

wartungsarm und robust sind Konstruktionen, bei denen sich der Wasserdruck über den flexiblen Gehäuseboden auf eine innere Ölfüllung überträgt. Ein Schleppzeiger erleichtert die Dokumentation von Tauchgängen. Elektronische Tiefenmanometer können Wasserdrücke erheblich genauer (ca. ± 30 cm Wassersäule) messen als mechanische Geräte und sind weniger empfindlich gegen Stöße. Üblicherweise werden Ziffern («digital») und/oder Balkenreihen (quasi «analog») mit Flüssigkristallen («LCD») angezeigt. Allerdings ist auch hier gelegentliche Nacheichung empfohlen, um Drift auszugleichen. Mit einem Zeitgeber kombiniert, können sie die unter Wasser verbrachte Zeit anzeigen sowie vor Überschreitung der zulässigen Aufstiegs geschwindigkeit von 10 m/min und/oder der Nullzeit warnen. Die Funktion des Schleppzeigers übernimmt eine Anzeige gespeicherter Werte von Maximaltiefe und Tauchzeit nach dem Auftauchen.

Tauchcomputer

Während des Tauchens löst sich – entsprechend dem höheren Teildruckangebot im Atemgas – zusätzliches Inertgas (bei Luftatmung also Stickstoff, N₂) im Körper (s. S. 192 ff.). Läßt beim Aufstieg der Druck nach, wird dieses überschüssige Gas vom Körper wieder abgegeben. Damit dabei Blasenbildung und das dadurch bedingte Krankheitsrisiko möglichst klein bleiben, sind – in Abhängigkeit von den Tiefe-Zeit-Profilen des aktuellen, aber auch evtl. vorangegangener Tauchgänge – u. U. Austauschpausen zu beachten. Für rechteckige Tiefe-Zeit-Profile, also Aufenthalt in der gleichen Tiefe während des größten Teils der Tauchzeit, können diese Austauschpausen («Dekompressionszeiten und -stufen») Dekompressionstabellen (s. S. 349 ff.) entnommen werden. Insbesondere Sporttaucher wechseln aber ihre Tiefe häufig und tauchen auch mehrmals, bevor aller überschüssiger Stickstoff den Körper wieder verlassen hat. Kleine, unter Wasser betriebsfähige Rechner («Tauchcomputer») verarbeiten Druck- und Zeitinformationen in Echtzeit so, daß für das getauchte Profil ein spezieller Dekompressionsplan berechnet und dem Benutzer angezeigt wird. Die Prozessoren solcher Tauchcomputer sind in ihrer Rechenleistung aus Preis-, Platz- und Strombedarfsgründen recht begrenzt. Zudem müssen sie ihre Aufgaben ja in «Echtzeit» lösen, um den Taucher in Sekundenabständen nicht nur über seinen augenblicklichen Zustand sondern auch prognostisch über die Optionen zur weiteren Gestaltung des Tauchgangs zu informieren. Von der Vielzahl bisher

vorgeschlagener mathematischer Dekompressionsmodelle haben deshalb nur ganz wenige, deren Gleichungen ohne Iterationen lösbar sind, in bisherigen Tauchcomputern Verwendung gefunden. Wegen der rasch zunehmenden Leistungsfähigkeit der «hardware» lockert sich diese Beschränkung allerdings Jahr für Jahr. Dies ist wünschenswert, da sich gezeigt hat, daß die bisher verwendeten, einfachen Modelle (mit nur vom Außendruck linear abhängigen Übersättigungstoleranzen) für mehrere Tauchgänge pro Tag und mit wechselnden Tiefen, u. U. über Wochen fortgesetzt, nicht das gleich hohe Sicherheitsniveau liefern wie für Einzeltauchgänge. Schon die beobachtete Verzögerung der Entsättigung durch den Blasenansturm nach dem vorausgegangenem Tauchgang sprengt das lineare Modell.

Vom Tauchcomputer wird zu Recht erwartet, daß er die für einen sicheren und «rationellen» (d. h. günstigem Verhältnis gewünschter Effekt zu Aufwand) Ablauf des Tauchgangs erforderlichen Daten erfaßt, logisch verknüpft und dem Taucher möglichst unmißverständlich lesbar anzeigt. Die Forderung nach fehlerfreier Ablesbarkeit – ggf. auch in dunklem und/oder trübem Wasser – sowie der leichten Unterscheidung wichtiger Größen (z. B. Tiefe) von weniger wichtigen (z. B. Temperatur) steht im Widerspruch zur modischen Tendenz möglichst kleiner (leichter und billiger) Geräte. Ebenso können Geräte, die – einschließlich Langzeit-Batterie – voll vergossen sind, zwar sehr kleine Ausfallrisiken und Betriebskosten bieten, müssen dafür aber i. a. auf Skalenbeleuchtung und Rechenleistungen von «notebook»-Computern verzichten.

