



Berufliches Tauchen und Arbeiten im Überdruck

Martin Rüegger, Dominik Schwarb

suvapro

Sicher arbeiten

Suva

Abteilung Arbeitsmedizin
Postfach, 6002 Luzern
www.suva.ch

Auskunft

Tel. 041 419 58 51
Fax 041 419 62 05
arbeitsmedizin@suva.ch

Bestellungen

www.suva.ch/waswo
Tel. 041 419 58 51
Fax 041 419 59 17

Titel

Berufliches Tauchen und Arbeiten im Überdruck

Autoren

Dr. med. Martin Rüegger,
Abteilung Arbeitsmedizin, Suva Luzern,
Dr. med. Dominik Schwarb,
Abteilung Arbeitsmedizin, Suva Luzern

Titelbild

Keystone

Abdruck – ausser für kommerzielle Nutzung – mit
Quellenangabe gestattet
Erstauflage: Juni 2012

Bestellnummer

2869/8.d (nur als PDF-Datei erhältlich)

Das Modell Suva

- Die Suva ist mehr als eine Versicherung: sie vereint Prävention, Versicherung und Rehabilitation.
- Die Suva wird von den Sozialpartnern geführt. Die ausgewogene Zusammensetzung im Verwaltungsrat aus Arbeitgeber-, Arbeitnehmer- und Bundesvertretern ermöglicht breit abgestützte, tragfähige Lösungen.
- Gewinne gibt die Suva in Form von tieferen Prämien an die Versicherten zurück.
- Die Suva ist selbsttragend; sie erhält keine öffentlichen Gelder.

Vorwort	5
Einleitung	6
A	Physikalische Grundlagen
1.	Der atmosphärische Druck 11
1.1.	Masseinheiten 11
1.2.	Änderungen des Druckes unter Wasser 12
2.	Beziehungen zwischen Druck und Volumen eines Gases 12
2.1.	Gesetz von Boyle und Mariotte 12
3.	Das Verhalten von Druck und Volumen der verschiedenen Teile eines Gasgemisches 13
4.	Die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten 14
B	Gefahrenquellen
1.	Tauchen 19
1.1.	Besonderheiten beim Aufenthalt unter Wasser 19
1.1.1.	Auftrieb 19
1.1.2.	Dichte des Wassers 19
1.1.3.	Erhöhte Atemgasdichte 20
1.1.4.	Lichtbrechung 20
1.1.5.	Schallgeschwindigkeit 20
1.1.6.	Wärmeleitfähigkeit 20
1.2.	Apnoetauchen 21
1.2.1.	Hypoxie beim Apnoetauchen 21
1.2.2.	Lungenödem beim Apnoetauchen 21
1.3.	Schwimmen und Tauchen mit Schnorchel 22
1.4.	Oberflächenversorgtes Helmtauchen 22
1.5.	Flaschentauchen mit Lungenautomaten (Atemregler) 23
1.6.	Technisches Tauchen und Tauchen mit Kreislaufgeräten sowie Gasgemischen 27
1.7.	Sättigungstauchen 29

2.	Der Aufenthalt in mit Druckluft gefüllten Räumen	30
2.1.	Die Taucherglocke	30
2.2.	Der Caisson oder Senkkasten	30
2.3.	Der Hydroschildvortrieb	31
2.4.	Die Deckelbauweise	34
2.5.	Unterwasserhäuser und Habitats	35
2.6.	Druckluftschleusen	35

C Wirkungsweisen und Krankheitsbilder

1.	Die Wirkung von Druckunterschieden auf lufthaltige Körperhöhlen	41
1.1.	Das Barotrauma im Bereich des Kopfes	42
1.1.1.	Das Barotrauma des äusseren Gehörganges	42
1.1.3.	Das Barotrauma des Mittelohres	42
1.1.4.	Das Barotrauma des Mittelohres mit Schädigung des Innenohres	44
1.1.5.	Das Barotrauma der Nasennebenhöhlen	44
1.1.6.	Das Barotrauma der Zähne	44
1.2.	Das Barotrauma der Verdauungsorgane	45
1.3.	Das Barotrauma der Haut	45
1.4.	Das Barotrauma der Lunge	45
1.4.1.	Das positive Barotrauma der Lunge	45
1.4.2.	Das negative Barotrauma der Lunge	47
1.4.3.	Das Lungenoedem bei Tauchern und Schwimmern	48
2.	Die Wirkung von unter erhöhtem Druck im Körper gelösten Gasen	49
2.1.	Die Wirkung von Inertgasen	49
2.1.1.	Die Stickstoffnarkose, der Tiefenrausch	49
2.1.2.	Das High Pressure Nervous Syndrome (HPNS)	50
3.	Die Wirkung von Gasblasen in Blut und Gewebe: Die Druckfall- oder Dekompressionskrankheit	50
3.1.	Das Entstehen von Gasblasen im Körper	50
3.1.1.	Die Aufnahme und Abgabe von Gasen durch eine Flüssigkeit in vivo	50
3.1.2.	Die tolerierte Übersättigung	51
3.1.3.	Die Bildung von Gasblasen	51
3.2.	Gasembolien	52
3.2.1.	Arterielle Gasembolien	52
3.2.2.	Venöse Gasembolien	52
3.3.	Offenes Foramen ovale (PFO)	53
3.4.	Die lokale Wirkung von Gasblasen in Geweben	54
3.5.	Die Bläschen- oder Dekompressionskrankheit (DCI)	55
3.6.	Die chronische Druckfallkrankheit, sogenannte Long Term Health Effects (LTHE)	56
3.6.1.	Aseptische Knochennekrosen und Gelenkdeformationen (Caissonkrankheit im engeren Sinne)	56
3.7.	Spätschäden nach DCI	58
3.7.1.	Chronische Schäden des Zentralnervensystems und der Sinnesorgane	58
3.7.2.	Störungen des Gehör- und des Gleichgewichtssinnes	58

4.	Die Wirkung von reizenden und toxischen Gasen	59
4.1.	Stickoxid	59
4.2.	Kohlendioxid	59
4.3.	Kohlenmonoxid	60
4.4.	Erhöhter Sauerstoffpartialdruck	61
4.4.1.	Die Wirkung auf Atemwege und Lungen	61
4.4.2.	Die Wirkung auf das Zentralnervensystem	61
4.4.3.	Die Gefährdung durch Sauerstoffvergiftung	61
4.5.	Sauerstoff Toleranz Einheiten (Unit Pulmonary Toxic Dosis, UPTD)	62
5.	Der Tod beim Tauchen	62
5.1.	Tod während und unmittelbar nach dem Tauchen	62

D Prophylaxe und Therapie von Tauch- und Überdruckunfällen

1.	Eignungs- und Kontrolluntersuchungen	67
2.	Ausbildung	68
2.1.	Sporttaucher	68
2.2.	Berufstaucher	69
2.3.	Überdruckarbeiter	69
3.	Dekompressionstabellen	69
4.	Tauchausrüstung und Tauchplanung	72
4.1.	Anzüge und Zubehör	73
4.2.	Pressluft-/Atemgasversorgung	74
4.3.	Tauchcomputer	74
5.	Alarmierung und erste Hilfe bei Tauch- und Überdruckunfällen	76
6.	Professionelle Behandlung von Tauch- und Überdruckunfällen	78

E Versicherungsrechtliche Begriffe

1.	Der Unfall	83
2.	Unfallähnliche Körperschädigungen	84
3.	Die Berufskrankheit	84
4.	Die Grobfahrlässigkeit	85
5.	Das Wagnis	85
6.	Die Versicherung von Sporttauchern	86

F Weiterführende Informationen

Im Jahre 1985 publizierte die Suva erstmals im Rahmen der Reihe Arbeitsmedizin eine zweiteilige Broschüre mit dem Titel «Erkrankungen durch Überdruck und Unterdruck». Sie trug den Untertitel «Tauchen, Caissonarbeit, Höhengedächtnis, Fliegen» und wurde von Dr. med. Hans Vogel, ehemals Arbeitsarzt der Suva, verfasst. Diese Publikation erfreute sich einer regen Nachfrage und wurde letztmals 1992 nachgedruckt.

Unter Berücksichtigung der seitherigen Entwicklungen im Tauchsport sowie neuer hyperbarmedizinischer Erkenntnisse ist jetzt die ehemalige Suva Publikation grundlegend überarbeitet worden. Höhen- und flugmedizinische Aspekte sind darin nicht mehr berücksichtigt und auch auf kasuistische Betrachtungen ist verzichtet worden. Dies machte es möglich, den Stoff in einem einzigen Heft zur Darstellung zu bringen.

Es versteht sich von selbst, dass die Autoren im Bereich der Tauch- und Überdruckmedizin auf die Unterstützung kompetenter Fachleute angewiesen waren. In diesem Zusammenhang gilt unser besonderer Dank den Herren Dres. Jürg Wendling Biel und Christian Wölfel Schwyz für ihre kritische Durchsicht des gesamten Manuskriptes, Hr. Dr. iur. Markus Fuchs, Abteilung Versicherungsleistungen der Suva, und seinen Mitarbeitern für die juristische Beratung sowie den Herren Robert Meier und Andreas Achermann, Abteilung Arbeitssicherheit, Suva Luzern, Franz Hattin Hergiswil und Ernst Voellm Kilchberg für ihre Unterstützung in tauch- und drucklufttechnischen Belangen.

Ausserdem sind uns von verschiedenen Seiten zahlreiche Abbildungen und Fotografien zur Verfügung gestellt worden. Dafür möchten wir uns an dieser Stelle herzlich bedanken. Wir haben auf den entsprechenden Seiten auf die jeweiligen Bildquellen hingewiesen.

Luzern, im Frühjahr 2012,

Die Verfasser

Sporttauchen übt auf zahlreiche Menschen eine grosse Faszination aus. Aber auch das berufliche Tauchen ist von Bedeutung. Es umfasst Bau-, Montage- und Forschungsarbeiten unter Wasser, ebenso wie das Rettungstauchen und das sogenannte Offshore Tauchen, welches der Errichtung und dem Unterhalt von Erdölbohrplattformen in den küstennahen Zonen unserer Meere dient.

Neben dem Tauchen kennt man auch «trockene Arbeiten», die unter Überdruck und mit Hilfe von speziell dazu ausgerüsteten Tunnelbaumaschinen oder mit Caissons ausgeführt werden. Auch dafür müssen sich Arbeitnehmer höheren Umgebungsdrücken gegenüber exponieren.

Der Aufenthalt im und unter dem Wasser bringt ganz bestimmte Gefahren mit sich, die andernorts nicht vorkommen. Vor allem die Zu- und Abnahme des auf den Körper wirkenden äusseren Druckes beim Ab- und Auftauchen sowie seine Dauerwirkung können dem Menschen unter Umständen schweren Schaden zufügen, wenn gewisse Regeln nicht streng eingehalten werden.

Die physischen Anforderungen des Tauchens sowie der Arbeit unter Überdruck erfordern deshalb regelmässige ärztliche Eignungsuntersuchungen, um möglichen Gesundheitsschäden vorzubeugen.

Die vorliegende Schrift soll einen Einblick in die Belange der Tauch- und Überdruckmedizin geben. Sie richtet sich in erster Linie an Ärztinnen und Ärzte, die mit einem Tauchzwischenfall konfrontiert werden können, sei es auf Grund der relativen Nähe ihres Arbeitsortes zu einem Gewässer, durch das Erscheinen von Rückkehrenden aus Tauchferien, die sich mit spät auftretenden Beschwerden in der Sprechstunde melden oder von Gesunden, die sich bezüglich ihrer Tauchtauglichkeit beraten lassen möchten.

Im Weiteren richtet sich die Publikation auch an das Personal von therapeutischen Druckkammern, an Verantwortliche von Tauch- und Bauunternehmen, die Überdruckarbeiten ausführen sowie an besonders an der Thematik interessierte Laien.

Die Suva versichert die Arbeitnehmenden der ihr gemäss Verordnung über die Unfallversicherung (UVV) zugewiesenen Betriebe gegen Berufsunfälle, Nichtberufsunfälle sowie Berufskrankheiten. Viele der beim Tauchen vorkommenden Gesundheitsschäden werden landläufig als «Tauchunfälle» bezeichnet, ohne dass es sich um Unfälle im Sinne des Gesetzes handelt. Es ist deshalb klärend, aufzuzeigen, was beim Tauchen sowie Arbeiten unter Überdruck als Unfall oder Berufskrankheit gilt und wo für die Betroffenen allenfalls Versicherungslücken bestehen, die ausserhalb der sozialen Unfallversicherung gedeckt werden sollten.



A

Physikalische Grundlagen



1. Der atmosphärische Druck

Auf jedem Punkt der Erde lastet das Gewicht der darüber liegenden Luft. Dieses – definiert als Kraft/Fläche – entspricht physikalisch dem Druck.

1.1. Masseinheiten

Die Einheit des Druckes ist das Pascal (Pa), welches als 1 N/m^2 definiert ist. Auf Meereshöhe beträgt der Druck durchschnittlich $101'325 \text{ Pa}$ beziehungsweise $101,325 \text{ kPa}$. In der Praxis wird auch oft die Einheit bar verwendet, wobei 1 bar $100'000 \text{ Pa}$ entspricht, beziehungsweise 1 mbar 100 Pa oder einem hPa (Hektopascal). Der Normaldruck auf Meereshöhe kann somit auch als $1,013 \text{ bar}$ bzw. 1013 mbar angegeben werden. Ebenfalls verwendet wird auch noch die ältere Einheit Atmosphäre (atm) entsprechend kp/cm^2 , wobei gilt, dass 1 atm $1,013 \text{ bar}$ beziehungsweise 1013 mbar entspricht.

1 Pa	1 N/m ²	Grundeinheit
1 kPa	1000 Pa	abgeleitete Einheit
1 bar	100'000 Pa = 100 kPa	abgeleitete Einheit
1 mbar	0,001 bar = 100 Pa	abgeleitete Einheit
Normaldruck	101'325 Pa = 101,325 kPa	abgeleitete Einheit
	1,013 bar = 1013 mbar	abgeleitete Einheit

Tabelle 1 Gebräuchliche SI Druckeinheiten

Der Luftdruck nimmt mit steigender Höhe ab. Die Zu- und Abnahme verläuft allerdings wegen der Kompressibilität der Luft nicht linear. Zu den höhenabhängigen Schwankungen des Luftdruckes kommen noch die meteorologisch bedingten hinzu, so dass sich dieser auf Meereshöhe in etwa zwischen 92 und 107 kPa (920 und 1070 hPa) bewegt. Gesamthaft gesehen befinden wir uns also über Wasser in einem Druckbereich, der vorwiegend unterhalb von einem 1 bar liegt.

1 at	1 kp/cm ²	98'100 Pa	0,981 bar
1 atm	1,033 kp/cm ²	101'325 Pa	1,013 bar
1 Torr	0,001359 kp/cm ²	133,322 Pa	0,001333 bar
1 kPa	0,0102 at	0,00987 atm	7,5 Torr
1 bar	1,02 at	0,987 atm	750 Torr

Tabelle 2 Umrechnungsformeln von Druckeinheiten

Zu beachten ist, dass in technischen Berufen der Überdruck als Masseinheit gebräuchlich ist («gauge pressure»), während der atmosphärische Umgebungsdruck als Null definiert wird. Dies erfordert eine gewisse Vorsicht beim Gebrauch der Druckeinheiten.

1.2. Änderungen des Druckes unter Wasser

Befindet sich ein Körper unter Wasser, so lastet zusätzlich zum Gewicht der überstehenden Wassersäule auch noch dasjenige der atmosphärischen Luft auf ihm. Was das bedeutet, soll anhand des folgenden Rechenbeispiels für eine Tiefe von 10 Metern aufgezeigt werden: Jeder cm^2 «trägt» eine Wassersäule von 10 m Höhe. Sie entspricht rund 1 kg Masse und damit einer Gewichtskraft von 1 kp/cm^2 bzw. 9,81 N/cm^2 oder 98'100 N/m^2 bzw. 98'100 Pa bzw. 0,981 bar. In 10 m Tiefe beträgt der Wasserdruck somit rund 1 bar. Hinzu gesellt sich der atmosphärische Luftdruck, der auf Meereshöhe ebenfalls rund 1 bar beträgt, so dass in der in unserem Beispiel angenommenen Tiefe von 10 m ein Gesamtdruck von rund 2 bar herrscht. In 20 m Tiefe wären es dann 2 bar plus 1 bar = 3 bar Gesamtdruck und so weiter. Meerwasser weist wegen seines Salzgehaltes im Vergleich zu Süßwasser eine etwas höhere Dichte auf. Entsprechend ist die Druckzunahme pro 10 m Wassertiefe leicht höher als im Süßwasser. Für unsere Betrachtungen sind diese Unterschiede aber nicht von Belang.

2. Beziehungen zwischen Druck und Volumen eines Gases

2.1. Gesetz von Boyle und Mariotte

Das Gesetz von Boyle und Mariotte (1703) lautet: Bei gleichbleibender Temperatur ist das Produkt aus Druck (p) und Volumen (V) einer bestimmten Menge von Gasmolekülen konstant:

$$p \times V = \text{konstant}$$

Wenn also der Druck auf eine gegebene Gasmenge verdoppelt wird, nimmt ihr Volumen um die Hälfte ab und beim Halbieren des Druckes verdoppelt sich das Volumen (Abb. 1).

Da nach dem Pascalschen Prinzip der Wasserdruck von allen Seiten in gleicher Weise auf den menschlichen Körper wirkt und sich auf alle Organe fortpflanzt, wird auch die im Körper eingeschlossene Luft, zum Beispiel im Darm oder in den Lungen, bei steigendem Aussendruck auf ein kleineres Volumen zusammengepresst. Bei fallendem Druck dehnt es sich dagegen aus. Da der Taucher bei sonst unveränderten Bedingungen auch in der Tiefe gleich grosse Luftmengen ventiliert, wird beim Tauchen mehr Luft verbraucht: In 10 m Tiefe ist dies beispielsweise die doppelte Menge. Das bedeutet, dass eine gegebene Luftmenge umso weniger lang zum Atmen ausreicht, je tiefer damit getaucht wird.

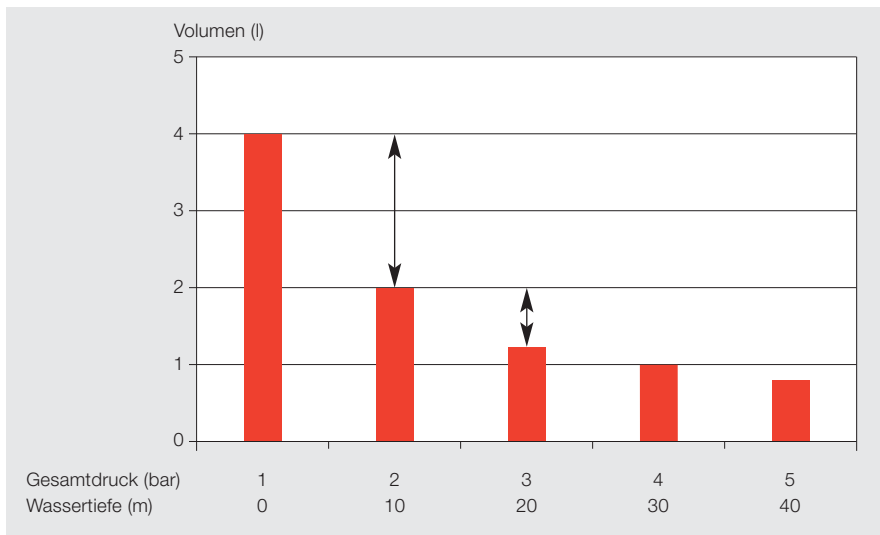


Abbildung 1 Beziehung zwischen Wassertiefe, Gesamtdruck und Gasvolumen (im Beispiel 4 Liter). Zu beachten ist, dass die Volumenänderung pro Druckeinheit mit zunehmender Tiefe abnimmt.

3. Das Verhalten von Druck und Volumen der verschiedenen Teile eines Gasgemisches

Nach dem Gesetz von Dalton (1801) übt jedes Gas in einem Gasgemisch den gleichen Druck aus, wie wenn es allein das ganze Volumen ausfüllen würde; der Gesamtdruck stellt somit die Summe der Partialdrücke aller Gase dar, welche das Gemisch bilden, mit anderen Worten, die einzelnen Gase beteiligen sich entsprechend ihrem Volumenanteil am Gesamtdruck (Abb. 2).

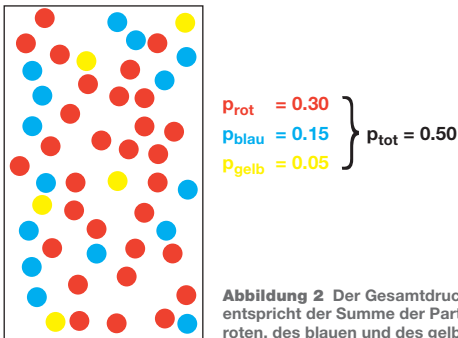
Für trockene atmosphärische Luft gilt dabei folgende Zusammensetzung in Volumenprozenten:

Stickstoff	78,09
Sauerstoff	20,95
Argon	0,93
Kohlendioxid	0,03

Tabelle 3 Zusammensetzung der atmosphärischen Luft (vereinfacht)

Dazu kommen noch Spuren von Wasserstoff, Ozon und Edelgasen. Vereinfacht kann man sagen, die Luft bestehe aus 21 % Sauerstoff und 79 % Stickstoff.

Der Teil- oder Partialdruck des Sauerstoffes beträgt bei Normaldruck nach dem Gesetz von Dalton 21 kPa (0,21 bar), in 10 m Wassertiefe 42 kPa (0,42 bar) und in 50 m Tiefe 126 kPa (1,26 bar).



Das Ausmass der biologischen Wirkung eines Gases hängt in der Regel von seinem Partialdruck ab, entsprechend den für diese Wirkung massgeblichen physikalischen Eigenschaften wie Löslichkeit oder Diffusionsgeschwindigkeit.

4. Die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

Das Gesetz von Henry (1803) sagt vereinfacht folgendes: Die in einer Flüssigkeit physikalisch gelöste Menge (molare Konzentration) C eines Gases X ist proportional dem Partialdruck p des Gases über der Flüssigkeit und einer Löslichkeitskonstante α (Abb. 3). Es gilt:

$$C_x = p_x \times \alpha_x$$

Dabei gilt die Löslichkeitskonstante jeweils für ein bestimmtes Gas und eine bestimmte Flüssigkeit; sie nimmt mit steigender Temperatur ab.

