Master Scuba Diver Trainer
PADI MSDT # 33913

SSI SCUBA SCHOOLS INT.
® Albrecht Salm
Instructor No. 12653



Dr. Bernd Aspacher

2001
127X



NITROX	5
Tiefenrausch/Stickstoffnarkose	6
Längere Nullzeitgrenzen	6
Kürzere Deko-Stopps	8
Wiederholungsplan	9
Bergseetauchen	9
Nitrox-Atemgas und Lufttabelle	10
Die Nachteile des Nitrox-Tauchens	11
Neuronale Sauerstoffvergiftung.....	11
Pulmonale Sauerstoffvergiftung	12
Gase mischen	12
Rechtslage	14
TAUCHEN MIT NITROX	16
Partialdruck und Dalton'sches Gesetz	16
Druck.....	16
Hydrostatischer Druck*.....	16
Barometrischer Druck*	17
Praktische Vereinfachung	17
T-im-Kreis.....	19
Wieviel Sauerstoff braucht der Körper?	20
Neuronale Sauerstoffvergiftung	22
Symptomatik.....	22
CNS-Uhr.....	23
Zuverlässigkeit der CNS%.....	25
Pulmonale Sauerstoffvergiftung	27
Symptomatik.....	27
Maximale Einsatztiefe MOD	28
Wie tief darf ich mit einer gegebenen Mischung tauchen?	28
Beste Mischung (best mix)	30
Was ist die beste Mischung für die angestrebte Tauchtiefe?	30
Prinzip der äquivalenten Lufttiefe	32
Gleichheit der Stickstoffpartialdrücke	32
Wie kann man die EAD nutzen?.....	33
Dekompression mit dem EAD-Prinzip*	34



Nonsens zum Thema Nitrox	35
AUSRÜSTUNG	36
GASANALYSE.....	38
Verantwortlichkeit	39
ÜBUNGEN	40
LÖSUNGEN	45
ANHANG	51
US-NAVY-Tabellen.....	51
Deko92 Luft, Bergsee, Nitrox32, Nitrox36	52
Sauerstoffpartialdruck Nitroxgemische.....	55
CNS% pro Mintute für Nitroxgemische.....	56
OTU/Minute für Sauerstoffpartialdrücke.....	57
OTU-Kontrolle für Nitroxgemische.....	57
END / EAD für Nitroxgemische	58
Maximum Operation Depth	58



Hallo PATD-Taucher,

ich hoffe, du wirst an diesem Kurs Spass haben und ich bin davon überzeugt, dass du etwas Neues dazu lernst.

Ich bin seit 1990 Tauchlehrer. Als ich Ende 1991 für 3 Jahre nach Florida ging, tat ich dies im naiven Glauben, dass mir kaum noch jemand im Tauchen etwas beibringen könnte. Dieser Glaube wurde sehr schnell und jäh zerstört – zum Glück. Von Nitrox hatte man bis dahin unter deutschen Sporttauchern noch nie etwas gehört. Einige Forschungstaucher oder Mediziner und die Marine kannten diese Art des Tauchen zwar, aber die große Masse der Taucher war ahnungslos. Als ich meinen Nitrox-Kurs belegte, da tat sich für mich eine neue faszinierende Welt auf: die Welt des Mischgastauchens. Im Nitroxkurs werden schätzungsweise rund die Hälfte des Basiswissens hierfür vermittelt. Dieser Kurs ist der perfekte Einstieg für diejenigen, die extremer tauchen wollen und er ist eine ideale Ergänzung zur Sporttaucherausbildung für diejenigen, die innerhalb der altbewährten Grenzen noch mehr Sicherheit oder längere Tauchzeiten haben wollen. Als ich im Sommer 1993 den vermutlich ersten offiziell ausgeschriebene Nitroxkurs für Sporttaucher in Deutschland unterrichtet habe, da hoffte ich auf einen Erfolg dieses Gases. Heute weiß ich, dass Nitrox ein fester Bestandteil des Tauchens ist und bleiben wird – und du kannst ab jetzt daran teilhaben.

Diese Manual setzt sich aus verschiedenen Abschnitten zusammen. Der erste Artikel gibt dir einen Überblick über das Tauchen mit Nitrox. Lies ihn dir durch und entscheide selbst, ob Nitrox etwas für dich ist oder nicht – ich wette jedoch, dass es dich interessieren wird. Der nächste Artikel gibt dir einen sehr detaillierten Einblick. Die Abschnitte, welche mit einem Stern* markiert sind, kannst du im Kurs auch übergehen, wenn du willst. Diese Sachverhalte sind jetzt noch nicht relevant; du kannst sie natürlich aber auch lesen. Dann folgt ein Abschnitt mit Übungsfragen und den dazugehörigen Lösungen und zu guter Letzt einige Seiten mit Tabellen, welche dir das Rechnen ersparen können.

Nun wünsche ich viel Spass, einen positiven Lernerfolg, viele schöne Nitrox-Tauchgänge und allseits Lungenriss und Haifischbiss.

Bernd Aspacher
16.5.2001



Nitrox

Nullzeitkiller, Deco-Booster, Non-Limit-Pusher, Helfer in allen Situationen ein Überblick

Nitrox ist ein aus dem Englischen bzw. Lateinischen stammendes Kunstwort, das sich aus nitrogen (Stickstoff) und oxxygen (Sauerstoff) zusammensetzt. Mit Nitrox bezeichnet man also Stickstoff - Sauerstoff - Gemische. Wenn man beim Tauchen umgangssprachlich von Nitrox spricht, meint man sauerstoffangereicherte Luft (EANx enriched air nitrox, x = Sauerstoffanteil) mit mehr als 25% Sauerstoff. Über die Vor- und Nachteile bei der Verwendung dieser Atemgemische soll dieser Artikel informieren.

Atmen von Nitrox ist nichts Neues. Bereits beim Bau des Hudson-Tunnels stellte man fest, dass die Caisson-Arbeiter weit weniger von der damals noch rätselhaften Deko-Krankheit befallen wurden, wenn dem Atemgas mehr Sauerstoff beigemischt wurde. Bereits 1912/13 bauten die deutschen Firmen Westfalia und Dräger Atemgeräte, die mit Nitrox arbeiteten. Wenn etwas funktioniert, so kommt sein Nutzen meist zuerst dem Militär zugute, so auch beim Nitroxtauchen. Ihm folgten nach dem zweiten Weltkrieg die wissenschaftlichen und kommerziellen Taucher. Als Nitrox 1985 in das Sporttauchen Einzug hielt, konnten die Instrukturen also auf eine reichhaltige Erfahrung mit zigtausend Tauchgängen zurückgreifen. Dick Rutkowski, Gründer des ersten Nitrox-zertifizierenden Verbandes, war 33 Jahre bei der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) und 18 Jahre Direktor des Druckkammer-Ausbildungszentrums in Florida.

Warum also reichert man das Atemgemisch mit Sauerstoff an? Spontan würde man vermuten um dem Körper eben mehr von dem von ihm so begehrten Gas zukommen zu lassen. Doch weit gefehlt, denn beim Atmen von Luft in der Tiefe bekommt der Körper wegen des höheren Sauerstoffpartialdrucks sowieso mehr davon ab, als er benötigt. Der problematische Faktor beim Tauchen ist jedoch der Stickstoff und dieser wird zum Teil durch den hinzugegebenen Sauerstoff ersetzt. Eigentlich wäre nitrogen reduced air der treffendere Name, denn dies ist der wahre Grund für die Sauerstoffanreicherung. Welche Vorteile entstehen dem Taucher, wenn sein Atemgemisch weniger Stickstoff enthält?



Tiefenrausch/Stickstoffnarkose

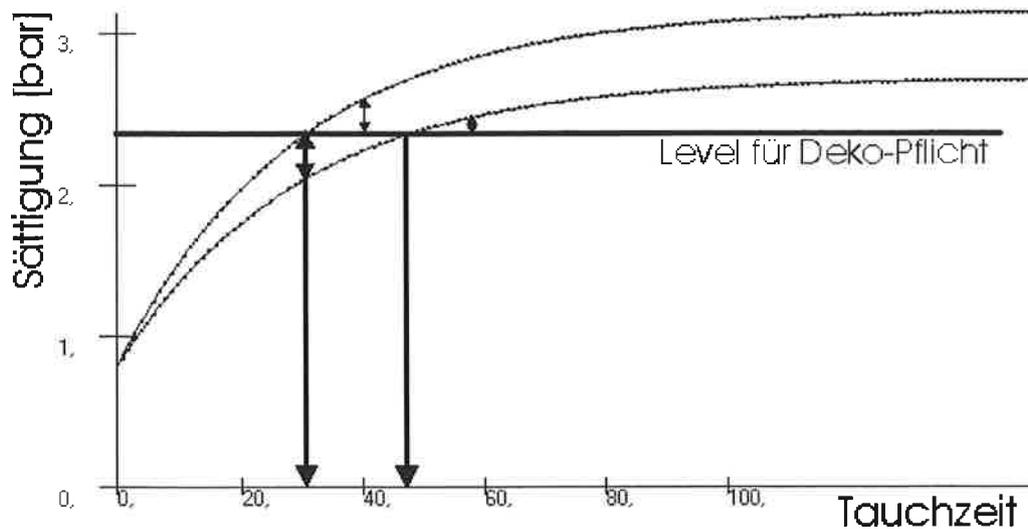
Der Stickstoff wird als die Hauptursache des Tiefenrausches angesehen. Je höher der Stickstoffpartialdruck ist, desto höher wird seine narkotisierende Wirkung. Durch den geringeren Stickstoffanteil wird bei gleicher Tiefe somit auch dessen Partialdruck verringert. Mit einem Gemisch, das nur 68% Stickstoff enthält an Stelle der normalen 79%, entspricht die narkotische Wirkung in 40 Metern Tiefe also der eines Tauchgangs mit Luft in 33 Metern Tiefe. In wie weit dieser Effekt vom zusätzlich im Blut gelösten, nicht an Hämoglobin gebundenen Sauerstoff kompensiert wird, ist jedoch noch nicht erforscht.

Längere Nullzeitgrenzen

Die Nullzeitgrenzen werden ebenfalls vom Stickstoffpartialdruck im Atemgas bestimmt, da dieser Menge und Geschwindigkeit des sich im Körper lösenden Stickstoffs festlegt. Wenn nun in einer bestimmten Tiefe weniger Stickstoff gelöst wird, dauert es eben länger, bis die kritischen Sättigungswerte erreicht werden, ab denen ein Auftauchen ohne Deko-Stopps nicht mehr möglich ist. Somit kommt es zu einer Verlängerung der Nullzeitgrenzen. Folgende Tabelle gibt einen Vergleich der Nullzeitengrenzen (in Minuten) für Luft, NOAA I (Standardmischung 32% Sauerstoff) und NOAA II (Standardmischung 36% Sauerstoff) wieder. Dieses und alle folgenden Beispiele dieses Artikels sind mit der US-NAVY Tabelle errechnet.

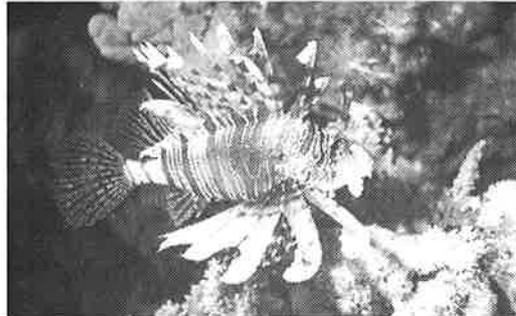
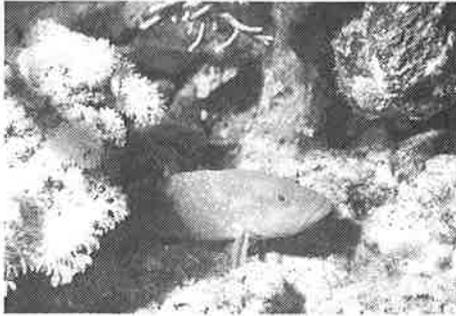
TIEFE [METER]	LUFT	NOAA I	NOAA II
9	310	315	325
12	200	310	310
15	100	200	200
18	60	100	100
21	50	60	60
24	40	50	60
27	30	40	50
30	25	30	40
33	20	25	30
36	15	25	---
39	10	20	---

Vergleich der Nullzeitgrenzen für Luft, Nitrox32 und Nitrox36 nach US-Navy.



Die Sättigung mit Stickstoff erfolgt mit stickstoffreduzierten Gemischen langsamer (unter Kurve). Während diese erst bei ca. 45 Minuten die kritische Stickstoffsättigung erreicht, geschieht dies bei stickstoffreichen Gemischen viel früher (ca. 30 Minuten). Ferner ist erkenntlich, dass ein möglicher Schaden bei gleichem Überschreiten der Nullzeitgrenze mit Nitrox geringer ausfällt.

Berechnet werden diese Nullzeiten nach dem "Prinzip der äquivalenten Lufttiefe", auch äquivalente Narkose- oder Stickstofftiefe genannt. Dieses kann auf jegliche Lufttabelle angewendet werden. Hierzu berechnet man zuerst den Stickstoffpartialdruck des Nitrox-Gemisches in der geplanten Tauchtiefe. Dann berechnet man, in welcher Tiefe derselbe Partialdruck erreicht würde, wenn man mit Luft unterwegs wäre. Die diesem Druck entsprechende geringere Tiefe ergibt die äquivalente Lufttiefe. Man kann nun einfach die Nullzeiten dieser äquivalenten Lufttiefe, abgelesen in der Lufttabelle, für die reale Tiefe, getaucht mit Nitrox, benutzen. Man plant z.B. einen Tauchgang auf 24 Meter mit einem 36/64-Nitrox Gemisch (beim Tauchen wird immer zuerst der Sauerstoffanteil angegeben, in der Industrie manchmal der Stickstoffanteil, also Vorsicht!). Getaucht mit Luft läge die Nullzeitgrenze bei 40 Minuten. Den Stickstoffpartialdruck von ca. 2.2 bar würde man, falls mit Luft getaucht würde, bereits in knapp 18 Meter Tiefe erreichen. Die Lufttabelle gibt für 18 Meter eine Nullzeitgrenze von 60 Minuten an, und somit kann mit der 36/64-Mischung auf 24 Metern ebenfalls 60 Minuten getaucht werden, ohne dass an Deko-Stopps gedacht werden muss. Nehmen wir einen schönen Wracktauchgang zur 'Jura', ein Schaufelraddampfer, der in 38 Metern Tiefe im Bodensee liegt. Wenn man dort 15 Minuten verweilen will, so wird man, falls man mit Luft taucht, bereits mit Deko-Stopps bestraft. Mit Nitrox-32 hält man sich immer noch 5 Minuten von der Nitrox-Nullzeitgrenze entfernt. Dies gibt dem Taucher die nötige Sicherheit, auch im Hinblick auf die dort herrschende Kälte oder auf einen langsamen, sicheren Aufstieg. Was für den Bodensee gilt, ist selbstverständlich auch für die Wracktaucher in der Ostsee gültig um nur einige sinnvolle Einsatzgebiete für das Nitroxtauchen in Deutschland zu nennen.



Wer möchte hier nicht etwas länger bleiben? Nitrox ist ideal für Sporttaucher im Urlaub.



Und wer möchte hier nicht so schnell wie möglich wieder hin? Nitrox ermöglicht viele Varianten, den Tauchplan positiv zu verändern.

Kürzere Deko-Stopps

Für diejenigen, die die Nullzeitgrenzen überschreiten wollen, bringt Nitrox den Vorteil, dass auf Grund des weniger aufgenommenen Stickstoffs die Deko-Pausen kürzer werden. Für einen eine Stunde dauernden Tauchgang auf 30 Metern verlangt die Lufttabelle insgesamt 37 Minuten Dekopause, während die Nitrox-36 Tabelle den Taucher mit weniger als der Hälfte, nämlich mit 17 Minuten, davonkommen lässt. Mit speziellen Tabellen lässt sich Nitrox, und oberhalb 6 Metern Tiefe auch reiner Sauerstoff, als Deco-Booster benutzen. Getaucht wird zum Beispiel mit normaler Luft, auf den Deko-Stufen wird jedoch Nitrox geatmet. Dies verkürzt ebenfalls die Deko-Zeiten. Wenn man die Luft-Deko-Zeiten jedoch vollständig ableistet, fügt dieses Verfahren ein nicht zu unterschätzendes Quäntchen Sicherheit hinzu, da der Stickstoff wegen des größeren Konzentrationsgefälles schneller aus dem Körper ausdiffundiert, als die Lufttabelle eigentlich annimmt.

Sollte sich beim Tauchen, egal mit welchem Atemgemisch, ein Deko-Unfall ereignen, so ist eine der Erste-Hilfe-Maßnahmen das Verabreichen von reinem Sauerstoff. Wer solchen nicht zur Verfügung hat, sollte sich darüber im Klaren sein, dass das Atmen von Nitrox dem Verunglückten ebenfalls hilft; zwar nicht so gut wie reiner Sauerstoff, aber immer noch besser als Luft.



Wiederholungsplan

Sinnvoll lässt sich Nitrox auch dann einsetzen, wenn man eine bestimmte Anzahl von Tauchgängen in einer bestimmten Zeit absolvieren will. Dies kann z.B. für einen Tauchlehrer interessant sein, der einen vollen Ausbildungstag vor sich hat, oder für Taucher, die eine Woche Non-Limit-Tauchen gebucht haben und diese auch voll ausnutzen wollen. In welcher Zeit lassen sich drei 24 Meter-Tauchgänge mit einer Tauchzeit von je 30 Minuten absolvieren? Getaucht mit Luft dauert das erste Oberflächenintervall ca. $4\frac{1}{2}$ Stunden, das zweite ca. $5\frac{1}{4}$ Stunden. Ganz anders sieht der Zeitplan aus, wenn man Nitrox-36 anstelle der Luft benutzt. Die erste Oberflächenpause verkürzt sich auf eine $\frac{3}{4}$ Stunde, die zweite ist mit ca. $2\frac{1}{3}$ Stunden auch noch deutlich kürzer. Damit lässt sich sogar Zeit für einen weiteren Tauchgang gewinnen.