Tauchcomputer sollten möglichst die nachfolgend aufgezählten, sicherheitsrelevanten Eigenschaften aufweisen:

- 1) Der implementierte Algorithmus sollte die Einflüsse der Blasenbildung während und nach Aufstiegen berücksichtigen und generell möglichst «konservativ» sein, d. h. Reserven bieten für persönlich und/oder situationsbedingt erhöhte Risiken einer Dekompressionskrankheit.
- 2) Im Falle einer nennenswerten Unterschreitung der vom Computer verlangten Gesamt-Aufstiegszeit sollten
 - a) die Werte für Tiefe und Zeit unter Wasser weiter angezeigt,
 - b) die Dekompressionsberechnung «eingefroren»,
 - c) eine sonst mögliche Abschaltung für mindestens 24 Std. blockiert und
 - d) die für eine evtl. Behandlung wichtigen Daten abrufbar gespeichert werden.

- 3) Kurze Unterschreitungen der jeweils minimal erlaubten Tiefe («ceiling»), z.B. kurzes Auftauchen aus einer Dekostufe zur Orientierung, sollten zwar die Dekoberechnung solange «einfrieren» und eine entsprechende Warnung auslösen, nicht aber schon den unter 2) beschriebenen Zustand ergeben.

Wünschenswert sind weiterhin

- 4) Möglichkeit wochenlangen Dauerbetriebs ohne Datenverlust,
- 5) einfache Kontrollmöglichkeit des Drucksensors (z. B. Anzeige des Luftdrucks),
- 6) Berücksichtigung der Höhenlage des Tauchgewässers in der Dekoberechnung,
- 7) Einbeziehung des Flaschendrucks in die Prognose, z.B. Anzeige der noch verbleibenden Zeit, bis der Reservedruck erreicht wird.

Hierzu muß der Flaschendruck minus Reservedruck geteilt werden durch die – über die Atemzüge gemittelte – minutliche Abnahme des Flaschendrucks. Da auch evtl. Dekompressions-Stufen und -Zeiten dem Rechner jeweils «bekannt» sind, kann sogar die während der Dekompression – bei Unterstellung des bisherigen Atemminutenvolumens – zu erwartende Abnahme des Flaschendrucks dem Reservedruck zugeschlagen werden. Damit entsteht eine realistische Prognose für die noch sichere Tauchzeit.

Tarier- und Rettungswesten

Wie auf S. 109 zahlenmäßig erläutert wird, lassen sich die Auftriebsdifferenzen beim Gerätetauchen nur mit einer Tarierweste bequem ausgleichen. Das ist vor allem für das Einhalten der Dekompressionsstufen in 6 und 3 m, d.h. für die Sicherheit des Austauschens wesentlich. Ohne eine Tarierweste muß sowohl in der Tiefe wie bei den Dekompressionsstufen unter Umständen ein Schub von 50 N mit den Flossen ständig aufgebracht werden, um ein weiteres Absinken oder ein unbeabsichtigtes Auftauchen zu verhindern. Gute Tarierwesten haben einen leuchtend orangeroten Mantel über einem Gas-Beutel von ca. 15 bis 18 l Volumen. Sie besitzen eine bis auf 200 bar füllbare Druckluftflasche mit 90 bar Luftinhalt oder eine 38g-CO₂-Patrone, einen leicht erreichbaren Faltenschlauch, dessen Mundstück zum Füllen der Weste mit Ausatemluft auch mit Handschuhen leicht zu bedienen ist. Die Form und der Sitz des Luftbeutels müssen so konstruiert sein, daß sie den Kopf eines Tauchers auch bei Bewußtlosigkeit über Wasser halten. Um eine