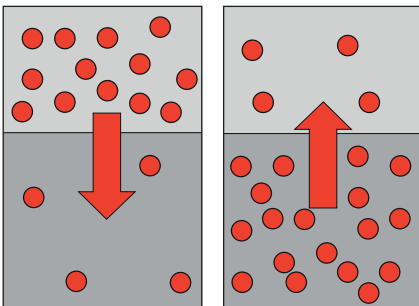


Abbildung 3 Löslichkeit von Gas in Flüssigkeiten in Abhängigkeit des Partialdruckes (Gesetz nach Henry)

Bis die ganze diesem Gesetz entsprechende Gasmenge in der Flüssigkeit gelöst, das heisst ein Gleichgewicht zwischen dem Druck des entsprechenden Gases über der Flüssigkeit und demjenigen innerhalb der Flüssigkeit eingetreten ist, braucht es eine gewisse Zeit. Beim Absinken des Druckes treten mehr Gasmoleküle aus der Flüssigkeit aus als von dieser wieder aufgenommen werden. Dabei bilden sich bei kritischer Übersättigung Blasen.

Alle Inertgase weisen eine vom Partialdruck und vom Molekulargewicht abhängige narkotische Wirkung auf. Diese wird wesentlich durch den Löslichkeitsunterschied in Fett und Wasser mit beeinflusst. Der Fett/Wasser Koeffizient ist somit ein wichtiges Mass für die narkotisierende Wirkung. Für Xenon beispielsweise ist diese im Vergleich zu Helium, Wasserstoff und Stickstoff wesentlich höher, so dass nur die drei letztgenannten für die Taucherei in Betracht kommen, wie dies aus Tabelle 4 hervorgeht.

Gas	Molekulargewicht	Fett/Wasser Verteilungskoeffizient	Narkotische Potenz
Wasserstoff	2,016	3,2	0,46
Helium	4,003	1,8	0,235
Stickstoff	28,013	5,3	1,0
Xenon	131,29	20 (-)	25,6

Tabelle 4 Unterschiedliche Fett-/Wasserlöslichkeiten von Wasserstoff, Helium, Stickstoff und Xenon im Vergleich.



B Gefahrenquellen



1. Tauchen

1.1. Besonderheiten beim Aufenthalt unter Wasser

Der tauchende Mensch befindet sich in einer Umgebung, die ihm im Laufe der Evolution wesensfremd geworden ist und in welcher er ohne technische Massnahmen nicht mehr als ein paar Minuten überleben kann. Ein Mensch, welcher sich zum Tauchen ins Wasser begibt, muss deshalb mit den folgenden Gegebenheiten zurecht kommen:

1.1.1. Auftrieb

Der Körper des Tauchers wird nach dem Prinzip des Archimedes um soviel leichter, als es dem Gewicht des von ihm verdrängten Wassers entspricht. Ist die Dichte des Tauchers kleiner als diejenige des Wassers, dann schwimmt er an der Oberfläche, ist die Dichte grösser, sinkt er ab. Wegen der Luft in verschiedenen Körperhöhlen, vor allem in den Lungen, ist die mittlere Dichte des menschlichen Körpers etwas kleiner als diejenige des Wassers. Ein Mensch bleibt daher normalerweise an der Oberfläche, wobei nur ein ganz kleiner Teil seines Körpers daraus hervorragt, derart dass die Atemöffnungen normalerweise unter Wasser bleiben. Daher ertrinken des Schwimmens Unkundige in der Regel, während Schwimmer ihren Körper durch die typischen Bewegungen soweit aus dem Wasser schieben können, dass Mund und Nase darüber hinausragen. Will ein Mensch unter die Wasseroberfläche tauchen, so benötigt er zum Ausgleich des Auftriebs Gewichte. Wird keine Luft zugeführt, so wird der Thorax durch den steigenden Umgebungsdruck mehr und mehr komprimiert, was zu einer Zunahme der mittleren Dichte des Körpers führt, bis der an der Oberfläche noch wirksame Auftrieb gegen Null geht und sich nach und nach ein zunehmender Abtrieb bemerkbar macht. Ohne geeignete Tariervorrichtung würde der Taucher immer schneller absinken und er könnte aus eigener Kraft nicht mehr an die Oberfläche zurückkehren. Auftrieb kann auch unfallgefährdend sein, zum Beispiel wenn der Tariweste (Stabilizing Jacket, Abb. 20, S. 73) oder dem Trockentauchanzug unkontrolliert Luft zugeführt werden oder ein Hebesack durch Ungeübte unter Wasser aufgeblasen wird.

1.1.2. Dichte des Wassers

Wasser ist erheblich dichter als Luft. Es setzt deshalb den Bewegungen des Tauchers deutlich mehr Widerstand entgegen, was zu einer Zunahme der physikalischen Arbeit und einem im Vergleich zu einer gleichartigen Tätigkeit an der Oberfläche vermehrten Sauerstoffbedarf führt. Dieser erhöhte Widerstand hat auch zur Folge, dass der Taucher grössere Massenverschiebungen – etwa aufwärts oder abwärts gerichtete Meeresströmungen – nicht ohne Weiteres überwinden kann, was insbesondere für Anfänger eine erhebliche Gefährdung bedeutet.

1.1.3. Erhöhte Atemgasdichte

Mit steigendem Druck, das heisst mit zunehmender Dichte eines Gases, treten schon bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten Turbulenzen auf und die Strömungswiderstände in den Atemwegen nehmen zu, so dass die Atemarbeit grösser wird.

1.1.4. Lichtbrechung

Ins Wasser einfallendes Licht wird zum Lot hin gebrochen und stärker absorbiert als in der Luft. Der Brechungsindex ist unter anderem von der Wellenlänge abhängig; er ist für kürzer welliges blaues Licht höher als für länger welliges rotes. Blaues Licht dringt daher tiefer ins Wasser ein. Mit zunehmender Tiefe und wegen der fortschreitenden Lichtabsorption tritt zunehmende Blauverfärbung und schliesslich Dunkelheit ein.

Die Lichtbrechkraft des menschlichen Auges ist für den Übergang zu Luft eingerichtet. Unter Wasser erscheinen Gegenstände deshalb um $\frac{1}{3}$ grösser und um $\frac{1}{4}$ näher als in der Luft. Bei direktem Kontakt mit Wasser sehen wir daher unscharf und benötigen eine Taucherbrille, die einen Luftraum zwischen Wasser und Auge schafft.

1.1.5. Schallgeschwindigkeit

Im Wasser ist die Schallgeschwindigkeit im Vergleich zu Luft um zirka das Vierfache erhöht. Der Schalleindruck im Wasser wird dadurch unnatürlich laut und Schallquellen können wesentlich schlechter geortet werden. Unterwasserarbeiten, die Lärm verursachen, sind daher für das Gehör des Tauchers gefährlicher als unter atmosphärischen Bedingungen. Dies kann vor allem für Berufstaucher ein Problem darstellen.

1.1.6. Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit des Wassers ist – temperaturabhängig – rund 25 Mal besser als diejenige von Luft. Der Wärmeverlust des Körpers ist daher im kalten Wasser sehr gross. Für längere Tauchgänge muss der Körper deshalb mit einem Anzug vor Wärmeverlust geschützt werden. Beim Nasstauchanzug ermöglichen dies zum einen die Luftblasen im Neoprenschaumstoff und zum anderen eine unbewegte Wasserschicht zwischen Körper und Anzug. Werden die Luftblasen durch zunehmenden Druck kleiner, nimmt nicht nur die Isolierwirkung, sondern zusätzlich auch die Auftriebswirkung ab. Beim Trockentauchanzug wird diese Isolierfunktion von einer Luftschicht zwischen Anzug und Körper übernommen, deren Volumen sich vom Taucher verändern lässt. Ausserdem kann unter dem Trockentauchanzug isolierende Wäsche getragen werden. In Extremfällen ist es sogar möglich, das Innere von Spezialanzügen mit zirkulierendem warmem Wasser zu heizen. In solchen Fällen muss auch für eine ausreichende Erwärmung der Atemluft gesorgt werden, da sonst der Körper rasch auskühlen würde.

1.2. Apnoetauchen

Die einfachste und am weitesten verbreitete Art des Tauchens ist diejenige mit angehaltenem Atem (Apnoe). Nach wie vor tauchen Schwammfischer sowie Perlentaucher auf diese Weise. Ausserdem hat sich das Apnoetauchen in jüngerer Zeit zu einer besonderen Disziplin des Sporttauchens entwickelt.

1.2.1. Hypoxie beim Apnoetauchen

Beim Apnoetauchen in die Tiefe nimmt der Druck in der Lunge und damit auch der O_2 Partialdruck zu; der Sauerstoffvorrat reicht dadurch länger aus. Beim Auftauchen sinkt dafür der O_2 Partialdruck wesentlich tiefer unter den Ausgangswert ab und es kann eine Hypoxie mit Bewusstlosigkeit eintreten. Der Taucher kommt wohl an die Oberfläche, er versinkt und ertrinkt jedoch, wenn er nicht sofort gerettet wird. Man spricht von Aufstiegsohnmacht oder Deep Water Blackout.

Vor dem Apnoestreckentauchen im flachen Wasser wird oft während einigen Atemzügen hyperventiliert. Dadurch kann die O_2 -Sättigung des Blutes aber nur unwesentlich verbessert werden. Hingegen nimmt der CO_2 -Gehalt erheblich ab. Es dauert deshalb länger, bis der Taucher durch den CO_2 bedingten Reiz auf das Atemzentrum zum Ausstieg aus dem Wasser gezwungen wird. Je länger hyperventiliert und damit der Reiz hinausgezögert wird, desto grösser wird die Gefahr, dass der Taucher auf Grund eines Sauerstoffmangels bewusstlos wird, bevor der CO_2 -bedingte Atemreiz auftritt. Man spricht in diesem Fall von Flachwasserohnmacht oder Swimming Pool Blackout.

Berufliche und wettkampfmässige Apnoetaucher müssen deshalb nicht nur gut vorbereitet sein, sondern auch zuverlässig gesichert werden.

1.2.2. Lungenödem beim Apnoetauchen

Wird der Thorax durch den Wasserdruck so stark zusammengepresst, dass sich die Lunge ihrem Residualvolumen annähert, wird zuerst das Zwerchfell stark nach oben gedrückt und so das intrathorakale Volumen verkleinert; kann der Thorax bei weiterer Drucksteigerung nicht mehr nachgeben, wird der Druck in seinem Inneren kleiner als im übrigen Körper. Es kommt zu einem vermehrten Blutrückfluss in den Brustraum und schliesslich tritt Blutplasma aus den Lungenkapillaren in die Alveolen über, so dass ein Lungenödem entsteht. Zunehmende Tiefe und maximal mögliche Apnoezeit stellen somit die limitierenden Faktoren des Apnoetauchens dar. Sie zu überschreiten, gelingt nur Apnoetauchern, die sich dazu besonderer Massnahmen bedienen und ein lang dauerndes intensives Wettkampftraining absolvieren. Unter diesen Umständen kann es in Einzelfällen sogar zu Dekompressionserkrankungen (DCI) kommen, was früher beim Apnoetauchen nie beobachtet worden ist.

1.3. Schwimmen und Tauchen mit Schnorchel

Ein Schnorchel erlaubt es, bequem in Bauchlage und mit dem Gesicht im Wasser zu schwimmen ohne dabei den Atem anhalten zu müssen. Auch ein Gerätetaucher, der durch das Gewicht seiner Ausrüstung zirka 10 cm tief ins Wasser gedrückt wird, braucht einen Schnorchel, um bequem und ohne übermässige Anstrengung an der Oberfläche schwimmen zu können.

Das Prinzip des Schnorchels funktioniert allerdings nur unmittelbar an der Wasseroberfläche. Beim eigentlichen Tauchen lässt es sich dagegen nicht anwenden, da dadurch sowohl der Totraum der Atemwege als auch die Atemarbeit erheblich vergrössert würden. Schon in einem halben Meter Tiefe reicht die Kraft der Einatemmuskulatur nicht mehr aus, um den auf den Thorax wirkenden Wasserdruck zu überwinden. Ein Schnorchel darf daher nie länger als 35 cm sein und nur für das Schwimmen mit dem Gesicht im Wasser verwendet werden.

1.4. Oberflächenversorgtes Helmtauchen

Helmtauchgeräte in der Art, wie sie früher verwendet worden sind (Abb. 4), bestehen aus einem Messing- oder Kupferhelm, der mit Sichtscheiben ausgerüstet ist und wasserdicht auf einen mit einem speziellen Schulterstück versehenen Trockenanzug montiert werden kann. Die Atemluft wird von der Oberfläche aus über einen Schlauch in den Helm gepumpt, von wo sie der Taucher mittels Ventil portionenweise wieder ins Wasser ablassen kann. Zu Tarierzwecken ist insbesondere der Brustbereich des Anzugs mit Blei versehen und es müssen Bleischuhe getragen werden, damit sich der Taucher aufrecht im Wasser bewegen kann.

Die heutigen modernen Helmtauchausrüstungen (Abb. 6, Seite 26/27) verfügen über einen leichteren Kunststoffhelm mit Sichtscheibe, in welchem in der Regel eine Atemmaske mit integrierem Lungenautomaten (Atemregler) eingebaut ist. In derselben Weise funktionieren auch die weichen sogenannten Vollgesichtsmasken. Auch die modernen Helme sind mit dem Trockenanzug des Tauchers wasserdicht verbunden. Gewichte sind nach wie vor unverzichtbar, unter anderem, damit sich der Taucher in einer für seine Arbeit bequemen Stellung im Wasser halten kann. Anstelle von Bleischuhen werden Füsslinge oder Flossen getragen, so dass sich der moderne Helmtaucher im Vergleich zu früher freier im Wasser bewegen und allenfalls auch schwimmen kann. Je nach auszuführender Unterwasserarbeit können die Bleigewichte allerdings zu Skelettbelastungen führen, welchen durch ergonomische Anpassungen entgegengewirkt werden muss.

Zu den neuzeitlichen Helmtauchgeräten gehören unter anderem eine Sprechverbindung mit der Oberfläche, allenfalls eine Helmkamera für die Videoüberwachung sowie eine mitgeführte Atemluftreserve, die bei Ausfall der Oberflächenversorgung einen gefahrlosen Aufstieg ermöglicht.



Abbildung 4 Historisches Helmtauchen: Kupferhelm mit Schulterstück und übergehängtem Brustblei (Pfeil). Luftversorgung mittels Schlauch von der Oberfläche aus.

Bild: H. Gerber, Tauchclub Kreuzlingen

1.5. Flaschentauchen mit Lungenautomaten (Atemregler)

Die Erfindung des Lungenautomaten – vornehmlich durch die Franzosen Commaheines, Gagnan und Cousteau, dem berühmten Meeresforscher – ermöglicht es, während längerer Zeit ohne Schlauchversorgung mit der Oberfläche in grösseren Tiefen zu tauchen, wenn eine entsprechende

Gasreserve in Flaschen mitgeführt wird. Diese Methode des «Froschmannes» führte in der Folge zu einer raschen und weltweiten Verbreitung des Tauchsportes (Abb. 7a, S. 28). Für Berufstauchersätze wird sie aber wegen der inhärenten Gefahren in der Regel nicht verwendet.

Der Lungenautomat (Abb. 5a,b), der auf Grund seiner Entwicklung in den USA auch als «self-contained underwater breathing apparatus» (scuba) bezeichnet wird, besteht im Prinzip aus einem Reduzierventil, welches den Druck der in einer Flasche mitgeführten komprimierten Atemluft automatisch dem umgebenden Wasserdruck anpasst. Eine Membran, die Wasser und Atemluft trennt, öffnet das Lufterlassventil sobald der Druck auf ihrer Wasserseite grösser ist als auf der Luftseite; dieser Druckunterschied kann sowohl durch Zunahme der Tauchtiefe als auch durch eine Inspirationsbewegung des Tauchers entstehen. Ein Auslassventil gibt die Luft ins Wasser ab, wenn der Luftdruck innen höher ist als der Wasserdruck aus-

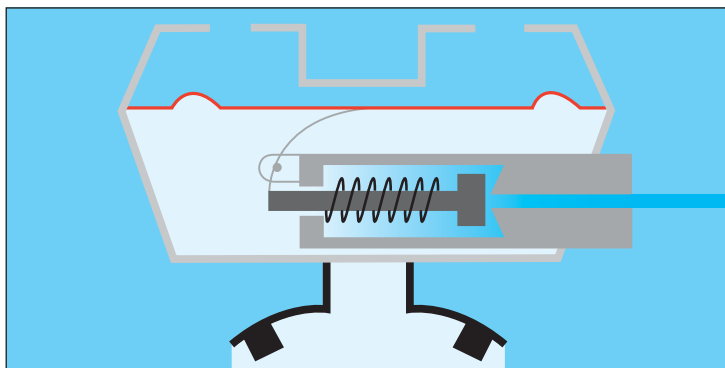


Abbildung 5a Stark vereinfachter Querschnitt durch einen Lungenautomaten/Atemregler der 2. Stufe. Durch Einatmen über das Mundstück (schwarz) sinkt der Druck im Inneren des Reglers und die Membran (rot) wird eingedrückt. Der mit ihr verbundene Kipphebel öffnet ein Ventil, welches so lange Atemgas (dunkelblau) einströmen lässt, bis Innendruck und äusserer Wasserdruck ausgeglichen sind. Die Ausatmung erfolgt über ein separates Ventil direkt ins Wasser (in der Skizze nicht abgebildet).

Bild: modifiziert nach W. Behnmüller, Salzburg

Abbildung 5b Beispiel eines Lungenautomaten/Atemreglers (2. Stufe) wie er heute verwendet wird. Atemgaszufuhr über einen Schlauch (Ansatz durch dunkelblauen Pfeil markiert). Ausatmungsöffnung an der gegenüberliegenden Seite unten (hellblauer Pfeil), Mundstück hinten.

Bild: Fa. Scubapro

Weil der Flaschendruck normalerweise viel höher ist als der tiefenabhängige Umgebungsdruck, sind zwei Druckreduzierstufen erforderlich. Man spricht deshalb auch von einem zweistufigen Lungenautomaten, bei welchem eine erste Stufe den Flaschendruck auf einen mittleren Druck reduziert, der rund 8 bar über dem Umgebungsdruck des Tauchers liegt. Diese erste Stufe ist direkt an der Flaschenöffnung montiert. Die zweite Stufe reduziert den Mitteldruck weiter, so dass Atemgas geliefert wird, das in jeder Tiefe genau dem Umgebungsdruck entspricht. Diese zweite Stufe ist direkt ins Mundstück integriert, wird also vor dem Gesicht getragen. Die zweistufige Bauart hat gegenüber der heute nicht mehr verwendeten einstufigen den Vorteil, dass der für die Öffnung des Ventils am Mundstück erforderliche Negativdruck (Ansprechdruck) gering ist, was das Atmen des Tauchers erheblich erleichtert. Dafür strömt die Ausatemluft unmittelbar im Mundbereich ab, so dass ein Blasenabweiser dafür sorgen muss, dass diese das Gesichtsfeld weniger stören.

Zu beachten ist, dass die Expansion der komprimierten Luft, vor allem nach der ersten Stufe, zu einer massiven Abkühlung der Ventile führen kann, derart, dass diese in mehr oder weniger geöffneter Stellung einfrieren. Man spricht dann von «Abblasen» des Lungenautomaten. Die Luft strömt dabei mit erheblichem Lärm ab, das Mundstück kann dem Taucher aus dem Mund gerissen und hin und her geschlagen werden. Dadurch wird der Luftvorrat innert weniger Minuten aufgebraucht, was bei Unerfahrenheit rasch zu Panik führt. Auch Verschmutzungen oder Rost können die Funktion des Lungenautomaten erheblich beeinträchtigen. Um solchen und anderen Eventualitäten zuvorzukommen, führt man beim Tauchen in der Regel zwei voneinander unabhängige Lungenautomaten mit sich (Reservelungenautomat, sog. Oktopus). Für den Notfall lernt jeder Taucher ausserdem die sogenannte Wechselatmung, bei welcher zwei Taucher abwechselungsweise aus dem gleichen Lungenautomaten atmen, indem sie diesen hin und her reichen. Durch Drücken auf die Gummimembran kann der Taucher das Mundstück mit Luft durchblasen und so allenfalls eingedrungenes Wasser daraus entfernen.

Scuba-Tauchen wird klassischerweise mit Pressluft durchgeführt. Seit rund zehn Jahren kommt zunehmend mit O_2 angereicherte Luft, sogenanntes «Nitrox» oder englisch «oxygen enriched air (OEA)» beziehungsweise «enriched air nitrox (EAN)» zum Einsatz. Dies ist im Berufstauchen vielerorts Standard geworden. Man spricht beispielsweise von Nitrox 32 und meint damit ein Gemisch, das 32 % O_2 enthält, also nicht nur 21 % wie die normale Luft. Nitrox 40 würde demnach 40 % Sauerstoff und 60 % Stickstoff enthalten und so weiter. Nitrox hat im Vergleich zu Pressluft den Vorteil, dass in einer gegebenen Tiefe vom Körper weniger Stickstoff aufgenommen wird als bei Pressluftatmung. Dies vermindert das Risiko einer Dekompressionskrankheit, vor allem wenn gleichzeitig nach den für normale Atemluft geltenden Regeln dekomprimiert wird (vgl. Kapitel C 3).



Abbildung 6a Moderner Berufstaucher: Für Bau- und Montagearbeiten unter Wasser ausgerüstet mit robustem «Trockentauchanzug», Glas- und oder Karbonfaser laminiertem Helm, integrierter Atemmaske und Sprechverbindung sowie aufgeschraubter Beleuchtung. Schlauchversorgt (Pfeil) von der Oberfläche aus. Hilfspersonal ist unumgänglich.

Bild: Arbeitsinspektion Österreich



Abbildung 6b Berufstaucher beim Unterwasserschweissen. Fast alle Bau- und Montagetechniken, die über Wasser zum Einsatz kommen, können auch unter Wasser verwendet werden.

Bild: Commercial Diving Academy, Jacksonville FL/USA



Abbildung 6c Schalwand aus Stahl für das Betonieren eines Brückenpfeilerfundamentes. Einstieg des Tauchers zur Befestigung der unter Wasser zu legenden Armierungseisen. Der Taucher wird von der Oberfläche aus schlauchversorgt. Auf dem Rücken trägt er für den Notfall eine Atemgasreserve.

Bild: Fa. Pro DS, Hergiswil

1.6. Technisches Tauchen und Tauchen mit Kreislaufgeräten sowie Gasgemischen

Das technische Tauchen oder TecDiving stellt eine Erweiterung des klassischen Flaschentauchens im oben geschilderten Sinne dar. Die Technologie wurde weitgehend von der Berufstaucherei in grösseren Tiefen übernommen (siehe Kapitel 1.7.). Anstelle von Luft werden ein oder mehrere Atemgasgemische verwendet und zum Teil in separaten Flaschen mitgeführt, derart, dass in verschiedenen Tiefen von einer Mischung auf

die andere umgestellt werden kann. Verwendet werden Heliox und vor allem Trimix. Während Heliox eine reine Sauerstoff-Helium Mischung mit einem O_2 -Gehalt von 21% und weniger darstellt, enthält Trimix in Abhängigkeit des vorgesehenen Tiefenbereiches zusätzlich einen unterschiedlichen Stickstoffanteil. Damit lassen sich grössere Tiefen als mit Luft erreichen. Die Ausrüstung ist beim technischen Tauchen im Vergleich zum normalen Presslufttauchen komplexer, voluminöser und schwieriger zu handhaben. TecDiving sollte deshalb sehr erfahrenen und speziell dafür ausgebildeten Tauchern vorbehalten bleiben (Abb. 7b).