Bergseetauchen

Geht man Bergseetauchen mit Tabelle, so muss man erst die Höhenlage des Sees kennen um dann in speziellen Tabellen die Nullzeiten zu ermitteln, oder man muss seine normale Lufttabelle umrechnen. Die Tiefe muss um den Faktor "Luftdruck auf Meereshöhe / Luftdruck auf Bergseehöhe" tiefer gelegt werden, die Deko-Tiefen um denselben Faktor höher. Geht man Bergseetauchen mit dem Computer, so muss gewartet werden, bis sich der Bergseemodus einschaltet, oder es müssen Adaptionszeiten für den Körper abgewartet werden. Geht man Bergseetauchen mit Nitrox, dann geht man einfach Bergseetauchen mit seinem Computer oder seiner normalen Lufttabelle (nicht mit der Nitrox-Tabelle). Ich habe mit der Abyss-Software (Abysmal Diving, DATECH) Tauchgänge unter gleichen Bedingungen simuliert und dabei lediglich die Höhenlage auf 4000 Meter verändert, und wer taucht schon darüber? Dabei ergab sich für die Nullzeitgrenzen folgendes:

Tiefe	Luft, Höhe = 0m	Nitrox 32, Höhe = 4000m
20m	49 Min.	54 Min.
30m	20 Min.	21 Min.
40m	11 Min.	11 Min.



Nitrox-Atemgas und Lufttabelle

Als wichtigsten Sicherheitspunkt zur Vermeidung der Dekompressionskrankheit sehen die Befürworter des Nitroxtauchens das Tauchen mit Nitrox bei gleichzeitiger Verwendung von Lufttabellen. Jedem Taucher sollte klar sein, dass keine Tabelle/Computer einen hundertprozentigen Schutz gegen die Deko-Krankheit bietet, insbesondere dann nicht, wenn man wiederholt an die Grenzen der Tabelle geht. Dies gilt selbstverständlich auch für Nitroxtabellen. Wer an deren Grenzen taucht, geht dasselbe Risiko ein, als ob er mit Luft und Lufttabelle taucht. Limit pushing bedeutet immer erhöhtes Risiko und oftmals entscheidet lediglich die körperliche Verfassung über das Auftreten oder Nichtauftreten der Deko-Krankheit. Wer aber mit Nitrox taucht und Lufttabellen verwendet, der kann genauso lange wie immer tauchen und dabei hart an die Grenzen gehen, bleibt aber dennoch weit von den echten Nitrox-Nullzeitgrenzen entfernt und bekommt somit einen immensen Bonus auf sein Sicherheitskonto.

Kritiker werden nun sagen, wenn ich mit einer Lufttabelle tauche, dann muss ich mir nicht das teurere Nitrox kaufen, das ist doch alles Geschäftemacherei. Es ist dasselbe Spiel, dass man Tabellen immer sicherer machen kann, indem man Nullzeiten verkürzt und Oberflächenpausen verlängert. Beide Argumentationen sind sicherlich richtig. Meiner Meinung nach muss man von Situation zu Situation entscheiden, ob Nitrox-Tauchen mit Lufttabellen oder Computern einen Sinn ergibt oder nicht, auch wenn es generell immer sicherer ist. Ein Taucher, der z.B. im Süßwasser auf Fototour geht und dabei maximal 10 Meter tief taucht, wird für diesen Tauchgang wohl kaum eine sinnvolle Einsatzmöglichkeit für Nitrox finden. Wer einen entspannten Urlaub mit ein oder zwei moderaten Tauchgängen am Tag macht, hat sicherlich auch keinen allzu großen Gewinn, wenn er Nitrox und Lufttabellen benutzt.

Um festzustellen, für wen das Verfahren einen echten Vorteil bringt, muss man sich zuerst einmal vergegenwärtigen, wie die am weitesten verbreiteten Tauchtabellen entwickelt und getestet wurden. Die US-NAVY - und die Bühlmann/Hahn-Tabellen wurden meines Wissens nach für zwei Tauchgänge pro Tag ausgelegt, jedoch nie in echten In-Wasser-Tauchgängen getestet, sondern nur in trockenen Druckkammertests. Der PADI-RDP wurde immerhin mittels Dopplermethode an Sporttauchern getestet (drei Tauchgänge pro Tag), aber ebenfalls nur für je einen Tag. Man geht beim Benutzen dieser Tabellen also stillschweigend davon aus, dass, was für zwei oder drei Tauchgänge an einem Tag in Ordnung ist, auch für vier, fünf oder sechs Tauchgänge an diesem Tag gilt. Wie sich mehrere aufeinanderfolgende Tauchtage auf den Körper auswirken, ist für keine Tabelle erforscht. Nehmen wir also den Tauchlehrer, der sechs Tieftauchgänge am Tag absolvieren muss. Er absolviert ohne Zweifel ein typisches Jo-Jo-Tauchen und hierfür sind die Tabellen/Computer nun wirklich nicht ausgelegt, zumal bei oftmaligem Auf- und Abtauchen auch die freie Gasphase (verschiedene Generationen und Wachstum



von Mikrobläschen) berücksichtigt werden muss. Dies ist jedoch in den gängigen Tabellen nicht der Fall. Selbst wenn selbiger Tauchlehrer immer innerhalb seiner Nullzeitgrenzen bleibt, so überschreitet er dennoch die Grenzwerte der Tabelle, weil diese eben nicht für eine solche Art des Tauchens ausgelegt ist. Führt er die Tauchgänge mit Nitrox durch und bleibt dabei innerhalb der Luftgrenzen, gewinnt er das nötige Sicherheitspolster.

Ein anderes, nicht erfundenes Beispiel: Malediven-Urlaub, Non-Limit-Tauchen; außer Tauchen kann man ohnehin nicht viel unternehmen, und wenn man schon bezahlt hat, dann will man alle Möglichkeiten ausnützen; vor allem wir Schwaben!. 6 Uhr Dämmerungstauchen, Frühstück, 9 Uhr Bootstauchgang, 11 Uhr Tauchen am Hausriff, Mittagessen, 14 Uhr Bootstauchgang, 17 Uhr Tauchen am Hausriff, Nachtessen, 21 Uhr Nachttauchgang, ab in die Bar. Selbst wenn nicht jeder Tag ein solch extremes Programm bietet, werden es auf jeden Fall vier Tauchgänge täglich, und das 14 Tage lang. Der Computer läuft die ganze Zeit durch, ohne sich auch nur ein einziges Mal auf Grund einer Entsättigung abzuschalten. Auch hierfür wurden die Computerprogramme niemals entwickelt oder wissenschaftlich getestet. Wäre es nicht im eigenen Sicherheitsinteresse, den einen oder anderen Tauchgang mit Nitrox durchzuführen und trotzdem innerhalb der Luftnullzeitgrenzen zu bleiben?

Nitrox-Tauchen hat noch einen weiteren Vorteil. Die Müdigkeit, die Taucher oft selbst nach einfachen Tauchgängen überkommt, wird dem ausdiffundierenden Stickstoff und den Mikrobläschen zugeschrieben. Wer also mit Nitrox in den Luftgrenzen taucht, wird von diesem Übel weniger befallen und ist somit leistungsfähiger.

Die Nachteile des Nitrox-Tauchens

Wo viel Licht ist, gibt es auch Schatten: hier einige Punkte, auf die man, abgesehen von den Deko-Grenzen, beim Tauchen mit sauerstoffangereicherten Atemgemischen beachten muss.

Neuronale Sauerstoffvergiftung

Als gefährlichster Aspekt ist sicher eine Sauerstoffvergiftung des zentralen Nervensystems zu erwähnen. Hierbei spielen der Sauerstoffpartialdruck und die Tauchzeit die entscheidende Rolle. Generell sollte beim Tauchen ein Sauerstoffpartialdruck von 1.6 bar nicht überschritten werden und die Tauchzeit sollte hierfür maximal 45 Minuten betragen. Will man länger tauchen, muss man den maximalen Partialdruck auf 1.5 bar oder weniger reduzieren. Wie lange man mit welchem Sauerstoffpartialdruck tauchen kann, ist einer speziellen Tabelle zu entnehmen. Diese gibt auch an, wie bei Wiederholungstauchgängen oder bei körperlich anstrengenden Tauchgängen (Arbeit, Strömung) zu verfahren ist. Wie genau muss



man sich an diese Grenzen halten? Ich würde im Interesse eines jeden Tauchers sagen: peinlich genau. Eine Adaption, wie sie beim Tiefenrausch zum Teil möglich erscheint, ist gegenüber der Sauerstoffvergiftung nicht durchführbar, zumal die individuelle Verträglichkeit extremen täglichen Schwankungen unterliegt. Wie wirkt sich nun eine solche Vergiftung aus? Genaues weiß man darüber noch nicht viel. Letzten Endes jedoch entfällt ein korrektes Funktionieren des zentralen Nervensystems und es kommt zu Krämpfen und Bewusstlosigkeit. Ertrinken ist immer das Endresultat, und dies ohne Ausnahme. Wer sich in die Reihe der Verunglückten nicht einreihen will, sollte sich deshalb innerhalb der Tiefen- und Zeitgrenzen bewegen. Den tiefenbesseren Tauchern sei noch gesagt, dass mit Luft ein Sauerstoffpartialdruck von 1.6 bar in 66 Metern Tiefe erreicht wird und in 80 Metern Tiefe bereits 1.9 bar beträgt. Sehr viele der tödlichen Tieftauchunfälle sind eben nicht Deko- oder Tiefenrausch bedingt, sondern die direkte Folge der Sauerstoffvergiftung.

Pulmonale Sauerstoffvergiftung

Eine weitere Schädigung durch hohe Sauerstoffpartialdrücke kann in den Lungen erfolgen. Gewebereizung, Verdickung der Alveolarmembranen und somit die Verringerung der Lungen-Vitalkapazität bis hin zum Lungenödem kann die Folge sein. Auftreten können diese Komplikationen bei Sauerstoffpartialdrücken von mehr als 0.5 bar, generell jedoch erst nach sehr langen Tauchzeiten. Somit stellen diese Lungenschädigungen für den Sporttaucher keinerlei Gefahr dar. Vorsicht ist nur dann geboten, wenn man mehrere lange Nitrox-Tauchgänge hintereinander durchführt und mit reinem Sauerstoff dekomprimiert. Dann kann der Körper jedoch über sogenannte 'oxygen tolerance units' (OTU/UPDT) kontrolliert werden, für die es ebenfalls eine spezielle Tabelle gibt.

Gase mischen

Ein weiteres Problem beim Nitrox-Tauchen ist das Mischen der Gase. Wohl dem Taucher, der, wie in Florida, Californien oder einigen Karibikinseln, nur in den Tauchladen zu gehen und sich das Gewünschte abzuholen braucht. Dies ist sicherlich die einfachste Methode. Von Profis werden die Gase kontinuierlich mit einem speziellen, schmierstofffreien und sauerstoffkompatiblen Kompressor gemischt. Dieser zieht reinen Sauerstoff und Luft im richtigen Mischungsverhältnis an und komprimiert sie.

Eine weitere Methode ist das Benutzen einer Abscheidemembran, die den unerwünschten Stickstoff zurückhält. Die billigste, aber bei weitem gefährlichste Methode ist das Mischen nach Partialdruck. Ich möchte von dieser Methode, sofern man nicht exakt weiß, was getan werden muss, eindringlich abraten, sie aber dennoch erwähnen, da man mit etwas Nachdenken auch von selbst auf diese Idee kommen kann. Man

gibt in die Tauchflasche einen gewissen, vorher berechneten Anteil an reinem Sauerstoff und füllt mit Pressluft aus dem Kompressor auf. Das Gefährliche hierbei ist das Hantieren mit reinem Sauerstoff, noch dazu unter hohem Druck. Wenn Siliconfett oder, noch schlimmer, Ölkondensat, das aus dem Luftkompressor stammt, mit reinem Sauerstoff in Kontakt kommt, kann es zu einer spontanen Explosion der Flasche kommen. Diese Mischmethode ist also nur möglich, wenn Flasche und Flaschenventil vorher für Sauerstoffgebrauch gereinigt wurden und die Pressluft keine Öldämpfe enthält. Die Gefahr einer spontanen Explosion ist jedoch gebannt, wenn man Gemische mit weniger als 40% Sauerstoff in seine Flasche füllt (USA-Richtlinie). Da die meisten Tauchgänge mit einem 32% oder einem 36% Gemisch durchgeführt werden, ist die Reinigungsprozedur hierfür nicht nötig (nach US-Reglement), wenn das Gas bereits gemischt eingefüllt wird. Man kann also seine ganz normale Tauchausrüstung benutzen, rein physikalisch gesehen. Nach deutschem Recht muss man dennoch eine Sauerstoffflasche verwenden.



Das Mischen der Gase kann gefährlich sein und erfordert spezielle Kenntnisse und Sonderausrüstung (Wilhelm).

Das ulkige Argument, dass durch die hohen Sauerstoffpartialdrücke in der Tiefe eine Explosionsgefahr besteht, ist reiner Unsinn, da zum einen der die Verbrennung dämpfende Stickstoffpartialdruck im gleichen Maße zunimmt, zum anderen der Sauerstoffpartialdruck von Nitrox-32 in seiner maximalen Einsatztiefe 1.6 bar erreicht und ich noch nie von einem Lungenautomaten gehört habe, der in 66 Metern Tiefe, durchflutet von Luft und somit demselben Sauerstoffpartialdruck ausgesetzt, explodiert ist. Wer jedoch ausnahmsweise mit mehr als 40% Sauerstoff tauchen will, sollte seinen Lungenautomaten reinigen und spezielle O-Ringe einsetzen. Zugelassene Automaten sind inzwischen auch erwerbbar, was dem Taucher als Endverbraucher eine gewisse Sicherheit in Punkto Produkthaftung gibt. Das eben beschriebene Gemisch darf aber niemals in einen Trockentauchanzug gefüllt werden! Ein überspringender Funke im Unterzieher kann die ganze Kleidung in Brand setzen.

Um über das Mischungsverhältnis genau informiert zu sein, muss das Gas zu guter Letzt mit einem Sauerstoffmessgerät analysiert werden, denn allen Vorabrechnungen zum Trotz kommen doch immer wieder leichte Abweichungen vom gewünschten Sauerstoffgehalt vor.



Eine sorgfältige Analyse der Gasgemische ist eine zwingende Tugend.
Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser Lenin

Rechtslage

Ein weiteres Problem liegt in der Rechtslage: Jede Gasart hat ein anderes Flaschenventil, eine Regelung, die bisher auch durchaus sinnvoll war. Mit dem breiten Einzug von Nitrox (bzw. Deko-Sauerstoff und Trimix) in die Taucherei sollte jedoch überlegt werden, ob nicht eine Regelung gefunden werden kann, dass normale Tauchflaschen nicht mehr als Pressluftgeräte, sondern als Tauchgeräte gestempelt werden. Der Taucher kann ein von ihm gewünschtes Atemgas einfüllen und die Flasche kennzeichnen, ohne neue Flaschen oder neue Ventile kaufen zu müssen, die dann mittels Adapter wieder an DIN-Anschlüsse angepasst werden müssen. Auch das Füllen der Flaschen mit verschiedenen Atemgasen durch Tauchshops sollte möglichst schnell geregelt werden, bevor Taucher dies in der eigenen Garage versuchen. Die Erfahrung in den USA hat gezeigt, dass sich das Nitrox-Prinzip durchsetzen wird, weil es viele Vorteile bietet, welche sich die Taucher in jedem Fall zu Nutze machen werden, auf welche Art auch immer - und dann doch bitte auf dem sicheren Wege!



Der erste Nitroxkurs für Sporttaucher in Deutschland (1993).



Meine 1993-Meinung:

Ein paar mahnende Worte zum Abschluss: Nitrox-Tauchen steckt in Europa noch in den Kinderschuhen. Wer jetzt meint, er könne dies ungeschult auf eigene Faust durchziehen, dem läuft garantiert etwas schief und dies wird sich negativ, wenn nicht gar mit Verboten, auf die "Technische Tauchgemeinde" ausüben. Wer Nitrox-Tauchen oder Technisches Tauchen lernen möchte, sollte dies bei einem lizenzierten Tauchlehrer tun.

Sicherlich wird auch in Deutschland die Diskussion darüber aufkommen, ob Nitrox nun sicher ist oder nicht. Für die konservativen Taucherkreise wird es sicherlich ein Teufelszeug sein, aber diese wussten auch damals schon, dass tauchen mit Computern fürchterlich gefährlich ist und sich deshalb nie durchsetzen wird. In den USA ist die Nitroxdiskussion schon lange zu Gunsten dieser Art des Tauchens beendet (und in Europa inzwischen auch). Ich denke, dass Nitrox-Tauchen in verschiedenen Situationen durchaus einen Sinn ergibt und, wenn man es richtig betreibt, auch sicher ist, sogar sicherer als das Tauchen mit Luft - und mit letzterem kann man schließlich auch Unsinn und Fehler machen, wenn man sich nicht an die Regeln hält.



