

# Zurück zu den Grundlagen

Dekompressionsverletzungen sind faszinierende Leiden, die immer im Hinterkopf eines jeden Tauchers herumspuken und uns daran erinnern, dass wir verletzlich sind und dass unser Drang, die Welt zu entdecken von den möglichen Konsequenzen gezügelt wird. Ob wir nun aus der Tiefe aufsteigen oder in hohe Gefilde reisen, wenn wir uns nach außen und nach oben vom Zentrum der Erde wegbewegen, reduziert sich der Umgebungsdruck. Unter den richtigen Bedingungen kann das ein komplexes Zusammenspiel zwischen Physik und Physiologie in Gang setzen, das zu Verletzungen führt.

Taucher werden mit zwei Arten von Dekompressionsverletzungen konfrontiert: Dekompressionskrankheiten (DCS) und arteriellen Gasembolien (AGE). Insgesamt werden beide Leiden oft zusammengeworfen und auch als Dekompressionsverletzungen (DCI) bezeichnet. Ihr gemeinsamer Ursprung ist der Dekompressionsprozess, aber die zugrundeliegenden Ursachen unterscheiden sich erheblich.

## AGE

AGEs sind die Verletzungen, die bei 29 Prozent der tödlich endenden Tauchunfälle den Taucher behindert haben. Wahrscheinlich stehen sie in Zusammenhang mit einer unzureichenden Atemgasversorgung, die wiederum der Auslöser von rund 41 Prozent der Tauchunfälle ist.<sup>1</sup> Bei Embolien handelt es sich um tatsächliche oder potenzielle Blockaden der Blutgefäße durch Fremdmaterial. Sie können aus Gas, Blutklümpchen, Fett, Tumoren, Fruchtwasser oder bakteriellen Wucherungen bestehen. Bei den AGEs von Tauchern handelt es sich bei den Embolien um Gas im arteriellen Blutkreislauf, die von einer Lungenüberdehnung oder einem Lungenbarotrauma (einer physikalischen Verletzung des Lungengewebes aufgrund einer Druckveränderung) herrühren. Diese Verletzungen erlauben es dem Gas aus den kleinen Luftsäckchen der Lungen (Alveoli) zu entweichen und in den arteriellen Blutkreislauf zu gelangen.

Das Boyle'sche Gesetz— welches besagt, dass das Volumen einer Gasmenge zunimmt, wenn der Umgebungsdruck abnimmt — erklärt die Lungenüberdehnung beim Aufstieg. Die Umkehrung dieses Gesetzes ist ebenso wahr: Das Volumen einer Gasmenge nimmt zu, wenn der Umgebungsdruck beim Abstieg zunimmt. Für Taucher ist das Risiko eines Lungenbarotraumas im Flachwasser am höchsten. Die größte Druckänderung, dem Taucher in der Wassersäule ausgesetzt sind (im Verhältnis zum Umgebungsdruck an der Wasseroberfläche), findet innerhalb der ersten 3 bis 4 Meter statt.

Eine Gasausdehnung über die Kompensationskapazität der Alveoli hinaus führt zur Verletzung des Lungengewebes und ermöglicht das Entweichen der in den Lungen eingeschlossenen Luft in die Lungenvenen, die wiederum sauerstoffreiches Blut ins Herz zurücktransportieren. Wenn es dazu kommt, kann die entwichene Luft ins Herz gelangen und ins Gehirn weiter wandern, wo es dann zu akuten neurologischen Verletzungen kommen kann. Die Geschwindigkeit, mit der dies geschieht, erklärt das schnelle Auftreten von Symptomen nach einem Tauchgang - eine AGE manifestiert sich innerhalb von Minuten.

Ein Lungenbarotrauma kann auch aus freier Luft im Mediastinum (einem Bereich in der Brust zwischen den Lungen), also einem Pneumomediastinum, oder aus einem Pneumothorax (Luft im Brusthohlraum außerhalb der Lungen) bestehen. Die größte Gefahr für einen Taucher ist eine AGE, die das Gehirn erreicht. Ein solches Leiden nennt man zerebrale arterielle Gasembolie (CAGE).

CAGE-Symptome treten an oder nahe der Oberfläche unmittelbar nach einem Tauchgang auf, wobei rund 50 Prozent der Taucher, die eine CAGE erleiden plötzlich das Bewusstsein verlieren. Bei anderen Tauchern

kann sich die psychische Verfassung akut verändern oder sie verlieren ihre Koordinationsfähigkeit oder Kraft. All dies sind Anzeichen und Symptome für einen Schlaganfall und das Ergebnis eines eingeschränkten Blutflusses zu verschiedenen Bereichen des Gehirns. Diejenigen, die die ursprüngliche Verletzung überleben, können sich spontan innerhalb von Minuten erholen. Dabei können sie dann neurologische Verletzungen in unterschiedlichen Graden davon tragen oder sogar wieder völlig normale Funktionen aufweisen.

