

Dekompressionskrankheit in der Luftfahrt

C. Frigg^a, J. Stepanek^b, A. Gmür^c, J. Suter^d, S. Huber^d

Einleitung

In der Fliegerei und beim Tauchen spielen Druckänderungen eine grosse Rolle. Beim Tauchen betragen diese in der Regel mehrere Atmosphären, in der Fliegerei weniger als eine Atmosphäre. Die Dynamik und Schwere einer Dekompressionskrankheit (engl. Decompression sickness, DCS) ist daher bei Tauchern und Höhenexposition sehr unterschiedlich, d.h., es gibt relativ zahlreiche DCS-Zwischenfälle beim Tauchen, hingegen sehr wenige beim Fliegen. Ein anderer Unterschied ist, dass wenn der Umgebungsdruck weniger als eine Atmosphäre beträgt, die metabolischen Gase (O₂, CO₂ und Wasserdampf) einen grösseren Anteil in den infolge DCS entstehenden Luftblasen ausmachen als beim Tauchen [1]. Die Effekte von Gasvolumenänderungen durch Änderungen des barometrischen Umgebungsdrucks auf die luftgefüllten Körperhöhlen, wie beispielsweise Mittelohr, Stirn- und Kieferhöhlen, Magen-Darm-Trakt usw., die unter Umständen ebenfalls ein Barotrauma auslösen können, möchten wir im folgenden nicht näher beschreiben. Vielmehr interessiert uns die Dekompressionskrankheit, deren Pathophysiologie und Pathogenese in vielen Aspekten noch nicht vollständig geklärt sind. Die Dekompressionskrankheit (engl. Decompression sickness, DCS) beinhaltet diejenigen Krankheitsbilder, welche durch die Bildung von Stickstoffblasen hervorgerufen werden. Dieses Problem tritt auf bei schnellen Partialdruckabnahmen von Stickstoff, bedingt durch rasche Umgebungsdruckabnahmen. Im folgenden gehen wir auf die Pathophysiologie der Dekompressionskrankheit ein, erläutern die klinischen Symptome, die Diagnose und Therapie und besprechen Massnahmen zur Prophylaxe einer Dekompressionskrankheit.

Definition

Decompression sickness (DCS) is a clinical syndrome following a reduction in ambient pressures sufficient to cause formation of bubbles from gases dissolved in body tissues. DCS follows dose-response characteristics at each involved tissue-site, the pathophysiological se-

quence that may or may not follow and finally result in clinical symptoms is subject to multiple moderating factors (humoral, tissue, individual susceptibility, operational and environmental factors).

Pathophysiologie

Das Fliegen in Flugzeugen ohne Druckkabine, Aufenthalte in Unterdruckkammern, Arbeiten in unter Druck stehenden Tunnels oder Tauchen stellen prädisponierende Umweltbedingungen dar. Die Kombination von Tauchen und anschliessendem Fliegen kann ebenfalls zum Bild eines DCS führen. Dieses Krankheitsbild wurde erstmals 1854 bei Caissonarbeitern durch die französischen Ärzte B. Pol und T. J. J. Watelle beschrieben. Moderne Verkehrsflugzeuge bewegen sich während des Reiseflugs in der Regel zwischen 9 und 14 km Höhe. Sie sind durchwegs mit Druckkabinen ausgerüstet (Äquivalenzhöhe ca. 2500 m ü.M.), die den Passagieren Schutz vor Sauerstoffmangel und Unterdruck bieten.

Andererseits gibt es kleine, leistungsfähige Sportflugzeuge, meist ohne Druckkabine, die problemlos Gipfelhöhen von bis zu 8000 Metern oder mehr erreichen können.