Tauchen mit Nitrox

Partialdruck und Dalton'sches Gesetz

Beim Mischgastauchen (Nitrox, Heliox, Trimix, HeliAir, Neox, Argox, Hydreliox, ...) kommt dem Verständnis des Partialdruckes (Teildruck) eine ganz elementare Bedeutung zu. Alle Vorteile und fast alle Gefahren dieser Gasmischungen resultieren aus den Partialdrücken der verschiedensten Gaskomponente. Deshalb soll dieser Aspekt der Tauchphysik hier nochmals ganz ausführlich besprochen werden. Meine Physikerkollegen mögen mir den vereinfachten Umgang mit Einheiten verzeihen.

Druck

Generell ist der Druck definiert als Kraft pro Fläche: **Druck = Kraft / Fläche** und die physikalisch korrekte Einheit ist das Pascal [Pa], entsprechend 1 Newton / 1 m². Da diese Einheiten den meisten Menschen des zweiten Milleniums noch sehr ungeläufig waren, wird beim Tauchen der Druck in *bar* angegeben. 1 bar entspricht ungefähr der Gewichtskraft von 1 kg auf der Erdoberfläche, welche auf die Fläche von einem Quadratcentimeter drückt: "1kg/cm²"≅1 bar = 100000 Pa.

Hydrostatischer Druck*

Der Druck in Flüssigkeiten nimmt unter dem Eigenwicht der Flüssigkeit mit der Tiefe D zu. Da Flüssigkeiten nahezu inkompressibel sind, erfolgt die Druckzunahme linear. Da sich die Flüssigkeitsmoleküle in alle Richtungen frei bewegen können, wirkt der Druck in alle Richtungen gleich. Für den hydrostatischen Druck P_h gilt daher:

$$P_h = F/A = mg/A = \rho gV/A = \rho gDA/A = \rho gD$$

wobei m die Masse, ρ die Dichte, V das Volumen und A die Fläche der Flüssigkeit bzw. der Flüssigkeitssäule darstellt und g (=9.80665 m/s²) die Erdbeschleunigung wiedergibt. Um den absoluten Umgebungsdruck P zu berechnen, muss der über der Flüssigkeit herrschende statische Druck P_{st} (z.B. atmosphärischer Luftdruck) noch addiert werden: $P = P_{st} + P_h$.



Barometrischer Druck*

Der atmosphärische Druck beträgt durchschnittlich 1.01325 bar und nimmt mit zunehmender Höhe h exponentiell ab:

$$p = p_0 e^{\frac{-gh\rho_0}{p_0}},$$

wobei p_0 und ρ_0 der Druck und die Dichte der Luft auf Meereshöhe sind. In linearer Näherung gilt $p = p_0 \cdot (1 - gh\rho_0 / p_0) = p_0(1 - 0.000126 \cdot h)$ oder 0.0126 bar Änderung pro 100 Meter Höhe. Für das Bergseetauchen müssen Tabellen dementsprechend modifiziert werden.

Praktische Vereinfachung

Doch nun zu einigen praxisgerechten Vereinfachungen für Taucher:

- Der Luftdruck schwankt auf Meereshöhe um $\pm 3\%$, wodurch wir ihn auf Meereshöhe ohne Probleme auf 1 bar festlegen können.
- Die Dichte von Wasser schwankt zwischen 0.996 g/cm^3 für warmes Süßwasser und rund 1.03 g/cm^3 für Salzwasser, wobei der Salzgehalt hier bestimmend ist. Legen wir diesen Wert mit 1 g/cm^3 fest, trotz der Tatsache, dass die weitaus größere Wassermenge Salzwasser ist.
- Die Erdbeschleunigung sei $g = 10 \text{ m/s}^2$.

Praktischer Weise heben sich die Fehler, verursacht durch diese Vereinfachungen, zum Teil gegenseitig auf. Der 'Fehler' auf Grund der einzelnen Vereinfachungen könnte maximal 6.3% betragen, bei einer Tauchtiefe von 20 Metern würde das vereinfachte Ergebnis jedoch nur 3.3% vom Idealwert abweichen.

Für die einfache Druckberechnung ergibt sich somit die Faustformel

$$P = (D/10) + 1.$$

Pro 10 Metern Tiefe nimmt der Druck um 1 bar zu, hinzu kommt 1 bar des Luftdrucks.

Setzt man ein Gas oder Gasgemisch unter Druck, so setzt sich dieser Druck immer als Summe der Teildrücke (Partialdrücke, partial pressure pP) der Gaskomponenten zusammen.

Dalton Gesetz: $P = pP_1 + pP_2 + pP_3 + \dots$



Den Partialdruck pP einer Gaskomponente berechnet man durch Multiplikation des Gesamtdruckes P mit dem Mengenanteil f (fraction) der Gaskomponente:

$$pP = f \cdot P$$

wobei $\sum_i f = f_1 + f_2 + f_3 + \dots = 1$ ergeben muss.

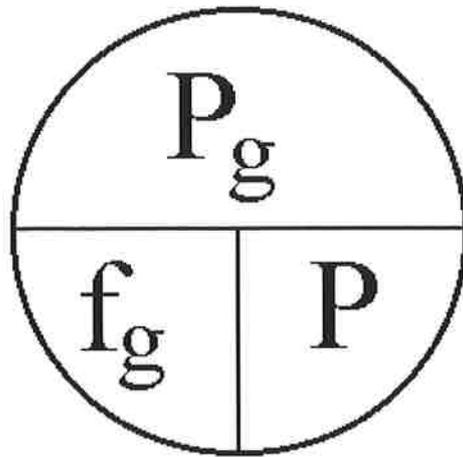
Beispiel:

Luft setzt sich aus 21% Sauerstoff, 78% Stickstoff, 1% Argon und einem minimalen, vernachlässigbaren Anteil an anderen Edelgasen oder CO_2 zusammen. Die Anteile sind somit $f_{\text{O}_2} = 0.21$, $f_{\text{N}_2} = 0.78$, $f_{\text{Ar}} = 0.01$ und $f_{\text{O}_2} + f_{\text{N}_2} + f_{\text{Ar}} = 0.21 + 0.78 + 0.01 = 1$. Diese Werte sind bei einem Gasgemisch unveränderlich. Bei atmosphärischer Umgebung ($P = 1$ bar) beträgt der Sauerstoffpartialdruck somit $p\text{PO}_2 = f_{\text{O}_2} \cdot P = 0.21 \cdot 1 \text{ bar} = 0.21$ bar, der Stickstoffpartialdruck würde dementsprechend 0.78 bar betragen. Taucht man nun auf 30 Meter Tiefe ab, wo ein absoluter Umgebungsdruck von 4 bar herrscht, so ergibt sich folgendes Bild: Sauerstoffpartialdruck $p\text{PO}_2 = f_{\text{O}_2} \cdot P = 0.21 \cdot 4 \text{ bar} = 0.84$ bar, für den Stickstoffpartialdruck entsprechend 3.12 bar.

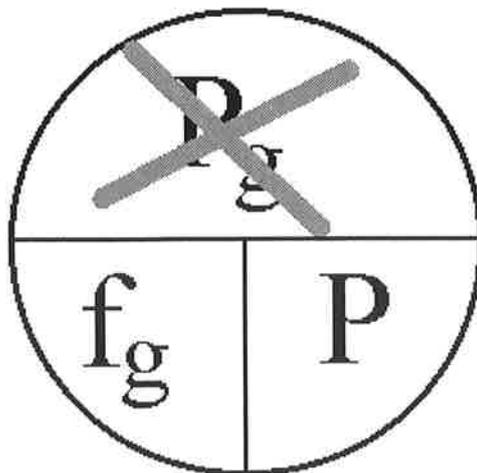
Nehmen wir nun Nitrox32, welches sich aus 32% Sauerstoff und 68% Stickstoff zusammensetzt. Die Anteile betragen somit $f_{\text{O}_2} = 0.32$, $f_{\text{N}_2} = 0.68$ und $f_{\text{O}_2} + f_{\text{N}_2} = 0.32 + 0.68 = 1$. Bei atmosphärischer Umgebung ($P = 1$ bar) beträgt der Sauerstoffpartialdruck somit $p\text{PO}_2 = f_{\text{O}_2} \cdot P = 0.32 \cdot 1 \text{ bar} = 0.32$ bar, der Stickstoffpartialdruck würde dementsprechend 0.68 bar betragen. Taucht man nun wieder auf 30 Meter Tiefe ab, so ergibt sich folgendes Bild: Sauerstoffpartialdruck $p\text{PO}_2 = f_{\text{O}_2} \cdot P = 0.32 \cdot 4 \text{ bar} = 1.28$ bar, Stickstoffpartialdruck 2.72 bar.

T-im-Kreis

Für all diejenigen, die das Merken von Formel nicht so sehr mögen, gibt es den T-im-Kreis, bei welchem man sich lediglich merken muss, dass der Partialdruck des Gases oben steht.



P_g steht hier für den Partialdruck des Gases in bar, f_g für den Anteil des Gases (als Dezimalzahl: 21% \rightarrow 0.21) und P für den Umgebungsdruck. Sucht man eine Größe hiervon, so muss man das dazugehörige Symbol abdecken und erhält die Formel aus dem, was sichtbar bleibt. Für den eben behandelten Partialdruck P_g sieht das folgendermaßen aus:



Also ist $P_g = f_g \cdot P$



Wieviel Sauerstoff braucht der Körper?

Der menschliche Körper benötigt Sauerstoff zur Aufrechterhaltung seines Stoffwechsels. Die Verbrennung von Glukose (Zucker) mit Sauerstoff liefert die Energie für alle Organe, wobei insbesondere das Gehirn auf eine regelmäßige Mindestversorgung angewiesen ist. Zum korrekten Funktionieren des Metabolismus ist ein bestimmter Sauerstoffpartialdruck notwendig und nicht, wie viele glauben, ein bestimmter Sauerstoffgehalt in Prozent. In unserer normalen atmosphärischen Umgebung beträgt der Sauerstoffpartialdruck $pPO_2 = 0.21 \text{ bar}$ ($pP = f \cdot P = 0.21 \cdot 1 \text{ bar}$), deshalb wird dieser pPO_2 auch als normoxisch ('Normalsauerstoff') bezeichnet. Fällt der pPO_2 unter 0.21 bar, so treten Mangelercheinungen auf. Unterhalb von 0.16 bar beginnen sich Anzeichen von Sauerstoffmangel zu zeigen, unterhalb von 0.12 bar wird die Hypoxie (Sauerstoffmangel) sehr bedrohlich, unterhalb von 0.1 bar folgt Bewusstlosigkeit und Tod. Beim Tauchen mit Luft oder Nitrox im offenen System wird ein solcher Bereich nie erreicht, beim Tauchen mit Kreislaufgeräten ist dies bei falscher Dosierung möglich.

Probleme treten bei diesen Gasgemischen normalerweise nur auf Grund eines überhöhten pPO_2 (Hyperoxie) auf und die Frage kann demzufolge nur lauten: 'Wie hoch darf der pPO_2 sein?'. Oberhalb von 0.5 bar kann eine pulmonale Vergiftung auftreten. Dies ist jedoch nur der Fall, wenn man sich sehr lange diesem erhöhten pPO_2 aussetzt, wie z.B. Taucher, die in einer Luftglocke unter erhöhtem Druck leben (Sättigungstaucher), oder Taucher, die an mehreren aufeinander folgenden Tagen sehr lange Reinsauerstoffdekompressionen durchführen. Für den normalen Taucher, der innerhalb der Sporttaucherregeln taucht, tritt diese Gefahr nicht auf, da er sich diesen erhöhten Partialdrücken nie in der kritischen Länge aussetzt.

Die weitaus höhere Gefahr für den Technischen Taucher geht von einer neuronalen Sauerstoffvergiftung (Paul-Bert-Effekt). Diese tritt oberhalb 1.6 bar pPO_2 auf. Deshalb sollte dieser Sauerstoffpartialdruck auch eine ernst zu nehmende Obergrenze darstellen, die nur in einfachen Nullzeittauchgängen in warmen Gewässern erreicht werden darf. Für aufwendigere Tauchgänge sollten von dieser Obergrenze Abzüge gemacht werden, jeweils 0.1 bar pro Risikofaktor:

- Dekompressionstauchgänge
- Tauchgänge in kaltem oder in extrem warmem Wasser
- Tauchgänge mit hohem Arbeitspensum (Arbeit, Strömung, ...)

Verbände für Sporttauchen gehen dabei grundsätzlich auf Nummer Sicher und geben 1.4 bar als Obergrenze an. Alte Werte für Obergrenzen von 1.7 bar oder gar 2 bar sollten der Vergangenheit angehören oder dem Militär überlassen bleiben.

Dennoch wird immer wieder von Partialdrücken oberhalb 1.6 bar bis hin zu 3 bar zu hören sein - und diese Drücke werden in speziellen Situationen auch korrekt angewandt. Benutzt man Vollgesichtsmasken oder Taucherhelme oder sitzt man in einer Druckkammer zur Therapie,



dann ist es weniger schlimm, wenn man auf Grund der Sauerstoffvergiftung bewusstlos wird - man ertrinkt in dieser Umgebung nicht und kann vom Hilfspersonal gerettet werden. Diese Sicherheiten hat der normale Taucher jedoch nicht und deshalb sollte er sich an die Obergrenze von maximal 1.6 bar halten.

Sauerstoff-partialdruck [bar]	Problem/Effekt/Anwendung
< 0.1	Bewusstlosigkeit, Koma, Tod
0.12	Schwere Atemnot, Hypoxie
0.16	Beginn der Atemnot
0.21	Normoxisch
0.35	Sättigungstauchen
>0.5	Lorraine-Smith-Effekt: Ganzkörper- oder pulmonale Vergiftung
1.4	Max. pPO ₂ für technische Taucher, empfohlene Grenze für Sporttaucher
1.6	Max. pPO ₂ für Taucher (Easy-Diving), inkl. Sicherheitpolster, max. pPO ₂ während Dekompression ohne Habitat
> 1.6	Beginn Paul-Bert-Effekt: neuronale Sauerstoffvergiftung. Militäreinsatz, Vollgesichtsmaske / Helm, Druckkammer, Deko im Habitat.



Neuronale Sauerstoffvergiftung

Symptomatik

Bis heute ist nicht bekannt, wie die neuronale Sauerstoffvergiftung (Vergiftung des zentralen Nervensystems), auch Paul-Bert-Effekt genannt, zu Stande kommt. Eine der gängigen Theorien besagt dass hohe Sauerstoffpartialdrücke gefäßverengend wirken, d.h. unsere Blutadern verringern ihren Durchmesser (vasoconstriction). Auf Grund des sehr hohen pPO_2 wird unser Körper jedoch weiterhin reichlich mit Sauerstoff versorgt und der Metabolismus geht seinen normalen Gang. Das nun auftretende Problem ist, dass die Menge an produziertem Kohlendioxid unverändert bleibt und dass dessen Abtransport durch die verengten Blutbahnen behindert ist. Es kommt zur Anhäufung von CO_2 und dadurch zur Veränderung des Blut-pH-Wertes und zur Kohlendioxidvergiftung. Die Tatsache, dass starke Anstrengung (= erhöhte CO_2 -Produktion) unter Wasser die Gefahr einer neuronalen Sauerstoffvergiftung deutlich erhöht, unterstützt diese Theorie.

Eine andere Theorie führt die Sauerstoffvergiftung auf die Bildung von Sauerstoffradikalen (Sauerstoffionen, elektrisch geladene Sauerstoffmoleküle) zurück. Diese haben eine enorme Oxidationsfähigkeit, womit sie die chemischen Vorgänge im Körper massiv verändern können und auch in die Elektrochemie (z.B. Nerven) eingreifen. Der menschliche Körper besitzt zwar wie alle aeroben Lebensformen Enzyme, welche diese Radikale katalytisch abfangen. Offenbar treten diese jedoch unter erhöhtem Sauerstoffpartialdruck vermehrt auf und somit kommt es zur Vergiftung. Es gibt weitere medizinisch kompliziertere Theorien, auf die hier jedoch nicht eingegangen werden soll, zumal das Endresultat jedes Mal dasselbe ist. Müdigkeit, Einnahme von Medikamenten, schnelle Temperaturwechsel oder Nervosität tragen ebenfalls zum frühen Auftreten dieser Vergiftung bei, die Einnahme von GABA oder speziellen Vitamin-E-Präparaten scheinen das Auftreten dagegen zu verzögern.

Forschungen haben ergeben, dass die Anfälligkeit für eine neuronale Sauerstoffvergiftung durch Schwerelosigkeit begünstigt wird. Entsprechende Tests zeigen, dass die Vergiftung im Wasser ab 1.6 bar auftritt, außerhalb des Wassers deutlich oberhalb von 1.6 bar. Sauerstofftauglichkeitstest für Taucher, die im Trockenen durchgeführt werden, halte ich auf Grund dieser Tatsache für ungeeignet. Ferner ist bekannt, dass es für die Sauerstoffvergiftung keine Adaption gibt und dass die Anfälligkeit sehr stark von der Tagesform abhängen kann. Was nützt es also, wenn man heute einen Test bei 2.5 bar übersteht und morgen bei 2 bar unter Wasser dann dennoch bewusstlos wird?!?! Wie wirkt sich nun solch eine neuronale Sauerstoffvergiftung beim Tauchen aus: Man bekommt einen Krampfanfall, wird bewusstlos, kann den Lungenautomaten nicht mehr im Mund behalten und ertrinkt. Dies



kann schlagartig und ohne Vorwarnungen geschehen. Gelegentlich kündigt sich die Vergiftung durch folgende Warnsymptome an (Merkwort **SOZIUS**)

- Sichtprobleme, Tunnelblick
- Ohrenläuten
- Zittern/Zucken der Muskulatur (Gesicht)
- Irritation des Gemüts (Depression, Aggressivität)
- Uebelkeit
- Schwindel

Andere Symptome sind Veränderungen im Atemverhalten, Müdigkeit, Schwitzen und Pulsverlangsamung. Sollte man also bei hohem Sauerstoffpartialdruck tauchen und diese Symptome an sich registrieren, so gilt es unbedingt alle Anstrengungen zu vermeiden, auf ein Atemgemisch mit niedrigerem Sauerstoffgehalt umzusteigen und sofort aufzutauchen, sofern möglich.

