

Lungen- oder Ganzkörpersauerstoffvergiftung

(von Stefan Steuerer)

Mir ist bewusst, dass für 98% der durchgeführten Rebreathertaugänge weltweit keine Planung und Berechnung der OTU's erforderlich ist.

Aber es wird einige geben, die - so wie ich - genau wissen wollen, warum sie etwas nicht wissen müssen.

Schädigung der Lunge

Das zweite wichtige Organsystem, an dem sich die Sauerstofftoxizität bemerkbar macht, ist die Lunge. Nur wenn wir uns über einen längeren Zeitraum einem O₂-Partialdruck von mindestens 0,5 bar aussetzen, kann es zu einer Lungen- oder Ganzkörpersauerstoffvergiftung (Lorrain Smith-Effekt) kommen.

Die Schädigung macht sich durch Atemnot bemerkbar und bei einer Blutuntersuchung stellt man fest, dass tatsächlich eine Hypoxie (Sauerstoffmangel) besteht.

Unter dem erhöhten O₂-Partialdruck kommt es zu einer Verdickung der Alveolarwände und erschwert dadurch den Gasaustausch. Weiters zerstört der Sauerstoff den Antiatelektasefaktor, das ist ein Enzym das die Oberflächenspannung der Alveolen herabsetzt.

Fehlt dieses, oder wird seine Bildung durch den erhöhten O₂-Partialdruck in der inneren Zellschicht der Alveolen (Alveolarendothel) gestört, kommt es zum Zusammenfallen der Alveolen (Atelektase).

Schließlich fördert der erhöhte O₂-Partialdruck auch die Bildung eines Lungenödems (Flüssigkeit in der Lunge). Durch diese Veränderungen in der Lunge wird der Gasaustausch so erschwert, dass es trotz eines Überangebotes von Sauerstoff zu einem, in schweren Fällen tödlichen, Sauerstoffmangel kommt.

Die Symptome beginnen mit einem gelegentlichen Husten und einem Engegefühl in der Brust. Es kommt zu einem Brennen hinter dem Brustbein und Schmerzen wie bei einer Bronchitis und einer zunehmenden Atemnot mit Hustenreiz ohne Schleimauswurf. Die Vitalkapazität der Lunge nimmt ab (Schwierigkeit komplett einzusatmen).

Selbst wenn zu diesem Zeitpunkt auf Luftatmung umgestellt wird, dauert die Erholung bis zu zwei Wochen.

Da die Empfindlichkeit des Körpers gegenüber hohen Sauerstoffpartialdrücken (ZNS) erheblich größer ist, als die der Lunge, kann es beim Tauchen grundsätzlich nicht zu einer Lungen- oder Ganzkörpersauerstoffvergiftung (Lorrain Smith-Effekt) kommen.

Viel größer ist zum Beispiel die Gefahr der Lungenschäden bei künstlicher Beatmung, im Bereich der Intensivmedizin, Druckkammerbehandlungen oder in der Berufstaucherei.

Als Grundlage für die Berechnung der Lungen- oder Ganzkörper-Sauerstoffvergiftung dient die Unit of Pulmonary Toxicity Dosage (UPTD).

**1 UPTD ist der Wert für 1 Minute 100% O₂
Atmung bei einem O₂ Druck von 1bar.**

Dr. Christian J. Lambertsen entwickelte am Institut für Umweltmedizin der Universität Pennsylvania eine, aus empirisch ermittelten Daten, abgeleitete Pulmonal-Sauerstoff-Toleranzkurve für O₂ Partialdrücke über 0,5 bar.

Aus diesen Forschungsergebnissen wurde eine Methode für die Berechnung der UPTD (Unit Pulmonary Toxic Dose) für eine einmalige und die CPDT (Cumulative Pulmonary Toxic Dose) für mehrmalige Expositionen entwickelt.

Der ungefähre Schwellwert für einen nachweisbaren Lungeneffekt liegt bei einem pO₂ von 0,5 bar.