Der Luftdruck in 5500 Metern Höhe beträgt noch die Hälfte, in 10 000 Metern Höhe noch ein Viertel des atmosphärischen Luftdruckes in Meereshöhe. Die prozentuale Zusammensetzung der verschiedenen atmosphärischen Gase bleibt hingegen in diesen Höhen gemäss dem Dalton-Gesetz konstant. So beträgt der Stickstoffgehalt 78% der Aussenluft, unabhängig von der Meereshöhe. Stickstoff (N₂) zählt man zu den inerten Gasen, d.h., sie gehen keine chemischen Bindungen mit Zellbestandteilen ein. Der menschliche Körper ist normalerweise mit gelöstem Stickstoff gesättigt. Der Stickstoffgehalt im Fettgewebe ist etwa fünf Mal höher als im Blut. Das physikalische Prinzip der Gasblasenbildung durch herabgesetzten Umgebungsdruck basiert auf dem Gasgesetz von Henry. Dieses besagt, dass der Anteil von gelöstem Gas in einer Flüssigkeit oder in einem Gewebe, die miteinander in Kontakt stehen, proportional zu den Partialdrucken dieser Gase ist.

^a Medizinische Klinik, Kantonsspital, Zug

^b Section of Aerospace Medicine, Division of Preventive and Occupational Medicine, Mayo Clinic Rochester, 200 First Street SW, USA-Rochester MN

^c HNO-Klinik, Rätisches Kantons- und Regionalspital, Chur

^d Fliegerärztliches Institut der Schweizer Luftwaffe, Dübendorf

Kommt es zu einer raschen Druckabnahme des Umgebungsdrucks, ist das Körpergewebe hauptsächlich mit dem inerten Gas Stickstoff übersättigt. Der erhöhte Stickstoffpartialdruck des Gewebes führt zur Diffusion von überschüssigem N₂ ins Blut, welcher in den Lungenkreislauf gelangt und teilweise über die Lungen abgeatmet wird. Überschreitet der gelöste Stickstoff die Löslichkeitsschwelle, die kritische Sättigung, besteht die Möglichkeit einer Gasblasenbildung. Bildlich ist dies vorzustellen ähnlich einer kohlen säurehaltigen Mineralwasserflasche, die vor dem Öffnen wenig Gasblasen hat, da Partialdruck über- und unterhalb des Flüssigkeitsspiegels gleich gross ist, und die nach dem Öffnen viele Gasblasen bildet, da durch das Öffnen der Partialdruck in der gasförmigen Phase plötzlich herabgesetzt wurde. Dieses Risiko besteht insbesondere im Körpergewebe, im venösen System und weniger im arteriellen, da der hohe hämostatische Druck die Bildung von Gasblasen behindert. Das Boyle-Mariottesche Gasgesetz besagt, dass das Produkt aus Volumen (V) und Druck (p) bei gleichbleibender Temperatur konstant bleibt ($p \times V = \text{konst.}$). Beträgt nun der Aussendruck noch einen Viertel des Ausgangswertes, nimmt das Volumen einer initial unbedeutend kleinen Gasblase um ein 4faches zu. Diese neu entstehenden Gasblasen werden für die Symptome des DCS verantwortlich gemacht. Der pathogenetische Faktor eines DCS ist nicht der tiefe Druck per se, sondern die Druckabnahme über eine kurze Zeit. Eine langsame Abnahme des Luftdrucks wird gut toleriert, da der im Körpergewebe gelöste Stickstoff abgeatmet werden kann und somit in der Regel kein DCS auszulösen vermag.

Der Taucher begibt sich beim Auftauchen in Gefahr, der Flieger hingegen «therapiert» sich bei der Rückkehr auf den Erdboden.

Klinische Symptome

Bei der Dekompressionskrankheit manifestiert sich der Stickstoff einerseits durch mechanische Effekte und andererseits durch seine sekundären Effekte, die durch Aktivierung des Endotheliums, Leukozyten sowie Thrombozyten zur Freisetzung einer Vielzahl von vasoaktiven Mediatoren führen, welche ihrerseits zu einer Vasokonstriktion führen können. Die Symptome einer Dekompressionskrankheit können nach Golding (1960) in zwei Klassen eingeteilt werden. **DCS Typ I:** Gliederschmerzen («pain-only bends») und/oder Hautmanifestationen. Die extravasalen Gasblasen in Gelenkkapseln, Ligamenten, Sehnen, Faszien, Muskeln und Haut werden für diese Symptome verantwortlich gemacht. Die Glieder- und Gelenksbeschwerden betreffen typischerweise die oberen Extremitäten. Prädilektionsstellen für die Hautmanifestationen («Itches») bildet der Körperstamm. **DCS Typ II:** Chokes und/oder neurologische Beeinträchtigungen (zentrales und peripheres Nervensystem) wie Kopf- und Nackenschmerzen, bis hin zum neurozirkulatorischen Kollaps und zerebralen Insulten (Tab.1).