Für die Frage, wie lange man sich welchem Sauerstoffpartialdruck aussetzen kann, hat die NOAA folgende Richtlinien an ihre Taucher ausgegeben.

pPO ₂ [bar]	Maximalzeit pro Tauchgang [Minuten]	Maximalzeit pro Tag [Minuten]
1.6	45	150
1.5	120	180
1.4	150	180
1.3	180	210
1.2	210	240
1.1	240	270
1.0	300	300
0.9	360	360
0.8	450	450
0.7	570	570
0.6	720	720

CNS-Uhr

Einem Taucher wird in einer inneren Uhr maximal 100% an CNS-Sauerstoffexposition zugestanden (CNS-clock, central nervous system/syndrom). Berechnet wird dies, indem man die echte Tauchzeit, die man bei einem pPO₂ verbringt durch die maximale Zeit, die man bei diesem Partialdruck maximal verbringen darf, teilt und diese Werte für jedes Level des Tauchgangs addiert. Die so errechneten CNS% sollten den Wert 100% nicht überschreiten.

$$CNS = \sum_{Level} \frac{EchteTauchzeit}{max.Tauchzeit} = \frac{EchteTauchzeit_1}{max.Tauchzeit_1} + \frac{EchteTauchzeit_2}{max.Tauchzeit_2} + \dots$$

Das Ergebnis wird mit 100 multipliziert und als CNS% bezeichnet.



Beispiel:

Tiefe [m]	Zeit [Min.]	Gemisch	pPO ₂ [bar]	Max. Zeit für pPO ₂ [Min.]	CNS%
36	45	32/68	1.47	120	37.5
6	5	100/0	1.6	45	11.1
3	12	100/0	1.3	180	6.6

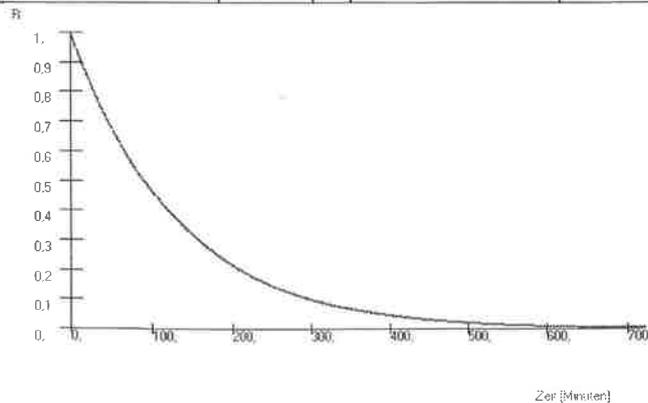
Die Summe der CNS% ergibt rund 55%.

Hat man einen gewissen Wert an CNS% angesammelt, so gibt es zwei Methoden, um die Abnahme dieses Wertes während der Verweilzeit an der Oberfläche zu berechnen.

- Liegt der Wert eines Einzeltauchgangs über 50 CNS%, so sollte man mindestens 45 Minuten an der Oberfläche verweilen. Beträgt der Wert mehr als 90%, so müssen zwei Stunden an der Oberfläche (normoxisch!) verbracht werden. Die Gesamtzeiten für einen Tag bleiben hiervon unberührt. Ist das Tageslimit erreicht, so muss eine Pause für 12 Stunden folgen.
- Man kann den CNS%-Wert mit einer Halbwertszeit von 90 Minuten zurückrechnen. Nach 90 Minuten hat sich der Wert auf die Hälfte, nach 180 Minuten auf ein Viertel (Hälfte der verbleibenden Hälfte) reduziert.

Reduktionsfaktoren

15 Minuten	·0.89	150 Minuten	·0.32
30 Minuten	·0.80	180 Minuten	·0.25
45 Minuten	·0.71	210 Minuten	·0.20
60 Minuten	·0.63	240 Minuten	·0.16
75 Minuten	·0.56	270 Minuten	·0.13
90 Minuten	·0.50	300 Minuten	·0.10
105 Minuten	·0.45	360 Minuten	·0.07
120 Minuten	·0.40	420 Minuten	·0.04



Für mathematisch interessierte Leser*:

$$CNS\%(t) = CNS\% \cdot (1/2)^{t/90} = CNS\% \cdot e^{-t/130},$$

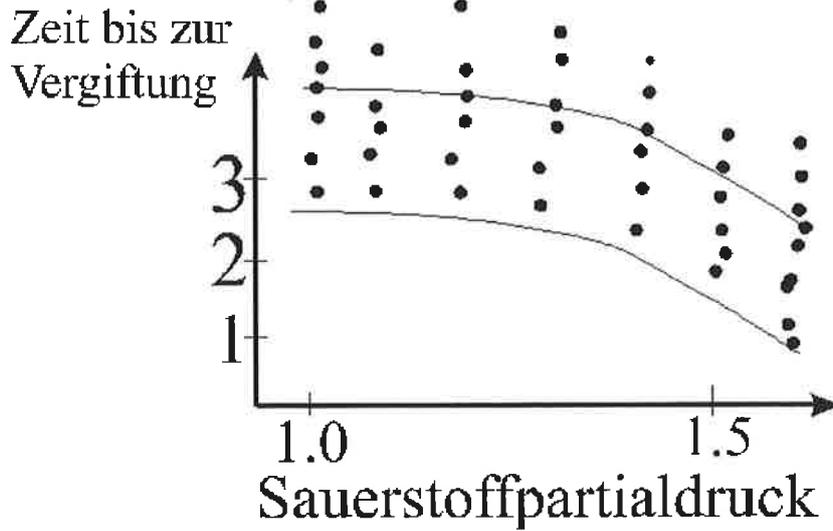
wobei t die Zeit an der Oberfläche in Minuten ist.



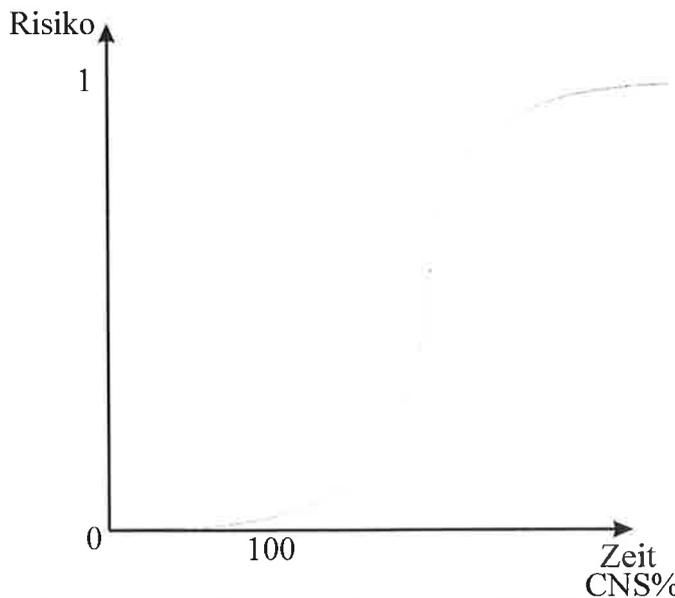
Zuverlässigkeit der CNS%

Diese NOAA-Empfehlungen haben sich als sehr sicher herausgestellt und jeder ist gut beraten sich daran zu halten. Dennoch liegen diesen Empfehlungen kaum wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse zu Grunde, weshalb die CNS-Methode zur Kontrolle der Sauerstoffvergiftung oft belächelt wird. Es ist kein Geheimnis, dass Tauchgänge mit Sicherheitsmasken mit weit über 1000 CNS% durchgeführt wurden, ohne dass der Taucher eine Sauerstoffvergiftung erlitt. Wie ist dies erklärbar? Die Antwort liegt in der Vorgehensweise bei der Erstellung dieser Richtlinien. Nimmt man eine große Anzahl von Menschen und lässt diese bei verschiedenen Sauerstoffpartialdrücken leichte Arbeit verrichten und misst die Zeit, nach der sich eine Sauerstoffvergiftung einstellt, so werden sich beim selben Partialdruck für verschiedene Personen verschiedene Zeiten ergeben. Auch bei derselben Person würde sich die Vergiftung mal früher oder mal später einstellen. Dies ist von Tag zu Tag sehr verschieden. Man könnte nun die daraus resultierende Durchschnittszeit pro Partialdruck als Limit angeben (obere Linie). Diese Durchschnittszeit liegt weit höher als die Maximalzeiten der NOAA und dies ist auch gut so. Würde man nämlich diese Durchschnittszeit als Richtlinie vorgeben, dann würden ja 50% aller Taucher, die bis an diese Grenze Tauchen, verunglücken. 50 CNS% bedeutet ja auch nicht, dass die Wahrscheinlichkeit, bei diesem Tauchgang eine Sauerstoffvergiftung zu bekommen 50% beträgt, sondern dass man 50% der als sicher geltenden Zeit bei die pPO_2 verbracht hat.

Die NOAA-Richtlinien geben eher den ersten Zeitpunkt wieder (untere Linie), nach der im Test ein Unfall registriert wurde, bzw. die Zeit, die von der NOAA in zigtausenden von Tauchgängen als sicher erkannt wurde. Dies hat zur Folge, dass man durchaus weit über die 100 CNS% hinausgehen kann, allerdings dann mit deutlich zunehmendem Risiko und in dem Wissen, dass bei dieser Dosis durchaus schon Taucher vergiftet wurden. Man darf die 100 CNS% nicht wie einen Schalter betrachten: 100 CNS%, ich lebe, 101 CNS%, ich bin tot, aber man sollte auch nicht zu leichtsinnig damit umgehen. Weitaus ernster allerdings sollte man die 1.6 bar Sauerstoffpartialdruck minus Sicherheitsabschlag nehmen, denn Sauerstoff vergibt keine Fehler!



Qualitative Darstellung eines Belastungstest zur Ermittlung maximaler Sauerstoff-Expositionszeiten. Gemessen wird bei verschiedenen pPO₂ und Personen die Zeit bis zum Eintreten der Vergiftung. Der Durchschnittswert wäre zu gefährlich, man darf höchstens die untere Einhüllende als Grenzwert benutzen.



Das Risiko einer Sauerstoffvergiftung ist unterhalb von 100 CNS% sehr gering und nimmt oberhalb von 100% stark zu. Dies gilt insbesondere unter Wasser. Die Graphik gibt dies qualitativ wieder, nicht quantitativ.

Pulmonale Sauerstoffvergiftung

Symptomatik

Die Lungen- oder Ganzkörpersauerstoffvergiftung, auch Lorraine-Smith-Effekt genannt, tritt nur bei sehr langen Verweilzeiten unter erhöhtem Sauerstoffpartialdruck auf und ist somit nur für Sättigungstaucher oder Taucher, die stundenlange Dekompressionen unter erhöhtem Sauerstoffpartialdruck durchführen, von Bedeutung. Der radikale Sauerstoff führt zu einer Verringerung der Vitalkapazität, trockenem Husten, Kurzatmigkeit, erhöhtem Atemwiderstand, Entzündungen und einem Anschwellen des Lungengewebes bis hin zur Zerstörung des Lungengewebes. Um diese Art der Sauerstoffvergiftung zu kontrollieren wurden die OTU (oxygen tolerance units) bzw. UPTD (unit pulmonary toxicity dose) eingeführt, welche vom Wert her gleich sind. Ein OTU entspricht der Wirkung bzw. Dosis von 1 bar pPO_2 über den Zeitraum einer Minute, die Zahl 0.5 in der Formel entspricht dem Partialdruck, ab dem die Schädigung auftritt.

Für Taucher, die innerhalb der klassischen Sporttauchergrenzen bleiben, ist diese Vergiftungsform normalerweise nicht von Bedeutung. Dekompressionstauchgänge finden auf diesem Level nicht statt und die Oberflächenpausen und Nullzeitgrenzen zwingen dem Sporttaucher genügend Pausen in normoxischer Umgebung (0.21 bar Sauerstoffpartialdruck) auf, wodurch sich die Lungen kurieren können. Auch die CNS-Uhr zwingt zu Pausen bei niedrigem Sauerstoffpartialdruck. Auf eine Kontrolle der OTUs kann somit verzichtet werden (wir kommen im Technical-Nitrox-Kurs hierauf zurück). Sollte man jedoch tatsächlich drei bis vier Tauchgänge pro Tag mit Nitrox 50 in guter Tiefe über mehrere Tage hinweg durchführen und man verspürt irgendwann ein zunehmendes Brennen der Lungen, dann sollte man eben mal ein oder zwei Tage aussetzen, so wie das im normalen Sporttauchen mit Luft sowieso empfohlen wird.



Aufhören, falls die Lungen doch mal zu brennen beginnen!!!

Maximale Einsatztiefe MOD

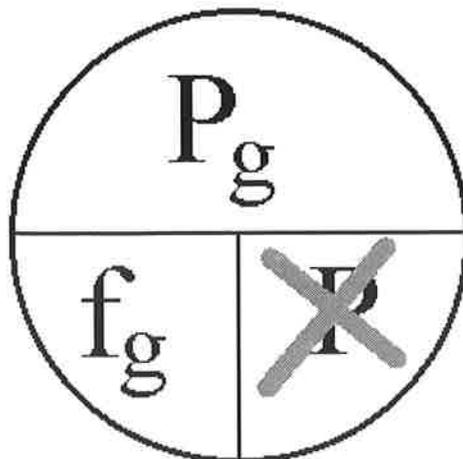
Mit dem Wissen um einen maximal erlaubten Sauerstoffpartialdruck $pPO_{2,max}$ und den Umgang mit Partialdrücken lassen sich nun zwei elementare Fragen des Nitrox-Tauchens beantworten.

Wie tief darf ich mit einer gegebenen Mischung tauchen?

Gesucht wird die maximale Einsatztiefe für ein Gasgemisch, im amerikanischen als 'maximum operation depth' MOD bezeichnet. Der Taucher fragt sich, wie tief er mit einem vorgegebenen Gemisch tauchen darf, in welcher Tiefe er mit diesem Gemisch seinen maximal erlaubten Sauerstoffpartialdruck $pPO_{2,max}$ erreicht.

Hierzu muss man fragen, bei welchem Umgebungsdruck ein Gasgemisch den $pPO_{2,max}$ erreicht. Dafür wird die Formel des Partialdrucks (siehe oben) zum Druck P hin umgestellt $P = pPO_{2,max} / f_g$ und dann berechnet, in welcher Tiefe D dieser Umgebungsdruck $P = (D/10)+1$ herrscht.

Mit dem T-im-Kreis sucht man nach dem maximalen Umgebungsdruck P , dem man sich aussetzen darf. Daraus ergibt sich die eben benutzte Formel.



Also ist $P = P_g / f_g$, wobei P_g der maximal akzeptierte Sauerstoffpartialdruck ist.



Beispiel: MOD für Nitrox32 bei einem maximal erlaubten Sauerstoffpartialdruck $pPO_{2,max} = 1.6$ bar.

$$P = pPO_{2,max} / f_g = 1.6 \text{ bar} / 0.32 = 5 \text{ bar.}$$

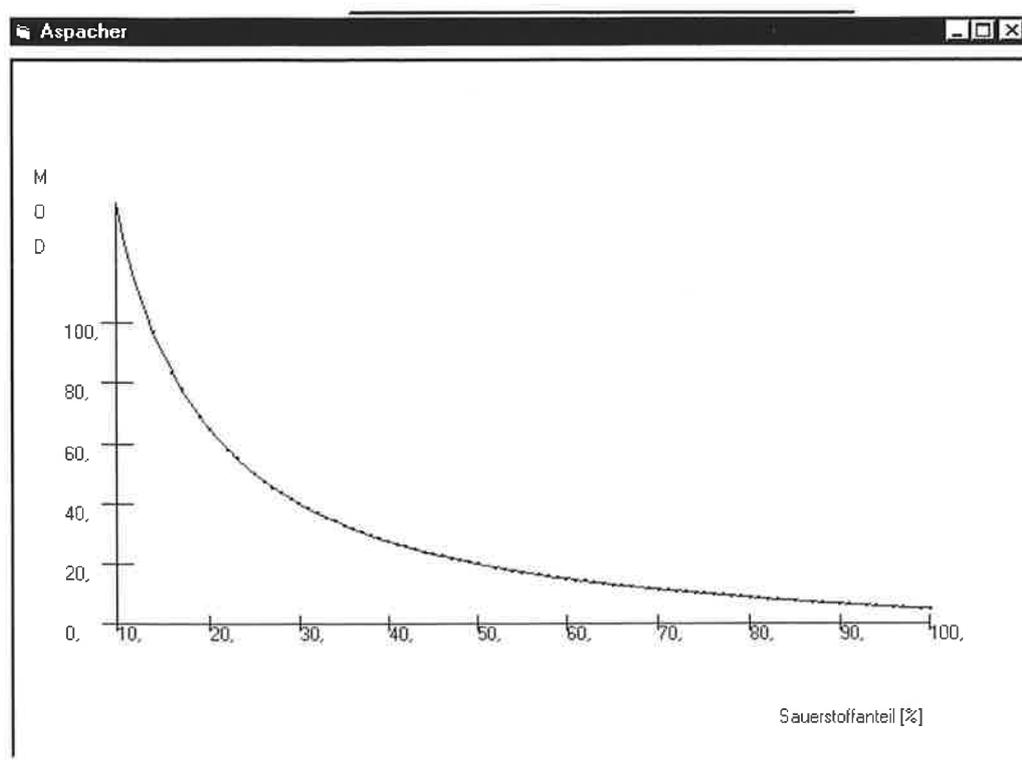
Setze ich mich also unter Nitrox32-Atmung einem Druck von 5 bar aus, so herrscht bei der Atmung ein pPO_2 von 1.6 bar, und hier sollte man den Tauchgang abbrechen, zumindest was die Tiefe angeht. In welcher Tiefe herrschen 5 bar?

$$P = (D/10) + 1 \rightarrow D = (P - 1) \cdot 10 = 40 \text{ m,}$$

in 40 Meter Tiefe herrschen 5 bar, dies ist meine maximale Einsatztiefe MOD.