Unabhängig vom technischen Tauchen aber auch in Kombination mit diesem können sogenannte Kreislaufgeräte oder Rebreather eingesetzt werden. Dabei handelt es sich um Tauchgeräte, bei denen das ausgeatmete Gas über einen Absorber aus Atemkalk geleitet wird, welcher das abgegebene CO_2 eliminiert. Die verbleibende Ausatemluft gelangt in ein ins Gerät eingebautes Reservoir – eine Art Aussenlunge – zurück, wo im Prinzip lediglich die Menge des verbrauchten Sauerstoffes ersetzt wird. Aus diesem Reservoir wird das aufbereitete Gas dann wieder eingeatmet. Bei Be-



Abbildung 7a Sporttaucherin und Sporttaucher mit üblicher SCUBA Ausrüstung. 2. Stufe des Lungenautomaten vor dem Mund erkennbar. Beim Tauchen in warmen Gewässern kann auf eine Kopfhaube und allenfalls auf Anzüge mit langen Ärmeln und Beinen verzichtet werden.

Bild: age photostock

nützung eines Rebreathers vom geschlossenen Typ entstehen somit keine Blasen durch die Ausatemluft. Derartige Geräte sind für Beobachtungen und das Fotografieren der Tier- und Pflanzenwelt unter Wasser aber auch für militärische Zwecke geeignet. Rebreather verfügen über eine fein-regulierte, heute meist elektronische Steuerung des Frischgaszuflusses. Kommt es zu einer Fehlfunktion oder Fehlmanipulation, so kann das für den Taucher gefährlich werden. Mindestens der Sauerstoffpartialdruck des Atemgases muss deshalb von zwei im Gerät eingebauten voneinander unabhängigen Systemen überwacht werden.



Abbildung 7b TecDiver: Die verschiedenen Atemgase müssen in separaten Druckflaschen mitgeführt werden. Erforderlich sind ausserdem verschiedene Anzeige- und Überwachungs- sowie Reservegeräte.

Bild: iq images

1.7. Sättigungstauchen

Je grösser und je länger die Druckwirkung ist, die zur Lösung von Gasen in den Körperflüssigkeiten und Geweben führt, desto langsamer muss die anschliessende Druckentlastung vor sich gehen, damit sich keine Blasen bilden. Nach Tauchgängen in mehr als 150 m Tiefe, wie sie beispielsweise bei der Erdölgewinnung im Meer das heisst beim sogenannten «offshore Tauchen» üblich sind, dauert eine Dekompression einige Tage. Um diese wirtschaftlich nicht verwertbare Zeit im Verhältnis zur eigentlichen Arbeitszeit möglichst zu verkürzen, bleiben die Taucher während mehrerer Wochen unter Überdruck auf den Versorgungsinseln. Sie werden in Tauchkammern in die Tiefe hinunter gelassen. Dort steigen sie ins Wasser aus, wo sie – schlauchversorgt – während mehreren Stunden ihre Arbeit verrichten. Anschliessend kehren sie in die Tauchkammer zurück, die sie auf die Bohrinsel oder das Schiffsdeck hisst, wo sie in die Wohn-Druckkammer umsteigen. Unabhängig von der Taucheinsatzdauer bleiben ihre Körperflüssigkeiten während der ganzen Zeit mit Gas gesättigt. Erst am Ende der Arbeitsperiode, die bis zu 14 Tage oder mehr dauern kann, findet die Dekompression statt, sodass die Taucher bis zu einem Monat unter Überdruck leben (vgl. Kapitel B 2.5.)

2. Der Aufenthalt in mit Druckluft gefüllten Räumen

2.1. Die Taucherglocke

Die Taucherglocke ist im Prinzip ein unten offenes, und mit Zusatzgewichten beschwertes Gefäß, in welchem die Luft beim Eintauchen ins Wasser gefangen bleibt. Taucherglocken können von einem Schiff aus ins Wasser gelassen und von Deck aus über eine Schlauchleitung versorgt werden. Zusätzlich hineingepumpte Luft ermöglicht es, den Druck in der Taucherglocke dem jeweiligen Umgebungsdruck des Wassers anzupassen, so dass der Innenraum der Glocke trocken bleibt. Die Taucherglocke dient den Tauchern als Zwischenstation zwischen Unterwasserarbeitsplatz und Begleitschiff und setzt eine entsprechend ausgerüstete Equipe voraus.

2.2. Der Caisson oder Senkkasten

Ein Caisson ist ebenfalls ein unten offener Kasten, meist aus Stahl oder Eisenbeton, der auf den Boden eines Gewässers gesenkt wird und vom Prinzip her einer Taucherglocke entspricht (Abb. 8). Das Wasser im Kasten wird durch hineingepumpte Druckluft verdrängt. Vom Dach des Caissons führt ein luftdichtes Rohr in die Schleuse über der Wasseroberfläche. Die Caissonarbeiter steigen im Trockenen durch Schleuse und Zustiegsschacht auf den Grund des Gewässers ab, wo sie diesen losschaufeln, -baggern

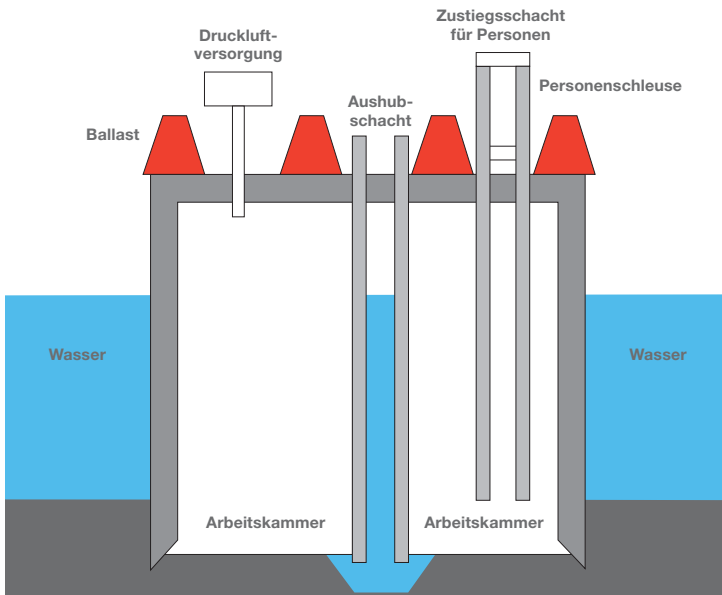


Abbildung 8 Schematische Darstellung eines Caissons: Die über eine Schleuse mit Zustiegsschacht erreichbare und nach unten offene Arbeitskammer ist mit Druckluft gefüllt, so dass kein Wasser in die Kammer dringen kann. Der Aushub wird über einen zusätzlichen Schacht entfernt. Grosse Gewichte (rot) verhindern das Kippen des Caissons.

Bild: modifiziert nach Wikipedia

oder -sprengen. Das abgebaute Material wird über eine Materialschleuse ins Freie befördert. Mit dem Ausschachten des Grundes sinkt der Caisson immer tiefer, bis er den gewünschten Stand erreicht hat. Weil der Wasserdruck mit zunehmender Tiefe zunimmt, muss auch der Luftdruck innerhalb des Caissons in gleichem Mass gesteigert werden, damit kein Wasser in ihn eindringen kann.

Um die Stabilität des Caissons zu gewährleisten, muss er ausreichend schwer konstruiert sein, weil er sonst durch Auftriebskräfte angehoben und gekippt werden könnte.

Caissons werden für Unterwasserarbeiten, vor allem für Foundationen von Brückenpfeilern, Hafenanlagen sowie für Kraftwerksbauten und dergleichen genutzt.

2.3. Der Hydroschildvortrieb

Heute werden die meisten Tunnels maschinell vorgetrieben und nicht gesprengt. Man setzt dazu Tunnelbohrmaschinen (TBM) ein, die mit Hilfe eines sogenannten Schneid- oder Fräsrades den gesamten Tunnelquerschnitt – auch in weichem, wenig stabilem Untergrund – auf einmal auffahren können. Aufwändige Zusatzinstallationen auf dem sogenannten Nachläufer der TBM ermöglichen den Abtransport des Aushubes in Richtung Tunnelportal sowie den gleichzeitigen Einbau von Stützelementen, sogenannten Tübbing, die den Tunnel gegen Einstürze sowie Niederbrüche sichern und das allfällige Eindringen von Wasser verhindern, insbesondere wenn lockeres Material durchfahren werden muss.

Um die noch nicht mit Tübbing ausgekleidete Frontpartie des Tunnels zu sichern, setzt man einen sogenannten Schild ein, das heisst ein in der Längsachse hydraulisch verschiebbares Stahlrohr, welches bezüglich seines Querschnittes dem Tunnelprofil entspricht und sowohl zur Tunnelbrust hin als auch in Richtung des Portals offen ist.

Bewegt sich die TBM in einer Grundwasser führenden Schicht, so wird der Schild zur Portalseite hin mit einer luftdichten Stahlwand (Schottwand) versehen. Der entgegengesetzte, in Richtung Tunnelbrust liegende Bereich mit dem Schneidrad, wird mit Pressluft in dem Masse unter Überdruck gesetzt wie er dem Grundwasserdruck am Boden des Tunnels entspricht. Auf diese Weise kann das Eindringen von Grundwasser verhindert werden. Gleichzeitig ist die Tunnelbrust gegen Niederbrüche von lockerem Material gesichert.

Damit die Druckluft nicht unkontrolliert durch Lecks in den Untergrund entweichen kann, wird der Vortriebsbereich derart mit Bentonit teilgefüllt, dass lediglich im Scheitelbereich des zu bohrenden Tunnels ein sogenanntes Druckluftpolster verbleibt. Bentonit ist ein feiner Tonschlamm, in welchem sich das Schneidrad bewegt. Die Tunnelbrust sowie die nicht durch

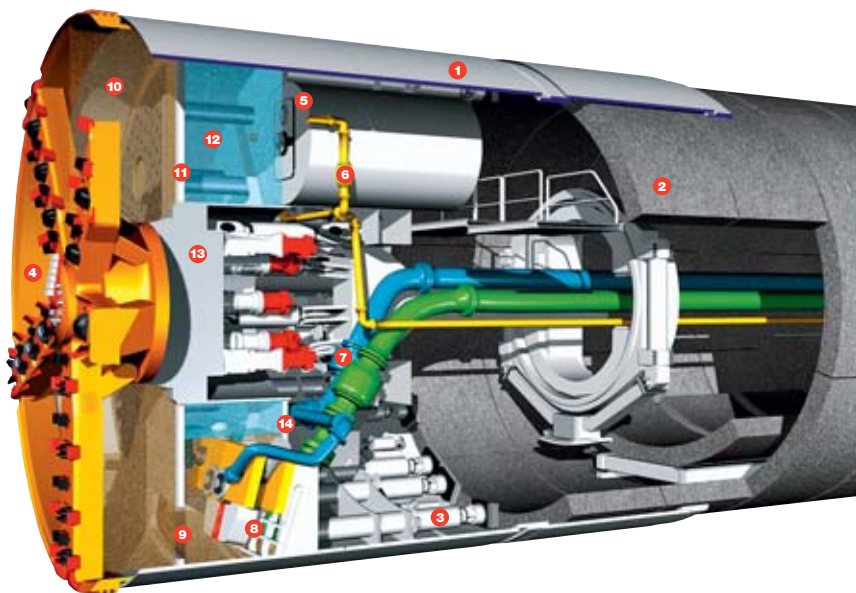


Abbildung 9a Tunnelbohrmaschine (TBM) im Hydroschildvortrieb

1 Schild | 2 Tübbinge (Hohlraumsicherung) | 3 Vortriebspressen | 4 Schneidrad mit Abbaulwerkzeugen | 5 Personenschleuse | 6 Druckluftversorgung | 7 Stützflüssigkeitskreislauf | 8 Steinbrecher mit Ansaugrechen | 9 Tauchwandöffnung | 10 Stützflüssigkeit im Abbauraum (braun) | 11 Tauchwand | 12 Druckluftpolster (hellblau) hinter Tauchwand | 13 Hauptantrieb (Schneidrad) | 14 Schottwand



Abbildung 9b Ansicht von vorne gegen das Schneidrad, daran anschliessend weiss gestrichen der Schild und dahinter Teile des Nachläufers (unter Kran), welcher die Installationen für die Maschine und den Rohausbau des Tunnels enthält.

Bilder: Fa. Herrenknecht AG, Schwanau, Deutschland

den Schild abgedeckten Wandpartien werden auf diese Weise mit Bentonit beaufschlagt, was eine luftabdichtende Wirkung hat. Das abgebaute Material vermischt sich mit dem Bentonit, wird mit diesem nach rückwärts aus dem Druckbereich hinausgepumpt, aufbereitet und anschliessend wieder in den Abbauraum zurückbefördert (Abb. 9a und 9b).

Auch wenn der Abbauvorgang automatisch abläuft, so muss der Abbauraum dennoch regelmässig für Wartungs- und Entspannarbeiten, also für Sondereinsätze, betreten werden. Zu diesem Zweck wird der Bentonitpiegel unter Aufrechterhaltung des Überdruckes abgesenkt, so dass man den Abbauraum über eine Schleuse im Firstbereich des Tunnels betreten kann (Abb. 9c). Während für Caissonarbeiten regelmässige und in der Regel vollschichtige Druckluftexpositionen der Arbeitnehmenden erforderlich sind, ist dies bei Verwendung einer TBM mit Hydroschild nur für die genannten Sondereinsätze notwendig.

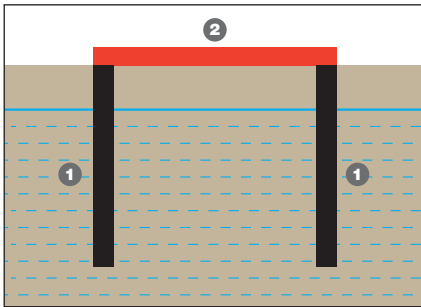


Abbildung 9c Bei abgesenktem Bentonitpiegel werden unter Druckluft von bis zu 2.5 bar Kontrollarbeiten am Schneidrad durchgeführt.

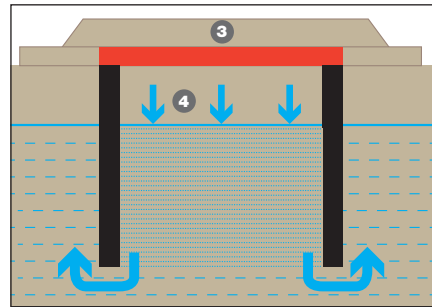
Bild: PraderLosinger SA

2.4. Die Deckelbauweise

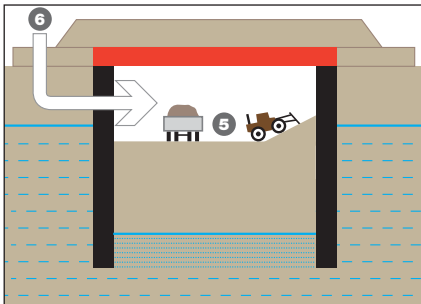
Für ausgedehnte Bauwerke, die in geringer Tiefe und lockerem Baugrund erstellt werden müssen – beispielsweise für die Untertageverlegung von Verkehrswegen – ist der Einsatz einer Tunnelbohrmaschine weniger geeignet. Als mögliche Alternative bietet sich die sogenannte Deckelbauweise an. Sie besteht darin, dass längs des zu erstellenden Streckenabschnittes seitliche Schlitzwände in den Boden vorgetrieben und anschliessend mit einem Betondeckel überdacht werden, während die Unterseite des so entstandenen Kanales offen bleibt. In einem nächsten Schritt muss das Grundwasser führende Material im Kanalinneren abgebaut und anschliessend die Bodenplatte betoniert werden. Dazu muss der Kanal gegen die beiden Portale hin abgedichtet und unter Überdruck gesetzt werden. Das Kanalinnere kann deshalb zum Abbau und Aushub des Materials nur noch über Schleusen betreten werden. Wegen der eher geringen Tiefe dieser Bauwerke sind die erforderlichen Überdrücke verhältnismässig niedrig. Dafür erstrecken sie sich über ein sehr grosses Volumen und die Belegschaft ist während der gesamten Schicht exponiert (Abb. 10).



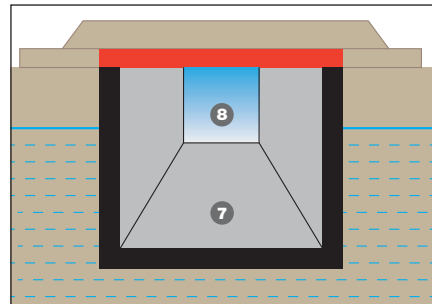
- 1 Erstellen von Schlitzwänden (schwarz) entlang der Baustrecke
- 2 Erstellen der Betonüberdachung (rot). Das Bauwerk ragt in die Grundwasser führende Schicht hinein (blau gestrichelt)



- 3 Beschweren des Betondeckels mit Ballast
- 4 Herauspressen des eingeschlossenen Grundwassers (blau punktierte Zone) mittels Druckluft



- 5 Abbau des eingeschlossenen Erdreiches unter Überdruck
- 6 Betreten des Abbaurumes über eine Schleuse



- 7 Nach Beendigung des Aushubes Betonieren der Bodenplatte
- 8 Abschluss: Ablassen des Überdruckes. Verbinden der beiden Tunnelportale mit der Oberfläche (Ein- und Ausfahrtsrampen)

Abbildung 10 Deckelbauweise (schematische Profildarstellung)

Bild: modifiziert nach A. Walther, Starnberg, Deutschland

2.5. Unterwasserhäuser und Habitats

Langdauernde Tauch- und Überdruckarbeiten lassen sich oft nur mit Hilfe der Sättigungstechnik bewerkstelligen (vgl. Kapitel B 1.7 «Sättigungstauen»). Die Taucher beziehungsweise Überdruckarbeiter wohnen während dieser Zeit in einem sogenannten Habitat, das heisst einem geschlossenen und lediglich via Schleusen zu betretenden Raumkomplex. Dieser kann in der Art einer Druckkammer an Deck von Schiffen oder auf Baustellen eingerichtet werden. Druckkammersysteme dieser Art erfordern eine aufwändige Steuerung und Regelung des Überdruckes und der klimatischen Bedingungen. Dabei sind künstliche Gasmischungen erforderlich, die grösstenteils Helium enthalten, weil Sauerstoff und vor allem Stickstoff in ihrem natürlichen, das heisst der Luft entsprechenden Mischungsverhältnis bei Drücken von deutlich über 5 bar toxisch, ja lebensgefährlich wären. Die Dekompression, das heisst die stufenweise Rückkehr aus einem Habitat in die normale Atmosphäre mit Luft, kann Stunden bis Tage in Anspruch nehmen. Habitats werden gelegentlich auch für länger dauernde oft meeresbiologische Projekte im Wasser verwendet, dann aber meist in lediglich 5–15 m Tiefe.

2.6. Druckluftschleusen

Das Ein- und Ausschleusen (Abb. 11) erfolgt in einer eigens dafür vorgesehenen Kammer oder Druckluftschleuse. Während der Kompression und der Dekompression, die von aussen durch den Schleusenwart gesteuert werden, müssen die Arbeiter für einen regelmässigen Druckausgleich in den Nasenneben- und Paukenhöhlen sorgen. Ist der Arbeitsdruck erreicht, wird die zur Arbeitskammer gerichtete Türe geöffnet und die Kammer kann betreten werden.



Abbildung 11 Dekompression mit Sauerstoff in der Personenschleuse einer TBM.

Bild: PraderLosinger SA

Beim Ausschleusen läuft der gegenteilige Vorgang ab, wobei dieser aus den im nächsten Kapitel genannten Gründen unter Beachtung strenger Regeln und wesentlich langsamer als das Einschleusen erfolgen muss. Aus Sicherheits- und Praktikabilitätsgründen sind Druckluftschleusen zwei- ja sogar dreiteilig, das heisst sie bestehen im Prinzip aus zwei bis drei hintereinander geschalteten Einzelschleusen, die unabhängig voneinander unter Druck gesetzt werden können. Das ermöglicht das mehrzeitige Ein- oder Ausschleusen von Personen bei gleichzeitigem Freihalten einer Schleusenkammer für einen allfälligen notfallmässigen Rückzug aus der Arbeitskammer.





C

Wirkungsweisen und Krankheitsbilder



1. Die Wirkung von Druckunterschieden auf luftthaltige Körperhöhlen

Der von aussen durch Luft oder Wasser auf den Körper wirkende Druck pflanzt sich durch alle Gewebe und Organe fort. Ein in einem weichen Hohlorgan eingeschlossenes Gasvolumen, zum Beispiel im Darm, wird dabei nach dem Gesetz von Boyle und Mariotte mit zunehmendem Druck verkleinert, während es sich bei abnehmendem Druck vergrössert; der Druck innerhalb des Hohlraumes bleibt dabei gleich wie derjenige in seiner Umgebung (Abb. 12). Ist der mit Gas gefüllte Hohlraum von Knochen umschlossen, das heisst nicht komprimierbar und ohne Verbindung mit der Umgebung, so kann sich der Aussendruck nicht in sein Inneres fortsetzen und es entsteht ein relativer Unterdruck. Dieser Unterdruck kann Schleimhauthyperämie, Oedem, Exsudation oder gar eine Blutung erzeugen und nicht knöcherne Wandteile zerreissen: Man spricht von einem negativen Barotrauma oder Englisch «squeeze».

Kann die beim Auftauchen sich ausdehnende Luft aus den Körperhöhlen nicht entweichen, schädigt sie diese, indem sie sie komprimiert oder deren Wand zerreisst: Es entsteht ein positives Barotrauma.

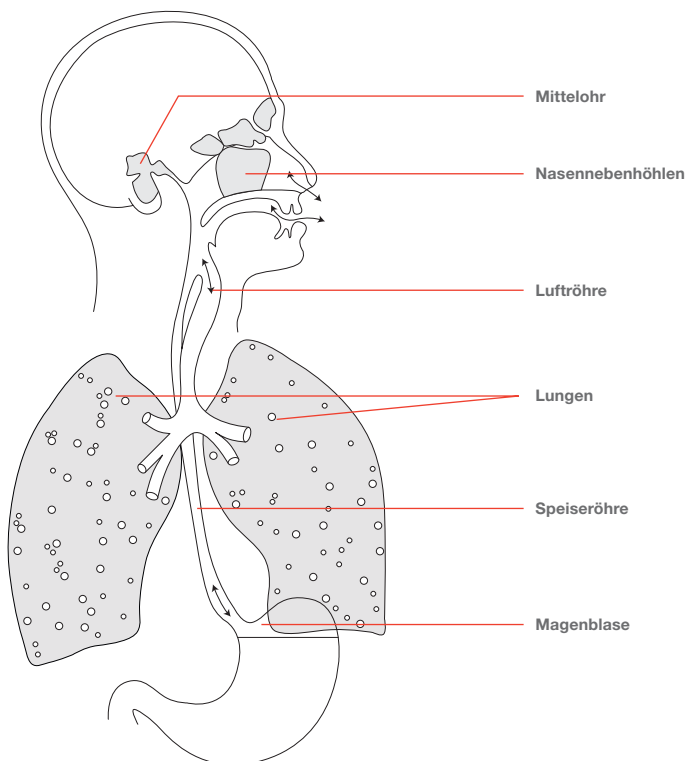


Abbildung 12 Luftthaltige Hohlräume des Körpers

1.1. Das Barotrauma im Bereich des Kopfes

1.1.1. Das Barotrauma des äusseren Gehörganges

Wenn der äussere Gehörgang durch einen Ceruminalpfropf, durch einen Stöpsel aus Kunststoff oder Watte oder etwas Ähnlichem total verschlossen ist, das Mittelohr aber durch die Eustachische Röhre mit den Atemwegen verbunden bleibt, entwickelt sich beim Abtauchen im abgeschlossenen Gehörgangsteil ein negatives Barotrauma mit Kongestion und Blutung in das Epithel und schliesslich Perforation des Trommelfelles nach aussen. Kommt der Verschluss erst während des Aufstieges zustande, zum Beispiel durch Quellen von Cerumen, dann entwickelt sich ein positives Barotrauma und das Trommelfell perforiert nach innen.