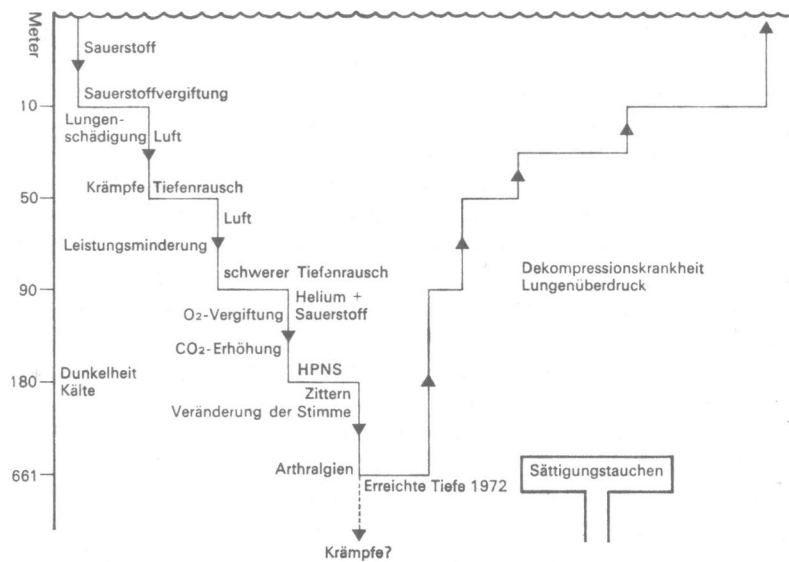
Gasdichte und Atmung

Im Zusammenhang mit der Dichte von Tieftauchaatemgemischen wurde schon die Beeinträchtigung der Atemfunktionen erwähnt. Dabei leuchtet zunächst die Behinderung der Atemmechanik unmittelbar ein; durch das gewissermaßen «zähflüssig» werdende Atemgas entsteht bei schnellem Ein- und Ausatmen ein erheblicher Widerstand mit ansteigender Atemarbeit, so daß nicht mehr das gleiche Atemminutenvolumen wie unter Normalbedingungen bewältigt werden kann. Dieser Effekt ist auch im Druckluftbereich wirksam; er ist uns schon bei der Kohlendioxidanreicherung bei schwerer Arbeitsbelastung in größerer Tiefe begegnet, insbesondere bei zusätzlichem Atemwiderstand durch den Atemregler (s. S. 184). In dieser Hinsicht ist also der Einsatz von Wasserstoff mit geringstmöglicher Gasdichte trotz des technischen Aufwands eine folgerichtige Überlegung.

Als weiteres Problem im Bereich der Atemphysiologie wurde für hohe Drücke eine Verminderung der alveolaren Diffusion der für die Lebensprozesse wichtigen Gase Sauerstoff und Kohlendioxid diskutiert. In der Tat ist der Diffusionskoeffizient in Gasmischen umgekehrt proportional zum Druck; dies führte zu der Vermutung, daß der Austausch von Sauerstoff und Kohlendioxid in der Lunge gefährdet sein könnte. Der Transport des Sauerstoffs aus dem eingeatmeten Frischgas zur Alveolarmembran – und umgekehrt des Kohlendioxids aus den Lungenkapillaren zum auszuatmenden Anteil des Alveolarvolumens – wäre demnach durch die im Vergleich zu Normalbedingungen fast hundertfach größere Moleküldichte des Inertgases so weit behindert, daß ein Sauerstoffmangel oder eine Kohlendioxidübersättigung eintreten könnte.

Die im Institut für Flugmedizin in Köln durchgeführten Tieftauchexperimente konnten allerdings zeigen, daß zumindest bis zu einer Tiefe von 615 m in Heliox ein solcher Effekt nicht eintritt. Die physiologischen Reaktionen in einem Rückatmungsexperiment aus der Flugmedizin mit zunehmendem Sauerstoffmangel änderten sich auch bei maximaler Tiefe nicht, und die Kohlendioxidanreicherung bei Arbeitsbelastung zeigte die der reinen Gasdichte entsprechenden Ergebnisse wie im Druckluftbereich.

Das Diagramm faßt noch einmal alle für die Tiefenentwicklung beim Tauchen wesentlichen Gesichtspunkte zusammen; noch nicht erwähnt wurden die sog. Kompressionsathralgien, Gelenkschmerzen, die ab 150 m Tiefe noch während der Kompression oder bald nach Ankunft in der Tiefe auf-



Die wichtigsten physiologischen Gefahrenstufen des Tauchens.

treten können. Die Taucher klagen dann über Schmerzen und Knacken vor allem in Schulter- und Kniegelenken und haben das Gefühl, «keine Gelenkschmiere mehr zu haben». Die Beschwerden halten für wenige Tage an und bilden sich dann von selbst zurück; bei Kurzeittauchgängen stellen sie ein diagnostisches Problem für die Dekompression dar, da sie bis in die Dekompressionsphase hinein andauern können. Eine überzeugende Erklärung für dieses Phänomen ist bisher nicht gefunden worden; anscheinend ergeben sich aber keine weiteren Konsequenzen für das Wohlergehen der Taucher.

Über die Entstehung von Gasblasen

Mit dem Vorstoß in größere Tiefen und bei längeren Bodenzeiten erwies sich das einfache Haldanesche Modell als nicht ausreichend, um eine sichere Dekompressionszeit für beliebige Tauchgänge vorauszubestimmen. *Haldane* selbst äußerte Zweifel darüber, ob seine Berechnungen über einen Druck von 6 ata (6 bar) hinaus noch gültig seien, da keine experimentellen Erfahrungen vorlagen und sie auf der Annahme eines festen Übersättigungsfak-

tors beruhten. Das Zentralproblem schien zunächst die Entstehung von Blasen im Gewebe zu sein.