Man kann diese beiden Rechenschritte auch zusammenfassen:

$$MOD = \left(\frac{pPO_{2,max}}{f_{O_2}} - 1 \right) \cdot 10$$



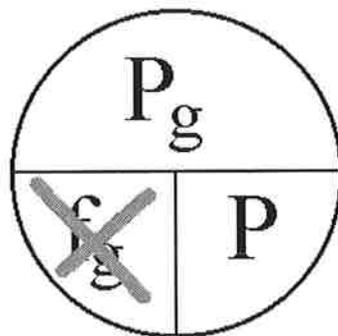
Die MOD für einen maximalen pPO_2 von 1.5 bar, als Funktion des Sauerstoffanteils.

Beste Mischung (best mix)

Was ist die beste Mischung für die angestrebte Tauchtiefe?

Bei vorgegebener Zieltiefe stellt sich die Frage, mit welchem 'besten' Gemisch man in diese Tiefe taucht. Das 'beste' Gemisch (amerikanisch best mix) ist so definiert, dass man mit diesem Gemisch in der Zieltiefe genau den maximalen Sauerstoffpartialdruck $pPO_{2,max}$ erreicht. Hierfür berechnet man zuerst den Druck in der Zieltiefe und dann mittels Partialdruckformel den Anteil f_g für den Sauerstoff. Plant man lange Grundzeiten, sollte der $pPO_{2,max}$ geringer gewählt werden, um eine CNS%-Reserve für die Deko zu haben.

Der Gasanteil lässt mit T-im-Kreis wie folgt festlegen:

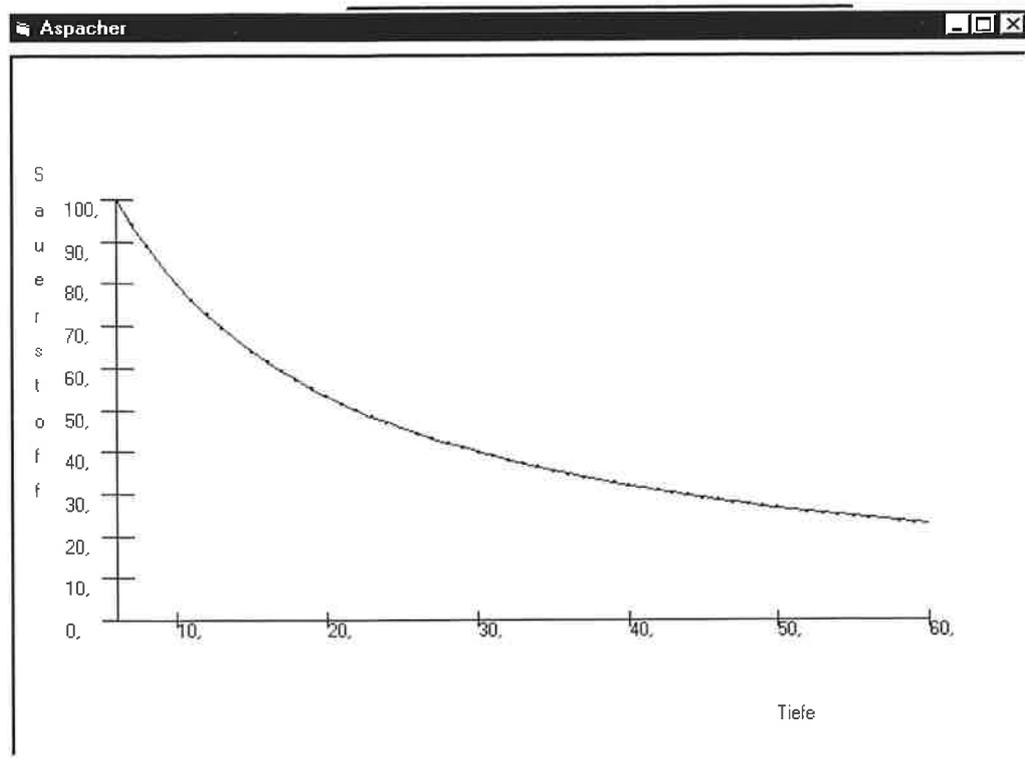


Also ist $f_g = P_g / P$ oder $f_g = pP / P$, um in unserer ursprünglichen Schreibweise zu bleiben. P_g bzw. pP stellt den Sauerstoffpartialdruck dar.

Beispiel: Best Mix für einen 50 Minuten Tauchgang auf 30 Metern Tiefe. In 30 Meter Tiefe herrscht ein Druck von 4 bar, auf Grund der geplanten 50 Minuten (>45 Minuten, maximal erlaubte Zeit bei 1.6 bar) wird der $pPO_{2,max}$ auf 1.5 bar festgelegt. Damit ergibt sich der Anteil $f_g = 1.5\text{bar} / 4\text{ bar} = 0.375$ oder Nitrox37.

Man kann diese beiden Rechenschritte auch zusammenfassen:

$$f_{O_2,best} = \frac{pPO_{2,max}}{\frac{D}{10} + 1}$$



Best Mix für einen maximalen pPO_2 von 1.6 bar, als Funktion der Tauchtiefe.



Prinzip der äquivalenten Lufttiefe

Gleichheit der Stickstoffpartialdrücke

Die letzte Frage beim Nitroxtauchen lautet: Wie groß ist der Vorteil gegenüber Luft, den man durch den Einsatz von Nitrox erzielt? Wie kann man bestimmen, wie stark sich die Nullzeit verlängert bzw. wie stark sich die Stickstoffnarkose reduziert (siehe hierzu Narkotische Wirkung von Gasen). Der Schlüssel liegt wiederum bei einem Partialdruck, dem des Stickstoffs: p_{N_2} . Ist der Stickstoffpartialdruck beim Tauchen hoch, dann lösen sich die Stickstoffmengen (dm/dt) schneller im Körper, und es löst sich insgesamt mehr Gas. Der Stickstoffpartialdruck in der Lunge ist sozusagen die treibende Kraft für diesen Vorgang.

Berechnen wir die Partialdrücke für zwei Situationen:

- a) Tauchgang mit Luft (21/79) auf 33 Meter Tiefe: $p_{N_2} = 0.79 \cdot 4.3 \text{ bar} = 3.4 \text{ bar}$
- b) Tauchgang mit Nitrox 32 auf 40 Meter Tiefe: $p_{N_2} = 0.68 \cdot 5 \text{ bar} = 3.4 \text{ bar}$

In beiden Fällen herrscht derselbe Partialdruck und da dieser die steuernde Größe für die Stickstoffaufnahme ist, bedeutet dies auch, dass sich in beiden Situationen gleich viel Stickstoff gleich schnell im Körper löst. Was die Nullzeit angeht, ist es also egal, ob man mit Luft auf 33 Metern taucht oder mit Nitrox 32 auf 40 Metern Tiefe. Die 33 Meter mit Luft sind äquivalent zu 40 Metern mit Nitrox. Die Schlussfolgerung hieraus lautet: Man kann mit dieser Nitroxmischung auf 40 Metern tauchen und die Nullzeitgrenze aus der Lufttabelle bei 33 Metern ablesen, da diese Situationen gleich sind. Man nennt deshalb diese gleichberechtigte Tiefe auch „Äquivalente Lufttiefe“ EAD, vom amerikanischen „equivalent air depth“.

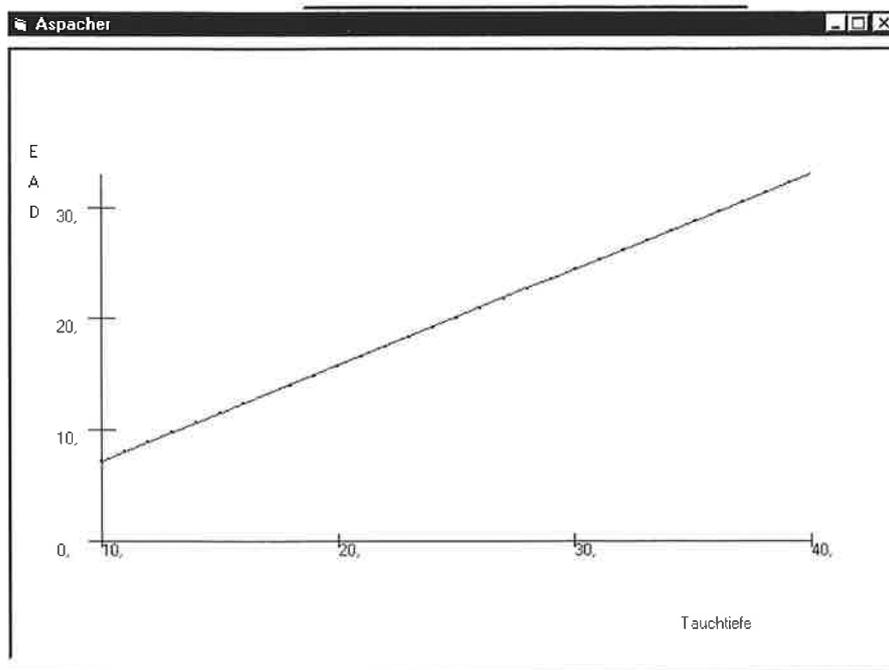
Die EAD wird für ein gewünschtes Tauchprofil in zwei Schritten berechnet: Zuerst berechnet man den Stickstoffpartialdruck seines Nitroxgemisches in der Tiefe, auf die man tauchen will, und dann die Tiefe, in der man mit Luft denselben Stickstoffpartialdruck erreicht.

Beispiel: Geplant ist ein Tauchgang auf 30 Meter Tiefe mit Nitrox 36. Wie groß ist die EAD? Der Stickstoffpartialdruck für Nitrox ist $p_{N_2} = 0.64 \cdot 4 \text{ bar} = 2.56 \text{ bar}$, mit Luft wird dieser Wert bei einem Umgebungsdruck $P = p_{N_2} / f_g = 2.56 \text{ bar} / 0.79 = 3.24 \text{ bar}$ erreicht, und dieser Druck herrscht in 22.4 Metern Tiefe. Der Tauchgang ist also unter Benutzung einer Lufttabelle mit den Werten für 22.4 Metern durchführbar.

Falls Stickstoff alleine für den Tiefenrausch zuständig ist, dann gibt diese äquivalente Lufttiefe auch eine äquivalente Narkostiefe (oder äquivalente Stickstofftiefe) END wieder. END steht für equivalent nitrogen depth oder equivalent narcosis depth. Man taucht z.B. mit Nitrox 36 auf 30 Meter Tiefe und ist nur einem Tiefenrausch ausgesetzt, der dem eines Lufttauchganges auf 22 Metern entspricht.

Die EAD bzw. END lässt sich mit folgender Formel auch in einem Schritt berechnen (D ist die echte Tauchtiefe in Metern):

$$EAD = END = \left[\frac{fN_2 \cdot (D + 10m)}{0.79} \right] - 10m$$



Äquivalenten Lufttiefe EAD für ein Nitrox-32-Gemisch als Funktion der echten Tauchtiefe.

Hinweis: In wie weit die Narkose durch den Einsatz von Nitrox reduziert wird und somit END zum Tragen kommt, wird unter 'Sauerstoff-Dilemma' und 'Narkotische Wirkung von Gasen' diskutiert. Beim Tauchen mit Trimix tritt auf jeden Fall eine Verringerung der Narkose auf und auch hierbei gilt die Formel für END. Beim Trimixtauchen sollte man jedoch nicht den Ausdruck EAD benutzen, da dies implizieren könnte: man kann das Gas benutzen und den Nullzeitwert in einer Lufttabelle bei EAD ablesen. Dies geht für Trimix auf gar keinen Fall!

Wie kann man die EAD nutzen?

Man kann jede beliebige Lufttabelle (PADI, US-NAVY, Bühlmann/Hahn, Deco92, ...) benutzen um damit Nitrox-Tauchen zu gehen. Man muss nur die Werte auf der Tiefe EAD ablesen anstatt auf der echten Tauchtiefe. Nitroxtauchtabellen sind somit eigentlich überflüssig. Wenn man sie hat, erspart man sich allerdings die Rechnerei.

Man kann das Prinzip der äquivalenten Lufttiefe dazu benutzen Nitrox tabellen zu berechnen. Genau so sind die gängigen Nitrox tabellen auch entstanden. Es gibt zur US-Navy Lufttabelle gehörende Nitrox tabellen, ebenso zur PADI- oder zur Deco92-Tabelle. Ich persönlich nenne so etwas eine Tabellenfamilie: US-Navy-Luft, US-



Navy-Nitrox32, US-Navy-Nitrox36, und von PADI gibt es eine andere Familie. Die Oberflächenintervalltabellen innerhalb einer Familie sind immer identisch, da es sich hier immer um Entsättigung von einer Wiederholungsgruppe unter normoxischen Bedingungen handelt. Mit diesen Tabellen sind wie mit allen Tabellen Wiederholungstauchgänge berechenbar, selbst dann, wenn ein Tauchgang mit Nitrox und der davor oder danach mit Pressluft durchgeführt wird, d.h., Gaswechsel zwischen den Tauchgängen sind möglich. Beachten muss man lediglich zwei Dinge:

- Der Wechsel von einer Tabelle zur anderen muss immer mit der Wiederholungsgruppe am Anfang oder Ende der Oberflächenintervalltabelle geschehen. Der Zeitzuschlag für den kommenden Tauchgang muss dabei aus der Tabelle entnommen werden, die zum Gas für diesen kommenden Tauchgang gehört.
- Die Tabellen müssen alle aus derselben Tabellenfamilie stammen. Man kann also niemals den ersten Tauchgang z.B. mit Luft aus der Deco92 Tabelle errechnen und dann nach der Oberflächenpause mit der dort ermittelten Wiederholungsgruppe auf die PADI-Nitrox-tabelle wechseln.

Dekompression mit dem EAD-Prinzip*

Wer mit Nitrox die Nitrox-Nullzeit unter Berücksichtigung von Nitrox-tabellen überschreitet ist von der Deko-Pflicht in derselben Lagen wie wenn er Luft atmet und Lufttabellen benutzt. Das Atmen von Nitrox und die Benutzung von Lufttabellen und dem EAD-Prinzip birgt beim Dekompressionstauchen jedoch einen weiteren Sicherheitsfaktor. Aufgrund der Nitroxatmung kann man die Nullzeit oder die Wiederholungsgruppe bei einer geringeren Tiefe ablesen, entsprechend der EAD. Dieses Prinzip erzeugt hier Gleichheit. Beim Dekomprimieren ist die Tabelle jedoch so gerechnet, als ob man Luft atmen würde. Bleibt man dagegen bei Nitroxatmung, wovon die Tabelle natürlich nichts weis, so diffundiert der Stickstoff schneller aus und die Deko-Stopps könnten kürzer ausfallen. Mit der Lufttabelle und dem EAD-Prinzip dekomprimiert man als etwas länger als eigentlich notwendig und gewinnt damit wieder etwas Sicherheit. Hinzu kommt, dass bei gleich langer Deko-Zeit die Deko-Stufen flacher ausfallen, wenn man Nitrox als Atemgemisch (Bottom-Mix) benutzt hat.

40m-Tauchgang

Luft, NDL:	8 Min.
Luft, 30 Min:	43 Min Deko mit Luft* 9/6/3
Nitrox32, NDL:	12 Min.
Nitrox32, 40 Min:*	40 Min. Deko mit Luft* 6/3
Nitrox32, 40 Min:*	34 Min. Deko-Pflicht mit Nitrox 6/3
Luft, 40 Min auf EAD(40m) = 33m*:	41Min Deko mit Luft 9/6/3*

*ungefähr die selbe Situation

NDL: no deco limit = Nullzeitgrenze



Nonsens zum Thema Nitrox

Man liest gelegentlich, dass man beim Deko-Tauchen mit Nitrox die Dekostufen 'tiefer legen' muss. Ein 6m-Stopp mit Luft muss demnach unter Verwendung von Nitrox-32 auf 9m und unter Verwendung von Nitrox-40 auf 11m Tiefe gelegt werden. Die Begründung hierfür ist, dass man auf den Nitrox-Deko-Stufen den selben Stickstoffpartialdruck einhalten muss wie bei Luft-Deko-Stufen. Dies stimmt natürlich nicht. Umgekehrt wurde auch behauptet, dass sich, wenn man die Stufen beibehält, die Gefahr für DCS deutlich erhöht. Die Begründung: wäre man z.B. bei 2.5 bar Stickstoffpartialdruck gesättigt, so könnte man (nach der einfachen 2:1-Theorie) auf 6 Meter Tiefe auftauchen, wo dann mit Luftatmung 1.25 bar $p\text{N}_2$ in den Lungen herrscht. Würde man dies mit Nitrox 50 tun, so ergäben sich nur 0.8 bar $p\text{N}_2$ und die Druckdifferenz wäre somit zu hoch.