Unter «Chokes» versteht man substernale Thoraxschmerzen, in Inspiration zunehmend, die oft mit Dyspnoe sowie mit einem persistierenden, nicht produktiven Husten verbunden sind. Eine mögliche Erklärung dafür sind intravaskuläre Gasblasen, die diese pulmonalen Symptome hervorrufen.

Der Blutdruck ist im frühen klinischen Stadium noch normal, jedoch kann die Akkumulation von Gasblasen in der pulmonalen Zirkulation in einem späteren Zeitpunkt zu einer pulmonalarteriellen Hypertonie führen. Aufgrund dieser Widerstandserhöhung im pulmonalen Kreislauf wird auf der venösen Seite die Füllung des linken Vorhofs behindert, was einen Blutdruckab-

Tabelle 1. Symptome der Dekompressionskrankheit.

Typ I	Typ II
Gelenkschmerzen (bends)	Zentralnervöse Ausfälle (zerebral, spinal)
Muskelschmerzen	Visusstörungen
Hautmanifestationen («itches»)	Pulmonale Symptome (chokes)

Tabelle 2. Standorte von hyperbaren Kammern in der Schweiz.

Alarmierung erfolgt über Rettungsflugwacht (REGA): Tel. 1414.

- Universitätsspital Basel
- CHUV Lausanne
- Kantonsspital Genf (Betrieb nur temporär)

fall bei einem DCS Typ II erklären könnte. Zerebrale Gasembolisation in den Kreislaufregulationszentren vermögen ebenso eine starke Beeinträchtigung des Blutdrucks herbeizuführen. Unklar bleibt, ob bei Personen ohne pathologischen Rechts-links-Shunt einzelne Gasblasen die Lungenkapillaren passieren und so zu zentralen Manifestationen führen können oder ob allenfalls durch den hohen Lipidgehalt der zerebralen Strukturen es an Ort zur Gasblasenbildung kommen kann. Schwere Fälle von DCS, die zum Tode führen, sind bei Höhenexpositionen im Flugzeug selten. Der letzte Fall mit Todesfolge im Flug wurde von Neubauer [2] 1988 beschrieben, nachdem ein vorhergehender Fall im Jahr 1959 publiziert wurde [3]. Tauchunfälle mit Todesfolgen sind hingegen viel häufiger.

Das Auftreten von Symptomen der Dekompressionskrankheit ist zusätzlich zu physikalischen Faktoren interindividuell verschieden. Nach Literaturangaben kann sich ein DCS bereits um 18 000 ft (5486 m) Höhe unter definierten äusseren Bedingungen manifestieren. Ein DCS tritt bei Piloten selten unter 20 000 ft (6096 m) auf [4, 5]. Die Inzidenz der Dekompressionskrankheit beträgt etwa 105 Fälle pro 100 000 Höhenexponierte in Unterdruckkammerexpositionen (7622 m, 25 000 ft) [2]. Gemäss Angaben der US Air Force betrug die «In flight»-Inzidenz in den Jahren 1980–1990 etwa 0,2 bis 0,3 pro 100 000 Flugstunden. Symptome treten teilweise auch erst nach Rückkehr auf Bodenhöhe mit einer Latenz von über 2 Stunden auf [6]. Gewisse Vermutungen gehen dahin, dass die Gasblasen eine gewisse Zeit benötigen, um sich zu organisieren und zu reaktiven Fibrinauflagerungen zu führen. Dadurch können sich klinische Symptome auch erst mit einer zeitlichen Verzögerung manifestieren.