Hierzu zunächst einige physikalische Grundgedanken. In vereinfachter Anschauung kann man sich ein Gas als einen Schwarm von kleinsten, durcheinanderfliegenden und aneinanderstoßenden Kügelchen – den Molekülen – vorstellen. Die Geschwindigkeit ihrer Bewegung hängt von der Temperatur ab, die Dichte des Schwarms von dem Druck, unter dem das Gas steht. Der Raum zwischen ihnen ist relativ groß; die Abstände zwischen den Molekülen werden durch elektrostatische Kräfte (Van-der-Waalsche Kräfte) bestimmt. Flüssigkeiten haben keinen sehr großen Raum zwischen ihren Molekülen, jedoch sind die Moleküle untereinander leicht verschiebbar. Man kann sie sich als einen Haufen gleich großer Kugeln vorstellen. Bei festen Körpern dagegen haben die Moleküle feste Plätze.

Im menschlichen und tierischen Organismus grenzen feste Körper und Flüssigkeiten aneinander. Wir wollen beide – feste Körper und die Flüssigkeiten – als «Körper» bezeichnen. In diese Körper dringen nun Gasmoleküle in die Zwischenräume ein, und zwar um so mehr, je höher der Partialdruck ist, unter dem das Gas steht, je kleiner die eindringenden Moleküle und je größer die Abstände der Moleküle der Körper sind. Zwischen Gas- und Körpermolekülen wirken ähnliche Anziehungskräfte wie zwischen den Molekülen des Festkörpers selbst.

Das Eindringen von Gasmolekülen in den Körper nennen wir Diffusion. Die Geschwindigkeit, mit der das Eindringen stattfindet, heißt die Diffusionsgeschwindigkeit. Die Gasmoleküle können in den Körper aber nicht nur eintreten, sie können ihn auch wieder verlassen. Steigt die Gaskonzentration im Körper an, so werden auch zunehmend Gasmoleküle wieder aus ihm austreten. Schließlich stellt sich ein dynamischer Gleichgewichtszustand (= steady state oder Fließgleichgewicht) ein, bei dem die Gaskonzentration im Körper sich nicht mehr ändert. Die Menge des aufgenommenen Gases wird dann durch das Henrysche Gesetz bestimmt (s. S. 114).

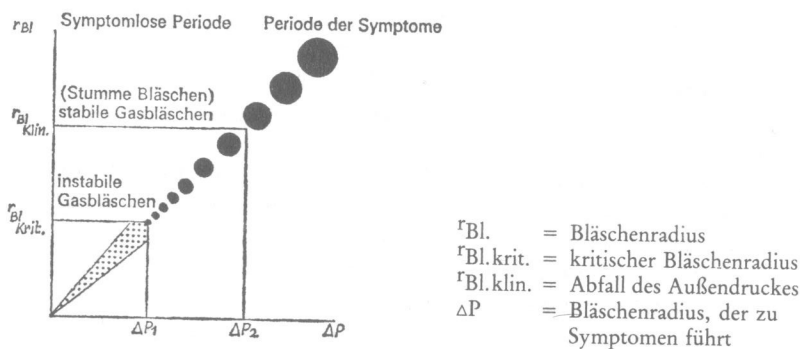
Sinkt nun der äußere Gasdruck, so werden so lange Gasmoleküle den Körper verlassen, bis ein neues Gleichgewicht wiederhergestellt ist. Bei stärkerem Druckabfall entsteht plötzlich ein deutliches Ungleichgewicht zwischen gelöstem Gas und äußerem Druck, so daß nicht nur Gasmoleküle den Körper verlassen, sondern gleichzeitig Blasenbildung einsetzt, um die vorhandene Übersättigung schnell abzubauen. Es hängt nun von der Oberflächen-

spannung der Flüssigkeit ab, ob diese Mikrobläschen wachsen und sich vereinigen, oder ob sie sich wieder auflösen.

Aus physikalischen Grundlagenexperimenten weiß man, daß diese Blasen sich keinesfalls «aus dem Nichts heraus» bilden können; dazu wären Gasspannungen von mehreren 100 bar erforderlich, die beim Tauchen nicht auftreten. Es müssen also Mechanismen existieren, die die Blasenbildung unter physiologischen Bedingungen deutlich erleichtern. Dazu kommen im wesentlichen drei verschiedene Möglichkeiten in Betracht:

Erstens: Die Blasen wachsen an schon vorhandenen kleinsten Gasaggregaten, die schon unter normalen Bedingungen vorhanden sind und die durch noch nicht geklärte Mechanismen stabilisiert werden; hierfür existieren experimentelle Hinweise aus Tierversuchen.

Zweitens: Reißt das Molekulargefüge eines «Körpers» auf, so entstehen sogenannte Kavitationen, das sind Hohlräumbildungen in Flüssigkeiten unter der Einwirkung mechanischer Energie. Solche Kavitationen entstehen



Bei vorschriftsmäßiger Dekompression sollten keine stabilen Gasbläschen entstehen. Sie entstehen, wenn die Gesetzesmäßigkeit $P_0 > P_1 > P$ erfüllt wird.