Beim Tauchen sowie beim Ein- und Ausschleusen in einer Druckkammer darf also der Gehörgang in keiner Weise verstopft sein.

Die erhöhte Spannung des Trommelfelles vermehrt den Widerstand des schallübertragenden Apparates; stärkere Spannung erzeugt stechende Schmerzen bis hin zu einer Ruptur des Trommelfelles, welche mit einem kurzen, scharfen Schmerz einhergeht, nach welchem das Stechen plötzlich nachlässt.

1.1.3. Das Barotrauma des Mittelohres

Beim Abtauchen, das heisst bei Druckzunahme, müssen in der Regel die Tuben (Eustachische Röhren) aktiv geöffnet werden, damit der Druckausgleich zwischen Paukenhöhle und dem Nasen-Rachenraum erfolgen kann. Bis zu einem Druckunterschied von 0,1 bar, also zirka 1 m Wassersäule, genügt dazu Schlucken oder ein Vorschieben des Unterkiefers. Bei höheren Druckdifferenzen wird der Ausgleich schwieriger. Es ist ein Pressmanöver nach Valsalva oder Toynbee nötig (Valsalva: Kräftiger Ausatemversuch bei gleichzeitig zugehaltener Nase und geschlossenem Mund; Toynbee: Schlucken bei gleichzeitig zugehaltener Nase).

Beim Auftauchen genügt schon ein leichter Überdruck im Mittelohr, um die Tuben passiv zu öffnen, so dass ein Barotrauma des Mittelohres seltener ist als beim Abtauchen.

Entzündliche Schleimhautschwellungen, zum Beispiel bei einem banalen Schnupfen oder Narben nach Entfernung der Rachenmandeln, können das Öffnen der Tuben erschweren, so dass vermehrt mit negativen Barotraumatosen des Mittelohres zu rechnen ist. Steigt der Aussendruck langsam, kann zum Ausgleich des relativen Unterdruckes blutige Flüssigkeit in die Paukenhöhle austreten. Umgekehrt besteht beim Auftauchen das Risiko eines positiven Barotraumata, weil die von der Flüssigkeit komprimierte Luft nicht oder nur unzureichend über die Eustachische Röhre abgegeben werden kann.

Es ist deshalb zu beachten, dass beim Tauchen mit einer banalen Erkältung unter Umständen Lebensgefahr besteht!

Das negative Barotrauma des Mittelohres lässt sich an einer Rötung und Einziehung des Trommelfelles erkennen. In schwereren Fällen entstehen auch Blutungen im Trommelfell selber. Blutungen im Mittelohr sind bei der Gehörgangsspiegelung – oft als dunkle Flüssigkeitsspiegel – zu sehen, welche das Trommelfell nach aussen drängen (Abb. 13a–d).

Wird ohne genügenden Druckausgleich zu rasch und zu tief abgetaucht, so kann dies zum Platzen des Trommelfells nach Innen führen. Das plötzlich eintretende kalte Wasser reizt dabei das Labyrinth und kann Schwindel, Nausea und Erbrechen hervorrufen, was für den Taucher lebensgefährlich ist. Ein Trommelfellriss mit Blutung ist bei der ärztlichen Untersuchung unschwer erkennbar.

Unsymmetrischer passiver Druckausgleich der Paukenhöhlen beim Auftauchen kann ebenfalls zu Schwindel mit all seinen Folgeerscheinungen führen. Man spricht in diesen Fällen von alternobarem Schwindel. Dieser ist nur kurzdauernd und bei Kenntnis der Situation ungefährlich.



Abbildung 13a Gelblich seröser Erguss mit Luftblasen in der Paukenhöhle durch Minderbelüftung des Mittelohres auf Grund fehlenden Druckausgleiches (leichtes Barotrauma des Mittelohres)



Abbildung 13b Diskrete hämorrhagische Suffusionen im Trommelfell. (Leichtes bis mässiges Barotrauma des Mittelohres)

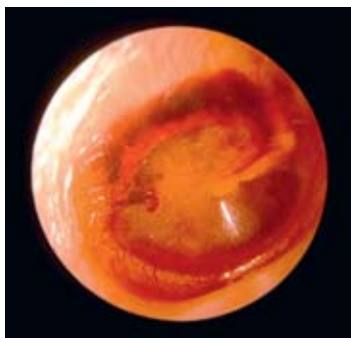


Abbildung 13c Trommelfell mit deutlichen interstitiellen Blutungen im Randbereich (Deutliches Barotrauma des Mittelohres mit Trommelfellverletzung).



Abbildung 13d Ausgeprägte hämorrhagische Suffusion des Trommelfelles, kombiniert mit blutigem Erguss in der Paukenhöhle (ausgeprägtes Barotrauma des Mittelohres).

Bilder: Hawke Library, Toronto, Kanada

1.1.4. Das Barotrauma des Mittelohres mit Schädigung des Innenohres

Ein Überdruck im Mittelohr kann zu Störungen des Innenohres mit Hörverlust, besonders im Bereich von 4000 Hz führen, vor allem wenn der Steigbügel stark in das ovale Fenster gepresst wird. Die so entstehende Druckerhöhung im Innenohr kann dieses schädigen, besonders wenn sie ruckartig erfolgt.

An Stelle des Trommelfelles und des ovalen Fensters kann auch das runde Fenster die schwächste Stelle zwischen Mittel- und Innenohr sein und durch starken Überdruck einreißen; dabei entstehen schwere Gleichgewichts- und Hörstörungen. Man spricht von einer Ruptur des runden Fensters. Diese Schädigung exakt zu diagnostizieren ist allerdings schwierig.

1.1.5. Das Barotrauma der Nasennebenhöhlen

Wenn die Verbindung der Nebenhöhlen (NH) zur Nasenhöhle durch eine entzündliche Schwellung, durch Polypen oder Schleimhaut verschlossen ist, entsteht beim Abtauchen ein negatives Barotrauma mit Anschwellung der Nebenhöhenschleimhaut sowie Austritt von Gewebeflüssigkeit und Blut, bis die Luft in den NH auf den Umgebungsdruck komprimiert ist. Öffnet sich die Verbindung zum Nasenraum wieder, fließt das blutige Sekret ab. Es entsteht der Eindruck von Nasenbluten.

Beim Auftauchen kann die Ausdehnung der gefangenen Luft zu einem positiven Barotrauma der NH führen. In seltenen Fällen sind sogar Mikrofrakturen der Schädelbasis mit Lufteintritt ins Cranium beobachtet worden. Das positive und negative Barotrauma der Kieferhöhlen führt zu Völlegefühl und Schmerzen im Bereiche des Oberkiefers, zu Schmerzen in den oberen Zähnen sowie gelegentlich zu Parästhesien im Bereich der Infraorbitalnerven.

Ein Barotrauma der Stirnhöhlen erzeugt Druckgefühl und dumpfen Schmerz in der Gegend von Stirne und Nasenwurzel.

1.1.6. Das Barotrauma der Zähne

Luft, die in kariösen Zähnen oder schlecht sitzendem Zahnersatz eingeschlossen ist, kann sich beim Auftauchen ausdehnen und unter Umständen zu einem schmerzhaften positiven Barotrauma führen. Dieses «Zahnweh» verschwindet bei Rekompensation. Als Folge eines positiven Barotraumata können auch Zahnstücke, Füllungen oder Kronen abgesprengt werden. Auch eingeschmolzene Zahnwurzelgranulome können zum Barotrauma im Kiefer führen. Angesichts des heutzutage besseren Gebisszustandes der Bevölkerung sind jedoch Barotraumata der Zähne seltener geworden.

1.2. Das Barotrauma der Verdauungsorgane

Während des Tauchens oder des Aufenthaltes im Überdruck können Gasblasen im Verdauungstrakt entstehen oder vergrößert werden, zum Beispiel im Magen durch Luftschlucken oder Ausperlen kohlenensäurehaltiger Getränke oder im Dickdarm durch Fäulnis. Beim Auftauchen oder Ausschleusen dehnen sich die Blasen aus, so dass bei ungenügendem Entweichen schmerzhafte, bisweilen von Übelkeit begleitete Darmkrämpfe auftreten können, die schlimmstenfalls sogar eine Rekompensation nötig machen. Es sind in diesem Zusammenhang schon Magenrupturen beschrieben worden.

1.3. Das Barotrauma der Haut

Unter den ziemlich steifen Trockenanzügen oder unter schlecht sitzenden Nassanzügen können abgeschlossene Lufträume entstehen, die sich beim Abtauchen nicht dem jeweiligen Druck anpassen. Dabei kann es zu Barotraumatosen der Haut mit streifenartigen Hämatomen kommen. Fleckig streifige Suffusionen oder Veränderungen im Sinne einer cutis marmorata können auch durch Gasembolien beziehungsweise durch lokale Gasblasenbildung und deren Folgeerscheinungen im Gewebe entstehen. (Vgl. Abb. 17, Seite 54)

1.4. Das Barotrauma der Lunge

1.4.1. Das positive Barotrauma der Lunge

Ein Überdruck in der Lunge entsteht, wenn beim Auftauchen die sich ausdehnende Luft nicht ausreichend abströmen kann, sei es aus einem Lungenteil, zum Beispiel infolge einer Bronchitis (air trapping) oder aus den Lungen an sich wegen eines Verschlusses der Stimmritze (Abb. 14).

Während des Auftauchens aus 10 m Tiefe dehnt sich die Luftmenge in der Lunge auf das Doppelte aus; es muss daher ein überschüssiges Volumen von der Grösse der Totkapazität abgeatmet werden. Eine Zunahme des Gasvolumens um 10 % bei voller Inspirationsstellung genügt, um das Lungengewebe zu zerreißen. Taucht man beispielsweise aus 10 m Tiefe an die Oberfläche auf, was bei einer normalen Aufstiegs geschwindigkeit von 10 m/Min. eine Zeit von 6 Sekunden pro Meter ergibt und bleibt die Stimmritze dabei aus irgend einem Grund verschlossen, so droht ein Lungenriss. Barotraumatosen der Lungen ereignen sich deshalb besonders häufig bei Panikaufstiegen und zwar schon aus wenigen Metern Tiefe. Jeder Taucher muss daher lernen, auch ohne Gerät unter ständigem Ablassen von Luft aus grösseren Tiefen aufzusteigen.

Der zentrale Lungenriss: Beim zentralen Lungenriss kann die Luft ins Mediastinum entweichen. Handelt es sich um grössere Gasmengen, entsteht ein Mediastinal- und Hautemphysem, das sich meist zum Hals und Nacken hin über den ganzen Rumpf und sogar den Kopf ausbreiten kann.

Symptome entstehen nur in schwereren Fällen (heisere, blecherne Stimme, Völlegefühl in der Brust, retrosternaler Schmerz, Atemnot, Schluckbeschwerden, bisweilen sogar Schock und Bewusstlosigkeit infolge Einflusstauung). Objektiv zeigen sich Befunde wie die typische knisternde Schwellung der Haut an Hals und Brust, abgeschwächte Herztöne oder ein mit der Herzaktion verbundenes Knistern.

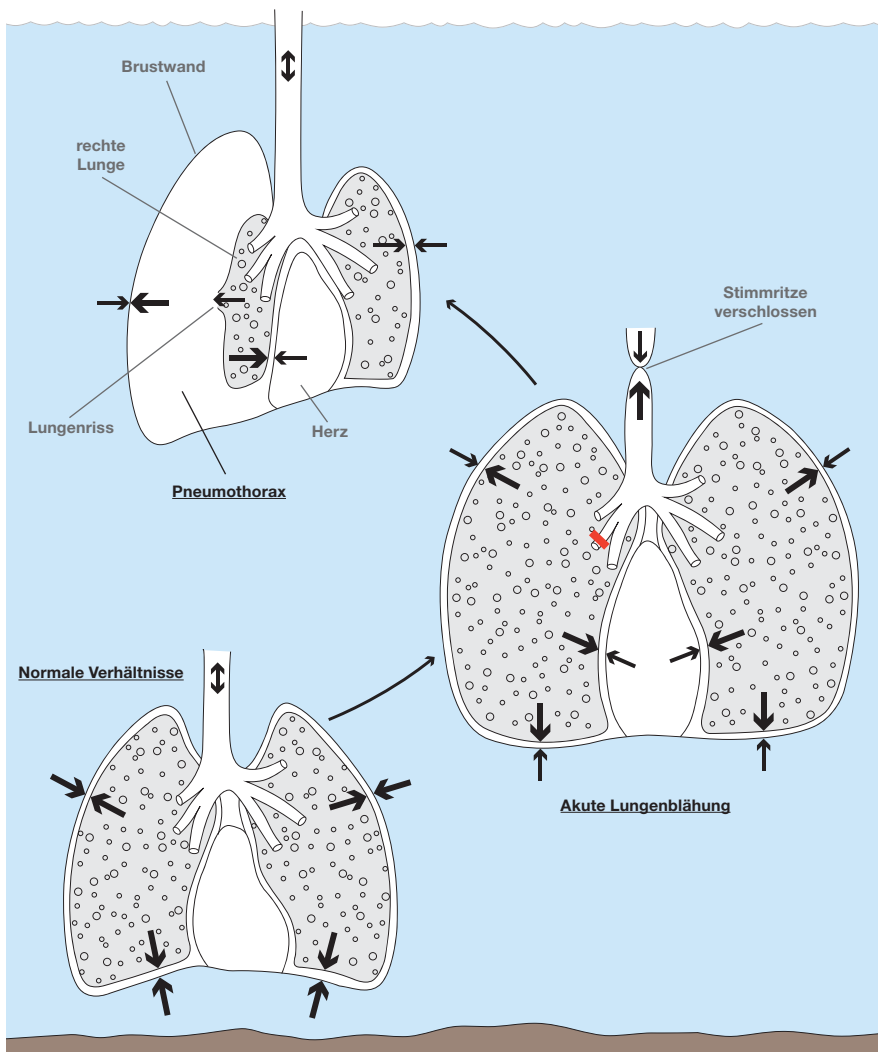


Abbildung 14 Barotrauma der Lunge

Pneumothorax rechts als Folge eines Barotraumas bei beidseitiger Lungenüberblähung wegen Stimmritzenverschlusses. Gleichartiges Geschehen auch bei einseitiger Überblähung durch Verschluss eines Bronchus möglich (roter Strich)

Der periphere Lungenriss: Beim peripheren Lungenriss durch die Pleura visceralis entstehen ein Pneumothorax beziehungsweise ein Spannungspneumothorax, unter Umständen sogar ein Hämato-pneumothorax durch die sich beim Auftauchen ausdehnende Luft im Pleuraraum.

Symptome des Pneumothorax sind plötzlicher, einseitiger Thoraxschmerz, Atemnot und Tachykardie. Bei der Untersuchung finden sich die bekannten klinischen Zeichen wie eingeschränkte Atembewegung der Thoraxwand, hypersonorer Klopfschall und ein abgeschwächtes bis aufgehobenes Atemgeräusch. Radiologisch fällt auf der betroffenen Seite eine fehlende Lungenzeichnung sowie eine Verziehung des Mediastinalschat-tens zur Gegenseite hin auf.

Wenn Alveolen zerreißen, besonders wenn sie im Inneren der Lunge liegen (zentraler Lungenriss), werden häufig Blutgefässe mit eröffnet und Atemgas dringt in sie ein. Erreichen die entstandenen Blasen den grossen Kreislauf, so entstehen arterielle Gasembolien mit entsprechenden Durchblutungsstörungen in allen möglichen Organen, vor allem in Gehirn, Rückenmark und Herzkranzgefässen. Die Symptome dieser Gasembolien werden im Kapitel C Pkt. 3 über die Druckfallkrankheit besprochen.

1.4.2. Das negative Barotrauma der Lunge

Ein negatives Barotrauma der Lunge entsteht, wenn ihr Innendruck kleiner ist als derjenige im übrigen Körper. Der Unterdruck führt zum Übertritt von Blutflüssigkeit in die Alveolen. Das entstehende Lungenödem kann wegen der massiven Behinderung der Sauerstoffaufnahme lebensgefährlich sein.

Folgende Situationen führen zu einem relativen Unterdruck in der Lunge:

Zu tiefes Apnoetauchen: Wenn der Wasserdruck stärker ist als er der Kompression der Lunge auf ihr Residualvolumen entspricht. Wegen der Steifheit des Thorax kann sich das Lungenvolumen nur noch durch starkes Hochdrängen des Zwerchfelles und den thorakalen Blutandrang infolge Saugwirkung geringfügig verkleinern, so dass schliesslich ein negatives Barotrauma eintritt (vgl. Kap. B 1.2.2).

Tauchen mit zu langem Schnorchel: Wenn in einer Tiefe von 50 cm und mehr durch einen Schnorchel geatmet wird (vgl. Kap. B 1.3).

1.4.3. Das Lungenoedem bei Tauchern und Schwimmern

Auf Grund zahlreicher Fallbeobachtungen ist bekannt, dass bei ansonsten gesunden Tauchern und Schwimmern Lungenoedeme auftreten können. Auslösend dürfte am ehesten eine Kombination von synergistisch wirkenden Faktoren sein. Dazu zählen die Immersion mit der durch sie bedingten Blutvolumenverschiebung in Richtung Thorax (Abb. 15), die Kälte und die durch sie ausgelöste periphere Vasokonstriktion sowie eine allgemeine adrenerge Stimulation, sei dies durch körperliche Aktivität oder durch psychischen Stress. Bei raschem Eingreifen und supportiver Behandlung normalisiert sich der pathologische Zustand in kurzer Zeit wieder.

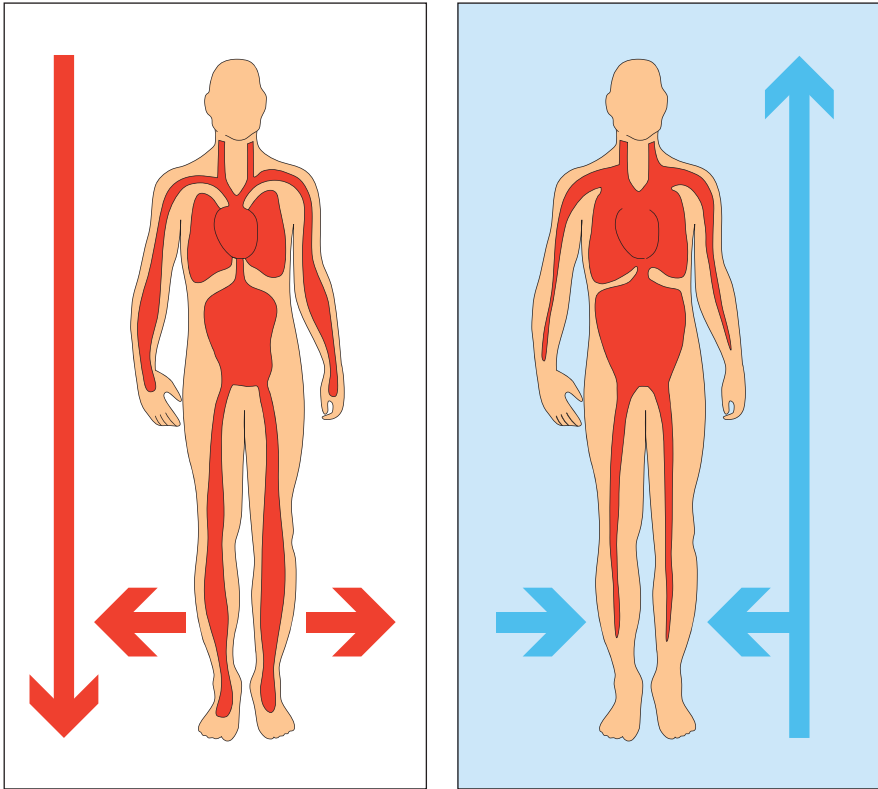


Abbildung 15 Immersionseffekt:

Links die Verhältnisse unter atmosphärischen Bedingungen im Freien. Der hydrostatische Druck im Körperinneren führt zum Versacken von Flüssigkeit in die unteren Extremitäten. Rechts: Verhältnisse beim Eintauchen ins Wasser. Der äussere hydrostatische Druck ist gleich dem inneren, was eine Volumenverschiebung in Richtung Brustorgane zur Folge hat.

Copyright Stephanie Naglschmid/LLVA

2. Die Wirkung von unter erhöhtem Druck im Körper gelösten Gasen

In vitro ist nach dem Gesetz von Henry (Kap. A Pkt. 4) die in einer Flüssigkeit gelöste Menge C eines Gases X proportional dem Partialdruck p dieses Gases an der Oberfläche der Flüssigkeit und proportional einem Löslichkeitskoeffizienten α , d.h. $C_x = p_x \times \alpha_x$.

Mit zunehmender Wassertiefe respektive mit zunehmendem Druck werden grössere Gasmengen im Körper gelöst. Weil die pharmakologische Wirkung eines Stoffes, auch eines gasförmigen, von seiner in den Körper aufgenommenen Menge abhängt, können Gase unter hohem Druck Wirkungen zeigen, die sie unter normalem Atmosphärendruck nicht aufweisen.

2.1. Die Wirkung von Inertgasen

Inerte, das heisst reaktionsträge Gase, welche normalerweise keine chemischen Bindungen mit Zellbestandteilen eingehen, können gleichwohl die Funktion von Nervenzellen beeinflussen und eine narkotische Wirkung erzeugen. Dabei spielt unter anderem die Lipidlöslichkeit der Substanz eine wichtige Rolle (vgl. Kap. A 4, S. 14).

Man nimmt an, dass Inertgase, wenn sie in erhöhter Konzentration in Zellen eindringen, deren Membraneigenschaften verändern beziehungsweise mit Rezeptorproteinen interferieren und dadurch die Wirkung von Neurotransmittern beeinflussen.