Prädisponierende Faktoren für einen Unterdruckvorfall sind erreichte Höhe, körperliche Aktivität während der Unterdruckexposition, Fliegen innert 24 Stunden nach Tauchgängen, Alter (>42 Jahre), grosse Kälte (< minus 23,3 Grad Celsius), Dehydrierung, Adipositas und lange Aufenthaltsdauer [7, 8]. Beträgt die Aufenthaltsdauer in der Höhe nach einem schnellen Aufstieg weniger als 30 Minuten, ist das Risiko für eine Dekompressionskrankheit mit 10% relativ gering. Nach weiteren 30 Minuten steigt das Risiko sprunghaft an und beträgt nach einer Stunde bereits 30% [9].

Diagnose und Therapie

Die adäquate Behandlung eines DCS Typ I besteht in der Gabe von 100% Sauerstoff und körperlicher Schonung, bis die Symptome verschwinden. Persistieren die Symptome über mehr als zwei Stunden, leitet man die Behandlung analog derer eines DCS Typ II ein. Bei der Dekompressionskrankheit Typ II sollte ebenfalls 100% Sauerstoff verabreicht werden, möglichst durch eine dicht

sitzende Maske. Zusätzlich ist eine Rekompresion des Patienten anzustreben, d.h., er sollte innert nützlicher Zeit in eine hyperbare Kammer verlegt werden. Durch Volumensubstitution kann die Organisation der Gasblasen möglicherweise verlangsamt werden. Der Einsatz von Kortikosteroiden und Thrombozytenaggregationshemmern ist umstritten. Unter Umständen können je nach Schweregrad der Symptome eines DCS zusätzlich intensivmedizinische Massnahmen wie Intubation oder kreislaufunterstützende Massnahmen nötig sein. Je länger der Behandlungsbeginn hinausgezögert wird, desto schlechter ist die Prognose. Muss der Patient per Helikopter ins nächste Spital mit einer Überdruckkammer transportiert werden, sollte dieser möglichst bodennahe fliegen, um nicht eine Verschlechterung der Symptomatik zu provozieren. Ein stabiler Patient kann und soll durchaus mit Bodentransportmitteln ins nächstliegende Zentrum mit hyperbarer Therapie verlegt werden, um eine Verschlimmerung der klinischen Symptome bedingt durch Gasexpansion zu verhindern.

Bis zum heutigen Zeitpunkt gibt es noch kein etabliertes Standardverfahren, das die Verdachtsdiagnose einer Dekompressionskrankheit zu beweisen vermag. Gelegentlich kann man bereits sehr früh in den Herzhöhlen mittels Echokardiographie Gasblasen nachweisen. Ein negativer Nachweis spricht jedoch nicht gegen ein DCS. Bei einem positiven Ansprechen auf hyperbare Therapie darf von der richtigen Diagnose ausgegangen werden. Vorhergehend müssen hingegen andere wichtige differentialdiagnostische Differentialdiagnosen ausgeschlossen werden. So kann beispielsweise der Angor einer Angina pectoris leicht mit Chokes verwechselt werden. Die Ausstrahlung in den linken Arm könnte von Bands herrühren. Die Symptome eines Pneumothorax gleichen ebenfalls Chokes, wobei ein Thoraxröntgenbild vielfach eine Unterscheidung zulässt. Eine Hypoxie, wie sie in grossen Höhen auftritt (gelegentlich im Zusammenhang mit einem DCS), kann sich am zentralen Nervensystem manifestieren. Typischerweise verschwinden diese Symptome bei Gabe von Sauerstoff innert weniger Sekunden, diejenigen einer DCS nicht.

Besteht die Verdachtsdiagnose DCS, sollte der behandelnde Arzt möglichst früh Kontakt über die Rettungsflugwacht (REGA) mit einem hyperbaren Therapiezentrum aufnehmen. Die frühe Kontaktnahme kann unter Umständen helfen, grobe Fehler zu vermeiden (Lufttransport, Therapie usw.) (Tab. 2).