Egal, ob sie normal erscheinen oder nicht, alle Betroffenen von Lungenbarotraumata, AGEs oder CAGEs sollten schnellstmöglich in der Notaufnahme eines Krankenhauses untersucht werden. Es ist bekannt, dass bei Patienten, die scheinbar vollständig genesen sind, erneut neurologische Symptome auftreten können. Überdruckmediziner sind sich einig, dass jeder, der nach einem Tauchgang Anzeichen einer neurologischen Verletzung zeigt, untersucht werden sollte. Patienten mit AGE-Diagnose sollten eine hyperbare Sauerstofftherapie (Druckkammerbehandlung) erhalten.

CT-Scans des Kopfes sind oft Teil der ersten Untersuchung dieser Patienten, sobald sie die Notaufnahme erreichen. Wichtig ist, dass vor dem Beginn einer Druckkammerbehandlung festgestellt wird, ob Hirnverletzungen oder ein Schlaganfall vorliegen – nicht, weil die Druckkammerbehandlung das jeweilige Leiden verschlechtern könnte, sondern weil bei Blutungen im Gehirn ein sofortiger chirurgischer Eingriff nötig ist. Der Ausschluss von intrakraniellen Blutungen und Blutklümpchen, die auch akute neurologische Verletzungen verursachen können, ist ein wichtiger Schritt. Sind diese Faktoren nicht vorhanden, unterstützt dies die Diagnose einer tauchbedingten AGE und die Entscheidung für eine hyperbare Sauerstofftherapie.

## **DCS: Immer Ärger mit den Bläschen**

Eine DCS geht mit der Aufnahme von Inertgas (Stickstoff oder Helium) durch das Gewebe einher und mit dem Aufstieg zu einem geringeren Umgebungsdruck, bei dem die Eliminierung des Gases zur Bläschenbildung führen kann. Dies begünstigt die Entstehung von Entzündungen und Gewebeschäden.

Wesentlich für das Verständnis dieser Erkrankungen sind die Gesetze von Boyle, Henry und Dalton. Das Boyle'sche Gesetz erklärt, warum wir beim Abstieg zunehmend mehr Gasmoleküle pro Atemzug einatmen müssen, damit unsere Körper den Druck in unserer Brust auf dem Niveau des Umgebungsdrucks halten können. Die im Verhältnis zu den Gasmolekülen im Blut und in den Geweben erhöhte Anzahl an Gasmolekülen in unseren Lungen erzeugt einen Diffusionsgradienten, der laut des Gesetzes von Henry die Gasmoleküle zur Auflösung anregt. Welche und wie viele dieser Moleküle wir absorbieren wird durch Daltons Gesetz definiert und vom unterschiedlichen Blutfluss in die verschiedenen Körperregionen beeinflusst.

Je länger und tiefer wir tauchen, desto mehr Gas absorbieren wir. Wenn ausreichende Mengen an Inertgas zerfallen und während des Aufstiegs Bläschen bilden, können sich daraus lokale und systemische Entzündungs- und Gefäßreaktionen ergeben, die unter Umständen zu einer Bandbreite an klinischen Manifestationen führen. Anders als AGEs, befinden sich DCS-Bläschen hauptsächlich im venösen Blutkreislauf und im Gewebe und Symptome können auch erst nach mehreren Stunden auftreten.

Eine DCS geht mit einer Inertgaslast (Dekompressionsstress) und dem Auftreten von Bläschen im Blutkreislauf einher. Obwohl hohe Bläschenwerte (durch eine Ultraschalluntersuchung ermittelt) nicht für eine DCS diagnostisch sind, sind sie ein Anzeichen für erheblichen Dekompressionsstress und werden eher mit dem Auftreten von DCS-Symptomen in Verbindung gebracht als niedrige Werte. Das Auftreten von Symptomen korreliert mehr oder weniger mit der Inertgaslast: Eine höhere Last wird einem schnelleren Auftreten und einer schnelleren Entwicklung der Symptome zugesprochen. Ein faszinierender Aspekt bei

DCS ist, dass die Symptome oft deutlich später auftreten als Bläschen feststellbar sind. Während Bläschen also ein Indikator für Dekompressionsstress sind, ist dies jedoch kein diagnostisches Kriterium.