2.1.1. Die Stickstoffnarkose, der Tiefenrausch

Wer mit Pressluft taucht, kann mit zunehmender Tiefe in eine Euphorie mit gehobener Stimmung, Kritiklosigkeit, verlangsamtem Denken und Störung der neuromuskulären Koordination geraten, genau wie bei einem beginnenden Alkoholrausch. Bisweilen beginnt der «Tiefenrausch» auch mit unbegründeten Angst- und Schreckreaktionen. Eine klare Tiefenlimite lässt sich für den Tiefenrausch nicht definieren. Allgemein geht man aber davon aus, dass ab 40 Metern in zunehmenden Masse mit diesem Phänomen zu rechnen ist. Von 60 m Tiefe an wird jede psychische und physische Leistung absolut unzuverlässig und ab 100 bis 150 m muss mit Bewusstlosigkeit gerechnet werden. Nimmt der Stickstoff-Partialdruck durch Aufsteigen in geringere Tiefe ab, verschwinden alle diese Symptome wieder. Bei schlechter Kondition, nach alkoholischen Exzessen und bei Schlafmangel, aber auch nach grosser körperlicher Anstrengung, beginnt der Tiefenrausch schon früher, oft schon in 30 m Tiefe. Tauchen mit Luft über 40 m ist deshalb gefährlich, ähnlich wie Autofahren mit erhöhtem Alkoholgehalt im Blut. Ab 60 m Tiefe kommt zur erhöhten Gefahr des Tiefenrausches noch diejenige der Sauerstoffvergiftung hinzu.

2.1.2. Das High Pressure Nervous Syndrome (HPNS)

Bei Tauchgängen über 40 m, besonders aber beim Sättigungstauchen in grossen Tiefen, wird in der Regel ein Helium-Sauerstoff-Gemisch verwendet. Wegen seiner schlechten Fettlöslichkeit hat Helium bedeutend geringere narkotische Eigenschaften als Stickstoff.

Dennoch können durch Helium in Tiefen von über 200 m (> 21 bar) zunehmend Tremor und Muskelzuckungen (Myoklonien), verbunden mit Erbrechen und Gleichgewichtsstörungen, ausgelöst werden. Ab 600–800 m Tiefe gleichen klinisches Bild und Elektroenzephalogramm denjenigen einer Epilepsie.

Ursache ist eine primär Helium bedingte gesteigerte Erregbarkeit des Gehirns, genannt Hochdruck-Nervensyndrom (High Pressure Nervous Syndrome HPNS). Das HPNS kann unter anderem durch langsame Kompression oder die geringe Zumischung eines narkotischen Gases verringert beziehungsweise vermieden werden. Bei Minderung des Druckes bildet es sich zurück.

3. Die Wirkung von Gasblasen in Blut und Gewebe: Die Druckfall- oder Dekompressionskrankheit

3.1. Das Entstehen von Gasblasen im Körper

3.1.1. Die Aufnahme und Abgabe von Gasen durch eine Flüssigkeit in vivo

In vivo hängt die Geschwindigkeit von Sättigung und Entsättigung eines Gewebes ausser vom Löslichkeitskoeffizienten α noch von der Geschwindigkeit ab, mit welcher ein Gas in die Gewebe transportiert respektive durch Blutzirkulation und Diffusion wieder daraus entfernt wird. Im Fettgewebe löst sich etwa fünfmal mehr Stickstoff als im Blut; wegen seiner schlechten Durchblutung wird aber Fettgewebe bedeutend langsamer mit Stickstoff gesättigt und entsättigt.

Als Mass der Sättigungsgeschwindigkeit eines Gewebes für ein bestimmtes Gas gilt dessen Halbwertszeit. Man spricht von «schnell und langsam sättigenden Geweben», insbesondere für den beim Tauchen im Vordergrund stehenden Stickstoff.

Für die Geschwindigkeit der Gasaufnahme und Gasabgabe ist die Partialdruckdifferenz zwischen Körperflüssigkeiten (Blut und Gewebe) und Alveolargas einerseits sowie die Durchblutung des betreffenden Gewebes andererseits massgebend.

Zu Beginn einer Dekompression ist der Umgebungsdruck respektive der Druck des Alveolargases (Summe von pN_2 , pO_2 und oder anderen) in der Regel grösser als der Inertgasdruck (pN_2) im Gewebe. Für die erste Dekompressionsphase ist daher ein grösserer Druckunterschied zulässig. Während den folgenden Stufen ist das Verhältnis umgekehrt, der Inertgasdruck im Gewebe ist höher als der inzwischen gesunkene Umge-

bungsdruck, so dass die Gefahr des Auftretens von Blasen zunimmt. Die Dekompression muss daher langsamer als zu Beginn erfolgen.

3.1.2. Die tolerierte Übersättigung

Blut und Gewebe ertragen ein gewisses Mass an Übersättigung durch gelöste Gase, ohne dass eine relevante Blasenbildung auftritt. Bühlmann bestimmte die maximal tolerierten Überdrücke experimentell und errechnete mit diesen Daten die Halbwertszeiten für 16 hypothetische Gewebe. Sie liegen für Stickstoff zwischen 2,65 und 635 Minuten und für Helium zwischen 1,0 und 240 Minuten. Aus diesen Experimenten und Berechnungen hat Bühlmann, basierend auf dem Dekompressionsmodell von Haldane (1905), Dekompressionstabellen erstellt, die unter der Abkürzung ZH-L16 (ZH für Zürich, L für linear) bekannt geworden sind (vgl. Kap. D 3).

3.1.3. Die Bildung von Gasblasen

Bei zu raschem Abfall des Umgebungsdruckes wird die Übersättigung in Blut und Gewebe so gross, dass sich Gasblasen bilden. In vitro braucht es zur Überwindung der Kohäsion der Flüssigkeitsmoleküle eine Druckdifferenz von über 100 bar. In vivo bilden sich hingegen durch Turbulenzen des Blutstromes und lokale Spannungsänderungen Gaskerne im Gewebe, die wesentlich rascher zur Blasenbildung führen.

Eine Blase wächst, wenn der darin herrschende Druck grösser ist als die Summe der Drücke von Umgebung, Gewebe und Oberflächenspannung. Ist der Druck kleiner als diese Summe, dann schrumpft die Blase bis sie verschwindet. Der Druck, den die Oberflächenspannung auf eine Blase ausübt, verhält sich umgekehrt proportional zu ihrem Radius. Blasen in Flüssigkeiten können praktisch uneingeschränkt wachsen. Ihrem Wachstum im freien Gewebe wirkt allerdings der Gewebedruck entgegen.

Mikroblasen entstehen bei jeder Dekompression, auch wenn sie regelkonform abläuft. Mikroblasen verursachen jedoch im Normalfall keinerlei Symptome. Grössere Blasen, die mit dem Blutstrom fortgeschwemmt werden, können mit dem Doppler-Ultraschallgerät nachgewiesen werden, während sich stationäre sonographisch erkennen lassen. Nur ein Teil der Individuen, die derartige Blasen aufweisen, zeigen Symptome einer Dekompressionskrankheit.

Die nur grobe Korrelation zwischen Blasenmenge und dem Risiko des Auftretens einer Bläschenkrankheit erklärt sich einerseits durch die inhomogene Perfusion verschiedener Gewebe beziehungsweise Körperteile während des Tauchganges, andererseits aber auch dadurch, dass Bläschen sekundäre systemische Veränderungen auslösen können. Berührt zum Beispiel ein Bläschen die Endothelmembran eines Gefässes, werden darin biochemische Veränderungen ausgelöst, die vor allem via Radikale eine Kaskade von weiteren Reaktionen verursachen (Komplementaktivierung, Gerinnung, Entzündungsvermittler, u.a.m.)

3.2. Gasembolien

3.2.1. Arterielle Gasembolien

Bei sehr schnellem Auftauchen, das heisst mit einer Geschwindigkeit von mehr als 15 m/Minute (Blow-up) aus über 40 m Tiefe, können auch nach kurzen Tauchgängen potentiell gefährliche Gasblasen von 0,03–2 mm Durchmesser im Blut entstehen und im arteriellen Kreislauf, vor allem in Hirn, Rückenmark und Herz, Gasembolien hervorrufen, die sich in Bezug auf ihre Konsequenzen in nichts von denjenigen nach einem Barotrauma, beispielsweise der Lungen, unterscheiden. Arterielle Gasembolien sind primär schwere Dekompressionszwischenfälle. Sie können zum Tod oder zu lebenslänglicher Invalidität führen. Schon die geringsten Symptome, vor allem von Seiten des Hirns und des Rückenmarkes, sind sehr ernst zu nehmen, zum Beispiel das Einschlafen der Extremitäten. Die Symptome treten oft schon während der Dekompression auf, spätestens aber einige Stunden danach.

Zeichen für eine Gasembolie des ZNS sind Verwirrung, Benommenheit, Konzentrationsschwäche und retrograde Amnesie, insgesamt als Durchgangssyndrom beziehungsweise akutes psychoorganisches Syndrom bezeichnet, ferner Sprech- und Sehstörungen, Schwindel, Krämpfe, Muskelschwächen, Paresen und Hemiparesen sowie Bewusstlosigkeit. Auch fokale zerebrale Symptome sind möglich.

Gasembolien im Rückenmark äussern sich durch Parästhesien in den Beinen. Bisweilen sind diese Empfindungen auch gürtelförmig am Stamm verteilt. Anfänglich gleichartig lokalisierten, mitunter starken Schmerzen, folgen Spasmen, Paresen oder Lähmungen der Extremitäten, die in schweren Fällen in Para- und Tetraplegien übergehen können. Schädigungen des unteren Rückenmarkes führen zu Störungen der Miktion und allenfalls der Defäkation.

Störungen im Bereiche des Innenohres mit Übelkeit, Schwindel, Ohrgeräuschen und oder Hörverlust können sowohl durch arterielle Gasembolien (selten) als auch durch lokale Bildung von Gasblasen entstehen. Solche kommen fast nur bei tiefen Mischgastauchgängen vor und lassen bei Rekompression rasch nach. Ohne Therapie sind dagegen Dauerschäden häufiger und ausgedehnter.

Eine koronare Gasembolie erzeugt typische anginöse Beschwerden und im EKG Ischämiezeichen, eventuell auch Rhythmusstörungen oder eine Herzinsuffizienz, was aber selten vorkommt.

3.2.2. Venöse Gasembolien

Beim Blow-Up ebenso wie durch das Einschwemmen von Gasblasen aus dem Gewebe treten diese in grosser Zahl auch in den Venen auf und gelangen in die Lungen, wo sie zurückgehalten und anschliessend über die

Atmung eliminiert werden. Dabei können die Bläschen unter Umständen den Lungenfilter durchdringen – beispielsweise über pulmonale Shunts – und auf diese Weise arterielle Gasembolien verursachen.

Eine massive Anschoppung der Lungen mit Gasblasen führt zu Thoraxschmerzen, Atemnot, und Reizhusten; im angelsächsischen Sprachgebrauch wird dieser Symptomenkomplex als «Chokes» bezeichnet.

3.3. Offenes Foramen ovale (PFO)

Das Foramen ovale ist eine ventilartige Öffnung in der Scheidewand der Herzvorhöfe. Sie ist für die vorgeburtliche Entwicklung von Bedeutung und bleibt bei zirka 30 % der gesunden Normalbevölkerung bis ins Erwachsenenalter bestehen. Die englische Bezeichnung für diesen Zustand lautet «patent foramen ovale», abgekürzt PFO.

Da normalerweise der Druck im rechten Herzvorhof geringer ist als im linken, bleibt das PFO geschlossen. Kommt es hingegen zur Drucksteigerung im rechten Vorhof, derart, dass dieser denjenigen im linken übertrifft, öffnet sich der ventilartige Verschluss des PFO und es können Blut und darin mitgeschwemmte Gasblasen direkt vom kleinen in den grossen Kreislauf gelangen und eine arterielle Gasembolie (AGE) verursachen (Abb. 16).

Individuen mit bekanntem, insbesondere höher gradigem PFO, werden deshalb besondere Vorsichtsmassnahmen empfohlen, um eine Verschleppung von Gasblasen vom kleinen in den grossen Kreislauf bei der Dekompression so weit wie möglich zu vermeiden (sog. «low bubble diving»). Alternativ ist auch der Verschluss des PFO mittels eines Implantates möglich. (Vergleiche dazu die PFO Empfehlungen der Schweizerischen Gesellschaft für Unterwasser- und Hyperbarmedizin www.SUHMS.org)

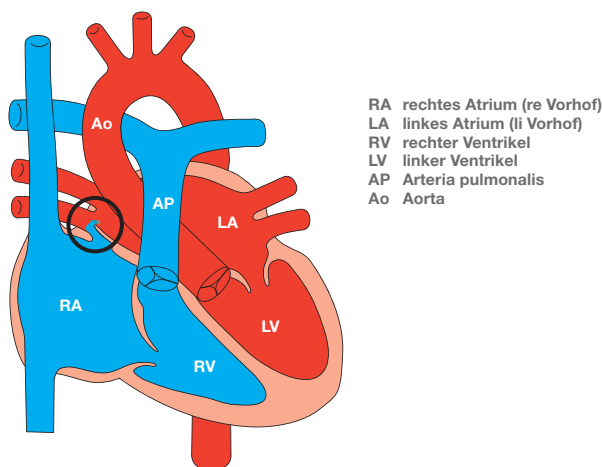


Abbildung 16 Querschnitt durch das menschliche Herz:

Eingekreist das Foramen ovale in der Vorhofscheidewand. Übersteigt der Blutdruck im rechten Herzvorhof denjenigen im linken, öffnet sich das Foramen und Blut strömt direkt vom rechten in den linken Kreislauf.

Bild: © 2012 W.L. Gore & Associates, Inc. (mod.)

3.4. Die lokale Wirkung von Gasblasen in Geweben

Rasche und heftige Änderungen des Gewebedruckes führen im Zustande der Übersättigung leicht zur Bildung von Gaskernen. Dies vor allem in der Umgebung der Sehnenansätze kräftiger Muskeln, wo entstehende Gasblasen das dichte, nicht nachgebende Gewebe unter starken Druck setzen, was sensible Nervenendigungen reizen und heftige Schmerzen auslösen kann. Im angelsächsischen Bereich nennt man diese Schmerzen «Bends» (*to bend*, sich krümmen, gemeint, vor Schmerzen). Im erweiterten Sinne verwendet man den Ausdruck Bends auch für die Dekompressionskrankheit an sich.

Bends entstehen vor allem an stark bewegten Gelenken, bei Tauchern hauptsächlich an Schultern und Ellbogen, bei Überdruckarbeitern eher an Hüft- und Kniegelenken. Sie können noch bis 1 Stunde nach Ende eines Tauchganges beziehungsweise einer Ausschleusung auftreten.

Der Schmerz der Bends ist gewöhnlich konstant und bohrend, etwa wie beim Zahnweh, bisweilen auch pulsierend; er erreicht seinen Höhepunkt innerhalb von Minuten bis Stunden und verschwindet auch ohne Behandlung nach einigen Stunden wieder. Die betreffenden Stellen sehen meist ganz normal aus und sind wenig druckempfindlich; mässige Bewegungen in den betroffenen Gelenken werden gut ertragen.

Gasblasen in den Muskeln führen in leichten Fällen zu Schmerzen wie bei einem Muskelkater, in schwereren Fällen zu sehr schmerzhaften Versteifungen. Bei Dekompressionsschäden der Muskeln ist die Kreatinphosphokinase (CPK) im Blut erhöht.



Abbildung 17 Skin bends: Durch Gasblasen im Unterhautgewebe oder ein negatives Barotrauma (schlecht sitzender Taucheranzug) hervorgerufene flohstich- bis landkartenartige Hauteinblutungen Bild: Ch. Wölfel, Schwyz

Manchmal führt eine ungenügende Dekompression zu kleinen, juckenden, roten, flohstichartigen Hautflecken, welche durch kleine Gasblasen entstehen und «Taucherflöhe» (skin bends) genannt werden. Anstelle dieser «Flohstiche» kommen auch bläuliche Marmorierungen der Haut (cutis marmorata) vor, vor allem im Sinne des negativen Barotraumas der Haut durch einen schlecht sitzenden Taucheranzug (vgl. Abb. 17 und Kapitel C 1.3).

Taucherflöhe, Muskelkater und Bends werden als primär leichte Fälle einer Dekompressionskrankheit bezeichnet (DCI I, siehe nächstes Kapitel C 3.5.). Sie treten in der Regel erst nach dem Auftauchen respektive nach dem Erreichen des atmosphärischen Druckes und langem Verweilen in der Tiefe auf, oft nach einer kurzen, selten aber bis zu 24 Stunden dauernden Latenzzeit. Bends sind an sich harmlos, müssen aber beobachtet werden, da sie Vorboten schwererer, insbesondere neurologischer Symptome sein können. Bei Sporttauchern kommen zwar Taucherflöhe und Muskelkater, aber wegen der relativ kurzen Tauchzeit in der Regel keine Bends vor.

3.5. Die Bläschen- oder Dekompressionskrankheit (DCI)

Symptome, die durch Gasblasen im Gewebe oder Blutstrom verursacht werden, sind Ausdruck einer Bläschen- oder Dekompressionskrankheit, englisch «Decompression Illness (DCI)». Für Krankheitsbilder, denen pathogenetisch eine *lokale* Blasenbildung im Gewebe zu Grunde liegt, wird der Begriff «Decompression Sickness (DCS)» verwendet. Bei einem embolischen Geschehen durch Gasblasen in der Blutbahn wie es typischerweise nach einem Barotrauma der Lungen auftreten kann, wird von «Arterial Gas Embolism (AGE)» gesprochen. Daraus folgt, dass DCI im Prinzip der Oberbegriff für DCS und AGE darstellt. Klinisch lassen sich AGE und DCS in vielen Fällen nur schwierig auseinanderhalten, was angesichts zahlreicher Überlappungsmöglichkeiten verständlich ist. Zudem ist die Unterscheidung weder therapeutisch noch prognostisch von wesentlicher Bedeutung.

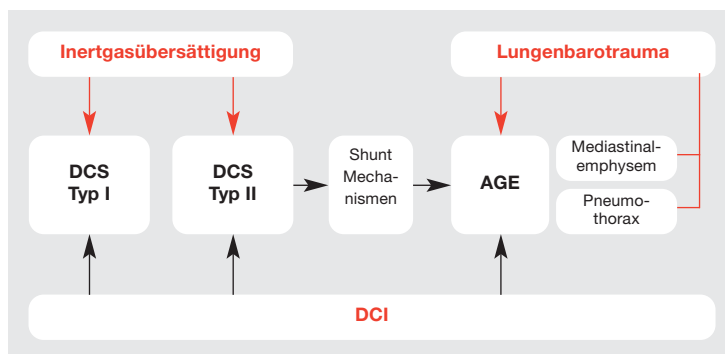


Abbildung 18 Blockgrafik «Systematik der Tauchunfälle»

Bild: Modifiziert nach Leitlinie «Tauchunfall», Version 2011, GTÜM

DCI werden in der hyperbarmedizinischen Praxis nach ihrem Schweregrad unterschieden. Mit DCI I sind solche gemeint, die vorwiegend durch lokal in der Haut und im Bindegewebe entstandene Gasblasen aufgetreten sind und somit eigentliche DCS darstellen wie beispielsweise Taucherflöhe oder Bends.

Als DCI II werden alle übrigen akuten Krankheitsbilder bezeichnet, die durch lokale Gasblasen oder Gasembolien in anderen Geweben beziehungsweise Organen entstanden sind. Zu den DCI II zählen Erkrankungen des Innenohrs, des zentralen und peripheren Nervensystems, der Lungen (vgl. C 3.2.2. «Chokes») sowie anderer innerer Organe.

AGE, die sich als Folge eines Barotraumas, beispielsweise der Lunge, gebildet haben, verursachen in der Regel massivere, rasch auftretende Ischämien unterschiedlicher Lokalisation, vornehmlich cerebral, das heisst, sie sind als DCI II einzustufen.

Die Unterteilung in Typ I und II ist allerdings dadurch limitiert, dass sich aus einer Typ I Erkrankung innert Stunden eine solche vom Typ II entwickeln kann. Zur initialen Grobbeurteilung eines verunfallten Tauchers beziehungsweise Druckluftarbeiters hat sich die Einteilung aber dennoch bewährt und durchgesetzt.

Schäden, die auf eine lokale Gasblasenbildung zurückgehen, sind häufig an mehreren Stellen – unter anderem des Nervensystems – zu finden.

3.6. Die chronische Druckfallkrankheit (sogenannte «Long Term Health Effects», LTHE)

Die Frage, ob es nach wiederholten Tauchgängen oder Druckluftexpositionen – auch ohne nachweisbare DCI – zu bleibenden Organschäden kommen kann, ist wiederholt und kontrovers diskutiert worden. Eindeutig belegt sind in diesem Zusammenhang lediglich Knochenaffektionen, die sogenannten dysbaren Osteonekrosen (DON), auf die im folgenden Abschnitt 3.6.1. näher eingegangen wird.

Umstritten sind dagegen andere bleibende LTHE durch langjähriges Tauchen und wiederholte Druckluftexpositionen. Diskutiert worden sind in erster Linie Veränderungen des zentralen Nervensystemes (u.a. mnestiche Störungen), allerdings ohne dass solche bis jetzt durch wissenschaftliche Studien überzeugend belegt werden konnten.

Allfällige Gehörschädigungen bei Berufstauchern sind lärm- und nicht direkt Überdruck bedingt (Zischgeräusche durch Ventile, veränderte Schallqualität beim Tauchen, Probleme des Gehörschutzes). Sie sind deshalb von den oben genannten LTHE abzugrenzen.

3.6.1. Aseptische Knochennekrosen und Gelenkdeformationen (Caissonkrankheit im engeren Sinne)

Wenn unter den in Kapitel C 3.1. genannten Bedingungen in der Spongiosa der Knochen mit ihrem reichlich Stickstoff speichernden Fettgewebe und ihrer langsamen Blutzirkulation Gasblasen entstehen, kann dies zu Embolien führen oder Blutgefässe abklemmen, weil sie in den engen Mark-

räumen nicht ausweichen können. Diskutiert werden weitere begünstigende Pathomechanismen, insbesondere eine venöse Stase, die den Blutabfluss vom Markraum Richtung Periost behindert. Die Folge davon ist eine umschriebene Mangeldurchblutung, die schliesslich zum Infarkt und damit zum Absterben (Nekrose) von Knochen- und eventuell auch von Knorpelgewebe führt. Diese stellt an sich noch keine Krankheit dar. Krankheitssymptome treten erst auf, wenn sekundäre Umbauprozesse die statische Widerstandskraft des Knochens schwächen. Knocheninfarkte, die sich nicht weiter entwickeln, finden sich in den Diaphysen der langen Röhrenknochen, besonders proximal an Humerus, Tibia und Fibula sowie proximal und distal am Femur. Erfolgen diese Umbauvorgänge jedoch gelenknah, kann der geschwächte Bezirk unter der



Abbildung 19a Osteonekrose im proximalen Humerus; Osteolysen mit Randsklerose in der Metaphyse sowie gelenksnah in der Epiphyse. Bild: W. Förster, München



Abbildung 19b Links betonte Osteonekrosen der distalen Femora und der linken Tibia mit unregelmässigen zirkulären sklerotischen Veränderungen der Knochenstruktur.