Schema einer Entwicklung von Blasen aus «Gaskeimen» (unstabilen Bläschen) über «stumme Bläschen» bis zu Blasen, die Dekompressionserscheinungen machen.

schon durch mechanische Spannung, aber auch durch Störungen im Molekulargefüge der Flüssigkeit.

Drittens: Blasen können ebenfalls an Grenzflächen zu anderen Stoffen mit unterschiedlicher Oberflächenspannung entstehen. Feinverteilte Fremd-

stoffe bilden sehr große Grenzflächen zur Flüssigkeit. Solche Fremdpartikel können daher als «Keime» bei einer Blasenbildung wirken.

Die Differenz zwischen der augenblicklichen Gasspannung in der Flüssigkeit und dem von außen wirkenden Druck darf nicht größer sein als die sogenannte «erlaubte Überspannung». Übersteigt die Gasspannung den Außendruck um diese erlaubte Überspannung, so bilden sich Blasen, die immer weiterwachsen.

Eine Blasenbildung im lebenden Organismus ist somit durch eine Vielzahl von beteiligten Faktoren bedingt und dementsprechend sehr komplex. Das Problem der Gasblasenbildung hat seit Jahren viele Forscher beschäftigt. Experimentell wurden an Wänden von Blutgefäßen vermehrt Gasblasen beobachtet.

Faßt man die Ergebnisse zusammen, so läßt sich sagen: die Blasenbildung ist ein Zufallsprozeß. Sie folgt Gesetzen, die für viele Geschehnisse gelten. Es läßt sich demnach nicht voraussagen, wo und wann sich eine einzelne Blase bilden wird.

Für das Tauchen bedeutet das, daß eine schädigende Gasblasenbildung nur zu vermeiden ist, wenn man in die Austauschzeiten große Sicherheitsfaktoren einbaut. In praktischen Experimenten bei Tieren und beim Menschen kann man den kritischen Übersättigungsfaktor erfassen. Entsprechende Tabellen müssen dann eine gewisse Sicherheit mit einbeziehen. Durch eine vermehrte Kreislauffähigkeit kann die Aufnahme, aber auch die Abgabe von Inertgasen im Körper beschleunigt werden.

Die Theorie und Berechnungen von Haldane

Die Berechnungen von Dekompressionszeiten von *Haldane* gingen von der Annahme aus, daß die Dekompressionskrankheit durch eine Gasblasenbildung im Organismus verursacht ist. Zweitens nahm er die Existenz einer stabilen Übersättigung im Organismus an, und nach seinen Experimenten wurde der kritische Sättigungsgrad mit 2,0 bestimmt. Erst wenn größere Druckdifferenzen bestünden, käme es zur krankmachenden Blasenbildung. Das bedeutet, daß beim Auftauchen der Druck in einem Verhältnis 2,0:1 vermindert werden könnte, ohne daß krankmachende Blasenbildungen entstehen. Drittens nahm er an, daß die verschiedenartig durchbluteten Gewebe des Organismus als eine Familie von mehreren Modellgeweben aufgefaßt werden können. Innerhalb von jedem dieser Modellgewebe sei der gelöste Stickstoff gleichmäßig verteilt. Eine Verzögerung durch die endliche Diffu-

sionsgeschwindigkeit innerhalb der Gewebe während der Stickstoffaufnahme wurde von ihm nicht angenommen. Er setzte nur voraus, daß der Durchblutungsgrad der einzelnen Gewebe der für die Stickstoffaufnahme entscheidende und verzögernde Faktor ist. Bei diesen Annahmen hängt die Änderungsgeschwindigkeit des Stickstoffpartialdruckes jedes einzelnen Gewebes von dem Unterschied der Partialdrücke des Blutes zu dem des Gewebes ab. Nimmt man vereinfachend einen plötzlichen Sprung im Stickstoffpartialdruck des Blutes an, so werden sich die Partialdrücke der Gewebe anfangs schnell, mit ständig abnehmender Partialdruckdifferenz immer langsamer und entsprechend ihrer Durchblutung sättigen.

Nach Tierversuchen ist dieses Modell nur für einen beschränkten Tiefen-Zeit-Bereich anwendbar. Um aber die Gültigkeit dieses Modells zu erweitern, wurden von verschiedenen Forschern Korrekturen vorgeschlagen und entsprechende Tabellen errechnet. Die wesentlichen Änderungen waren unterschiedliche, aber für die einzelnen hypothetischen Gewebe konstante Übersättigungsfaktoren. (*Hawkins, Schilling und Hansen 1935, Yarbrough 1937*). Um Arbeitszeiten in größeren Tiefen ausdehnen zu können, wurden auch bei diesen Tabellen Korrekturen notwendig. Es stellte sich heraus, daß die Annahme von konstanten Übersättigungsfaktoren nicht mehr zu halten war (*Dwyer 1976*).

