

Druck ablassen – aber sicher

Das Unberechenbare berechnen: 3. Teil

Der zweite Teil unserer Serie über Sättigung und Dekompression erklärte, warum es überhaupt zur Inertgassättigung kommt und weshalb verschiedene Gewebe sich in Hinblick auf die Zeit bis zu ihrer Sättigung unterscheiden. Teil 3 erklärt, wie es gelingt, dies zu kalkulieren.

■ Text und Grafiken von Christian Wölfel

Kinetik

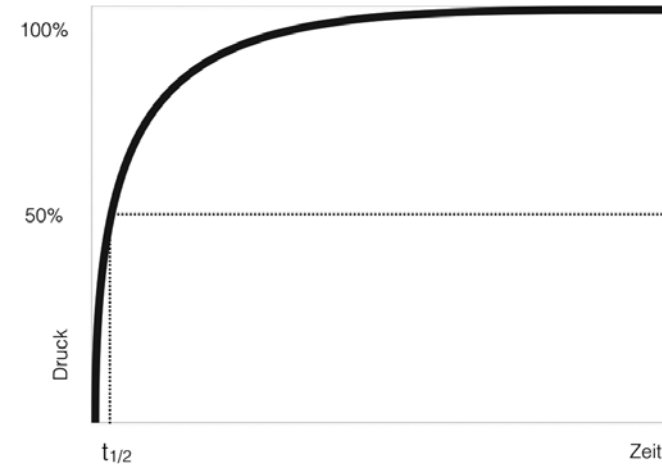
Das Verhalten eines Gewebes bezüglich der Sättigung bezeichnet man auch als Sättigungskinetik. Um den Ablauf der Sättigung der verschiedenen Körpergewebe vorhersagen zu können – und das ist notwendig, um Dekompressionstabellen zu berechnen oder Tauchcomputer zu programmieren –, werden Halbsättigungszeiten angegeben. Ein Gewebe mit einer Halbsättigungszeit von 10 Minuten ist nach 10 Minuten zu $\frac{1}{2}$, nach 20 Minuten zu $\frac{3}{4}$, nach 30 Minuten zu $\frac{7}{8}$ usw. gesättigt.

Rundungen

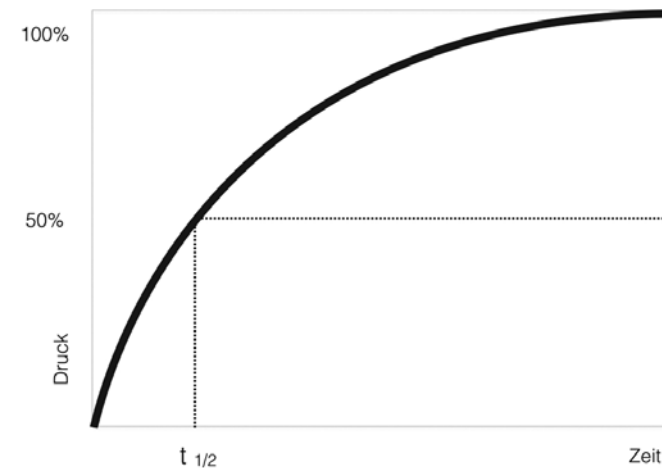
Wer jetzt denkt, dass so ja nie eine hundertprozentige Sättigung erreicht werden kann, der hat richtig gedacht. Man darf ein Gewebe aber näherungsweise als komplett gesättigt betrachten, wenn sechs Halbsättigungszeiten vergangen sind. Unser 10-Minuten-Gewebe ist also erst nach einer Stunde gesättigt (genau zu $\frac{63}{64}$ oder 98,4%).

Gratwanderung

Grundsätzlich den gleichen Gesetzen folgend, läuft die Entsättigung ab, sobald der Umgebungsdruck gesenkt wird, wie es z. B. beim Auftauchen geschieht. Damit es überhaupt eine treibende Kraft zum Abtransport von Inertgas aus den Geweben über das Blut zur Lunge gibt, muss der Partialdruck des Inertgases im Gewebe höher sein, als der im Blut, und jener im Blut höher, als der in den Lungenbläschen. Man spricht nun von «Übersättigung». Dieser Gradient darf nicht beliebig gross werden – wird er zu hoch, so kann es zu Symptomen der Dekompressionskrankheit kommen. Es gibt also einen schmalen Grat, auf dem ein Gewebe zwar schon übersättigt



Grafik 1 zeigt den Graph für eine kurze Halbsättigungszeit.



Grafik 2 jenen für eine lange Halbsättigungszeit.

