

# Tauchmedizin, ein Überblick

## Teil 1

Peter Nussberger<sup>a</sup>, Peter Knessl<sup>b</sup>, Christian Wölfel<sup>c</sup>, Sandra Torti<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Gemeindespital Riehen, <sup>b</sup> Spital Sanitas Kilchberg, <sup>c</sup> Kantonsspital Bruderholz, <sup>d</sup> Herzzentrum Bern



### Quintessenz

- Keine Freizeit- oder Berufsaktivität ist mit grösseren physiologischen Veränderungen verbunden als das Tauchen.
- Die meisten Taucher sind sogenannte Freizeittaucher. Viele tauchen aber mit Sachkenntnis, haben viel Erfahrung und eine fundierte Ausbildung in Tauchtheorie und -praxis.
- Ärzte, die sich nicht eingehend mit der Tauchproblematik befasst haben, bekunden oft Mühe in der Diagnosestellung und bei der Therapie von tauchspezifischen Zwischenfällen.
- Ungenügende Kenntnis führt gelegentlich zu unliebsamen Konfrontationen zwischen Rettungsdiensten, Medizinern und zunehmend anspruchsvollen Tauchern.
- Folgende Hinweise sollen in der Tauchmedizin unerfahrene Ärztinnen und Ärzte begleitend unterstützen.

### Summary

#### Diving medicine: a short update. Part 1

- *No recreational or professional activity is physiologically more challenging than diving.*
- *Recreational divers form the majority of those practising this activity. Many are possessed of great expertise after well-grounded theoretical and practical training.*
- *Physicians with insufficient insight into the problems associated with diving may experience difficulty with the diagnosis and therapy of diving-related conditions.*
- *Inadequate knowledge sometimes produces unpleasant confrontations between rescue squads, physicians and increasingly demanding divers.*
- *The following remarks are intended to assist the diving medicine laymen in dealing with diving-related problems.*




### Einleitung

Während in der Schweiz medizinische Höhenforschung eine lange Tradition hat, konnten weder das Berufstauchen noch Caissonarbeiten im Strassen- und Tunnelbau eine nachhaltige, arbeitsmedizinische Bedeutung erlangen. Dennoch sorgte die tauchmedizinische Forschung, angeregt durch die innovativen Tieftauchversuche mit verschiedenen Atemgasgemischen nach Modellen, errechnet von Hannes Keller, einem mathematisch begabten Tauchsportler, und Prof.



**Abbildung 1**

Hannes Keller und Prof. A.-A. Bühlmann.  
Druckkammertauchgang auf 300 m am 25.4.1961  
(Druckkammeranlage der franz. Marine in Toulon).

A.-A. Bühlmann vom Universitätsspital Zürich (Abb. 1 ) in den frühen sechziger Jahren weltweit für grosses Interesse und Anerkennung. Es wurde unter anderem versucht, die Stickstoffnarkose (Tiefenrausch) durch eine Veränderung der Zusammensetzung der Atemgasgemische zu vermeiden. Das Berechnen von Sättigungs- und Entsättigungswerten im Gewebe wurde zur Diskussionsgrundlage und führte zu einer weltweiten Ausarbeitung von Dekompressionstabellen und Tauchcomputern, die heute, teilweise adaptiert, noch immer Gültigkeit haben.

Seither wurde der Tauchsport popularisiert und kommerzialisiert. Obwohl es zahlreiche Tauchbegeisterte gibt, ist die Notfallrate im Vergleich zu anderen Sportarten klein [1]. Die meisten ernsthaften Ereignisse haben nur indirekt mit dem Tauchen zu tun. Ertrinken ist die häufigste Todesursache. Mechanische Verletzungen stehen weit vor tauchspezifischen Schädigungen. Welt-

weit hat ungefähr ein Viertel aller registrierten Todesfälle beim Tauchen eine internmedizinische Ursache, meist ein Herz-Kreislauf-Versagen.

## Tauchmethoden und Atemgasgemische

### Apnoetauchen

Bereits seit der Antike gibt es Beschreibungen über das Apnoetauchen bei Schwamm-, Perlen- und sogar bei Militärtauchern. Auch ohne Atemgerät wird dem Organismus beim Tauchen durch die veränderten Umweltbedingungen eine beträchtliche physiologische Anpassung abverlangt. Während gewisse Säugetiere Tauchtiefen bis zu 1000 Metern erreichen, gelten für Menschen engere Grenzen. Lange Zeit wurde dies mit der Elastizität des Thorax und den Sauerstoffreserven im Blut begründet. Bei Apnoewettkämpfen werden aber heute Tiefen erreicht, die neue physiologische Erklärungen nötig machen. Blutverschiebung aus der Peripherie ins Lungparenchym, unterstützt durch kreislaufaktive, humorale Faktoren, sowie ein aufbauendes gezieltes Körpertraining erklären die Fähigkeit, auch ohne Atemhilfe Tauchtiefen von über 210 Metern zu erreichen.