Bild: www.radiologyassistant.nl



Abbildung 19c T₁ gewichtete koronale MR Tomographie des linken Knies mit bereits älteren Knocheninfarkten im medialen Tibiaplateau und in beiden Femurkondylen. Zentrale Verfettung und periphere Randsklerose aller 3 Infarkte.

Bild: M. Schmid, Zürich

Belastung einbrechen. Es entsteht eine sekundäre Arthrose, die sich bezüglich Erscheinungsbild und Symptomatik nicht von einer üblichen, durch Abnutzung entstandenen Arthrose unterscheidet. Besonders gefährdet sind die grossen Kugelgelenke, deren Blutgefässe nicht oder nur ungenügend untereinander verbunden sind (Abb. 19a–c).

Wie in Kapitel C 3.4 beschrieben, neigen Taucher eher zu Veränderungen im Bereich der Schultergelenke, Caisson- und Tunnelarbeiter dagegen eher zu Nekrosen und Arthrosen der Hüftgelenke. Grund dafür dürfte die unterschiedliche Belastung und damit auch Durchblutung der Extremitäten sein. Die Latenzzeit zwischen Ereignis und dem Auftreten von radiologischen Veränderungen sowie von Symptomen schwankt zwischen einigen Monaten und mehreren Jahren. Aseptische Nekrosen, vor allem der Hüft- und Schultergelenke, können auch ohne weitere Tätigkeit unter Druckluft fortschreiten und zu Invalidität führen.

Die Häufigkeit aseptischer Knochennekrosen korreliert mit Anzahl und Dauer der Überdruckexpositionen einerseits und insbesondere mit der Anzahl allfälliger Dekompressionszwischenfälle andererseits. Aseptische Knochennekrosen treten deshalb eher bei professionellen Tauchern und Überdruckarbeitern auf, bei Sporttauchern dagegen ausgesprochen selten. Dank verbesserter Dekompressionstabellen sind DON aber auch bei professionell Exponierten seltener geworden.

3.7. Spätschäden nach DCI

3.7.1. Chronische Schäden des Zentralnervensystems und der Sinnesorgane

Von LTHE zu unterscheiden sind bleibende Schäden an Hirn und Rückenmark als Folgen eines Dekompressionszwischenfalles. Dazu zählen vor allem Halbseitenlähmungen (Hemiparesen), Störungen der Hirnnerven, Querschnittssyndrome, Ausfälle der Sensibilität und psychoorganische Störungen. Besonders häufig sind bei Sporttauchern Paraplegien. Die meisten zerebrospinalen Dekompressionsschäden sind allerdings reversibel, zumindest partiell, besonders, wenn die adäquate Rekompressionsbehandlung so rasch wie möglich nach Symptombeginn eingeleitet wird. Eine sekundäre, das heisst nach Tagen noch auftretende Progredienz, wurde bisher nicht beobachtet.

3.7.2. Störungen des Gehör- und des Gleichgewichtssinnes

Ein Hörverlust in Form einer *Schalleitungsschwerhörigkeit* ist die Folge eines Barotraumas von Aussen- oder Mittelohr. Er ist in der Regel reversibel. Eine *Innenohrschwerhörigkeit* dagegen rührt von einer Blasenbildung im Innenohr, von der Auswirkung eines Barotraumas des Mittelohres oder eventuell von Gasembolien in einer Arterie her, welche Innenohr, Hörnerv

oder die entsprechenden Gehirnabschnitte versorgt; sie ist oft von Ohrgeräuschen begleitet (Tinnitus), ohne Rekompensation oft irreversibel und betrifft vorwiegend den Hochtonbereich. Auf die Möglichkeit von lärminduzierten Gehörschädigungen – v.a. bei Berufstauchern – ist im vorangehenden Abschnitt 3.6 hingewiesen worden.

Neben der Schnecke ist oft gleichzeitig das Labyrinth geschädigt, so dass mit dem Hörverlust auch Schwindel und Brechreiz auftreten. Diese Symptome bilden sich in der Regel auch ohne Rekompensation innerhalb von 3–4 Wochen zurück, sei es als Folge einer funktionellen Erholung des geschädigten Gewebes oder auf Grund einer zerebralen Kompensation. Die Folgen eines Innenohrbarotraumas (vgl. C 1.1.4.) können ähnlich oder gar nicht von jenen einer DCI zu unterscheiden sein, weshalb in vielen Fällen keine abschliessende ätiologische Diagnose gestellt werden kann.

4. Die Wirkung von reizenden und toxischen Gasen

Toxische und reizende Gase sind zum einen als Schadstoffe von Bedeutung, die an Überdruckarbeitsplätzen freigesetzt oder gebildet werden und auf diese Weise exponierte Arbeitnehmende gefährden können. Toxische und reizende Gase können auch als Verunreinigungen in den bereitgestellten Atemgasen eine Rolle spielen, insbesondere dann, wenn bei deren Aufbereitung nicht nach dem Stand der Technik und mit Sorgfalt gearbeitet worden ist. In diesem Zusammenhang sind insbesondere Ölnebel zu erwähnen, die versehentlich in die Druckluft gelangen und Atemwegsprobleme verursachen können.

4.1. Stickoxid

Falls in einem Caisson oder in der Arbeitskammer einer TBM mit Hydroshield nach Sprengarbeiten nicht alle Sprenggase abgesaugt worden sind, bevor die Arbeiter den Überdruckbereich wieder betreten, sind Vergiftungen durch Stickoxide oder andere Reizgase möglich. Mit Stickoxiden ist auch beim Arbeiten mit Schweißsbrennern (Oxidation des Luftstickstoffes) sowie aus Dieselmotorabgasen zu rechnen. Stickoxide sind schlecht wasserlöslich, passieren die oberen Luftwegen und gelangen in die Alveolen. Typisch für die Stickoxidvergiftung ist ein nach mehreren Stunden auftretendes Lungenödem.

4.2. Kohlendioxid

Die normale atmosphärische Luft enthält 0,03 Vol-% CO₂. Der Kohlendioxidgehalt kann zunehmen, etwa bei ungenügender Absorberkapazität in geschlossenen Kreislaufgeräten (Rebreathern) oder Unterwasserräumen (Habitats), bei zu hohem Totraum in Helmen oder Schlauch versorgten Geräten oder durch Kontamination der Druckluft mit Auspuffgasen. Das Problem wird durch den Umstand verschärft, dass zum Beispiel 1 Vol-% CO₂ entsprechend 0,01 bar (1 kPa) an der Wasseroberfläche in 40 m

Tiefe einem Partialdruck von 0,05 bar (5 kPa) entspricht. Gesunde ertragen unter atmosphärischem Druck, also an der Wasseroberfläche, bis 1,5 Vol-% CO₂, was einen Partialdruck von 0,015 bar (1,5 kPa) ergibt. In rund 43 Metern Tiefe nehmen die 0,015 bar aber auf 0,08 bar (8 kPa) zu, was 8 Vol-% entspricht. Bei diesem CO₂ Partialdruck sind Bewusstlosigkeit und Krämpfe zu erwarten. Ab 2 Vol% an der Wasseroberfläche tritt zunächst vermehrte Atmung (Hyperventilation) auf; in über 40 m Tiefe wäre ein entsprechender Gehalt im Atemgas von lebensgefährlichen Wirkungen gefolgt

4.3. Kohlenmonoxid

CO kann ebenfalls durch Sprenggase oder Motorenabgase in die Atemluft von Tauchern und Überdruckarbeitern gelangen. Kohlenmonoxid verdrängt den Sauerstoff vom Hämoglobinmolekül und führt dadurch zur inneren Erstickung. Besonders empfindlich sind Herzmuskel und Gehirn; bei schweren Vergiftungen sind Spätschäden oder Tod möglich. Die ersten subjektiven Symptome der CO-Vergiftung sind Kopfweh, Schwindel, Herzklopfen und Atemnot bei Anstrengung, oft auch Ohrensausen, Augenflimmern und Übelkeit. Später entsteht ein Rauschzustand und schliesslich folgen Muskelkrämpfe, Kollaps und Koma (vgl. Tab. 5 und 6).

CO- Konz. (ppm)	pCO (mbar)	HbCO (%)	Physiologische Wirkung
400	0,4	7,2	keine
800	0,8	14,4	Stirnkopfschmerz, Mattigkeit, Kurzatmigkeit
1600	1,6	29,0	Verwirrtheit, Kollaps bei körperlicher Belastung
3200	3,2	58,0	Bewusstlosigkeit
4000	4,0	72,0	tiefes Koma
4500	4,5	81,0	Tod

Tabelle 5 Dosis-Wirkungsbeziehung von Kohlenmonoxid

Vol.-% CO	Umgebungsdruck (bar)	pCO (mbar)	Physiologische Wirkung
0,05	1	0,5	keine
0,05	2	1,0	leichte Symptome
0,05	3	1,5	Kollaps möglich
0,05	4	2,0	mittlere bis schwere Symptome

Tabelle 6 Dosis-Wirkungsbeziehung von CO in Abhängigkeit des Umgebungsdrucks

4.4. Erhöhter Sauerstoffpartialdruck

4.4.1. Die Wirkung auf Atemwege und Lungen

Bei längerer Exposition gegenüber O₂ Partialdrücken von 0,5–1 bar werden die oberen Atemwege gereizt; es kommt zu Schleimhautschwellungen in der Nase und im Rachen mit Trockenheitsgefühl im Hals, Heiserkeit sowie Husten, Auswurf und retrosternalen Schmerzen. Bleibt der erhöhte O₂ Partialdruck bestehen, so treten Kollapserscheinungen einzelner Lungenabschnitte (Atelektasen) sowie ein interstitielles und dann ein alveoläres Ödem der Lungen auf (sog. Lorraine-Smith Effekt).

Bei Partialdrücken unter 1 bar sind Nebenwirkungen an den Lungen erst bei einer Expositionszeit von vielen Stunden zu erwarten. Für Aufenthaltszeiten dieser und weiter reichender Grössenordnungen wie zum Beispiel beim Sättigungstauchen darf deshalb der Sauerstoffpartialdruck nicht mehr als 0,4–0,5 bar betragen.

4.4.2. Die Wirkung auf das Zentralnervensystem

Sauerstoffpartialdrücke von mehr als 2 bar können für das Zentralnervensystem toxisch sein. Vor allem bei strenger körperlicher Arbeit treten Vergiftungserscheinungen unter Umständen schon nach wenigen Minuten ein. Es kommt zu Zuckungen, Parästhesien der Lippen und Fingerkuppen, zu Einengungen des Gesichtsfeldes (Skotom) und zu Nausea (sog. Paul Bert Effekt). Die damit verbundenen Schwindelercheinungen sind beim Schwimmen im Wasser allerdings deutlich weniger ausgeprägt als beim Sitzen, zum Beispiel in einer Druckkammer. Schliesslich treten generalisierte epileptiforme Krampfanfälle auf, wobei deren Vorboten (sog. Aura) fehlen können. Die Empfindlichkeit für die Sauerstoffvergiftung des Zentralnervensystems ist sowohl unter verschiedenen Individuen als auch für den einzelnen Menschen, je nach seiner Tagesform, verschieden. Die zerebralen Sauerstoffwirkungen lassen sofort nach, wenn der O₂ Partialdruck wieder sinkt.

4.4.3. Die Gefährdung durch Sauerstoffvergiftung

Die normale Atmosphäre enthält 20,95 Vol-% Sauerstoff entsprechend einem Partialdruck von 0,21 bar. In einer Tiefe von 10 m verdoppelt er sich auf 0,42 bar. In 40 m Tiefe entspricht er mit rund 1 bar demjenigen von reinem Sauerstoff an der Wasseroberfläche. Wird mit reinem O₂ getaucht, zum Beispiel mit einem geschlossenen Kreislaufgerät, dann werden in 10 m Tiefe schon 2 bar erreicht. Die meisten Autoren betrachten heute für das Tauchen 1,4 bar, sicher aber 1,6 bar, als kritischen Sauerstoffdruck. Tiefer als 6 m (1,6 bar absolut) sollte deshalb mit reinem Sauerstoff unter keinen Umständen getaucht werden, da sonst mit lebensgefährlichen Vergiftungserscheinungen gerechnet werden muss (siehe Pkt. C 4.4.). Bei der Verwendung von Pressluft wird der kritische O₂ Partialdruck von 1,6 bar erst in 66 m Tiefe erreicht.

Um die Austreibung des Stickstoffes aus Gewebe und Blut während der Dekompression zu beschleunigen, wird bei längeren Tauchgängen und als Regel bei Arbeiten unter Überdruck mit reinem Sauerstoff dekomprimiert. Der Einsatz dieser Methode in der Taucherei erfordert besondere Versorgungseinrichtungen (über einen Schlauch von der Oberfläche aus oder in einer zusätzlichen Flasche, sogenannter «stag»). Dabei darf ein Sauerstoffpartialdruck von 1,6 bar nicht überschritten werden. Bei Überdruckarbeiten ist dagegen während der Kammerdekompression ein maximaler O₂ Partialdruck von 2,2 bar zulässig, weil sich die Arbeiter im Trockenen befinden, so dass bei Zwischenfällen keine Ertrinkungsgefahr besteht und rasch interveniert werden kann.

4.5. Sauerstoff Toleranz Einheiten (Unit Pulmonary Toxic Dosis, UPTD)

Die Langzeitexposition gegenüber Atemgasen mit erhöhtem Sauerstoffanteil kann zur Lungenfibrose führen (vgl. C 4.4.1). Diese Gefahr ist insbesondere bei der regelmässigen Dekompression mit O₂ zu beachten und zu überwachen. Man spricht in diesem Zusammenhang von sogenannten Sauerstoff Toleranz Einheiten beziehungsweise «units of pulmonary toxic dosis (UPTD)», wobei 1 UPTD der Atmung von reinem Sauerstoff bei 1 Atmosphäre Druck während 1 Minute entspricht. Die maximale Sauerstoffexpositionsdauer richtet sich im Allgemeinen nach den sogenannten NOAA Tabellen (National Oceanic and Atmospheric Administration der USA). Für die konkrete Berechnung wird auf separate Literatur verwiesen. Die Dokumentation der UPTDs ist vor allem bei professionellen Tauchern und Druckluftarbeitern von medizinisch prophylaktischer Bedeutung.

5. Der Tod beim Tauchen

5.1. Tod während und unmittelbar nach dem Tauchen

Erschöpfung, Unterkühlung, Sauerstoffmangel, vorbestehende Krankheiten, ein Lungenodem durch Sauerstoffvergiftung oder ein negatives Barotrauma der Lunge können für sich allein oder sekundär durch Ertrinken zum Tode führen. Der «Badetod» oder «Wasserschock» genannte tödliche vago-vasale Reflex, der zu plötzlichem Versinken führt, wird durch Sprung ins kalte Wasser, Pressatmung, Magenüberblähung, Angst und Panik begünstigt. Auch er ist letztendlich von Ertrinken gefolgt. Bei einer grossen Zahl von tödlichen Tauchunfällen steht jedoch Panik als Auslöser im Zentrum. Sie führt – insbesondere bei ungenügender Erfahrung und inadäquatem Ausbildungsstand – zu Fehlverhalten und schliesslich zur Aspiration und zum Ertrinken.

In 10–15% der Fälle tritt der Ertrinkungstod durch eine reine Asphyxie ein, ohne dass Wasser in die Lungen gelangt, weil der Reiz des Wassers im Kehlkopf einen Stimmritzenkrampf (Glottiskrampf) verursacht. Meist jedoch wird nach kurzer Apnoe Wasser aspiriert. Bereits eine teilweise Fül-

lung der Alveolen mit Wasser kann eine ungenügende Arterialisierung des Blutes mit Gewebhypoxie zur Folge haben. Ist diese Hypoxie hochgradig und plötzlich, so kommt es schon nach 4–5 Minuten durch irreversiblen Hirnschaden zum Tod. Hypoxien leichteren Grades können je nach Ausmass und Dauer Herzrhythmusstörungen, Hypotonie sowie Schockzustände mit entsprechenden Endorganschäden verursachen. Diese Vorgänge sind bei rechtzeitiger Behandlung reversibel.

In die Alveolen eintretendes Süsswasser kann wegen des osmotischen Druckunterschiedes in grösseren Mengen ins Blut einströmen und dieses schon nach kurzer Zeit erheblich verdünnen. Ausserdem werden der pulmonale surfactant verdünnt und das Alveolarepithel geschädigt, was ein sekundäres Lungenoedem zur Folge hat. Dieses führt zusammen mit allfälligen atelektatischen Lungenabschnitten zu inhomogenen Ventilations-Perfusionsverhältnissen, was die Arterialisierung des Blutes beeinträchtigt und eine bereits initial vorhandene Hypoxie akzentuiert oder neu hervorruft. Die starke Blutverdünnung kann ferner eine osmotische Hämolyse verursachen, wobei das aus den Erythrozyten gelöste Kalium zusammen mit der Hypoxie Herzrhythmusstörungen, vor allem Kammerflimmern, auslösen kann.

Meerwasser ist gegenüber dem Blut hyperton; es kommt zu einer Flüssigkeitsverschiebung vom Blut in den Alveolarraum, was ein Lungeneodem und allenfalls eine Hypovolaemie des Kreislaufes zur Folge hat. Wie bei der Aspiration von Süsswasser steht somit auch bei derjenigen von Meerwasser die Hypoxie pathogenetisch im Vordergrund. Ihr gesellen sich in Abhängigkeit der Umstände weitere Funktionsstörungen und individuelle Organschäden vor allem von Seiten des ZNS, des Herzens und der Nieren hinzu.

Wie unter Abschnitt B Punkt 1.1.6 gesagt worden ist, leitet Wasser die Wärme rund 25 Mal besser als Luft. Bei langem Aufenthalt in kaltem Wasser sinkt die Körpertemperatur allmählich ab. Die Abkühlung geschieht schneller, wenn sich der Körper bewegt. Unter diesen Umständen kann sich keine erwärmte und isolierende Wasserschicht an seiner Oberfläche bilden.

Anfänglich wird die Wärmeproduktion durch Muskelzittern erhöht und der Temperaturrückgang in den lebenswichtigen Organen (Kerntemperatur) durch periphere Vasokonstriktion verzögert. Sinkt die Hauttemperatur unter 10° C, erweitern sich die Hautgefässe und der Wärmeverlust nimmt rapide zu. Die weitere Unterkühlung lässt das Bewusstsein schwinden. Sinkt die Kerntemperatur unter 28° C, wird das Atemzentrum gelähmt und es kommt zu Herzkammerflimmern.

Bei vielen Tauchunfällen in der Schweiz ist Unterkühlung ein wichtiger Kofaktor.



D

Prophylaxe und Therapie von Tauch- und Überdruckunfällen



1. Eignungs- und Kontrolluntersuchungen

Nur gesunde und körperlich leistungsfähige Personen sollten tauchen oder unter Überdruck arbeiten (Tab. 7). Schon geringe Gesundheitsstörungen können – vor allem beim Tauchen – fatale Folgen haben. Dazu zählen nicht nur körperliche Akuterkrankungen und zu Zwischenfällen prädestinierende chronische Veränderungen, sondern auch psychische Besonderheiten. Individuen, die zu Angstzuständen und Panikreaktionen neigen, setzen sich selber und ihre Tauchpartner einer klar erhöhten Gefahr von Zwischenfällen aus.

Tauglichkeitskriterien für Freizeittaucher

- Selbständig schwimmfähig
- Mentale Reife, die Eigenverantwortlichkeit gewährleistet
- Ausschluss von Leiden, die eine Bewusstseinsstrübung oder Orientierungsstörung auslösen können
- Ausschluss von Leiden, deren Symptome leicht Panik auslösen
- Ausschluss von Leiden, die ein Barotrauma begünstigen
- Ausschluss von Leiden, die durch das Tauchen verschlimmert werden können

Tabelle 7 Wichtige Tauchtauglichkeitskriterien (Quelle: Manual Tauchtauglichkeit SUHMS)

Aus diesem Grunde werden allen Sporttaucherinnen und Sporttauchern wiederkehrende medizinische Eignungsuntersuchungen empfohlen. Es ist wichtig, dass diese durch Ärzte vorgenommen werden, die ausreichende tauchmedizinische Kenntnisse besitzen. Nur so können sie die Exploranden kompetent beurteilen und beraten. Das gilt in ganz besonderem Masse für Kinder und behinderte Menschen, denen heute unter gewissen Bedingungen ebenfalls Zugang zur Unterwasserwelt ermöglicht werden soll.

Arbeitnehmende, die als professionelle Taucherinnen und Taucher sowie Überdruckarbeitende tätig sein wollen, müssen sich im Gegensatz zu Sporttauchern von Gesetzes wegen regelmässigen medizinischen Eignungsuntersuchungen unterziehen (Art. 72 Absatz 3 und Artikel 73 UVV). Die Untersuchungen werden von der Suva veranlasst und organisiert, sobald der zuständige Arbeitgeber eine Meldung an diese erstattet hat. Die Untersuchungen werden von praktizierenden Ärzten durchgeführt. Dabei werden nach Möglichkeit solche mit tauch- und überdruckmedizinischen Kenntnissen bevorzugt. Untersuchungsraster und Intervalle werden von der Suva vorgegeben, welche sich ihrerseits weitgehend nach den Vorgaben des European Diving Technology Committee (EDTC) richtet.

Die Erst- beziehungsweise Grunduntersuchung muss vor Arbeitsaufnahme erfolgen. Anschliessend wird sie bis zum Alter von 45 Jahren in fünfjährigen Abständen wiederholt, während man sich in den Zwischenjahren auf eine Kurzuntersuchung beschränkt. Nach dem 45. Altersjahr wird die Grunduntersuchung intensiviert, das heisst in 24 monatigen Abständen verlangt. Diese neue zeitliche Gliederung entspricht derjenigen, wie sie von der Suva für Hitze Exponierte im Sinne einer verbesserten Modularität der arbeitsmedizinischen Untersuchungsgänge festgelegt worden ist.

Die Erst- beziehungsweise Grunduntersuchung umfasst eine ausgedehnte Anamneseerhebung, eine klinisch neurologische, otorhinolaryngologische und kardiozirkulatorische Prüfung einschliesslich einer Spirometrie und eines Belastungstestes. Die eingesandten Befunde werden von den Fachärzten der Abteilung Arbeitsmedizin der Suva hinsichtlich der Eignung der gemeldeten Personen für die vorgesehenen Tauch- und Überdruckarbeiten beurteilt. Bei Unklarheiten werden von der Suva – allenfalls nach Rücksprache mit den untersuchenden Ärzten – Zusatzabklärungen veranlasst. Auch können Grunduntersuchungen bei entsprechender Indikation in kürzeren Zeitabständen erfolgen.

Die Untersuchungskosten einschliesslich eines allfälligen Lohnausfalles werden von der Suva übernommen.