Die notwendigen Korrekturen am Haldane'schen Modell riefen andere Theorien auf den Plan. So nahm *Hills (1928)* an, daß der entscheidende Faktor für die Dekompression die Diffusion im Gewebe sei. *Rashbass (1956)* verwendete nach der Diffusionstheorie ein Eingewebemodell zur Berechnung einer Tabelle. Die wesentlichen Unterschiede zum Haldane-Modell bestanden darin, daß für die Halbwertzeiten der Gasaufnahme und der Gasabgabe ein ungleiches Verhalten angenommen wurde und daß an die Stelle des maximalen Übersättigungsfaktors eine maximal zulässige Druckdifferenz gesetzt wurde. Nach den experimentellen Untersuchungen *Hills (1971)* ist die Metastabilität – das ist der Zustand in dem ein Gas im Gewebe gelöst bleibt – in einem mit Inertgas übersättigten Gewebe gering.

Mit anderen Worten, es bilden sich schon bei geringen Übersättigungsgraden im Gewebe Mikrobläschen (Theorie der stillen Blasen). Die Zeit, die solche Mikrobläschen zu ihrer Auflösung brauchen, ist dabei wesentlich länger anzusetzen als die Zeit, die vom Gewebe benötigt wird, um eine entsprechende Gasmenge über das Blut aufzunehmen. Obwohl sich bei diesen theoretischen Annahmen eine Annäherung an die experimentell gefundene

Null-Zeitkurve der US-Navy-Tabelle ergab, mußte später auch das Modell einer konstanten Druckdifferenz korrigiert werden. Den Tabellen der britischen Marine liegt ein modifiziertes Diffusionsmodell zugrunde.

In Wirklichkeit sind die Vorgänge bei der Aufnahme und der Abgabe eines Inertgases im Organismus sehr komplex und bei weitem noch nicht restlos geklärt. Vieles spricht heute dafür, daß beide Vorstellungen eine Rolle spielen.

Alle theoretischen Modelle mußten im Laufe der Zeit aufgrund experimenteller Ergebnisse von Tauchversuchen korrigiert werden, so daß aus erfolgreichen Dekompressionen letztlich keine Aussagen über die physiologische «Richtigkeit» eines Modells abgeleitet werden können.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Tabellen

Die weiteste Verbreitung hat zweifellos die Tabelle der US-Navy von 1958 gefunden. Sie benutzt sechs hypothetische Gewebe mit Halbwertzeiten von 5, 10, 20, 40, 80 und 120 min. Die erlaubten Gasüberspannungen im Gewebe sind nicht konstant, sondern wurden für jede Dekompressionsstufe nach einer empirischen Formel aus den erlaubten Überspannungen für Inertgase an der Oberfläche errechnet.

Der Kern der Tabelle umfaßt Tauchgänge bis zu 12 m Tiefe für eine Dauer bis zu 300 min und bis zu 57 m Tiefe für eine maximale Dauer von 20 min. Über diese Bereiche hinaus ist sie unsicher.

Die Grundzeit (Bottom Time) zählt vom Verlassen der Oberfläche an bis zum Beginn des Aufstiegs. Eine bestimmte Abstiegsgeschwindigkeit ist bei Benutzung dieser Tabelle nicht vorgeschrieben. Sie wurde für die Verwendung bei der Marine entwickelt und für den Luftdruck in Meereshöhe berechnet. Für das Tauchen in Gebirgsseen sind sie entsprechend zu korrigieren (s. S. 204). Alle Werte der Tabelle gelten nur für die angegebene Aufstiegs- und Abstiegsgeschwindigkeit von 18 m/min. Für Tauchgänge über eine Tiefe von 60 m hinaus gilt eine «Ausnahme-Tabelle». Für diese Ausnahmen sind keine Repitivgruppen zur Berechnung von Wiederholungstauchgängen vorgesehen. Seit einiger Zeit wird in den USA mit umfangreichen Tieftauch- und Sättigungsversuchen an einer neuen Tabelle gearbeitet.

Die DCIEM-Tabellen beruhen auf einem von *Lauckner* und *Nishi* modifizierten Modell von *Kidds* und *Stubbs*.

Vier in Serie geschaltete Kompartimente werden durch vier simultane, nichtlineare, gewöhnliche Differentialgleichungen dargestellt. Aus zwei für zwei dieser Kompartimente angegebenen Übersättigungstoleranzen lassen sich Dekompressionspläne bilden. Der Vorteil dieses Modells liegt in den nur wenigen freien Parametern, die eine Anpassung an die vom DCIEM unternommenen Testtauchgänge mit Doppler-Blasenmessung ohne zu breiten Mehrdeutigkeits-Spielraum erlauben. Allerdings ist die nur iterativ mögliche, numerische Lösung der Differentialgleichungen erheblich aufwendiger als bei den streng lösaren Modellen aus parallelen Kompartimenten mit je nur einer Zeitkonstante.