### Gerätetauchen

Gerätetauchen ist heutzutage wesentlich weiter verbreitet als Apnoetauchen.

#### Offene Systeme

Bei den sogenannten offenen Systemen wird die Ausatemungsluft ins umgebende Wasser abgegeben. Die meisten Taucher benutzen Druckluftgeräte mit komprimierter gereinigter Umgebungsluft. Ein mechanischer Atemregler vermindert den Flaschendruck auf den Umgebungsdruck der jeweiligen Tauchtiefe und erlaubt dem Taucher ein beliebiges Volumen über ein Mundstück zu ventilieren.

#### Stickstoffreduzierte Atemgasgemische

Einige der wichtigsten Risiken beim Tauchen mit komprimierter Luft sind auf die Effekte des darin zu 78% vorhandenen Stickstoffes zurückzuführen (siehe unten). Daher finden heute sauerstoffangereicherte Gasgemische (Nitrox) zunehmend Verwendung. Zugunsten eines gegenüber der Umgebungsluft erhöhten Sauerstoffanteils (meist 32 bis 36% Vol.) wird der Stickstoffgehalt reduziert. Mit solchen Atemgasen ist es möglich, die Zeiten für Dekompressionsstops beim Auftauchen zu verkürzen bzw. die nicht dekompressionspflichtige maximale Tauchgangsdauer («Nullzeit») zu verlängern. Andererseits kann durch Verwendung von Nitrox das Risiko für das Auftreten der


Dekompressionskrankheit verringert werden. Die Art der dabei verwendeten Tauchtabellen oder Tauchcomputer-Algorithmen bestimmt, ob der Nutzen des verminderten Stickstoffanteils in einer Verlängerung der Nullzeit oder in einer Verringerung des Risikos für das Auftreten der Dekompressionskrankheit liegen soll.

Mit Sauerstoff angereicherte Gemische rücken allerdings die Grenze der ZNS-Toxizität des Sauerstoffs (siehe unten) in einen Tiefenbereich, der von durchschnittlichen Sporttauchern mühelos und häufig erreicht wird. Sie bedingen somit eine Tiefenbegrenzung, die zudem von der körperlichen Belastung abhängig ist.

#### Halbgeschlossene und geschlossene Systeme

Halbgeschlossene und geschlossene Atemkreislaufgeräte vermeiden dank der kompletten Rückatmung der Ausatemungsluft über einen CO<sub>2</sub>-Absorber weitgehend die Freisetzung von Blasen ins Wasser. Solche Kreislaufgeräte (*Rebreather*) gehören deshalb zur Ausrüstung von Militärtauchern und sind auch bei Unterwasser-Fotografen sehr beliebt. Sie erlauben zudem eine sehr ökonomische Gasausnutzung, wodurch weit kleinere Druckgasflaschen als bei offenen Systemen nötig sind. Die Tauchausrüstung wird dadurch leichter, und längere Tauchzeiten sind möglich.

#### Tec Diving

In Kreislaufgeräten werden meistens sauerstoffangereicherte Gasgemische benutzt. Zum Erreichen grösserer Tiefen und zur Abkürzung der Dekompressionszeiten hat sich bei sehr ambitionierten Tauchern und für Extremtauchgänge gar der Wechsel von Atemgasgemischen während eines Tauchganges durchgesetzt. Dieses technische Tauchen (*Tec Diving*), bei dem meist Helium als zusätzliches inertes Gas Verwendung findet, stellt wegen der verschiedenen mitgeführten Flaschen höchste Ansprüche an die Ausrüstung, die Ausbildung und die Fertigkeiten des Tauchers. Tec Diving wird gerade in Schweizer Seen, beim Höhlentauchen und von Berufstauchern mit zunehmender Häufigkeit praktiziert (Abb. 2 )

## Tauchspezifische Belastungen, Erkrankungen und Unfälle

Die Tauchmedizin beschäftigt sich, wie die Flug- und Raumfahrtmedizin, mit den physiologischen und pathophysiologischen Reaktionen des Organismus auf veränderte physikalische Umweltbedingungen. Thermische Einflüsse wie Wasser, Sonne und Wind können die Thermoregulation überbeanspruchen und zur Dehydratation führen. Brandung, Gezeiten, Strömungen, Boote und Schiffsschrauben sowie Einflüsse von Tieren und Pflanzen (Gifte, Allergien) gefährden die Gesundheit von Tauchern.