2. Ausbildung

2.1. Sporttaucher

In der Regel absolvieren Sporttaucher zu Beginn ihrer Aktivität eine Ausbildung. Solche werden heute von allen Tauchorganisationen angeboten, auch wenn keine gesetzliche Ausbildungsverpflichtung besteht. Es ist jedoch im ureigensten Interesse jedes Sporttauchers und jeder Sporttaucherin, das nötige Wissen bezüglich der physikalischen Besonderheiten unter Wasser zu erwerben, die damit verbundenen Gefahren zu kennen und geeignete Verfahren zu trainieren, um später Tauchgänge korrekt zu planen und möglichst unfallfrei durchführen zu können.

Die Ausbildungsgrundsätze sind international weitgehend vereinheitlicht. Im Freizeitbereich sind im wesentlichen vier weltumspannende Organisationen bekannt, nach deren Grundsätzen und Ausbildungsstufen in allen Erdteilen Tauchunterricht angeboten und Brevets erteilt werden (Professional Association of Diving Instructors, PADI; Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques, CMAS; National Association of Underwater Instructors, NAUI; Scuba Schools International, SSI). Innerhalb Europas können sich die Tauchschulen beispielsweise durch die European Underwater Federation (EUF) für ihre Ausbildung beziehungsweise die ausgestellten Brevets zertifizieren lassen. Diese werden von den grossen Organisationen gegenseitig anerkannt. (EN 14153 für Ein- Zwei- und Dreisternbrevets sowie EN 14413 für Tauchlehrer).

2.2. Berufstaucher

Die Tätigkeit als Berufstaucher ist in der Schweiz kein vom Bundesamt für Berufsbildung und Technologie anerkannter Beruf. Entsprechend gibt es auch keine Lehrpläne und keinen eidgenössischen Fähigkeitsausweis. Berufstaucher werden deshalb von den sie beschäftigenden Arbeitgebern auf privater Basis geschult.

In vielen anderen Ländern existieren dagegen anerkannte Ausbildungsgänge und Fähigkeitsausweise für Berufstaucher. Es gibt sogar internationale Verbände, in denen die Schulen für professionelles Tauchen zusammengeschlossen sind.

2.3. Überdruckarbeiter

Personen, die unter Überdruck arbeiten, werden dafür nicht besonders ausgebildet. Sie müssen hingegen von ihren Arbeitgebern über die Besonderheiten und Gefahren der Überdruckarbeit und die zu deren Verhütung nötigen Massnahmen stufengerecht und ausreichend informiert werden. Bei erstmals im Überdruck Arbeitenden, die von der Suva die entsprechende medizinische Eignungsmitteilung erhalten haben, ist durch den Arbeitgeber eine Probeschleusung zu veranlassen. Information und Probeschleusung sind zu dokumentieren.

Besondere Chargen, wie zum Beispiel diejenige des «Verantwortlichen für Arbeiten in hyperbarer Umgebung» oder des «Schleusenwärters» müssen in Kursen für ihre Tätigkeit ausgebildet und geprüft werden.

3. Dekompressionstabellen

In Blut und Geweben bilden sich nur dann grössere und damit potentiell gefährliche Gasblasen, wenn der von aussen auf den Körper lastende Druck schneller sinkt, als die im Gewebe gelösten Gase durch das Blut zu den Lungen transportiert und an die Umgebungsluft abgeatmet werden können. Die Blasenbildung tritt allerdings erst ein, wenn ein gewisses Mass an Übersättigung überschritten wird. Um eine potentiell gefährliche Blasenbildung zu vermeiden, muss deshalb die Zeit für den Aufstieg, das heisst die Dekompression, nach eigens dafür aufgestellten und erprobten Tabellen eingehalten werden. Sie geben Anzahl, Tiefe und Dauer von Haltestufen und Sicherheitsstopps vor, die ihrerseits von der Dauer und Tiefe des Tauchganges beziehungsweise der Überdruckexposition abhängen. Ausserdem wird auch die Aufstiegsgeschwindigkeit zwischen den Haltestufen vorgegeben.

Unter «Nullzeit» versteht man die maximale Dauer eines Tauchganges in einer bestimmten Tiefe, Abstiegs-(Kompressions-) Zeit eingeschlossen, bis zu welcher anschliessend nur mit einem Sicherheitshalt, also ohne eigentliche Dekompressionsstopps aufgetaucht werden kann. Solche Tauchgänge werden auch als «nicht dekompressionspflichtig» bezeichnet.

Dekompressionstabellen lassen sich nicht wissenschaftlich exakt berechnen, da der Mensch als komplexes biologisches System zahlreiche nicht genau fassbare Variablen aufweist. Die Dekompressionstabellen sind deshalb auf empirischem Weg entstanden, indem langjährige Beobachtungen, experimentelle Untersuchungen sowie theoretische Überlegungen zu mathematischen Modellen geführt haben, die eine möglichst risikolose Dekompression nachzubilden versuchen. Dies erklärt auch die Tatsache, dass es verschiedene voneinander abweichende Tabellen gibt, die sich in mehr als nur unterschiedlichen Randbedingungen unterscheiden. Bei der Wahl einer geeigneten Dekompressionstabelle wird man daher in erster Linie auf die Erfahrungen achten, die bisher mit dieser Tabelle gemacht worden sind, das heisst, ob sie bei einer grossen Zahl von Tauchgängen/Kompressionen mit einer nur geringen Zahl von Zwischenfällen zum Einsatz gekommen ist. Weitere Auswahlkriterien sind neben der Sicherheit auch der Verwendungszweck und die Handhabung der Tabelle beziehungsweise die Flexibilität des ihr zu Grunde liegenden Rechenmodells für allfällige Modifikationen im Falle sich ändernder Randbedingungen. Tauchtabellen enthalten eine Sicherheitsmarge, welche unter anderem individuellen Unterschieden sowie Luftdruckschwankungen in dem für sie vorgesehenen Höhenbereich über Meer Rechnung tragen.

Eine Dekompressionstabelle, die diese Kriterien erfüllt, ist beispielsweise diejenige von Albert Bühlmann, dem ehemaligen Tauchmediziner und Professor für Pathophysiologie an der Medizinischen Fakultät der Universität Zürich. Das von ihm auf der Basis der Vorarbeiten von Haldane entwickelte mathematische Modell berücksichtigt die Stickstoffhalbwertszeiten für 16 verschiedene Gewebe bei Luftatmung (ZH-L16), lässt sich aber auch für andere Atemgasmischungen und das Tauchen in verschiedenen Höhenlagen einsetzen. Das Bühlmann Modell liegt heute – zum Teil in modifizierter Form – zahlreichen Tauchcomputern als Rechenalgorithmus zu Grunde (vgl. Abschnitt C Pkt. 3.1.2.)

Die Bühlmann-tabelle sieht Dekompressionsstopps beziehungsweise Sicherheitshalte in Tiefenstufen von jeweils drei Metern Abstand vor. Bis zu 10 m Tauchtiefe ist die Nullzeit unbeschränkt, bei 12 m beträgt sie – je nach Tabellenversion – 125 Minuten, bei 15 m 75 Minuten, bei 21 m 35 Minuten, bei 30 m 17 Minuten und so weiter, um nur einige Beispiele zu nennen (Tab. 8).

Da bei einem Tauchgang auch nach der Dekompression überschüssiges Inertgas in den Körperflüssigkeiten gelöst bleibt, sehen die Bühlmann-tabellen für Wiederholungs- beziehungsweise Repetitivtauchgänge, die innerhalb von höchstens 24 Stunden erfolgen, einen Zeitzuschlag vor. Dieser führt zu einer rechnerischen Verlängerung des Wiederholungstauchganges und damit der Dekompression. Das Ausmass des Zeitzuschlages richtet sich nach der Ausgangsrepetitivgruppe sowie der Dauer der Wartezeit bis zum Wiederholungstauchgang und muss einer Zusatz-tabelle entnommen werden.

Tiefe	Grundzeit	Aufstieg bis zum 1. Halt	Stufen			Gesamtaufstiegszeit	RG
m	min	min	9m	6m	3m	min	
12	125	1			1	2	G
	150	1			4	5	G
	180	1			10	11	H
15	75	1			1	2	G
	90	1			7	8	G
	105	1			10	11	H
	120	1			16	17	H
	150	1			27	28	H
18	51	2			1	3	F
	60	2			5	7	F
	70	2			11	13	G
	80	2			18	20	G
	90	2			21	23	H
21	35	2			1	3	D
	40	2			2	4	E
	50	2			8	10	F
	60	2			16	18	G
	70	2			24	26	G
	80	2		2	26	30	H
24	25	2			1	3	E
	35	2			4	6	F
	40	2			8	10	F
	50	2			17	19	G
	60	2		4	24	30	G
	75	2		10	29	41	H
27	20	3			1	4	E
	30	3			5	8	F
	35	3			10	13	F
	40	2		2	13	17	G
	45	2		3	18	23	G
	50	2		6	22	30	G
30	60	2		11	26	39	H
	17	3			1	4	D
	25	3			5	8	E
	30	2		2	7	11	F
	35	2		3	14	19	G
	40	2		5	17	24	G
	45	2		9	23	34	G
	50	2	1	10	28	41	G

Tabelle 8 Beispiel aus der Bühlmann Dekompressionstabelle (Version 1986) für den Höhenbereich 0–700 m ü. M. Die mit Buchstaben bezeichneten Repetitivgruppen (RG) weisen auf die nach der Dekompression verbleibenden Reststickstoffgehalte hin. Sie sind bei Folgetauchgängen als Zeitzuschläge zu berücksichtigen, was eine zusätzliche Spezialtabelle erfordert (Der reproduzierte Tabellenausschnitt ist nicht für den praktischen Einsatz gedacht!).

An der Oberfläche von Bergseen ist der Luftdruck niedriger, die Druckabnahme beim Auftauchen daher grösser. Folglich werden alle Dekompressionszeiten länger. Für verschiedene Höhenbereiche über Meer gibt es deshalb verschiedene Auftauch- beziehungsweise Dekompressionstabellen.

Eine Flugreise im Anschluss an einen Tauchgang stellt eine weitere Dekompression dar. Je nach Dauer und Tiefe eines vorangegangenen Tauchganges darf deshalb eine bestimmte Flughöhe nicht überschritten werden. Wenn der letzte Tauchgang im Meer unmittelbar vor dem Antritt des Rückfluges in die Heimat durchgeführt wird, treten während der Reise oft Dekompressionserscheinungen auf. Allgemein wird daher empfohlen, nach dem Tauchen bis zur ersten Flugreise 24 Stunden zuzuwarten.

Nur wenn alle hier genannten, in den Tabellen festgelegten Regeln genau eingehalten werden, ist die Gefahr einer relevanten Blasenbildung im Körper und somit auch die Gefahr einer Dekompressionskrankheit (DCI) vernachlässigbar, das heisst das Restrisiko akzeptabel.

Für Druckluftarbeiten, aber auch für das Personal in HBO-Kammern¹ gibt es spezifische Tabellen, welche an die besonderen Arbeitsbedingungen angepasst und meistens darauf ausgerichtet sind, die N₂-Elimination ab Überdrücken von ≤ 1 bar durch reine O₂-Atmung zu beschleunigen (Vgl. Abschnitt C Pkt. 4.4.3.)

4. Tauchausrüstung und Tauchplanung

Da der Aufenthalt und das Arbeiten unter Wasser durch die besonderen Umgebungsbedingungen (vgl. Kapitel A 1.) eine beachtliche Gefährdung bedeuten, sind einerseits bei der Planung und Ausführung Sicherheitsmassnahmen zu berücksichtigen und andererseits Beeinträchtigungen durch eine geeignete Ausrüstung so zu reduzieren, dass ein Arbeiten mit akzeptablem Restrisiko möglich wird.

Berufstaucher arbeiten deshalb oberflächenversorgt über ein Umbilical, das heisst eine kombinierte Vorrichtung, die zum einen Atemgas sowie allenfalls notwendige Energie zuführt und zum anderen der Kommunikation mittels Telefonie oder allenfalls Video dient. Das Umbilical ist überdies so konstruiert, dass es gleichzeitig als Sicherheitsleine benützt werden kann. Für Zwischenfälle steht ein einsatzbereiter Sicherheitstaucher zur Verfügung. Dieses Vorgehen ermöglicht es dem Berufstaucher – im Gegensatz zum Sporttaucher – sich ganz auf seine Arbeit zu konzentrieren, während seine Überwachung sowie diejenige der Tauchparameter von der Oberfläche aus durch einen Supervisor erfolgt. In der Schweiz wird der Supervisor auch als Signalmann oder gemäss der «Verordnung über die Sicherheit der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer bei Arbeiten in hyperbarer Umgebung» als Verantwortlicher für die Arbeiten in hyperbarer Umgebung bezeichnet. Diese Verordnung ist derzeit in Bearbeitung und soll die alte «Druckluftverordnung» von 1961 ersetzen (SR 832.311.12). Im Gegensatz dazu will der Sporttaucher bezüglich Profil und Gestaltung des Tauchganges so frei wie möglich bleiben. Ein professionelles Sicherheitsmanagement ist damit praktisch ausgeschlossen. Umso bedeutender ist daher, dass im Rahmen der erworbenen Kompetenz (niveaugerecht)

¹ HBO bedeutet hyperbare Oxygenierung, d.h. therapeutische Verabreichung von Sauerstoff unter erhöhtem Druck

getaucht wird und dass technische Einrichtungen zum Beherrschen eines Zwischenfalles durch den Taucher selbst bereit gestellt werden, auch wenn dies gesetzlich nicht zwingend vorgeschrieben ist.

4.1. Anzüge und Zubehör

Die einfachste Ausrüstung, diejenige für das Schnorcheln, wird auch als Grund- oder ABC Ausrüstung bezeichnet. Sie umfasst eine Tauchermaske (Brille mit Nasenerker), einen Schnorchel und Flossen.

Für das eigentliche Gerätetauchen wird darüberhinaus eine erweiterte Ausrüstung benötigt. Zu ihr gehören die Atemgasversorgung mit Regler (vgl. Kap. B 1.6) und in unseren Klimaverhältnissen auch ein Tauchanzug, Sogenannte Nasstauchanzüge bestehen aus Neopren, welches dank bläschenförmigen Lufteinschlüssen isolierend wirkt. Da Neoprenanzüge im Bereich von Hals sowie Hand- und Fussgelenken das Eindringen von Wasser erlauben, bildet sich zwischen Körper und Tauchanzug ein sta-



Abbildung 20 Ein wichtiges Element der Sporttaucherausrüstung ist das Stabilizing Jacket. Über den dünnen Schlauch lässt es sich aus der mitgeführten Atemgasflasche (nicht abgebildet) mit Luft füllen. Alternativ kann dies auch über das integrierte Mundstück durch Einblasen erfolgen (Insufflator am Faltenschlauch). Mit dem roten Knopf kann Luft wieder abgelassen werden. Auf diese Weise kann der Taucher in jeder Tiefe seinen Auf- und Abtrieb steuern.

Bild: Firma Scubapro

tionärer Wasserfilm, welcher zusätzlich isolierend wirkt. Zum Anzug kommen Füsslinge und Handschuhe aus Neopren sowie je nach Anzugstyp eine Kopfhaut hinzu.

Ein weiterer wichtiger Ausrüstungsgegenstand ist die Tarierweste, das sogenannte «stabilizing jacket» (buoyancy compensating device BCD), das mit der Atemgasflasche in Verbindung steht und je nach Bedarf über ein Ventil mehr oder weniger gebläht werden kann (Abb. 20). Mit der Weste lassen sich Auf- und Abtriebskräfte abhängig von der Tiefe austarieren, um jederzeit im Wasser schweben zu können. Ergänzt wird die Ausrüstung durch einen Bleigurt zur Erzeugung von Abtrieb sowie ein Messer (Loslösen von Pflanzen und anderen Hindernissen, in welchen sich der Taucher verfangen kann). Je nach vorgesehener Art und Tiefe des Tauchganges müssen weitere Ausrüstungsgegenstände wie Lampe und Kompass mitgeführt werden.

Der Trockentauchanzug ist im Gegensatz zum Nassanzug vollkommen wasserdicht. Man trägt darunter isolierende Wäsche. Zwischen Anzug und Körper ist Luft, deren Volumen man möglichst konstant zu halten versucht, was eine wiederholte Korrektur durch Gaseinblasen und Ablassen bei Tiefenänderungen nötig macht. Im Notfall kann somit der Trockenanzug auch als «Rettungsaufstiegs-Ersatzweste» eingesetzt werden, erfordert aber insgesamt deutlich mehr Geschick in der Handhabung als der Nassanzug, das heisst, er ist für Anfänger nicht geeignet.

4.2. Pressluft-/Atemgasversorgung

Die für das Atmen erforderliche Luft wird komprimiert und von Sporttauchern in Flaschen aus Stahl, Aluminium oder Composite Werkstoffen mitgeführt. Bei den letztgenannten handelt es sich um dünnwandige Metallinnenflaschen, die aussen mit einer Carbonfaser laminierten Kunststoffschicht verstärkt sind und höhere Füllungsdrücke ermöglichen. Die Flaschen sind über eine sogenannte «backplate» mit der Tarierweste verbunden und werden rucksackartig getragen. Üblich sind Flaschengrössen zwischen 10, 15 und maximal 20 Litern bei einem Druck von 200 bar und mehr in gefülltem Zustand, was bei Normaldruck einer Luftmenge von rund 2000–4000 Litern oder mehr entspricht. Mitgeführt werden je nach geplantem Tauchgang eine oder zwei Flaschen.

Hinzukommen der zweistufige Lungenautomat (Atemregler), ein Reserveautomat (Oktopus), ein Tauchcomputer (vgl. nächsten Punkt), zusätzlich ein Finimeter, das den Luftvorrat in der/den Flasche/n anzeigt, ein Tiefenmesser und eine Uhr. Eine echte Pannensicherheit beim Flaschentauchen lässt sich allerdings erst dann erreichen, wenn zwei völlig voneinander getrennte Flaschen mit separaten Atemreglern mitgeführt werden.

4.3. Tauchcomputer

Früher gehörte es zur Tauchgangsplanung, sich Gedanken zur vorgesehenen Tiefe und Tauchdauer zu machen, die dafür zu berücksichtigende Dekom-

pressionszeit mit Dekompressionstabellen zu berechnen und den insgesamt erforderlichen Luftvorrat abzuschätzen.

Heute bedienen sich die Taucher praktisch ausnahmslos eines Tauchcomputers, der – ähnlich einer Uhr – am Handgelenk getragen wird (Abb. 21). Dieser misst sämtliche relevanten Daten, zum Beispiel den atmosphärischen Druck, den Wasserdruck (zur Berechnung der Tiefe) und die Zeit. Das Rechenprogramm bestimmt die für das Auftauchen erforderlichen Dekompressionsstopps sowie Sicherheitshalte und auf dem Display werden verschiedene Warnungen angezeigt, beispielsweise beim Überschreiten der Nullzeit oder zu raschem Aufstieg. Weiterentwickelte sogenannte gasintegrierte Modelle überwachen zudem den Atemluftverbrauch und geben zu jedem Zeitpunkt die noch verbleibende Tauchzeit an. Tauchcomputer lassen sich nach entsprechender Programmierung auch für Nitrox oder andere Gasgemische verwenden. Sie vermögen auch komplizierte Tauchprofile (sogenannte Multilevel-Tauchgänge) zu berechnen, die früher mit Hilfe von Tabellen kaum getaucht werden konnten. Tauchcomputer haben auf diese Weise das Tauchen bequemer gemacht. Dennoch sollte auf die Planung des Tauchganges nicht verzichtet werden, auch wenn die Dekompressionszeiten heute nicht mehr im Voraus berechnet werden müssen. Die Taucher sollten sich bewusst sein, dass beim Tauchen «nach Computer» – vor allem bei Multilevel-Tauchgängen – geringere Sicherheitsmargen bestehen können als beim Tauchen «nach Tabelle», da mit Tabellen nur rechteckige Profile auf der Maximaltiefe berücksichtigt werden können.



Abbildung 21 Tauchcomputer; ein am Handgelenk getragenes oder am Hochdruckschlauch befestigtes Instrument, das u.a. Tauchzeit, herrschenden Druck bzw. momentane Tauchtiefe sowie verbleibende Atemgasreserve registriert. Gestützt darauf zeigt das Gerät dem Taucher an, bis wann längstens innerhalb der sog. Nullzeit getaucht werden kann bzw. wann welche Deko'stopps einzuhalten sind.

Bild: Ernst Voellm, Kilchberg

5. Alarmierung und erste Hilfe bei Tauch- und Überdruckunfällen

Bei der Planung eines Tauchgangs ist es wichtig, sich zu überlegen, was bei einem allfälligen Unfall vorzukehren ist. Dazu gehört – in Abhängigkeit vom Tauchplatz – die richtigen Telefonnummern zur Alarmierung der Rettungsdienste bei der Hand zu haben. Gerade im Ausland ist dies von entscheidender Bedeutung. Ausserdem sind allgemeine sowie tauch- und überdruckspezifischen Erste Hilfe Massnahmen zu erlernen und regelmässig aufzufrischen.

Ereignet sich dennoch ein Tauchzwischenfall, so ist nach Kontrolle und Aufrechterhaltung der Vitalfunktionen das Verabreichen von normobarem Sauerstoff über eine Maske die wichtigste therapeutische Sofortmassnahme. Sie ist so rasch wie möglich einzuleiten und bis zur professionellen Weiterbehandlung sicher zu stellen. Allen Sporttauchern, insbesondere wenn sie in Gruppen tauchen, ist deshalb zu empfehlen, ein Sauerstoffbeatmungsgerät mitzuführen, dessen Handhabung zu beherrschen und dieses am Tauchplatz bereit zu halten (Abb. 22).



Abbildung 22 Beatmung mit normobarem Sauerstoff als therapeutische Sofortmassnahme bei Verdacht auf DCI. Dazu eignen sich geschlossene Geräte mit Rückatemventil und CO₂-Absorber, da mit ihnen erheblich Sauerstoff eingespart werden kann.

Bild: M. Rüegger, M. Oehler, Ch. Wölfel

In allen Fällen, in denen professionelle medizinische Hilfe erforderlich ist, kann diese aus der Schweiz über die REGA Notrufnummer 1414 unter dem Stichwort «Tauchunfall» angefordert werden. Erfolgt die Alarmierung über die Nummer 144, so ist unter Umständen damit zu rechnen, dass ein Ambulanzfahrzeug an der Unfallstelle eintrifft und den Patienten ins nächstbeste Spital fährt. Dieses dürfte aber kaum über eine therapeutische Druckkammer und vielleicht auch nicht über kompetentes Fachwissen bezüglich Tauch- und Überdruckmedizin verfügen, so dass zeitraubende Sekundärtransporte die Folge sind. Demgegenüber ist die REGA in der Lage, Patienten mit Tauchzwischenfällen ins nächstgelegene Behandlungszentrum zu fliegen oder wo sinnvoll fahren zu lassen. Schweiz weit gibt es ein solches mit 24 Stunden Bereitschaftsdienst zur Zeit nur noch in Genf, so dass Patienten aus der Nordost- und der Südschweiz ins nahegelegene Ausland transportiert werden müssen.