Die Dekompressionstabellen des Druckkammerlabors Zürich (A. A. Bühlmann) basieren auf den experimentellen Erfahrungen von Druckkammerversuchen dieses Institutes. Das experimentelle Modell benutzt 16 Kompartimente mit Stickstoffhalbwertzeiten von 4 bis 635 min. Durch systematische Auswertung der Symptome von Dekompressionskrankheiten nach Druckkammer- und Freiwasser-Tauchgängen konnten die kurzen Halbsättigungszeiten («schnelle» Kompartimente) dem Nervensystem, d. h. Erkrankungen vom Typ II, die mittleren der Muskulatur und Haut, längere dem Innenohr und die längsten den Gelenken und Knochen zugeordnet werden. A. A. Bühlmann gibt die niedrigst zulässigen Umgebungsdrücke als lineare Funktionen der berechneten Partialdrücke des in den (durch ihre Halbsättigungszeiten definierten) Kompartimenten (um die nur sehr lockere Zuordnung zu anatomischen Strukturen zu betonen, sollte hier nicht von «Gewebe» gesprochen werden) gelösten Inertgases an. Für «schnelle» Kompartimente nimmt der niedrigst zulässige Umgebungsdruck mit dem Lösungsdruck stärker zu als für «langsame» Kompartimente. «Schnelle» Kompartimente vertragen auch einen wesentlich höheren Überschuss des Lösungsdrucks über den Umgebungsdruck («Übersättigung»).

Der Schweizerische Unterwasser-Sport-Verband (SUSV) gibt Tabellen für 0–700 und 701–2500 m ü. NN. heraus (Bühlmann-Tabellen 1986).

Rechnerische Auswertung von Statistiken über Symptome der Dekompressionskrankheit nach Berufs-Tauchgängen, Druckkammerfahrten und Druckluftarbeiten sowie Doppler-Blasenmessungen nach dem Spencerschen Verfahren zeigen, daß die Risiken langer und tiefer Tauchgänge in früheren Tabellen i. A. unterschätzt wurden. Seit Mitte der achtziger Jahre existieren Tauchtabellen, die mit Hilfe der Dopplermethode erarbeitet wurden und die z. T. erheblich längere Dekompressionszeiten aufweisen als

ältere Tabellen (DCIEM, Kanada). Zukünftig erscheinende Tabellen werden für extreme Druck-Zeit-Profile allgemein erheblich verlängerte Dekompressionszeiten ausweisen. Eine Schwierigkeit bei Symptom-Statistiken liegt darin, daß offensichtlich nur ein kleiner Prozentsatz der Menschen stark empfänglich für Dekompressionskrankheiten ist und damit gerechnet werden muß, daß diese Menschen unter den Berufstauchern seltener sind als unter Sporttauchern. Da außerdem bei beruflichen Einsätzen fast immer Rekompensationsmöglichkeiten sofort verfügbar sind, nicht aber für die allermeisten Sporttauchgänge, muß Sporttauchern empfohlen werden, extreme Druck-Zeit-Profile zu vermeiden. Das gleiche gilt für Wiederholungstauchgänge, über die nur wenige dokumentierte Daten vorliegen, da sie beruflich nur in seltenen Ausnahmefällen unternommen werden.

Die Tabellen der US-Navy, des DCIEM und des Druckkammerlabors Zürich haben Code-Buchstaben bzw. -Ziffern, die das Mehr an Stickstoff im Organismus nach einem Tauchgang erfassen. Mit derartigen Codeziffern oder Buchstaben läßt sich nach Beendigung des ersten Tauchgangs in einer sogenannten Entsättigungs-Tabelle die Austauschzeit für einen zweiten Tauchgang errechnen. Der vermehrte Stickstoffgehalt des Körpers nach einem Tauchgang wird für weitere Tauchgänge berücksichtigt und entsprechende Zeitzuschläge sind in der Tabelle ablesbar.

Nicht erfaßt werden hierbei die klinisch stummen Blasen (vgl. Abb. S. 250), die sich nach dem ersten Tauchgang gebildet haben. Da sie sich erheblich langsamer auflösen als der im Körper in Lösung befindliche Stickstoff, ist im allgemeinen das Risiko bei Wiederholungstauchgängen höher als in bisherigen Tabellen angenommen. Ähnliche Überlegungen gelten auch für die Dekompressionscomputer, obwohl hier in jüngster Zeit Bestrebungen im Gange sind, Wiederholungstauchgänge mit besonders strengen Dekompressionsanforderungen zu belegen. Das Problem besteht letztlich in der experimentellen Erprobung neuer Rechenmodelle, die bei den veranschlagten geringen Risikofaktoren viele Tausend Tauchgänge erfordern würde, so daß hier eher mit der «Bewährung in der Praxis» argumentiert wird.