**Abbildung 2**

Technisches Tauchen (Wechsel von Atemgasgemischen während des Tauchgangs).

Druckänderungen beim Abtauchen (Kompressionsphase) und Auftauchen (Dekompressionsphase) können durch mechanische Überbeanspruchung das Gewebe schädigen. Biophysikalische Abläufe während einer linearen Druckexposition führen zur unterschiedlich schnellen Aufsättigung der verschiedenen Körpergewebe mit der Inertgasfraktion des Atemgasgemisches. Während und nach der Druckentlastung muss Inertgas wieder aus den Geweben entweichen.

### Barotraumen

Gemäss dem Boyle-Mariotte-Gesetz verdoppelt sich das Volumen eines Gases, unter der Voraussetzung konstanter Temperatur, bei Halbierung des Druckes. Dies ist z.B. beim Auftauchen aus zehn Metern Wassertiefe zur Oberfläche der Fall. Flüssigkeiten hingegen sind inkompressibel. Daher sind alle volumenkonstanten, luftgefüllten Hohlräume im Körper beim Tauchen erheblicher Druckbelastung ausgesetzt. Barotraumat des Mittelohrs sind bei behindertem Druckausgleich z.B. durch Schleimhautschwellung im Rahmen einer oberen Atemwegsinfektion häufig und können ernsthafte Läsionen des gesamten Gehör- und Gleichgewichtsorgans verursachen.

Barotraumat des Lungenparenchyms können zum Pneumothorax und/oder zu arteriellen Gasembolien (AGE) führen und sind daher lebens-

bedrohend. Zur Schädigung des Lungengewebes genügt ein Druckunterschied von nur 10 kPa. Lungenerkrankungen, insbesondere solche, die mit «Air trapping» einhergehen, sollten möglichst im Rahmen der Tauchtauglichkeitsuntersuchung aufgedeckt werden.

Andere lufthaltige Körperräume, wie Nebenhöhlen oder luftgefüllte Magen-Darm-Anteile, sind bei raschem Druckwechsel, wie sie beispielsweise während eines Notaufstieges vorkommen, ebenfalls dem Risiko einer Schädigung ausgesetzt. Kenntnis dieser Gefahren, ein geschultes Tauchverhalten sowie einwandfreie Atemregler lassen solche Verletzungen nahezu ausschliessen, vorausgesetzt, es liegen keine prädisponierenden Organschäden vor.

### Stickstoffnarkose

Dieses auch *Tiefenrausch* genannte Phänomen bezeichnet einen rauschähnlichen Zustand, der die Kritikfähigkeit einschränkt und bis zur Bewusstlosigkeit führen kann. Pathophysiologischer Hintergrund ist wahrscheinlich die Einlagerung von gut lipidlöslichen Stickstoffmolekülen unter erhöhtem Partialdruck in die Zellmembranen. Dies verändert deren elektrophysiologische Eigenschaften, ähnlich dem Effekt der bekannten Inhalationsanästhetika. Es besteht eine grosse individuelle, aber auch von der jeweiligen Tagesform des Tauchers abhängige Toleranzbreite. Weiter gibt es begünstigende Faktoren wie Kälte, Dunkelheit, Angst, Anstrengung und gewisse medikamentöse Einwirkungen. Die Zufügung von Helium zum Atemgasgemisch vermindert den Stickstoffpartialdruck und kann die Rauschwirkung deutlich reduzieren. Helium wird daher beim Tieftauchen häufig mitverwendet.

### Sauerstofftoxizität

Sauerstoffangereicherte Atemgasgemische ( $FiO_2 > 21\%$ ) werden wegen der oben beschriebenen Vorteile immer häufiger angewandt. Problematisch ist aber, dass der Sauerstoff ab einem Partialdruck von 1,4–1,6 bar für das ZNS toxisch wirkt, insbesondere bei körperlicher Anstrengung. Diese Sauerstofftoxizitätsschwelle wird beispielsweise bei einem  $FiO_2$  von 36% bereits in einer Tiefe von 28 Metern erreicht. Dabei kann es unter Wasser oft zu tödlichen, generalisierten Krampfanfällen kommen. Die Langzeittoxizität, wie wir sie von beatmeten Intensivpatienten her kennen, ist nur bei extrem langen Tauchzeiten von Bedeutung. Auf den Stellenwert der therapeutischen Sauerstoffanwendung bei Tauchzwischenfällen wird noch eingegangen.