Die REGA amtiert ausserdem als Notfallzentrale des «Divers Alert Network (DAN)» und kann bei Tauchunfällen im In- und Ausland den diensthabenden Tauchmediziner (DAN Pikettarzt) alarmieren, welcher den Beteiligten umgehend für telefonische Beratungen zur Verfügung steht.

Die selben Prinzipien für die Soforthilfe gelten auch für Equipen, die Unterwasserarbeiten ausführen. Sie müssen zwingend über ein Notfallkonzept verfügen, in welchem Erste Hilfe und Rettungsmassnahmen klar geregelt sind.

Auch bei Überdruckbaustellen stellen Notfall- und Rettungskonzepte zwingende Bestandteile von Planung und Ausführung dar. Betroffene Unternehmer müssen zudem über eine in Tauch- und Überdruckmedizin qualifizierte Arztperson verfügen, die sowohl zur fachlichen Beratung als auch für überdruckmedizinische Notfälle beigezogen werden kann.

Je nach Art des Tauchprojektes beziehungsweise der Baustelle gehört auch eine Behandlungskammer dazu, für deren Errichtung und Betrieb der Unternehmer zuständig ist. Derartige Projekte werden bezüglich Arbeitssicherheit auch von der Suva begleitet.

Details können der zur Zeit in Revision sich befindenden «Verordnung über die Sicherheit der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer bei Arbeiten in hyperbarer Umgebung» entnommen werden.

6. Professionelle Behandlung von Tauch- und Überdruckunfällen

Die eigentliche Behandlung muss nach Kurzanamnese und tauchmedizinischer Notfalluntersuchung in einer therapeutischen Druckkammer nach vorgegebenen Programmen stattfinden. Wesentlichster Bestandteil der Überdruckbehandlung ist die Rekompensation mit gleichzeitiger Sauerstoffatmung, die wegen deren Toxizität nur bis zu einem absoluten Höchstdruck von 2,8 bar (entsprechend 1,8 bar Überdruck) erfolgen kann. Dabei wird dem Verunfallten in jeweils 20-minütigen Therapieintervallen reiner Sauerstoff verabreicht. Nach 75 Minuten wird der Überdruck von 1,8 auf 0,9 bar gesenkt und mit den bereits erwähnten Zeitintervallen bis zu einer Gesamtdauer von 255 Minuten fortgesetzt. Daran anschliessend erfolgt dann eine sehr langsame Druckabsenkung bis auf den Umgebungsdruck. Diese Intervalle werden regelmässig von 5 minütigen Luftpausen unterbrochen, um einer allfälligen Sauerstofftoxizität entgegenzuwirken.



Abbildung 23a Beispiel einer in einem Container montierten Behandlungskammer auf der Baustelle.

Bild: PraderLosinger SA/Nordseetaucher GmbH



Abbildung 23b Bedienungs- und Überwachungskonsole für den Kammerfahrer.

Bild: PraderLosinger SA/Nordseetaucher GmbH

Dieses Behandlungsschema entspricht der US amerikanischen Navy Tabelle 6 (TS 260-80), von welcher verschiedene Modifikationen bestehen, bei denen zum Teil die 2,8 bar Gesamtdrucklimite (reiner Sauerstoff) überschritten wird, allerdings unter vorübergehendem Einsatz anderer Gase, zum Beispiel Helium. Tritt keine Schmerzfremieit oder keine eindeutige Besserung des Zustandsbildes ein, so kann die Beandlung nach dem gleichen oder einem etwas anderen Schema wiederholt werden. Für Details wird auf Spezialliteratur verwiesen.



Abbildungen 24a, b Behandlungskammer im Spital, die pro Einheit 8 sitzenden oder drei sitzenden und einem liegenden Patienten zur Beatmung mit reinem Sauerstoff Platz bietet. Entsprechend ist eine aufwändige Überwachungseinheit erforderlich.

Bilder: Julien Gregorio und Dr. J-Y. Berney, HUG



E Versicherungsrechtliche Begriffe



1. Der Unfall

Art. 4 des Bundesgesetzes über den Allgemeinen Teil des Sozialversicherungsrechtes (ATSG) definiert den Unfallbegriff wie folgt:

Als Unfall gilt die plötzliche, nicht beabsichtigte, schädigende Einwirkung eines ungewöhnlichen äusseren Faktors auf den menschlichen Körper.

Der Unfallbegriff ist somit rechtlicher Natur. Er deckt sich – vor allem im Rahmen der Taucherei – nicht zwingend mit dem medizinischen Fachausdruck Trauma.

Alle fünf Elemente des Unfallbegriffes müssen gleichzeitig zutreffen; wenn auch nur ein Element fehlt, entspricht das Ereignis nicht einem Unfall im gesetzlichen Sinne und wird vom UVG Versicherer nicht als solcher übernommen.

Das Erfordernis der **Plötzlichkeit** dient vor allem der Abgrenzung gegenüber gewöhnlichen Krankheiten und gegenüber wiederholten geringfügigen Einwirkungen, die für sich allein zu keiner Schädigung führen würden. Die Plötzlichkeit bezieht sich ausserdem auf die Einwirkung und nicht auf das Auftreten der Beschwerden.

Das Merkmal **ungewöhnlich** bedeutet, dass das Alltägliche deutlich überschritten werden muss. Übliche äussere Ereignisse fallen nicht unter den Begriff des Unfalles. Die beim Tauchen normalerweise auftretende Zu- und Abnahme des Druckes sowie dessen übliche Schwankungen gelten daher nicht als ungewöhnlich.

Äusserer Faktor bedeutet, dass eine Schädigung nicht übernommen wird, wenn ihre Ursache im menschlichen Körper selbst zu suchen ist.

Zwischen dem Unfallereignis und der Gesundheitsschädigung ist ein adäquater Zusammenhang zu fordern, das heisst das Ereignis muss die entscheidende Ursache für die Gesundheitsstörung sein. Barotraumatismen entstehen in der Regel, wenn aus körperinternen Gründen der Druckausgleich in einem Hohlorgan nicht möglich ist. Sie sind deshalb nur dann Unfälle im Sinnes des Gesetzes, wenn ihnen eine ungewöhnliche beziehungsweise aussergewöhnliche Druckänderung vorausgegangen ist.

Auch Folgen der Dekompressionskrankheit erfüllen in der Regel den Unfallbegriff nicht. Sie können nur dann als Unfall gelten, wenn beispielsweise die Dekompressionsvorschriften infolge einer aussergewöhnlichen Gefahr in der Tiefe oder zur Rettung des Tauchpartners nicht eingehalten werden konnten.

Einen Unfall erleidet dagegen, wenn unbeabsichtigt Wasser in die Atemwege eindringt, so dass dieses einen Gesundheitsschaden hervorruft oder im schlimmeren Fall zum Ertrinken führt. (vgl. Kapitel C 5).

2. Unfallähnliche Körperschädigungen

Es gibt eine Reihe von Schädigungen, die nicht die Folge eines Unfalles im Sinne der obigen Definition sind. Andererseits sind sie aber auch nicht als Krankheiten einzustufen. Für diese «Zwitteraffektionen» wurde der Begriff der unfallähnlichen Körperschädigung geprägt.

Das Bundesgesetz über die Unfallversicherung (UVG) gewährt für gewisse unfallähnliche Körperschädigungen einen Rechtsanspruch auf Versicherungsleistungen. In der zum UVG gehörenden Verordnung über die Unfallversicherung sind diese in die Versicherung einbezogenen Körperschädigungen einzeln und abschliessend aufgezählt (Art. 9 Abs. 2 UVV).

Voraussetzungen für eine Anerkennung sind ein unfallähnlicher Vorgang und ein sofortiger Schmerzauftritt. Für Taucher von Interesse ist, dass im Absatz 2 unter anderem Trommelfellverletzungen genannt und damit nach dieser Regelung übernommen werden, auch wenn sie Folge eines Barotraumas sind, das den Unfallbegriff nicht erfüllt.

3. Die Berufskrankheit

Das UVG sagt im Art. 9, Abs. 1 folgendes über die Versicherung von Berufskrankheiten:

Als Berufskrankheiten gelten Krankheiten, die bei der beruflichen Tätigkeit ausschliesslich oder vorwiegend durch schädigende Stoffe oder bestimmte Arbeiten verursacht worden sind. Der Bundesrat erstellt die Liste dieser Stoffe sowie der arbeitsbedingten Erkrankungen.

In Abs. 3 wird hinzugefügt, dass – soweit nicht anderes bestimmt ist – *Berufskrankheiten von ihrem Ausbruch an einem Berufsunfall gleichgestellt sind. Sie gelten als ausgebrochen, sobald der Betroffene erstmals ärztlicher Behandlung bedarf oder arbeitsunfähig wird.*

Die erwähnte bundesrätliche Liste findet sich im Anhang zu Art. 9 Abs. 1 UVV. Erkrankungen durch Arbeiten in Druckluft werden darin aufgeführt. Krankheiten als Folge der Änderung des Luftdruckes wie Barotraumatata oder Dekompressionsschäden sind also versichert, sofern sie durch die Ausübung des Berufes entstanden sind. Unter «Arbeiten in Druckluft» wird nicht nur das Arbeiten in Caissons oder anderen unter erhöhtem Druck stehenden Räumen verstanden, sondern auch das berufliche Tauchen. Da es keine «ausserberuflichen Berufskrankheiten» gibt, müssen bei Schäden durch ausserberufliches Tauchen der Unfallbegriff oder die Voraussetzungen für eine unfallähnliche Körperschädigung erfüllt sein, damit Leistungen der UVG Versicherer erbracht werden können.

4. Die Grobfahrlässigkeit

Die schuldhafte Herbeiführung eines Unfalles ist im Art. 37 UVG geregelt. Speziell sei dessen Absatz 2 erwähnt, der sinngemäss folgendes festhält: Hat der Versicherte den (Nichtberufs-) Unfall grobfahrlässig herbeigeführt, so werden die Taggelder, die während der ersten zwei Jahre nach dem Unfall ausgerichtet werden, gekürzt. Die Kürzung beträgt jedoch höchstens die Hälfte der Leistungen, wenn der Versicherte zum Zeitpunkt des Unfalles für Angehörige zu sorgen hat, denen bei seinem Tod Hinterlassenenrenten zustehen würden oder wenn er an den Unfallfolgen stirbt. Eine Kürzung nach diesem Gesetzesartikel ist auch bei tauchbedingten Körperschäden möglich, obwohl sie die Kriterien des Unfalles erfüllen. Wer zum Beispiel in elementarer Weise gegen allgemein anerkannte Tauchregeln verstösst, indem er alleine oder mit ungenügender oder schlecht gewarteter Ausrüstung taucht oder die Dekompressionszeiten vorsätzlich nicht einhält, muss mit Kürzungen rechnen. Es werden also bei Grobfahrlässigkeit nur die Heilkosten vollumfänglich übernommen.

5. Das Wagnis

In Art. 39 des UVG heisst es:

Der Bundesrat kann aussergewöhnliche Gefahren und Wagnisse bezeichnen, die in der Versicherung der Nichtberufsunfälle zur Verweigerung sämtlicher Leistungen oder zu Kürzungen der Geldleistungen führen.

Nach Art. 50 Abs. 2 UVV sind Wagnisse Handlungen, mit denen sich der Versicherte einer besonders grossen Gefahr aussetzt, ohne die Vorkehrungen zu treffen oder treffen zu können, die das Risiko auf ein vernünftiges Mass beschränken. Als Wagnis gelten zum Beispiel extrem schwierige Klettereien sowie Hochtouren mit ungenügender Ausrüstung und mangelhaftem oder fehlendem Training.

Im allgemeinen gilt das Tauchen mit Pressluft in Tiefen von mehr als 40 m als ein Wagnis, weil jenseits davon die Gefahr einer Stickstoffnarkose deutlich ansteigt. Überdies ist ganz allgemein davon auszugehen, dass die Probleme und damit die Gefahren erheblich zunehmen, je tiefer man taucht (zum Beispiel beim technischen Tauchen).

Diese Limite von 40 m wurde im Jahr 2010 nach einer Aussprache zwischen verschiedenen schweizerischen Tauchorganisationen einerseits und Versicherungsgesellschaften (inkl. Suva) andererseits bestätigt. Die Praxis der Suva beinhaltet insofern einen Spielraum, als dass Tauchgängen mit Pressluft bis zu 50 m Tiefe der Charakter eines Wagnisses abgesprochen werden kann, wenn sie von Tauchern mit ausserordentlich guter Ausbildung und ausserordentlich grosser Erfahrung durchgeführt werden. Diese Voraussetzungen erfüllen in der Regel nur Tauchinstruktoren.

Rettungshandlungen zu Gunsten von Personen sind indessen auch dann versichert, wenn sie an sich als Wagnis betrachtet werden müssten.

6. Die Versicherung von Sporttauchern

Aus den vorangehenden Ausführungen geht hervor, dass die UVG Versicherer nur dann Schäden beim ausserberuflichen Tauchen übernehmen, wenn der gesetzlich definierte Unfallbegriff oder die Voraussetzungen für eine unfallähnliche Körperschädigung erfüllt sind. Um Versicherungslücken zu vermeiden, wird deshalb allen Personen, die den Tauchsport betreiben, das Abschliessen einer entsprechenden Zusatzversicherung empfohlen.

F

Weiterführende Informationen



Gesetzliche Grundlagen

Bundesgesetz vom 6. Oktober 2000 über den Allgemeinen Teil des Sozialversicherungsrechts (ATSG)

SR 830.1

Bundesgesetz vom 20. März 1981 über die Unfallversicherung (UVG)

SR 832.20

Verordnung vom 20. Dezember 1982 über die Unfallversicherung (UVV)

SR 832.202

Verordnung vom 19. Dezember 1983 über die Verhütung von Unfällen und Berufskrankheiten (VUV)

SR 832.30

Verordnung vom 20. Januar 1961 über die technischen Massnahmen zur Verhütung von Unfällen und Berufskrankheiten bei Arbeiten unter Druckluft

SR 832.311.12

Verordnung vom 29. Juni 2005 über die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer bei Bauarbeiten (BauAV)

SR 832.311.141

Eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit (EKAS):
Beizug von Arbeitsärzten und anderen Spezialisten der Arbeitssicherheit.

Spezialrichtlinie Nr. 6508

Übersichten, Lehrbücher

Layon A.J., Modell J.H.: Drowning. Update 2009.
Anesthesiology 2009; 110: 1390–1401

Levett D.Z.H., Millar I.L.: Bubble trouble: a review of diving physiology and disease. Postgrad Med J 2008; 84: 571–578

Lynch H.J., Bove A.A.: Diving Medicine: A Review of Current Evidence.
J Am Board Fam Med 2009; 22: 399–407

Nussberger P., Knessl P., Wölfel Ch., Torti S.: Tauchmedizin, ein Überblick, Teil 1 und 2
Schweiz Med Forum 2007;7:970–974 und 990–993

Tetzlaff K., Thorsen E.: Breathing at Depth: Physiologic and Clinical Aspects of Diving while Breathing Compressed Gas.
Clin Chest Med 2005; 26: 355–380

Vann R.D., Butler F.K., Mitchell S.J., Moon R.E.: Decompression Illness.
Lancet 2010; 377: 153–64

Bühlmann A.A., Völlm E.B., Nussberger P.: Tauchmedizin. Barotrauma, Gasembolie- Dekompression, Dekompressionskrankheit, Dekompressionscomputer.
5. Auflage, Springer Verlag, 2002

Ehm O.F., Hahn M., Hoffmann U., Wenzel J.: Der neue Ehm. Tauchen noch sicherer: Tauchmedizin für Freizeittaucher, Berufstaucher und Ärzte.
11. Auflage, Pietsch Verlag, Stuttgart, 2011,

Klingmann Ch., Tetzlaff K.: Moderne Tauchmedizin. Handbuch für Tauchlehrer, Taucher und Ärzte.
2. vollständig überarbeitete Auflage, Gentner Verlag Stuttgart, 2012

Wendling J. et.al.: Tauchtauglichkeit, Manual, ISBN: 3952228400,
zu beziehen über die SUHMS (www.suhms.org.ch)

Brubakk A.O., Neuman T.S.: Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving.
5. Auflage, Verlag Elsevier Saunders, 2002

Edmonds C. , Lowry Ch., Pennefather J., Walker R.: Diving and Subaquatic Medicine.
4. Auflage (paper back), Verlag Hodder, London, 2005,

Wendling J., Elliott D., Nome T.: Medical assessment of working divers.
Hyperbaric Editions, CH 2501 Biel-Bienne, ISBN 3-9522284-2-7, zu
beziehen über IMCA (siehe Links)

Avanzi P., Galley P., Héritier F.: Plonger en sécurité.
Edition Gründ, Paris, 2000

Broussole B., Méliet J.-L., Coulange M.: Physiologie et médecine
de la plongée.
2^e édition, Edition Ellipses Paris, 2006

Wattel F., Mathieu D.: Traité de médecine hyperbare.
Edition Ellipses Paris, 2002

Fiorito A.: Medicina Subacquea
Editrice La Mandragora, 2006

Weiterführende Literatur

Asthma: Empfehlungen 2011 – 2014 der Schweizerischen Gesellschaft
für Unterwasser- und Hyperbarmedizin „SUHMS“; zu beziehen bei:
<http://www.suhms.org/>

Barak M., Katz Y.: Microbubbles; Pathophysiology and
Clinical Implications.
CHEST 2005; 128: 2918–2932

D'Agostino D.P., Colomb D.G. Jr., Dean J.B.: Effects of hyperbaric
gases on membrane nanostructure and function in neurons.
J Applied Physiol 2009; 106: 996–1003

Handlungsanleitung Tauchereinsätze mit Mischgas;
Berufsgenossenschaftliche Information 897;
Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, Berlin, 2007

Hutter C.D.D.: Dysbaric osteonecrosis: a reassessment and hypothesis.
Medical Hypotheses. 2000 Apr; 54(4): 585–590

Jain K.K.: Oxygen Toxicity pp 48 - 58 in: Jain K.K.: Textbook of
Hyperbaric Medicine, 5th revised and expanded edition, Hogrefe
Publishing, Cambridge MA, 2009

Jardine F.M., McCallum R.I. (Editors): Engineering and Health in Compressed Air Work. Proceedings of the International Conference, Oxford, September 1992, E & FN Spon, London 1994

Klingmann Ch., Praetorius M., Baumann I., Plinkert P.K.: Otorhinolaryngologic disorders and diving accidents: an analysis of 306 divers. Eur Arch Otorhinolaryngol 2007; 264:1243–1251

Kraus M., Wendling J.: Diving and Cardiology, Cardiovascular Medicine 2012;15(1):14–17

Langford N.J.: Carbon dioxide poisoning. Toxicol Rev 2005;24(4):229–235

Lindholm P., Lundgren C.E.G.: The physiology and pathophysiology of human breath-hold diving. J Appl Physiol 2009; 106: 284–292

McMullin AM.: Scuba Diving: What you and your patients need to know. Cleveland Clinic Journal of Medicine 2006; 73: 711–721

Neuman T.S.: Arterial Gas Embolism and Decompression Sickness. News Physiol Sci 2002; 17: 77–81

Pons M., Blickensdorfer D. et al.: Pulmonary oedema in healthy persons during scuba-diving and swimming. Eur Respir J 1995; 8: 762–767

Prockop L.D., Chichkova R.I.: Carbon monoxide intoxication: An updated review. Journal of the Neurological Sciences 2007; 262:122–130

Robichaud R., McNally M.E.: Barodontalgia as a Differential Diagnosis: Symptoms and Findings. J Can Dent Assoc 2005; 71: 39–42

Torti S.R., Billinger M. et.al.: Risk of decompression illness among 230 divers in relation to the presence and size of patent foramen ovale. European Heart Journal 2004; 25: 1014–1020

Walder D. N.: Bone necrosis, pp 16–28 in: Jardine F. M., McCallum R.I. (ed.) Engineering and Health in Compressed Air Work. Proceedings of the International Conference, Oxford, September 1992, E & FN Spon, London 1994.

Kontaktadressen und Links für weitere Informationen

Suva

Abteilung Arbeitsmedizin, Postfach, 6002 Luzern
Tel. 041 419 52 78, Fax 041 419 62 05
Abteilung Arbeitssicherheit, Bereich Bau, Postfach, 6002 Luzern
Tel. 041 419 50 49, Fax 041 419 58 86

EKAS

Eidgen. Koordinationskommission für Arbeitssicherheit
www.ekas.admin.ch
Gesetzliche Grundlagen und Richtlinien zur Arbeitssicherheit in der Schweiz

SUHMS

Schweizerische Gesellschaft für Unterwasser- und Hyperbarmedizin
www.suhms.org
Publikationen zur Tauchtauglichkeit und den Weiterbildungscurricula für tauchmed. interessierte Ärztinnen und Ärzte

FTU

Fachstelle für Tauchunfallverhütung
www.ftu.ch
Publikationen über Tauchunfalluntersuchungen, nützliche Tauchtipps und Medienmitteilungen

SGARM

Schweizerische Gesellschaft für Arbeitsmedizin
www.sgarm.ch
Allg. arbeitsmedizinische Informationen sowie nationale Regelungen und Stellungnahmen

GTÜM

Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin
www.gtuem.org
Informationen zur Tauchtauglichkeit und zur Tauchunfallbehandlung (Deutschland)

Medsubhyp

La Société de Médecine et de Physiologie Subaquatique et Hyperbare de langue française
www.medsubhyp.com
Informationen und Veranstaltungen zum Thema Tauch- und Hyperbarmedizin in französischer Sprache

SIMSI

Società Italiana di Medicina Subacquea ed Iperbarica

www.simsi.org

Informationen und Veranstaltungen zum Thema Tauch- und Hyperbarmedizin in italienischer Sprache

DAN

Divers Alert Network, Bereich Europa

www.daneurope.org

Weltweit tätige Taucherorganisation. Vermittelt Beratung und Hilfe bei Tauchunfällen, forscht und publiziert über Fragen der Tauchtechnik und Tauchsicherheit

IMCA

International Marine Contractors Association

www.imca-int.com

Erarbeitung und Publikation von Sicherheits- und Kompetenzstandards für die verschiedenen Funktionen in beruflichen Tauchequipen

IDSA

International Diving Schools Association

www.idsaworldwide.org

Erarbeitung und Publikation von Ausbildungsgrundsätzen und -standards für das berufliche Tauchen

FGU

Fachgruppe Untertagebau, Swiss Tunnelling Society STS

www.swisstunnel.ch

Organisation von wissenschaftlichen Kongressen sowie Erarbeitung und Publikation zu verschiedenen Fragen des Untertagebaus. Ist ein Fachverein des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA).

ITA

International Tunnelling and Underground Space Association

www.ita-aites.org

Erarbeitung von Publikationen zu verschiedensten Themen des Tunnelbaus, u.a. unter hyperbaren Bedingungen

Suva

Postfach, 6002 Luzern
Telefon 041 419 58 51
www.suva.ch

Ausgabe: Juni 2012

Bestellnummer

2869/8.d