Beide Argumentationen haben eines fundamental verwechselt: wie weit man auftauchen darf, wird nicht vom $p\text{N}_2$ in den Lungen festgelegt, sondern vom $p\text{N}_2$ in den Geweben. Der Ceiling (tiefste Dekostufe) wird berechnet aus dem höchsten minimal tolerierbaren Umgebungsdruck der Kompartimente. Der $p\text{N}_2$ in den Lungen ist hier bedeutungslos, er legt lediglich fest, wie lange man auf der Stufe verweilen muss. Je geringer der Stickstoffgehalt, desto kürzer die notwendige Dekozeit.

Ausrüstung

Wie im Einführungskapitel bereits erwähnt, fordert der Gesetzgeber bestimmte Auflagen. Diese sind von Land zu Land und selbst von Bundesland zu Bundesland verschieden und wechseln. So ändert sich gerade die Farbmarkierung für Gasflaschen und unter der Hand heißt es, dass bereits eine weitere neue Verordnung im Gange sei. Um in diesem gesetzlichen Verwirrspiel nicht Gefahr zu laufen, einen Fehler zu machen, haben sich im technischen Tauchen folgende Zusatzregelungen bewert.

Nitroxausrüstung, welche für Reinsauerstoff prepariert wurde, sollte nur mit Gasen beschickt werden, die ganz sicher ölfrei sind.

Viele Hersteller liefern Lungenautomaten, welche eine Sauerstofftauglichkeitsprüfung haben, auf Wunsch auch mit eine Sauerstoffanschluss aus.

Sauerstoffgereinigte Flaschen sollten beim Befüllen aus dem Kompressor immer einen Zusatzfilter vorgeschaltet haben. Damit kann man Restkondensat abfangen.

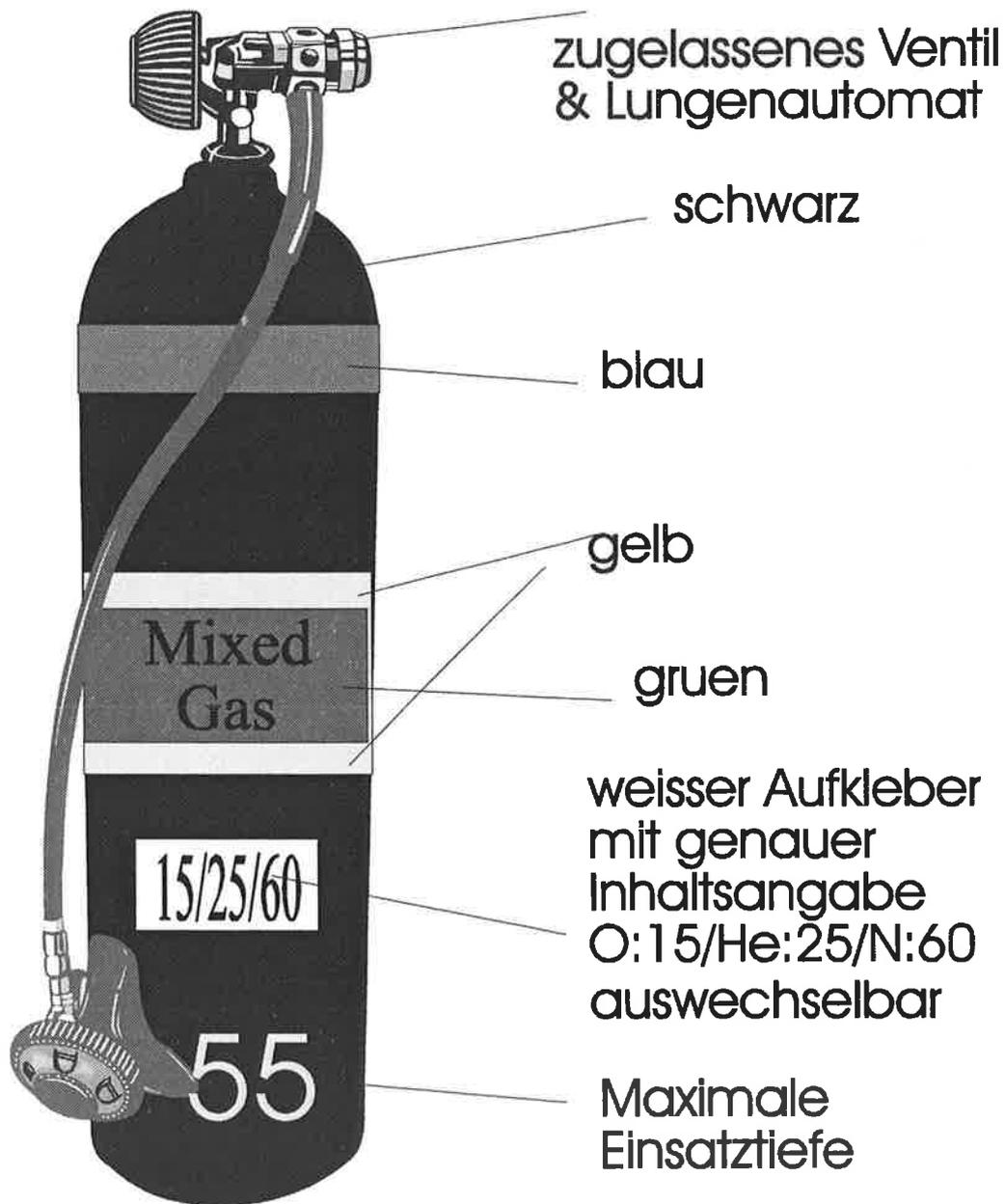
Tauchflaschen, welche ein anderes Gas als Luft enthalten, müssen mit Inhalt und MOD gekennzeichnet sein. Die MOD wird in großen Zahlen auf die Flasche geschrieben, da dies der einzige Wert ist, welcher unter Wasser interessiert. Die Inhaltsangabe ist deshalb wichtig, weil man nicht davon ausgehen kann, dass alle Taucher die MOD mit dem selben maximalen Sauerstoffpartialdruck berechnen.

Beispiel: ein alter Marinetaucher hat 21 auf seiner Flasche stehen, d.h. die MOD wäre 21m. Ein anderer Taucher nimmt dessen Flasche. Da ein vorsichtiger Taucher immer mit 1.4bar rechnet, könnte er auf die Idee kommen, mit Nitrox 45 zu tauchen. Alte Marinetaucher rechneten jedoch mit 2 bar und somit könnte es sich auch um Nitrox 65 handelt – und dies ist ein gewaltiger Unterschied.

Dies Beispiel zeigt, weshalb eine Inhaltsangabe besonders dann wichtig ist, wenn verschiedene Personen Zugriff auf Gasflaschen haben und wie wichtig es ist, das Gas vor dem Tauchen selbst per Analyse nochmals zu überprüfen.

Ferner sollte man Flaschen mit Gasgemischen immer mit dem international üblichen gelb-grün-gelben Band mit Aufschrift „Mixed Gas“ versehen (bei PATD erhältlich). Damit ist schon aus der Ferne erkennbar, dass sich ein anderes Gas als Luft in der Flasche befinden kann.

So könnte ein Flasche gekennzeichnet sein, um zusätzlich Sicherheit gegen Verwechslungen zu haben. Vorsicht: die gesetzliche Farbgebung der Flasche kann wechseln.





Gasanalyse

Jedes Gasgemisch muss analysiert werden

Dies gilt zumindest für den Sauerstoffgehalt. Der Sauerstoff ist das einzige Gas, das den Benutzer beim Tauchen unmittelbar umbringen kann. Bei Nitrox, Heliox und HeliAir sind somit die anderen Gasanteile ebenfalls bekannt, lediglich bei Trimix besteht eine gewisse Unsicherheit, die jedoch durch Tabellen und in der Deko-Software (J-Faktoren) abgefangen werden kann.

Wer muss das Gas analysieren?

Der, der das Gas gemischt hat, und der, der das Gas benutzt und zwar wenn er das Gas abholt und vor dem Tauchgang, falls der Zeitpunkt zur letzten Analyse schon länger her ist.

Füllprotokoll

Hersteller	Kunde	Hersteller-Analyse	Kunden-Analyse	MOD	Datum	Kunden-Unterschrift
Duck, D.	Maus, M.	31,8%	32,0%	40 m	16.5.1996	
Luke, L.	Dalton, J.	35,9%	36,1%	33m	10.9.1996	

Die Analyse sollte auf absolut $\pm 1\%$ genau sein, da ein Tauchgang, geplant mit Nitrox32, mit einem Sauerstoffgehalt zwischen 31% und 33% durchgeführt werden kann (NOAA-Tabelle).

Kalibrieren

Das Gasanalysegerät muss vor jeder Messung kalibriert (geeicht) werden, hierfür gibt es zwei Möglichkeiten:

- Reinsauerstoff --> 100%
- Luft --> 20.9%

Gemessen wird meistens der Sauerstoffpartialdruck, d.h., Staudruck oder hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Messrohr müssen vermieden werden. Es muss dort ein Druck von 1 bar herrschen. Die Temperatur sollte konstant gehalten werden. Vorsicht: Messsensoren altern! Wenn eine 100%-Kalibrierung nicht mehr möglich oder das Haltbarkeitsdatum abgelaufen ist, muss der Sensor ausgetauscht werden.

Geräte

Klassiker: MiniOX I

Kompakt: Oxy-Spy



An diese Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass das Mischen von Gasen sehr gefährlich sein kann, insbesondere wenn reiner Sauerstoff am Mischvorgang beteiligt ist. Es wird dringend empfohlen, einen PATD-Advanced-Nitrox und einen PATD-Gasblender-Kurs zu belegen.

Verantwortlichkeit

Wer Nitrox mischt oder Nitrox bezieht, sollte wissen, was er damit tut. Es darf nicht vorkommen, dass ein Nitrox-zertifizierter Taucher für seine „Kumpels“, die nicht Nitrox-zertifiziert sind, Nitrox besorgt. Diese kennen nicht die möglichen Gefahren. Der zertifizierte Taucher ist dafür verantwortlich, was mit dem Gas passiert.



Übungen

Welcher Druck herrscht in 18m Tiefe?

Welcher Druck herrscht in 35m Tiefe?

In welcher Tiefe herrscht ein Druck von 1.8 bar?

In welcher Tiefe herrscht ein Druck von 4.2 bar?

Welcher Luftdruck herrscht ungefähr in 1000m Höhe?

Schreibe die drei Formel auf, die sich aus „T-im-Kreis“ ableiten lassen.

Welchen Sauerstoffpartialdruck sollte ein Taucher mindestens einatmen?



Was ist der niedrigste Sauerstoffpartialdruck beim Nitroxtauchen?

Ab welchem Sauerstoffpartialdruck muss man ernsthaft mit einer neuronalen Sauerstoffvergiftung rechnen, auch bei kürzeren Tauchgängen?

Was sollte man sicherheitshalber als höchsten Sauerstoffpartialdruck ansetzen?

Nenne die 5 Symptome der neuronalen Sauerstoffvergiftung

S
O
Z
I
U
S

Was muss man tun, wenn diese Symptome auftreten?

Berechne die CNS% für eine Tauchgang mit Nitrox 36 für 30 Minuten in 30m Tiefe.

Berechne die CNS% für eine Tauchgang mit Nitrox 50 für 60 Minuten in 18m Tiefe.



Berechne die CNS% für eine Tauchgang mit Nitrox 32 für 15 Minuten in 39m Tiefe. Es folgt eine Oberflächenpasue von 30 Minuten, dann ein Tauchgang mit Nitrox 40 für 15 Minuten in 30m Tiefe.

Was kontrolliert man mit OTU?

Berechne die maximale Einsatztiefe für Nitrox 32 für einen $pPO_2 = 1.6$ bar.

Berechne die maximale Einsatztiefe für Nitrox 36 für einen $pPO_2 = 1.4$ bar.

In welcher Tiefe erreicht man mit Nitrox 50 einen $pPO_2 = 1.6$ bar.

In welcher Tiefe erreicht man mit Luft einen $pPO_2 = 1.6$ bar. Sollte man solch eine Tauchgang durchführen?

Berechne das „Best Mix“ für einen Tauchgang auf 35m bei einem $pPO_2 = 1.6$ bar.



Berechne das „Best Mix“ für einen Tauchgang auf 25m bei einem $pPO_2 = 1.4$ bar.

Berechne die EAD für Nitrox32 in 40m Tiefe.

Berechne die EAD für Nitrox50 in 18m Tiefe.

Welches Gasgemisch wird benutzt, wenn bei 30m Tiefe die EAD = 24m ist?

Die EAD sei 34m, welchen Wert aus der Tauchtabelle muss man für die Deko-Sicherheit benutzen? Den höheren (z.B. 36m) oder den niedrigeren (z.B. 33m), und warum?

Weshalb ist tauchen mit Nitrox unter Benutzung von Lufttabellen sehr sicher?

Die Gasanalyse ergibt einen Wert von 32,8% Sauerstoff. Kann man eine 32er-Tabelle benutzen und warum?



Die Gasanalyse ergibt 34,3% Sauerstoff. Muss man die 32er oder die 36er-Tabelle benutzen?

Die Gasanalyse ergibt 34,3% Sauerstoff. Kann man daraus die EAD für die geplante Tiefe berechnen und dann die Lufttabelle benutzen?

Weshalb sollte man Gase nicht selbst mischen?

Weshalb sollte man Nitrox-Ausrüstung speziell kennzeichnen?



Lösungen

Hinweis: die Lösungen sind von den physikalischen Einheiten nicht unbedingt konsistent; jedoch so, wie ein normaler Taucher rechnen würde.

Welcher Druck herrscht in 18m Tiefe?

$$(18\text{m}/10 + 1) = 2.8\text{bar}$$

Welcher Druck herrscht in 35m Tiefe?

$$(35\text{m}/10 + 1) = 4.5\text{bar}$$

In welcher Tiefe herrscht ein Druck von 1.8 bar?

1bar Luftdruck
0.8bar Wasserdruck → 8m Tiefe

In welcher Tiefe herrscht ein Druck von 4.2 bar?

1bar Luftdruck
3.2bar Wasserdruck → 32m Tiefe

Welcher Luftdruck herrscht ungefähr in 1000m Höhe?

$$P = 1\text{bar} \cdot (1 - (0.000126 \cdot 1000\text{m})) = 0.874\text{bar}$$

Schreibe die drei Formel auf, die sich aus „T-im-Kreis“ ableiten lassen.

$$P_g = f_g \cdot P$$

$$f_g = P_g / P$$

$$P = P_g / f_g$$



Welchen Sauerstoffpartialdruck sollte ein Taucher mindestens einatmen?

0.16bar

Was ist der niedrigste Sauerstoffpartialdruck beim Nitroxtauchen?

0.21bar während der Oberflächenpause oder beim Tauchen mit Nitrox21 (=Luft).

Ab welchem Sauerstoffpartialdruck muss man ernsthaft mit einer neuronalen Sauerstoffvergiftung rechnen, auch bei kürzeren Tauchgängen?

1.6bar

Was sollte man sicherheitshalber als höchsten Sauerstoffpartialdruck ansetzen?

1.4bar

Nenne die 5 Symptome der neuronalen Sauerstoffvergiftung

**Sichtprobleme
Ohrenläuten
Zittern/Zucken
Irritation des Gemütes
Uebelkeit
Schwindel**

Was muss man tun, wenn diese Symptome auftreten?

Alle Anstrengung einstellen und sofort auftauchen

Berechne die CNS% für eine Tauchgang mit Nitrox 36 für 30 Minuten in 30m Tiefe.

**$pPO_2 = 0.36 \cdot 4bar = 1.44bar \rightarrow$ Rechnung mit 1.5bar
1.5bar \rightarrow max. Expostionszeit: 120 Minuten
30min. / 120min = 0.25 \rightarrow 25CNS%**



Berechne die CNS% für eine Tauchgang mit Nitrox 50 für 60 Minuten in 18m Tiefe.

$pPO_2 = 0.5 \cdot 2.8\text{bar} = 1.4\text{bar} \rightarrow$ Rechnung mit 1.4bar
1.4bar \rightarrow max. Expostionszeit: 150 Minuten
60min. / 150min = 0.4 \rightarrow 40CNS%

Berechne die CNS% für eine Tauchgang mit Nitrox 32 für 25 Minuten in 39m Tiefe. Es folgt eine Oberflächenpasue von 30 Minuten, dann ein Tauchgang mit Nitrox 40 für 15 Minuten in 30m Tiefe.

$pPO_2 = 0.32 \cdot 4.9\text{bar} = 1.57\text{bar} \rightarrow$ Rechnung mit 1.6bar
1.6bar \rightarrow max. Expostionszeit: 45 Minuten
25min. / 45min = 0.55 \rightarrow 55CNS%

Oberfläche kleiner 45 Minuten, CNS% bleibt erhalten

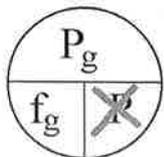
$pPO_2 = 0.4 \cdot 4.0\text{bar} = 1.6\text{bar} \rightarrow$ Rechnung mit 1.6bar
1.6bar \rightarrow max. Expostionszeit: 45 Minuten
15min. / 45min = 0.33 \rightarrow 33CNS%

$\rightarrow 33\text{CNS\%} + 55\text{CNS\%} = 88\text{CNS\%}$

Was kontrolliert man mit OTU?

Pulmonale Sauerstoffvergiftung

Berechne die maximale Einsatztiefe für Nitrox 32 mit $pPO_2 = 1.6$ bar.