## Andere toxische Substanzen


Die Verunreinigung des Atemgases mit CO, CO<sub>2</sub> oder mit anderen Gasen kann eine akute Intoxikation verursachen. Auch andere Kontaminationen des Atemgasgemisches, wie Kompressor-Öle, Feinstaub oder Dämpfe aus feuchten Atemkalkpatronen, können erhebliche akute und chronische Lungenschädigungen sowie systemische Effekte zur Folge haben. Da der Grad der toxischen Wirkung der jeweiligen Substanz von deren Partialdruck abhängt, nimmt sie proportional mit ihrem Anteil im Gasgemisch und auch mit der Tauchtiefe zu.

## Dekompressionskrankheit (DCS)

Bei Überdruckexposition lösen sich Gase, welche nicht metabolisiert werden (z.B. Stickstoff, Helium) zunächst im Blut und sekundär in allen Körpergeweben. Die Menge pro Zeiteinheit dieser sogenannten inerten Gase, die sich in einem Gewebe löst, ist abhängig von der Durchblutung des Kompartiments und dem entsprechenden Löslichkeitskoeffizienten.


Nur die Fähigkeit des Gewebes, eine gewisse Übersättigung zu tolerieren, lässt Tauchen ohne Gewebsschädigung überhaupt zu. Mit abnehmendem Druck beim Auftauchen diffundiert das gelöste Gas wieder aus dem Gewebe, sofern die Geschwindigkeit der Druckreduktion die Diffusionskapazität nicht übersteigt. Bei zu schnellem Aufstieg kann die Rückdiffusion des gelösten Stickstoffs in den Kreislauf ungenügend werden und bei Übersteigen der spezifischen Übersättigungstoleranz zur gefährlichen Gasblasenbildung führen. Wie beim Öffnen der Champagnerflasche geht beim Entkorken das unter Druck gelöste Gas vom flüssigen wieder in seinen gasförmigen Zustand über.

Die Aufstiegs geschwindigkeit darf also die Geschwindigkeit der Gewebe-Entsättigung unter abnehmendem Druck nicht übersteigen, sonst kommt es zur Formation von Gasblasen im Gewebe, was die Symptome der DCS verursacht.

Die Dekompressionskrankheit wird eingeteilt in DCS I (mit peripheren, meist leichteren Symptomen) und DCS II (bei der meist schwere Krankheitsbilder überwiegen). Während die «leichten» Symptome weitgehend von den sogenannten langsamen Geweben ausgehen (Haut, Knorpel, Knochen), betreffen die schweren Zwischenfälle vorwiegend das zentralnervöse System mit allen möglichen Folgeerscheinungen, wie vorübergehende, gelegentlich aber auch bleibende, zu meist spinal bedingte neurologische Ausfälle (Tab. 1 )

Das Erkennen erster diskreter Symptome einer DCS ist oft schwierig. Solche Symptome treten nicht selten erst Stunden nach einem Tauchgang auf. Daraus kann sich aber in der Folge rasch ein

schweres Krankheitsbild entwickeln. Es muss daher ein Anliegen sein, Ärztinnen und Ärzte, die tauchmedizinisch wenig Erfahrung haben, für die Symptomerkenkung zu sensibilisieren, auch im Hinblick auf eine möglichst frühzeitige Verabreichung von normobarem 100prozentigem Sauerstoff (NBO). Diese Therapie ist einfach, hochgradig wirkungsvoll und begünstigt signifikant den weiteren Heilungsverlauf und die Prognose.

Die physikalischen und physiologischen Mechanismen, die zur Dekompressionserkrankung führen, werden seit den frühen 40er Jahren intensiv erforscht und beschrieben. Man sucht weltweit nach neuen Wegen, die biologischen Abläufe zu ergründen und somit das Verständnis für die Dekompressionskrankheit zu vertiefen und entsprechende Gesetzmässigkeiten zu definieren. Auch wenn es in absehbarer Zukunft nicht gelingen wird, diese Komplikation vollständig zu vermeiden, so werden neue Rechenmodelle mit daraus entwickelten Computeralgorithmen weiterhin zum risikoarmen Tauchen beitragen. Während die ersten Dekompressionstabellen vorwiegend auf empirischen Grundlagen beruhten, die feste Raten für die physikalische Sättigung und Entsättigung für verschiedene Gewebe annahmen, bemüht man sich heute vermehrt, die Entstehung und das Verhalten der Gasblasen, die für die Gewebeschädigung verantwortlich sind, näher zu verstehen. Moderne Doppler- und bildgebende Ultraschallgeräte ermöglichen es, das Verhalten dieser Mikroblasen («Bubbles») zu dokumentieren (Abb. 3 )