Aktuelle DCS-Studien konzentrieren sich auf die biologischen Marker, die im Blut festgestellt werden können. Forscher untersuchen die möglichen Verbindungen zwischen Dekompressionsstress und dem Auftreten von Membranenmikropartikeln (mit Membranen verbundene Bläschen, die von verschiedenen Zelltypen abgesondert werden) im Blut. Das Niveau der Mikropartikel erhöht sich in Verbindung mit vielen physiologischen Krankheitszuständen ebenso wie mit der von den Bläschen im Blut verursachten Schubspannung. Die Arbeitshypothese lautet, dass bestimmte Mikropartikel (möglicherweise angeregt durch Inertgasbläschen) die Entzündungsreaktion, die zu einer DCS führt auslösen, ein Kennzeichen für sie sein oder zu ihr beitragen könnte. Diese Untersuchung geht weit über das einfache Bläschen-Modell hinaus. Während Bläschen im Blut sicherlich eine wichtige Rolle bei der Entwicklung einer DCS spielen, so ist durch ihr Auftreten oder Nicht-Auftreten keine zuverlässige Prognose zum Einsetzen von DCS-Symptomen möglich. Die Erforschung dieses Prozesses auf molekularer Ebene lehrt uns möglicherweise sehr viel mehr über DCS als wir bisher wissen und bringt uns neue Erkenntnisse, die uns hoffen lassen, dass sie die Effektivität von Prävention und Behandlung verbessern werden.

## Behandlung

Die hyperbare Sauerstofftherapie (HBO) ist die festgelegte Behandlung bei DCS und AGE. Vor dieser festgelegten Behandlung, kann das Atmen von 100% Sauerstoff das Auswaschen des Inertgases beschleunigen, die Schwere der Symptome reduzieren und die Behandlungseffektivität steigern.

Das am weitesten verbreitete und akzeptierte Druckkammerbehandlungsprotokoll, mit dem begonnen wird, ist die U.S. Navy Treatment Table 6. Je nach Zustand des Patienten können diese Behandlungen ausgedehnt oder wiederholt werden. DCI werden in monoplace Druckkammern ebenso wirkungsvoll behandelt wie in multiplace Druckkammern. In monoplace Druckkammern wird jeweils nur eine Person behandelt und die Patienten werden nicht von medizinischem Personal begleitet. Multiplace Druckkammern erlauben die gleichzeitige Behandlung von mehreren Patienten und die Begleitung durch Mitarbeiter, was für gerade schwerverletzte Patienten wichtig ist.

## Evakuierung

Tauchunfälle können Angst einjagen und wenn einmal eine DCI vermutet wird, ziehen viele Taucher andere Erklärungen für die Symptome gar nicht mehr in Erwägung. Um sicherzugehen, dass andere schwere Verletzungen, Erkrankungen und Leiden berücksichtigt werden, empfiehlt DAN, dass verletzte Taucher sich im nächstgelegenen Krankenhaus untersuchen lassen. Lautet die Diagnose tatsächlich DCI, können das Personal und, falls nötig, DAN eine zügige Überweisung zu einer angemessenen und verfügbaren Überdruckeinrichtung in die Wege leiten.

Tauchunfälle werfen viele Fragen auf. Nachdem Du den lokalen Rettungsdienst kontaktiert hast, rufe die DAN Emergency Hotline unter +39 06 4211 5685 an oder bitte die behandelnde Einrichtung, dies zu tun. DAN kann relevante medizinische Informationen zur Verfügung und bei der Planung und Koordination einer Evakuierung unterstützen.

## Gas-Gesetze zum Verständnis von DCI

**DasBoyle'sche Gesetz:** Bei konstanter Temperatur ist das Volumen eines bestimmten Gases umgekehrt proportional zum Umgebungsdruck.

*Um beim Abstieg während des Gerätetauchens das Lungenvolumen neutral zu halten, atmen wir*

*proportional mehr Gasmoleküle pro Atemzug ein.*

**Das Gesetz von Dalton:** Der von einem Gasgemisch ausgeübte Gesamtdruck ist gleich der Summe der Partialdrücke jedes einzelnen Gases in dem Gemisch.

*Wenn wir beim Abstieg mehr Gasmoleküle pro Atemzug einatmen, werden die potenziellen Auswirkungen erhöhter Partialdrücke wichtig. Stickstoffnarkosen entstehen aufgrund eines erhöhten Stickstoffpartialdrucks.*

**Das Gesetz von Henry:** Bei konstanter Temperatur ist die Menge eines bestimmten Gases, das sich in eine Flüssigkeit auflöst direkt proportional zum Partialdruck des Gases über der Flüssigkeit. Physiologisch betrachtet bedeutet das, dieser Gasdruck in unseren Lungen steht im Verhältnis zum Gasdruck in unserem Blut.

*Je höher der Gasdruck in Deinen Lungen, desto mehr Gas löst sich auf und strömt in Dein Blut und Gewebe. Das ist die Grundlage einer Dekompressionskrankheit.*