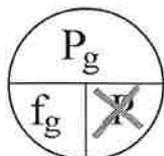


$P = P_g / f_g = 1.6\text{bar} / 0.32 = 5\text{bar} \rightarrow 40\text{m}$
oder

$$MOD = \left(\frac{pPO_{2,\text{max}}}{f_{O_2}} - 1 \right) \cdot 10\text{m} = \left(\frac{1.6\text{bar}}{0.32} - 1 \right) \cdot 10\text{m} = 40\text{m}$$



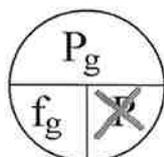
Berechne die maximale Einsatztiefe für Nitrox 36 für einen $pPO_2 = 1.4$ bar.



$P = P_g / f_g = 1.4 \text{ bar} / 0.36 = 3.8 \text{ bar} \rightarrow 28 \text{ m}$
 oder

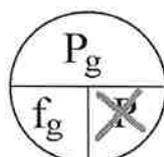
$$MOD = \left(\frac{pPO_{2,max}}{f_{O_2}} - 1 \right) \cdot 10 \text{ m} = \left(\frac{1.4 \text{ bar}}{0.36} - 1 \right) \cdot 10 \text{ m} = 28 \text{ m}$$

In welcher Tiefe erreicht man mit Nitrox 50 einen $pP_g = pPO_2 = 1.6$ bar.



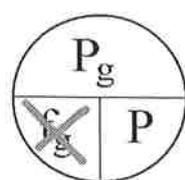
$P = pPO_2 / f_g = 1.6 \text{ bar} / 0.5 = 3.2 \text{ bar} \rightarrow 22 \text{ m}$

In welcher Tiefe erreicht man mit Luft einen $pPO_2 = 1.6$ bar. Sollte man solch eine Tauchgang durchführen?



$P = pPO_2 / f_g = 1.6 \text{ bar} / 0.21 = 7.6 \text{ bar} \rightarrow 66 \text{ m}$
Nein, die Stickstoffnarkose (Tiefenrausch) ist zu hoch

Berechne das „Best Mix“ für einen Tauchgang auf 35m bei einem $pPO_2 = 1.6$ bar.



$f_g = P_g / P = 1.6 \text{ bar} / 4.5 \text{ bar} = 0.355$
 oder

$$f_{O_2,best} = \frac{pPO_{2,max}}{\frac{D}{10} + 1} = \frac{1.6 \text{ bar}}{\frac{35}{10} + 1} = 0.355 \rightarrow \text{Nitrox35}$$



Berechne das „Best Mix“ für einen Tauchgang auf 25m bei einem $pPO_2 = 1.4 \text{ bar}$.



$$f_g = P_g/P = 1.4\text{bar}/3.5\text{bar} = 0.4$$

oder

$$f_{O_2, \text{best}} = \frac{pPO_{2, \text{max}}}{\frac{D}{10} + 1} = \frac{1.4\text{bar}}{\frac{25}{10} + 1} = 0.4 \rightarrow \text{Nitrox40}$$

Berechne die EAD für Nitrox32 in 40m Tiefe.

$$EAD = END = \left[\frac{fN_2 \cdot (D + 10m)}{0.79} \right] - 10m = \left[\frac{0.68 \cdot (40m + 10m)}{0.79} \right] - 10m = 33m$$

Berechne die EAD für Nitrox50 in 18m Tiefe.

$$EAD = END = \left[\frac{fN_2 \cdot (D + 10m)}{0.79} \right] - 10m = \left[\frac{0.5 \cdot (18m + 10m)}{0.79} \right] - 10m = 8m$$

Welches Gasgemisch wird benutzt, wenn bei 30m Tiefe die $EAD = 24m$ ist?

$$fN_2 = \frac{(EAD + 10m) \cdot 0.79}{D + 10m} = \frac{(24m + 10m) \cdot 0.79}{30m + 10m} = 0.67 \rightarrow \text{Nitrox33}$$

Die EAD sei 34m, welchen Wert aus der Tauchtafel muss man für die Deko-Sicherheit benutzen? Den höheren (z.B. 36m) oder den niedrigeren (z.B. 33m), und warum?

36m, man rechnet mit dem schlechteren Fall für Dekompression d.h. runden zur sicheren Seite hin

Weshalb ist tauchen mit Nitrox unter Benutzung von Lufttafeln sehr sicher?

Weil die Rechnung immer davon ausgeht, dass im Körper mehr Stickstoff gelöst ist als dies in Wirklichkeit der Fall ist.



Die Gasanalyse ergibt einen Wert von 32,8% Sauerstoff. Kann man eine 32er-Tabelle benutzen und warum?

Ja, die Tabellen sind auf $\pm 1\%$ ausgelegt

Die Gasanalyse ergibt 34,3% Sauerstoff. Muss man die 32er oder die 36er-Tabelle benutzen?

Die 32er-Tabelle, da diese die kürzeren Nullzeiten liefert und er muss seine MOD prüfen, falls für Nitrox 32 geplant war.

Die Gasanalyse ergibt 34,3% Sauerstoff. Kann man daraus die EAD für die geplante Tiefe berechnen und dann die Lufttabelle benutzen?

Ja

Weshalb sollte man Gase nicht selbst mischen?

Da der Umgang mit Sauerstoff sehr gefährlich ist. Man muss spezielle Regeln beachten und Sicherheitsvorkehrungen treffen.

Weshalb sollte man Nitrox-Ausrüstung speziell kennzeichnen?

Damit sie nicht aus Versehen bei tieferen Tauchgängen benutzt wird.



Anhang

US-NAVY-Tabellen

Die US-NAVY-Tabellen galten lange Zeit als DIE Tabellen, der Standard an dem sich alles andere orientieren musste. Während die Tabellen für Wiederholungstauchgänge sehr konservativ sind, erlauben sie für die ersten Tauchgänge sehr lange Nullzeiten. Letzteres ist insbesondere dann kritisch, wenn ein echter Rechtecktauchgang mit der gesamten Grundzeit auf dem tiefsten Tiefenniveau durchgeführt wird. Bei den Sporttauchverbänden rückte man Anfang der 90er Jahre von den NAVY-Tabellen ab. *Benutze diese Tabelle zum Üben, jedoch nicht zum wirklichen Tauchen.*

Saubere Tasche	Tasche Wiederholungsgruppe	Tasche			Tasche			Wiederholungsgruppe
		Tasche	Tasche	Druckgruppe	Tasche	Tasche	Druckgruppe	
m	min	m	min	3	m	min	9 6 3	Wiederholungsgruppe
3	80 120 150	15 25 30	10 12 15	C D E	10 12 15	10 12 15	C D E	C D E
4.5	70 110 140	15 20 25	10 12 15	C D E	10 12 15	10 12 15	C D E	C D E
6	60 100 130	15 20 25	10 12 15	C D E	10 12 15	10 12 15	C D E	C D E
7.5	55 95 125	15 20 25	10 12 15	C D E	10 12 15	10 12 15	C D E	C D E
9	50 90 120	15 20 25	10 12 15	C D E	10 12 15	10 12 15	C D E	C D E
10.5	45 85 115	15 20 25	10 12 15	C D E	10 12 15	10 12 15	C D E	C D E
12	40 80 110	15 20 25	10 12 15	C D E	10 12 15	10 12 15	C D E	C D E

US Navy
Austauchtabelle

		Oberflächenpause (h. min) ▶														
Wiederholungstauchgang Tautiefe (m)	Wiederholungsgruppe	0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300 1400 1500														
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
12	A	12	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121	131	141	151
15	B	15	24	34	44	54	64	74	84	94	104	114	124	134	144	154
18	C	18	27	37	47	57	67	77	87	97	107	117	127	137	147	157
21	D	21	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
24	E	24	33	43	53	63	73	83	93	103	113	123	133	143	153	163
27	F	27	36	46	56	66	76	86	96	106	116	126	136	146	156	166
30	G	30	39	49	59	69	79	89	99	109	119	129	139	149	159	169
33	H	33	42	52	62	72	82	92	102	112	122	132	142	152	162	172
36	I	36	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	175
39	J	39	48	58	68	78	88	98	108	118	128	138	148	158	168	178
42	K	42	51	61	71	81	91	101	111	121	131	141	151	161	171	181
45	L	45	54	64	74	84	94	104	114	124	134	144	154	164	174	184
48	M	48	57	67	77	87	97	107	117	127	137	147	157	167	177	187
51	N	51	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
54	O	54	63	73	83	93	103	113	123	133	143	153	163	173	183	193
57	P	57	66	76	86	96	106	116	126	136	146	156	166	176	186	196

Zeitzu- lag (min)



Deko92 Luft, Bergsee, Nitrox32, Nitrox36

Die folgenden Abbildungen zeigen Auszüge aus der Tabelle Deko92 von Dr. Max Hahn (VDST, RAB).

Tiefe [m]	Zeit [min]	Deco [min]	Aufstieg [min]	Rep. Gr.	Tiefe [m]	Zeit [min]	Deco [min]	Aufstieg [min]	Rep. Gr.	Tiefe [m]	Zeit [min]	Deco [min]	Aufstieg [min]	Rep. Gr.			
12	36	12	1.2	D	27	6	2.7	2.7	B	39	9	3.9	3.9	C			
140'	54	1.2	1.2	E	18'	10	2.7	2.7	C	9'	9	3.9	3.9	D			
	72	1.2	1.2	F	14	14	2.7	2.7	D	12	12	3	6.9	E			
	90	1.2	1.2	G	18	18	2.7	2.7	E	15	15	1	9.9	F			
	108	1.2	1.2	G	22	22	4.7	4.7	E	18	18	3	7	13.9	F		
					25	25	5	7.7	F	21	21	5	9	18.9	F		
15	24	1.5	1.5	D	30	30	8	10.7	F	24	24	5	13	24.9	G		
72'	36	1.5	1.5	E	34	34	2	10.7	F	27	27	7	16	30.9	G		
	48	1.5	1.5	E	38	38	3	13	G	42	42	4	2	4.2	C		
	60	1.5	1.5	F	42	42	5	15	G	7'	7'	2	6.2	D			
	72	1.5	1.5	F	46	46	7	18	G	10	10	3	10.2	E			
	84	1.5	1.5	G	50	50	9	21	G	13	13	4	14.2	F			
										15	15	4	10	20.2	F		
18	15	1.8	1.8	C	30	6	3.0	3.0	B	19	19	3	6	13	26.2	G	
45'	25	1.8	1.8	D	15'	9	3.0	3.0	C	22	22	3	8	16	33.2	G	
	35	1.8	1.8	E	12	12	3.0	3.0	D	25	25	1	4	8	4.5	D	
	45	1.8	1.8	F	15	15	3.0	3.0	D	45	45	1	5.5	5.5	D		
	55	1.8	1.8	F	18	18	2	5.0	E	6'	6'	3	7.5	7.5	E		
	65	1.8	1.8	G	21	21	4	7.0	E	10	10	4	10.5	10.5	E		
	75	1.8	1.8	G	24	24	1	10.0	F	12	12	2	14.5	14.5	F		
					27	27	2	8	F	14	14	3	18.5	18.5	F		
21	11	2.1	2.1	C	30	30	3	10	F	16	16	3	22.5	22.5	G		
31'	18	2.1	2.1	D	33	33	5	12	G	18	18	3	27.5	27.5	G		
	21	2.1	2.1	D	36	36	6	15	G	20	20	1	3	6	13	27.5	G
	26	2.1	2.1	E	39	39	7	17	G	22	22	2	4	7	15	32.5	G
	31	2.1	2.1	E	42	42	9	19	G	46	46	1	5.8	5.8	C		
	36	2.1	2.1	F	33	6	3.3	3.3	C	5'	5'	1	8.8	8.8	E		
	41	2.1	2.1	F	12'	9	3.3	3.3	D	7	7	3	11.8	11.8	E		
	45	2.1	2.1	F	9	15	5.0	5.0	E	9	9	5	14.8	14.8	F		
	51	2.1	2.1	G	15	15	7	8.3	E	11	11	2	17.8	17.8	F		
	56	2.1	2.1	G	18	18	8	11.3	F	13	13	3	21.8	21.8	F		
	61	2.1	2.1	G	21	21	1	7	F	15	15	4	24.8	24.8	F		
					24	24	3	8	F	17	17	5	29.8	29.8	G		
24	7	2.4	2.4	B	33	33	5	10	G	19	19	2	3	6	14	29.8	G
23'	11	2.4	2.4	C	12'	9	3.3	3.3	D	21	21	3	4	7	17	35.8	G
	15	2.4	2.4	C	9	12	3.3	3.3	D	48	48	1	6.1	6.1	D		
	19	2.4	2.4	D	15	15	5.0	5.0	E	51	51	1	9.1	9.1	E		
	23	2.4	2.4	D	18	18	7	8.3	E	5'	5'	3	12.1	12.1	E		
	27	2.4	2.4	E	21	21	9	11.3	F	10	10	5	16.1	16.1	F		
	31	2.4	2.4	E	24	24	1	7	F	12	12	2	20.1	20.1	F		
	35	2.4	2.4	F	27	27	3	8	F	14	14	3	24.1	24.1	F		
	39	2.4	2.4	F	30	30	5	10	F	16	16	4	28.1	28.1	F		
	43	2.4	2.4	G	33	33	7	13	G	18	18	6	32.1	32.1	G		
	47	2.4	2.4	G	36	36	9	15	G	21	21	7	36.1	36.1	G		
	51	2.4	2.4	G	39	39	11	18	G	24	24	9	40.1	40.1	G		
	55	2.4	2.4	G	42	42	13	21	G	27	27	11	44.1	44.1	G		
					45	45	15	24	G	30	30	13	48.1	48.1	G		
					48	48	17	27	G	33	33	15	52.1	52.1	G		
					51	51	19	30	G	36	36	17	56.1	56.1	G		
					54	54	21	33	G	39	39	19	60.1	60.1	G		
					57	57	23	36	G	42	42	21	64.1	64.1	G		
					60	60	25	39	G	45	45	23	68.1	68.1	G		
					63	63	27	42	G	48	48	25	72.1	72.1	G		
					66	66	29	45	G	51	51	27	76.1	76.1	G		
					69	69	31	48	G	54	54	29	80.1	80.1	G		
					72	72	33	51	G	57	57	31	84.1	84.1	G		
					75	75	35	54	G	60	60	33	88.1	88.1	G		
					78	78	37	57	G	63	63	35	92.1	92.1	G		
					81	81	39	60	G	66	66	37	96.1	96.1	G		
					84	84	41	63	G	69	69	39	100.1	100.1	G		
					87	87	43	66	G	72	72	41	104.1	104.1	G		
					90	90	45	69	G	75	75	43	108.1	108.1	G		
					93	93	47	72	G	78	78	45	112.1	112.1	G		
					96	96	49	75	G	81	81	47	116.1	116.1	G		
					99	99	51	78	G	84	84	49	120.1	120.1	G		
					102	102	53	81	G	87	87	51	124.1	124.1	G		
					105	105	55	84	G	90	90	53	128.1	128.1	G		
					108	108	57	87	G	93	93	55	132.1	132.1	G		
					111	111	59	90	G	96	96	57	136.1	136.1	G		
					114	114	61	93	G	99	99	59	140.1	140.1	G		
					117	117	63	96	G	102	102	61	144.1	144.1	G		
					120	120	65	99	G	105	105	63	148.1	148.1	G		
					123	123	67	102	G	108	108	65	152.1	152.1	G		
					126	126	69	105	G	111	111	67	156.1	156.1	G		
					129	129	71	108	G	114	114	69	160.1	160.1	G		
					132	132	73	111	G	117	117	71	164.1	164.1	G		
					135	135	75	114	G	120	120	73	168.1	168.1	G		
					138	138	77	117	G	123	123	75	172.1	172.1	G		
					141	141	79	120	G	126	126	77	176.1	176.1	G		
					144	144	81	123	G	129	129	79	180.1	180.1	G		
					147	147	83	126	G	132	132	81	184.1	184.1	G		
					150	150	85	129	G	135	135	83	188.1	188.1	G		
					153	153	87	132	G	138	138	85	192.1	192.1	G		
					156	156	89	135	G	141	141	87	196.1	196.1	G		
					159	159	91	138	G	144	144	89	200.1	200.1	G		
					162	162	93	141	G	147	147	91	204.1	204.1	G		
					165	165	95	144	G	150	150	93	208.1	208.1	G		
					168	168	97	147	G	153	153	95	212.1	212.1	G		
					171	171	99	150	G	156	156	97	216.1	216.1	G		
					174	174	101	153	G	159	159	99	220.1	220.1	G		
					177	177	103	156	G	162	162	101	224.1	224.1	G		
					180	180	105	159	G	165	165	103	228.1	228.1	G		
					183	183	107	162	G	168	168	105	232.1	232.1	G		
					186	186	109	165	G	171	171	107	236.1	236.1	G		