Nach einer Halbsättigungszeit ist das Gewebe zur Hälfte gesättigt, nach zweien ist die verbleibende Hälfte zusätzlich zur Hälfte gesättigt (also insgesamt zu $\frac{1}{2} + (\frac{1}{2} * \frac{1}{2}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} = \frac{3}{4} + \frac{1}{4} = \frac{7}{8}$), nach 3 Halbsättigungszeiten ist zusätzlich das verbleibende Viertel zur Hälfte gesättigt ($\frac{3}{4} + (\frac{1}{4} * \frac{1}{2}) = \frac{3}{4} + \frac{1}{8} = \frac{6}{8} + \frac{1}{8} = \frac{7}{8}$) usw. gesättigt.

ist, aber aus dieser Übersättigung noch keine schädlichen Konsequenzen resultieren. Diesen Grat bezeichnet man als Übersättigungstoleranz. Gäbe es sie nicht, wäre jedes Auftauchen mit gesundheitlichen Problemen verbunden und das Tauchen, wie wir es kennen, wäre unmöglich.

Halbe Sachen

John Scott Haldane (vgl. Teil 1) ging davon aus, dass keine Gasblasen entstehen, solange die Übersättigungstoleranz nicht überschritten wird, d.h. ein gefahrloses Auftauchen ist dann möglich. Aus Beobachtungen schloss er, dass keine Probleme auftreten, wenn der Druck auf die Hälfte des Überdrucks auf der maximalen Tauchtiefe reduziert wird. Auf der entsprechenden Tiefe muss nun so lange verweilt werden, bis das übersättigte Gewebe wieder zumindest soweit entsättigt ist, dass die Reduktion auf die erneute halbe Tiefe möglich ist, ohne dabei die Übersättigungstoleranz zu überschreiten. Das wird dann so lange wiederholt, bis zur Oberfläche aufgestiegen werden kann. Die heute noch verwendeten einheitlichen Tiefen für Deko-Stops sind dabei deutlich einfacher anzuwenden als die exakten halben Tiefen.

Die Forschungsdruckkammer am Universitätsspital Zürich, in der das ZH-L16 Modell entwickelt wurde.

Bild: Marcel Frauchiger



Besser – länger – tiefer

Um die verschiedenen Gewebe, die im menschlichen Körper vorkommen, zu repräsentieren, stellte Haldane ein Set von 5 Halbsättigungszeiten (von 5 Min. bis 75 Min.) zusammen. Je nach Tauchgangsdauer kann der Stickstoffpartialdruck eines anderen Gewebes am Rand der Übersättigungstoleranz liegen und so das Erreichen einer Dekostufe bestimmen.

Auch wechseln sich diese während des Auftauchens als «führendes Gewebe» ab. Zumindest zum Teil basieren die meisten modernen Dekompressionsmodelle auf diesem Prinzip. Man bemerkte allerdings schnell, dass die Dekozeiten, die das Haldane-Modell angab, für lange und tiefe Tauchgänge nicht sicher waren und es für flache Tauchgänge zu lange Dekozeiten lieferte. Verbesserungen gab es in der Folgezeit durch Anpassungen der Übersättigungstoleranzen, denn man fand Hinweise darauf, dass schnelle Gewebe höhere Gradienten erlauben als langsame. Während Haldane mit dem Luftdruck rechnete, begann man auch, einzig den Stickstoff-Partialdruck heranzuziehen und konnte so die Kalkulationen verbessern. Dem amerikanischen Tauchphysiologen Robert D. Workman gelang es, die Beobachtung, dass ein und dasselbe Gewebe bei grösseren Tiefen/höheren Drücken eine höhere Übersättigungstoleranz aufweist als bei kleineren Tiefen/Drücken, in die Berechnung von Dekompressionsmodellen einzuflechten. Mit diesem Durchbruch wurden längere und tiefere Tauchgänge weit zuverlässiger berechenbar.

Wer hat's erfunden?

Für später technisch mögliche, sehr tiefe Mischgastauchgänge, wie sie vor allem zur Ölförderung nötig wurden, und für Tauchen in Bergseen, das heisst bei einem Luftdruck von weniger als 1 bar, fehlten aber Algorithmen. Diese lieferte 1984 der Zürcher Professor Albert A. Bühlmann, mit dem Dekompressionsmodell ZH-L16. Es rechnet mit 16 Geweben mit Halbsättigungszeiten von 2,65 bis 635 Min. Die Stärken dieses Modells liegen in seiner sehr breiten experimentellen Erprobung und der Tatsache, dass Bühlmann es vollumfänglich öffentlich zugänglich gemacht hat. Vor allem der daraus abgeleitete 8-Gewebe-Algorithmus ZH-L8 stellt heute noch das Fundament der Programme zahlreicher Tauchcomputer dar.

Wie ein Tauchcomputer funktioniert und warum die Dekompressionskrankheit trotz ausgeklügelter Rechenmodelle noch immer vorkommt, erklären wir in der nächsten Ausgabe. ■