**Tabelle 1. Häufigkeit von Symptomen bei Tauchzwischenfällen [2].**

| Symptom                  | Häufigkeit (%) |
|--------------------------|----------------|
| Gelenkschmerzen          | 31,2           |
| Schwindel                | 20,9           |
| Paresen                  | 19,3           |
| Bewusstseinseintrübung   | 14,5           |
| Blasenfunktionsstörungen | 13,8           |
| Hautjucken               | 12,5           |
| Monoparesen              | 10,0           |
| Lendenschmerzen          | 8,0            |
| Bronchiale Aspiration    | 5,1            |
| Paraplegie               | 5,1            |
| Mittelohrbarotrauma      | 4,8            |
| Mediastinalemphysem      | 4,8            |
| Hemiparese               | 4,8            |
| Subkutanes Emphysem      | 4,5            |
| Hämoptysis               | 2,9            |
| Rhinorrhoe, Epistaxis    | 2,6            |
| Schock                   | 2,3            |
| Andere Symptome          | 1,6            |
| Hemiplegie               | 1,3            |
| Tetraparese              | 1,3            |
| Tetraplegie              | 1,0            |
| Pneumothorax             | 1,0            |

Man erhofft sich, mit grossangelegten Studien Fortschritte in der Vermeidung von Dekompressions-Zwischenfällen erzielen zu können. Der Weg und der Wirkungsort der Blasen, die erwiesenermassen nach jedem längeren Tauchgang vor allem im venösen Kreislauf entstehen, scheinen entscheidend zu sein. Wie bedeutend allfällige Rechts-links-Shunts sind, wie wir sie von einem offenen Foramen ovale (PFO) oder von den schwieriger nachweisbaren transpulmonalen Shunts her kennen, wird weiterhin untersucht. Die heute erwiesene Wirkung der Bläschen am Endothel mit Freisetzung von Mediatoren [3] wirft interessante Fragestellungen auf.

### Verletzungen, Bisse und Gifteinwirkung

Stürze, Ausgleiten und Aufschlagen mit schwerer Ausrüstung auf Booten oder an Land können zu ernsthaften Körperverletzungen führen. Auch in der Brandung oder beim Zurückkehren ins Tauchboot kommt es immer wieder zu schweren Traumata. Bissverletzungen durch Tiere, Vergiftungen durch Stiche oder Nesselwirkungen kommen vor, führen aber nur in seltenen Fällen zu schweren Körperschädigungen. Eine anaphylaktische Reaktion auf marine Toxine ist häufiger der Grund für eine Lebensgefährdung als die eigentliche Giftwirkung [4-6]. Auch die gefürchteten Verletzungen durch Haie werden bei korrektem Tauchverhalten ausserordentlich selten beobachtet. Anfüttern der Tiere oder Eindringen in deren enge Lebens- oder Bruträume können dennoch gefährliche Situationen provozieren.

#### Literatur

- 1 National Safety Council USA. Safety Facts 1991.
- 2 Desola J. Descriptive Classification of diving accidents. 2nd European Consensus Conference on treatment of decompression accidents in recreational diving. Marseille 1996. p. 45-57.
- 3 Koteng S, Brubakk AO. Endothelial damage by bubbles in the pulmonary artery of the pig v. nossum. Undersea Hyper med. 1999;26(1):1-8.



**Abbildung 3**

Präkardiale Blasendetektion mit Dopplersonde unmittelbar nach dem Tauchgang.

### Temperatureinflüsse

Wegen der hohen Wärmekapazität und der Wärmekonvektion im Wasser treten Unterkühlungen bei der Verwendung von nicht-adäquaten Wärmeschutzanzügen rasch auf. Muskelzittern erhöht die CO<sub>2</sub>-Produktion und führt neben den ohnehin schon erhöhten Atemwegswiderständen beim Gerätetauchen zu einer Zunahme der Atemarbeit. Zusammen mit dem Absinken der Körpertemperatur kann die körperliche Leistungsfähigkeit drastisch abnehmen. Dies führt unter Wasser leicht zu Erschöpfung und schliesslich zu Panikreaktionen.

Korrespondenz:  
Dr. med. Peter Nussberger  
CA Chirurgie, Präsident SUHMS  
Gemeindespital Riehen  
Schützengasse 37  
CH-4125 Riehen  
[nussberger@gsriehen.ch](mailto:nussberger@gsriehen.ch)

- 4 Mebs D. Gifttiere. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft; 1992.
- 5 Bennet P, Elliott D. The Physiology and Medicine of Diving. 5th Edition, Saundersverlag.
- 6 Bühlmann AA, Völlm EB, Nussberger P. Tauchmedizin. 5. Auflage: Springer-Verlag.