Tiefe [m]	Zeit [min]	Deco [min]	Aufstieg [min]	Rep. Gr.	Tiefe [m]	Zeit [min]	Deco [min]	Aufstieg [min]	Rep. Gr.	Tiefe [m]	Zeit [min]	Deco [min]	Aufstieg [min]	Rep. Gr.
12	36		1.2	D	12	20		1.2	B	27	6		2.7	B
112	54		1.2	E	416'	30		1.2	C	30'	12		2.7	C
	72		1.2	F		40		1.2	D		18		2.7	D
	90		1.2	G		60		1.2	E		24		2.7	E
	108		1.2	G		80		1.2	F		30		2.7	F
						100			F		36		4.7	F
											42		7.7	F
15	24		1.5	D	15	12		1.5	B		48		10.7	G
60'	36		1.5	E		20		1.5	C	30	6		3.0	B
	48		1.5	E	167'	30		1.5	D	24	9		3.0	C
	60		1.5	F		40		1.5	E		12		3.0	D
	72	5	1.5	F		55		1.5	E		18		3.0	E
	84	10	1.5	G		70		1.5	F		24		3.0	E
						85		1.5	G		30		6.0	F
18	15		1.8	C	18	10		1.8	B		36		9.0	F
38	25		1.8	D		16		1.8	C		42		12.0	G
	35		1.8	E	90'	22		1.8	D		14			
	45	3	1.8	F		32		1.8	E	33	5		3.3	B
	55	9	1.8	F		48		1.8	F	19'	9		3.3	C
	65	15	1.8	G		64		1.8	F		19		3.3	D
	75	22	1.8	G		80		1.8	G		24		5.3	E
											28		5.3	F
21	11		2.1	C	21	9		2.1	B		29		8.3	F
27	16		2.1	D	57'	14		2.1	C		34		11.3	F
	21		2.1	D		19		2.1	D		39		15.3	G
	26		2.1	E		27		2.1	E		4		3.6	B
	31	2	2.1	E		42		2.1	F		6		3.6	C
	36	5	2.1	F		57		2.1	F		12		3.6	D
	41	8	2.1	F		72		2.1	F		16		3.6	E
	46	12	2.1	F					G		20		5.6	E
	51	16	2.1	G							24		8.6	F
	56	20	2.1	G							28		11.6	F
	61	25	2.1	G							32		14.6	G
											36		17.6	G
24	7		2.4	B	24	9		2.4	B		4		3.9	B
30'	11		2.4	C	40'	12		2.4	C		6		3.9	C
	15		2.4	D		20		2.4	D		10		3.9	D
	19		2.4	D		30		2.4	D		14		3.9	E
	23		2.4	D		40		2.4	E		18		6.9	E
	27	2	2.4	E		50		2.4	F		22		9.3	F
	31	4	2.4	E		60		2.4	F		25		12.9	F
	35	7	2.4	F					F		30		16.9	G
	39	11	2.4	F					G		34		20.9	G
	43	14	2.4	F										
	47	17	2.4	G										
	51	20	2.4	G										
	55	24	2.4	G										
		28	2.4	G										

Nitrox 32 0m-700m Höhe

Nitrox 32 0m-700m Höhe

Luft 700m -1500m Höhe Bergsee

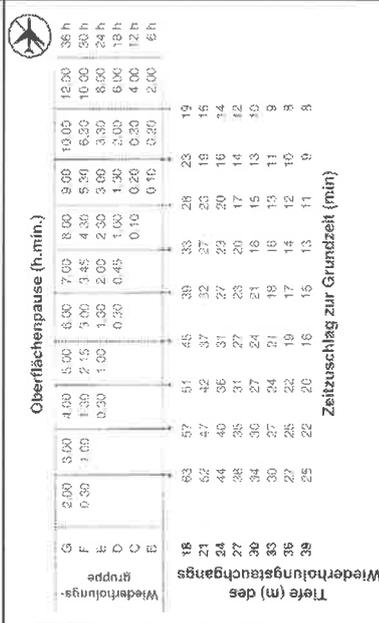
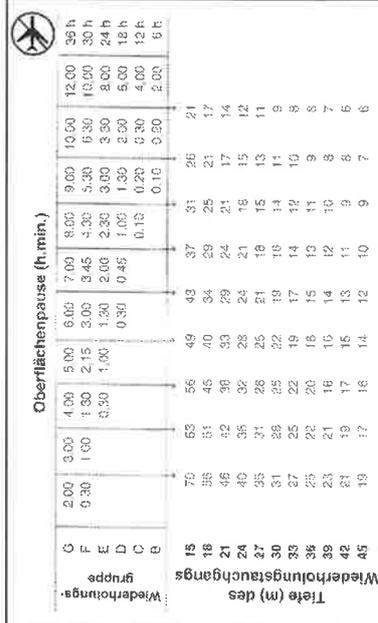


Tiefe [m]	Zeit [min]	Deco [min]	Aufstieg [min]	Rep. Gr.
12	20		1.2	B
757	30		1.2	C
	40		1.2	D
	60		1.2	E
	80		1.2	F
	100		1.2	F
15	15		1.5	B
251	25		1.5	C
	37		1.5	D
	49		1.5	E
	61		1.5	F
	73		1.5	F
	85		1.5	F
18	14		1.8	B
126'	22		1.8	C
	30		1.8	D
	40		1.8	E
	50		1.8	F
	60		1.8	F
	70		1.8	F
21	12		2.1	B
76'	18		2.1	C
	24		2.1	D
	36		2.1	E
	48		2.1	F
	60		2.1	F
24	10		2.4	B
52'	15		2.4	C
	22		2.4	D
	32		2.4	E
	42		2.4	F
	52		2.4	F
27	9		2.7	B
38'	14		2.7	C
	20		2.7	D
	26		2.7	E
	32		2.7	F
	38		2.7	F
	44	2	4.7	F
	50	4	6.7	G

Nitrox 36 0m - 700m Höhe

Tiefe [m]	Zeit [min]	Deco [min]	Aufstieg [min]	Rep. Gr.
30	7		3.0	B
29'	11		3.0	C
	17		3.0	D
	23		3.0	E
	29		3.0	F
	35	2	5.0	F
	41	5	8.0	F
33	6		3.3	B
24'	9		3.3	C
	14		3.3	D
	19		3.3	E
	24		3.3	E
	29	2	5.3	F
	34	5	8.3	F
	39	7	10.3	G

Nitrox 36 0m - 700m Höhe



Oberflächenintervall / Zeitzuschlag Luft



Sauerstoffpartialdruck Nitroxgemische

Tiefe		Sauerstoffgehalt [%] und PPO2															
m	ft	21	26	28	30	32	34	36	38	40	50	57	64	72	80	84	100
3	10	0,28	0,34	0,37	0,39	0,42	0,45	0,47	0,50	0,53	0,66	0,75	0,84	0,95	1,05	1,11	1,32
6	20	0,34	0,42	0,45	0,49	0,52	0,55	0,58	0,62	0,65	0,81	0,92	1,04	1,17	1,30	1,36	1,62
9	30	0,40	0,50	0,54	0,58	0,62	0,65	0,69	0,73	0,77	0,96	1,10	1,23	1,38	1,54	1,62	1,92
10	33	0,42	0,53	0,57	0,61	0,65	0,69	0,73	0,77	0,81	1,01	1,15	1,30	1,46	1,62	1,70	2,02
12	39	0,47	0,58	0,62	0,67	0,71	0,76	0,80	0,85	0,89	1,11	1,27	1,42	1,60	1,78	1,87	2,23
15	49	0,53	0,66	0,71	0,76	0,81	0,86	0,91	0,96	1,01	1,26	1,44	1,62	1,82	2,02	2,12	2,53
18	59	0,59	0,74	0,79	0,85	0,91	0,96	1,02	1,08	1,13	1,42	1,61	1,81	2,04	2,27	2,38	2,83
20	66	0,64	0,79	0,85	0,91	0,97	1,03	1,09	1,15	1,21	1,52	1,73	1,94	2,18	2,43	2,55	3,03
21	69	0,66	0,82	0,88	0,94	1,00	1,07	1,13	1,19	1,25	1,57	1,79	2,01	2,26	2,51	2,63	3,14
24	79	0,72	0,89	0,96	1,03	1,10	1,17	1,24	1,31	1,38	1,72	1,96	2,20	2,48	2,75	2,89	3,44
27	89	0,79	0,97	1,05	1,12	1,20	1,27	1,35	1,42	1,50	1,87	2,13	2,39	2,69	2,99	3,14	3,74
30	98	0,85	1,05	1,13	1,21	1,29	1,38	1,46	1,54	1,62	2,02	2,31	2,59	2,91	3,24	3,40	4,04
33	108	0,91	1,13	1,22	1,30	1,39	1,48	1,57	1,65	1,74	2,17	2,48	2,78	3,13	3,48	3,65	4,35
36	118	0,98	1,21	1,30	1,40	1,49	1,58	1,67	1,77	1,86	2,33	2,65	2,98	3,35	3,72	3,91	4,65
39	128	1,04	1,29	1,39	1,49	1,59	1,68	1,78	1,88	1,98	2,48	2,82	3,17	3,57	3,96	4,16	4,95
40	131	1,06	1,31	1,42	1,52	1,62	1,72	1,82	1,92	2,02	2,53	2,88	3,24	3,64	4,04	4,25	5,05
42	138	1,10	1,37	1,47	1,58	1,68	1,79	1,89	2,00	2,10	2,63	3,00	3,36	3,79	4,21	4,42	5,26
45	148	1,17	1,45	1,56	1,67	1,78	1,89	2,00	2,11	2,22	2,78	3,17	3,56	4,00	4,45	4,67	5,56
48	157	1,23	1,52	1,64	1,76	1,88	1,99	2,11	2,23	2,35	2,93	3,34	3,75	4,22	4,69	4,93	5,86
50	164	1,27	1,58	1,70	1,82	1,94	2,06	2,18	2,30	2,43	3,03	3,46	3,88	4,37	4,85	5,09	6,07
55	180	1,38	1,71	1,84	1,97	2,10	2,23	2,37	2,50	2,63	3,29	3,75	4,21	4,73	5,26	5,52	6,57
60	197	1,49	1,84	1,98	2,12	2,26	2,41	2,55	2,69	2,83	3,54	4,03	4,53	5,09	5,66	5,94	7,08
65	213	1,59	1,97	2,12	2,27	2,43	2,58	2,73	2,88	3,03	3,79	4,32	4,85	5,46	6,06	6,37	7,58
70	230	1,70	2,10	2,26	2,43	2,59	2,75	2,91	3,07	3,23	4,04	4,61	5,18	5,82	6,47	6,79	8,09
75	246	1,80	2,23	2,41	2,58	2,75	2,92	3,09	3,26	3,44	4,30	4,90	5,50	6,19	6,87	7,22	8,59
80	262	1,91	2,37	2,55	2,73	2,91	3,09	3,27	3,46	3,64	4,55	5,19	5,82	6,55	7,28	7,64	9,10



CNS% pro Mintute für Nitroxgemische

Tiefe		Sauerstoffgehalt [%] und CNS% pro Minute															
m	ft	21	26	28	30	32	34	36	38	40	50	57	64	72	80	84	100
3	10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6
6	20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	3,3
9	30	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,1	3,0	####
10	33	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	3,3	27,7	####
12	39	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	2,4	####	####	####
15	49	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,8	3,3	####	####	####	####
18	59	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,7	3,0	####	####	####	####	####
20	66	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,9	64,0	####	####	####	####	####
21	69	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	1,4	####	####	####	####	####	####
24	79	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	47,8	####	####	####	####	####	####
27	89	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,9	####	####	####	####	####	####	####
30	98	0,2	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	3,2	####	####	####	####	####	####	####
33	108	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,3	7,4	84,1	####	####	####	####	####	####	####
36	118	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	1,6	13,5	####	####	####	####	####	####	####	####	####
39	128	0,4	0,6	0,7	0,8	1,7	17,8	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####
40	131	0,4	0,6	0,7	0,9	3,2	47,2	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####
42	138	0,4	0,7	0,8	1,6	16,8	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####
45	148	0,5	0,8	1,2	11,4	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####
48	157	0,5	1,0	5,7	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####
50	164	0,6	1,6	26,4	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####
55	180	0,7	35,2	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####
60	197	0,8	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####
65	213	1,9	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####
70	230	26,3	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####
75	246	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####
80	262	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####



OTU/Minute für Sauerstoffpartialdrücke

pPO2	OTU / Minute
0,5	0,00
0,6	0,26
0,7	0,47
0,8	0,65
0,9	0,83
1,0	1,00
1,1	1,16
1,2	1,32
1,3	1,48
1,4	1,63
1,5	1,78
1,6	1,92
1,7	2,07
1,8	2,21
1,9	2,35
2,0	2,49

OTU-Kontrolle für Nitroxgemische

Tiefe		Sauerstoffgehalt [%] und OTUs pro Minute															
m	ft	21	26	28	30	32	34	36	38	40	50	57	64	72	80	84	100
3	10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1	1,2	1,5
6	20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,6	2,0
9	30	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,9	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9	2,4
10	33	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,1	2,5
12	39	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	1,2	1,4	1,7	1,9	2,2	2,3	2,8
15	49	0,1	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,4	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	3,2
18	59	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,7	1,9	2,2	2,5	2,8	3,0	3,6
20	66	0,3	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,8	2,1	2,4	2,7	3,1	3,2	3,8
21	69	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,9	2,2	2,5	2,8	3,2	3,3	4,0
24	79	0,5	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	2,1	2,4	2,8	3,1	3,5	3,7	4,3
27	89	0,6	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	2,3	2,7	3,0	3,4	3,8	4,0	4,7
30	98	0,7	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,5	2,9	3,3	3,7	4,1	4,3	5,1
33	108	0,9	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,7	3,1	3,5	4,0	4,4	4,6	5,4
36	118	1,0	1,3	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,9	3,4	3,8	4,2	4,7	4,9	5,8
39	128	1,1	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	3,1	3,6	4,0	4,5	5,0	5,2	6,1
40	131	1,1	1,5	1,7	1,8	1,9	2,1	2,2	2,4	2,5	3,2	3,7	4,1	4,6	5,1	5,3	6,3
42	138	1,2	1,6	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	3,3	3,8	4,3	4,8	5,3	5,5	6,5
45	148	1,3	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	3,5	4,0	4,5	5,0	5,6	5,8	6,8
48	157	1,4	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	3,0	3,7	4,2	4,7	5,3	5,8	6,1	7,2
50	164	1,4	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6	2,7	2,9	3,1	3,8	4,4	4,9	5,5	6,0	6,3	7,4
55	180	1,6	2,1	2,3	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,3	4,2	4,7	5,3	5,9	6,5	6,8	7,9
60	197	1,8	2,3	2,5	2,7	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	4,5	5,1	5,7	6,3	6,9	7,3	8,5
65	213	1,9	2,4	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,8	4,8	5,4	6,0	6,7	7,4	7,7	9,0
70	230	2,1	2,6	2,8	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	5,1	5,7	6,4	7,1	7,8	8,2	9,6



END / EAD für Nitroxgemische

Tiefe		Sauerstoffgehalt [%] und END/EAD [m]															
m	ft	21	26	28	30	32	34	36	38	40	50	57	64	72	80	84	100
3	10	3	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	20	6	5	5	4	4	3	3	3	2	0	0	0	0	0	0	0
9	30	9	8	7	7	6	6	5	5	4	2	0	0	0	0	0	0
10	33	10	9	8	8	7	7	6	6	5	3	1	0	0	0	0	0
12	39	12	11	10	9	9	8	8	7	7	4	2	0	0	0	0	0
15	49	15	13	13	12	12	11	10	10	9	6	4	1	0	0	0	0
18	59	18	16	16	15	14	13	13	12	11	8	5	3	0	0	0	0
20	66	20	18	17	17	16	15	14	14	13	9	6	4	1	0	0	0
21	69	21	19	18	17	17	16	15	14	14	10	7	4	1	0	0	0
24	79	24	22	21	20	19	18	18	17	16	12	9	5	2	0	0	0
27	89	27	25	24	23	22	21	20	19	18	13	10	7	3	0	0	0
30	98	30	27	26	25	24	23	22	21	20	15	12	8	4	0	0	0
33	108	33	30	29	28	27	26	25	24	23	17	13	10	5	1	0	0
36	118	36	33	32	31	30	28	27	26	25	19	15	11	6	2	0	0
39	128	39	36	35	33	32	31	30	28	27	21	17	12	7	2	0	0
40	131	40	37	36	34	33	32	31	29	28	22	17	13	8	3	0	0
42	138	42	39	37	36	35	33	32	31	29	23	18	14	8	3	1	0
45	148	45	42	40	39	37	36	35	33	32	25	20	15	9	4	1	0
48	157	48	44	43	41	40	38	37	36	34	27	22	16	11	5	2	0
50	164	50	46	45	43	42	40	39	37	36	28	23	17	11	5	2	0
55	180	55	51	49	48	46	44	43	41	39	31	25	20	13	6	3	0
60	197	60	56	54	52	50	48	47	45	43	34	28	22	15	8	4	0
65	213	65	60	58	56	55	53	51	49	47	37	31	24	17	9	5	0
70	230	70	65	63	61	59	57	55	53	51	41	34	26	18	10	6	0
75	246	75	70	67	65	63	61	59	57	55	44	36	29	20	12	7	0
80	262	80	74	72	70	67	65	63	61	58	47	39	31	22	13	8	0

Maximum Operation Depth

pPO ₂ max	Sauerstoffgehalt MOD [m]															
	21	26	28	30	32	34	36	38	40	50	57	64	72	80	84	100
1,30	52	40	36	33	31	28	26	24	23	16	13	10	8	6	5	3
1,35	54	42	38	35	32	30	28	26	24	17	14	11	9	7	6	4
1,40	57	44	40	37	34	31	29	27	25	18	15	12	9	8	7	4
1,45	59	46	42	38	35	33	30	28	26	19	15	13	10	8	7	5
1,50	61	48	44	40	37	34	32	29	28	20	16	13	11	9	8	5
1,55	64	50	45	42	38	36	33	31	29	21	17	14	12	9	8	6
1,60	66	52	47	43	40	37	34	32	30	22	18	15	12	10	9	6
1,65	69	53	49	45	42	39	36	33	31	23	19	16	13	11	10	7