In letzter Zeit wurden bei Obduktionen von Tauchern (die aber nicht infolge eines Tauchunfalls verstarben) im Nervengewebe Läsionen gefunden, die bei Nichttauchern fehlen. Es kann nicht mehr ausgeschlossen werden, daß häufiger Befall mit Blasen, die akut klinisch symptomlos sind und dopplersonografisch heute noch unter der Nachweisgrenze liegen, dennoch Spätschäden verursacht.

Blasenarme Aufstiege, gemäß „konservativer“ Tabellen bzw. Computer, sowie sorgfältige Beachtung der vorgeschriebenen Aufstiegsgeschwindigkeit, insbesondere oberhalb 20 m Tiefe, sind somit allen Tauchern empfohlen.

Alle Tabellen fußen auf mathematischen Modellen, mit denen die praktischen Versuchsergebnisse am besten in Einklang zu bringen waren. Daraus konnten auch Voraussagen über Tauchgänge mit Tiefen und Zeiten gemacht werden, die noch nicht praktisch erprobt waren. Die für die einzelnen Tabellen ausgearbeiteten Vorschriften, wie etwa die Aufstiegsgeschwindigkeit, sind unbedingt zu respektieren.

Nur pauschal sind in den Tabellen die mehr oder weniger individuell gebundenen Faktoren berücksichtigt, wie sie sich aus der jeweiligen körperlichen Kondition, den psychischen und physischen Belastungen während eines Tauchganges, der Abstiegs- und Aufstiegsgeschwindigkeit, außergewöhnlichen Streß-Situationen, Kälteeinflüssen usw. ergeben (s. auch S. 209).

Alle diese Momente können über eine vermehrte Durchblutung bestimmter Gewebe und damit verbundener vermehrter Inertgasaufnahme zu Veränderungen führen, die trotz Einhaltung der vorgeschriebenen Austauschzeiten und -stufen zu einem Dekompressionsunfall führen können. Um so mehr sind eigene Modifikationsversuche an den Tabellen zu unterlassen.

Bei mehreren ausgedehnten Tauchgängen an einem Tag in Tiefen über 20 m kann es auch bei Sporttauchern zu chronischen Dekompressionsschäden, den sogenannten aseptischen Knochennekrosen kommen, die sonst nur bei Caisson-Arbeitern bekannt sind (s. S. 214).

Generell lassen sich bei neueren Tabellen zwei Trends unterscheiden: Eine Gruppe ist für den Ersttauchgang verhältnismäßig großzügig, d. h. bietet längere Nullzeiten als die zweite Gruppe. Wiederholungstauchgänge werden dafür jedoch nur für recht eingeschränkte Tiefe-Zeit-Profile zugelassen, bzw. mit erheblichen Dekozeiten belegt.

Die andere Gruppe verlangt bereits für den Ersttauchgang sehr vorsichtige Dekompressionspläne, dafür sind die Einschränkungen für Wiederholungstauchgänge weniger gravierend.

Die durch Blasenanstieg nach dem Ersttauchgang verzögerte Entsättigung wird also bei der erstgenannten Tabellengruppe in den Vordergrund gerückt, während die zweite Gruppe bemüht ist, bereits die Blasenbildung nach dem Ersttauchgang gering zu halten. Dafür ist dann der Einfluß auf den Folgetauchgang geringer. Eine Zahlentabelle, in die auch Anzeigen

marktgängiger Tauchcomputer aufgenommen wurden, verdeutlicht diese beiden Richtungen.

Zahlentabelle zum Vergleich von Dekompressionstabellen (T) und Tauchcomputern (C)

Die obere Hälfte umfaßt die Gruppe 1, die untere Hälfte die Gruppe 2: Tauchgang auf 36 m mit 15 min Grundzeit

Tabelle (T) Computer (C)	Dekozeit in			Gesamt- aufstiegs- zeit in min	2 Stunden danach Nullzeit in						
	9 m	6 m	3 m		12 m	15 m	18 m	21 m	24 m	27 m	30 m
(T)US Navy (1958)				2'	163'	71'	36'	30'	22'	14'	11'
(T)COMEX (1987)		3'		6'	0'	0'	0'	0'	0'	0'	0'
(T)BSAC (1988)	1'			4'	44'	24'	15'	10'	8'	0'	0'
(C)AladinPro		3'		6'	99'	63'	43'	33'	25'	20'	16'
(T)DCIEM (1990)		10'		12'	115'	50'	31'	21'	16'	12'	10'
(T)NDC (1988)	1'	2'	5'	11,6'	105'	60'	30'	20'	13'	10'	7'
(C)DC12		5'		8,6'	106'	53'	34'	25'	19'	16'	13'