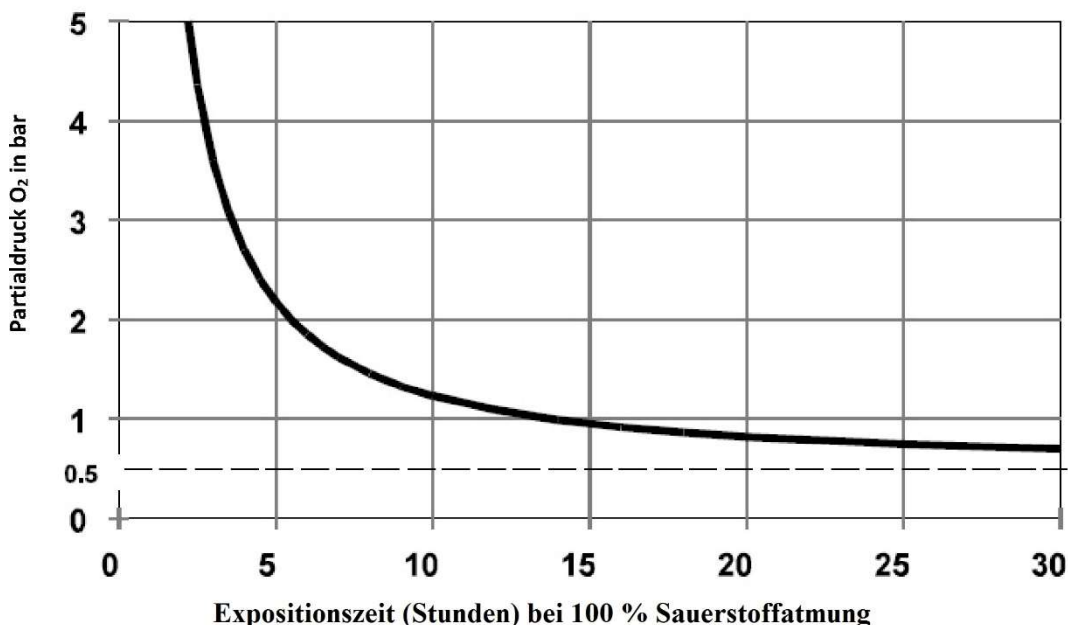
615 UPTD führen zu einer ca. 4% Reduktion, 1425 UPTD zu einer ca. 10% Reduktion der Lungen Vitalkapazität.

Die NOAA legt den maximalen UPTD Wert bei einmaligen Taucheinsätzen auf 850 UPTD/Tag fest.



Druckkammerversuch bei 3,7 bar Druck (Luft) und Atmung von 100% O₂ über eine Maske

Grundlage für die Entwicklung der UPTD war die pulmonale Sauerstoff-Toleranzkurve mit 4 % Abnahme der Vitalkapazität



Quelle: Oxygen Toxicity Calculations by Erik C. Baker, P.E.

Hamilton entwickelte 1989 das Konzept der OTU (Oxygen Toleranz Unit) auch bekannt unter dem Namen REPEX- Verfahren (Repetitive Excursions Procedures Report). Die Grundlagen für dieses Verfahren waren die UPTD Daten.

Dabei wurden aus empirischen Werten, Algorithmen entwickelt, der die O₂- Gesamtbelastung über mehrere Tage und deren Auswirkung über die Expositionsdauer berücksichtigt. Dieses Verfahren wurde für Tauchgänge in Sättigung konzipiert, ohne die Möglichkeit aufzutauchen, und bei den Oberflächenpausen unter Luftatmung den pO₂ auf einen normoxischen Wert (pO₂ 0,21) abzusenken.

Ein Vorteil dieser Methode ist dass die Einheiten additiv, sind und die Nettoergebnisse mehrerer Expositionen addiert werden können.

Tage	Max. OTU pro Tag	OTU Zunahme	Max. OTU Gesamt	Tage	Max. OTU pro Tag	OTU Zunahme	Max. OTU Gesamt
1	850	850	850	8	350	140	2.800
2	650	550	1.400	9	330	170	2.970
3	600	460	1.860	10	320	130	3.100
4	520	240	2.100	11	300	200	3.300
5	450	200	2.300	12	300	300	3.600
6	420	220	2.520	13	300	300	3.900
7	400	140	2.660	14	300	300	4.200

Quelle: SPUMS Journal – 1. März 1992 – Tolerating Oxygen Exposure/R. W. (Bill) Hamilton

Dr. R. W. Hamilton legte fest, dass die maximale tägliche Dosis 1068 OTU's nicht überschreiten sollte (Verringerung der Vitalkapazität um ca. 6%).

Für eine mögliche Druckkammerbehandlung werden 648 Units in Abzug gebracht. Daraus resultiert der empfohlene Höchstwert beim ersten Tauchgang von 420 Units.

1068 OTU tägliche maximal Dosis – 648 OTU Druckkammerbehandlung = 420 OTU für den ersten Tauchgang.

Clark J. M. betrachtete 1425 OTU als maximale tägliche Dosis und eine Verringerung der Vitalkapazität von ca. 10% als akzeptabel bei einer Druckkammerbehandlung von schweren DCI-Problemen.

1425 OTU tägliche maximal Dosis – 648 OTU Druckkammerbehandlung = 777 OTU für den ersten Tauchgang.

Eine Behandlung nach der US-Navy-Tabelle 6 oder Modifizierungen dieser Tabelle, dauert in der Regel vier Stunden und 45 Minuten und kann nötigenfalls verlängert werden. Die Kompression erfolgt mit normaler Luft, bis zu einem relativen Druck von 1,8 bar (entspricht etwa 18 Meter Tauchtiefe). Danach erfolgt der Wechsel des Atemgases von Luft zu Sauerstoff ca. 650 OTU's).

Daraus resultiert der empfohlene Höchstwert beim ersten Tauchgang von 850 Units.

Belastung bei Tauchgängen

Leider werden bei den meisten Tauchverbänden Tabellen die für Sättigungstauchen oder Druckkammerbehandlungen konzipiert sind, verwendet und unterrichtet.

Die Schwedische Marine scheidet maximal 300 OTU/Tag bei unbegrenzten Tauchtagen und maximal 450 OTU/Tag bei einer 5-tägigen Arbeitswoche vor.

Die NOAA empfiehlt maximal 350 OTU/Tag.

Ein guter Kompromiss ist der maximale Wert von 420 OTU/Tag bei fünf aufeinander folgenden Tauchtagen und dann zwei tauchfreie Tage.

Wenn über einen Zeitraum von mehr als 5 Tagen getaucht wird, sollte der Wert von 300 OTU/Tag nicht überschritten werden.

Die wöchentliche OTU Belastung sollte 2100 OTU nicht überschreiten.

Bei diesen Angaben werden natürlich die Belastung von Stickstoff bez. die Dekompressionszeiten und Deko-Empfehlungen nicht betrachtet.

Formel für die Berechnung der OTU

$$OTU = t * \left(\frac{PO_2 - 0,5}{0,5} \right)^{0,83}$$

Tabelle für die tägliche Tauchzeit bei maximal 420 OTU/Tag, bei fünf aufeinander folgenden Tauchtagen und anschließend zwei tauchfreien Tagen.

pO ₂	ca. OTU/min	Maximale Tauchzeiten in 24 Stunden	pO ₂	ca. OTU/min	Maximale Tauchzeiten in 24 Stunden
0,60	0,27	25,9	1,20	1,33	5,2
0,70	0,47	14,8	1,30	1,48	4,7
0,80	0,66	10,6	1,40	1,63	4,2
0,90	0,84	8,3	1,50	1,78	3,9
1,00	1,00	7,0	1,60	1,93	3,6
1,10	1,17	5,9	1,70	2,01	3,4

Tabelle für die tägliche Tauchzeit in Stunden bei maximal 300 OTU/Tag, ohne tauchfreie Tage.

pO ₂	ca. OTU/min	Maximale Tauchzeiten in 24 Stunden	pO ₂	ca. OTU/min	Maximale Tauchzeiten in 24 Stunden
0,60	0,27	18,5	1,20	1,33	3,7
0,70	0,47	10,6	1,30	1,48	3,3
0,80	0,66	10,6	1,40	1,63	3,0
0,90	0,84	7,5	1,50	1,78	2,8
1,00	1,00	5,0	1,60	1,93	2,5
1,10	1,17	4,2	1,70	2,01	2,4

Halbwertzeiten oder Reduktionsfaktoren wie uns von der ZNS Berechnung bekannt sind, gibt es für die OTU Berechnung bei Wiederholungstauchgängen nicht.

Die anfallenden OTU Belastungen bei „normalen“ Tauchgängen ist grundsätzlich gering und es wird meist nur ein Tauchgang in 24 Stunden durchgeführt.

Diese Oberflächenpause reicht aus, um unserer „Lungen Uhr“ genügend Zeit für einen „blow off“ zu geben (wieder auf null zu stellen).

Beispiel:

Wir tauchen mit unserem Rebreather mit einem Setpoint von 1,3. Die Tauchzeit beträgt 120 Minuten. Berechne die OTU-Belastung.

pO₂ = 1,3 bar

Aus der Tabelle bei 1,3 bar ergibt eine OTU Belastung von 1,48 OTU/min.

120 Tauchzeiten ergeben eine OTU-Belastung von 177,6.

Führen wir den gleichen Tauchgang bei einem Setpoint von 1,1 durch, beträgt unsere OTU-Belastung nur mehr 149,4 OTU.

Bei beiden Beispielen sind wir weit weg von den empfohlenen Werten.

Quellen:

- SPUMS Journal Vol 27 No. 1 March 1997, TOLERATING OXYGEN EXPOSURE von R.W. Hamilton;
- RESEARCH REPORT 126, A comparison of oxygen decompression tables for use in compressed air work von Valerie Flook PhD, CPhys, MInstP;
- Gesellschaft für Tauch und Überdruckmedizin, Leitlinie Tauchunfall
- Oxygen Toxicity Calculations von Erik C. Baker, P.E