Der wiederholten neurologischen Untersuchung eines Patienten mit DCS kommt grosse Bedeutung zu, da sich oft geringgradige neurologische Ausfallserscheinungen feststellen lassen, deren serielle Beobachtung wertvolle Hinweise auf ein gutes Ansprechen auf hyperbare Therapie ermöglicht und unter Umständen

Quintessenz

- Die Dekompressionskrankheit (DCS) kommt mit grösster Wahrscheinlichkeit unter Piloten häufiger vor, als sie effektiv diagnostiziert wird, da die Symptome vom Betroffenen oft fehlinterpretiert werden.
- Keine Flüge innerhalb von 12 Stunden vornehmen, nach einer Luftdruckexposition bis 2 bar (etwa 10 Meter Wassertiefe) bzw. 24 Stunden nach Exposition von mehr als 2 bar.
- Die Therapie besteht in der Gabe von 100% Sauerstoff, aus Rekompensation in einer Druckkammer (i.d.R. auf 2,8 bar, äquivalent 18 Meter Wassertiefe) so schnell als möglich sowie in der Behandlung allfälliger Begleitkomplikationen.

eine Reklassifikation des Patienten von Typ I in Typ II erfordert.

Prophylaxe

Der höheninduzierten Dekompressionskrankheit kann man durch verschiedene Massnahmen vorbeugen. Guten Schutz bietet eine Druckkabine. In solchen Druckkabinen kann es in seltenen Fällen, z.B. durch Vogelschlag, akzidentell zu Druckverlusten kommen. Druckanzüge bieten ebenfalls einen guten Schutz, sind aber oft mit Restriktionen, wie eingeschränkter Bewegung oder reduziertem Gesichtsfeld, für die Benutzer verbunden. Reine Sauerstoffvoratmung vor einem Höhenanstieg vermag den Stickstoffpartialdruck des Körpergewebes zu erniedrigen, indem auf diese Weise ein künstlicher Gradient für das Auswaschen von N_2 geschaffen wird. Eine etwas weniger effektive Methode besteht in der Denitrogenierung durch langsames Aufsteigen sowie durch eine kurze Aufenthaltsdauer in grossen Höhen. Treten im Flug trotz allen Vorsichtsmassnahmen Symptome einer Dekompressionskrankheit auf, sollte der Pilot einen Sinkflug einleiten, um so seine «Rekompensationstherapie» einzuleiten. Hautsymptome und Bends sind relativ schnell reversible Sym-

ptome, die in der Regel bereits unterhalb von 5500 Metern (18 000 ft) wieder verschwinden.

Fazit

In der Sportfliegerei werden heutzutage leistungsfähige Flugzeuge eingesetzt, wobei die wenigsten eine Druckkabine aufweisen. Der im Auftreten von Symptomen einer Dekompressionskrankheit und deren Gefahren wenig geschulte Pilot schenkt den dadurch auftretenden Symptomen meist kaum Beachtung und sieht sie nicht in Zusammenhang mit Fliegen in grosser Höhe. Gelenksymptome werden oft als Gelenkschmerzen anderer Genese fehlgedeutet. Komplikationen eines DCS mit neurologischen Manifestationen sind relativ selten, können jedoch schwerwiegende Konsequenzen, bis hin zum Tod, mit sich führen.

Piloten in der Ausbildung sollten deshalb bezüglich der Gefahren einer Dekompressionskrankheit sensibilisiert und auf mögliche präventive Massnahmen aufmerksam gemacht werden. Im Falle eines Auftretens von Symptomen, die auf ein DCS hinweisen, sollte sich der Betroffene unverzüglich in ärztliche Behandlung begeben. Gemäss internationalen Vorschriften ist der Pilot verpflichtet, solche Vorkommnisse unverzüglich zu melden. Der Internist, der die Dekompressionskrankheit eher als Problem vom Tauchsport her kennt, sollte bei Piloten, die Symptome oder Residuen eines DCS aufweisen, durch gezielte anamnestiche Fragen und eine detaillierte neurologische Untersuchung die Diagnose einer Dekompressionskrankheit auszuschliessen versuchen. Eine frühe Kontaktnahme mit einem Zentrum mit hyperbarer Rekompensationstherapie ist bei einer Diagnosestellung angezeigt. Selbst spät erkannte Residuen nach einem DCS sollten noch einer hyperbaren Rekompensationstherapie zugeführt werden und können unter Umständen noch klinisch stark gebessert werden.

Literatur

- 1 Van Liew DH, Burkard ME. Simulation of Gas Bubbles in Hypobaric Decompressions: Roles of O₂, CO₂, and H₂O. *Aviat Space Environ Med* 1995; 1:50-5.
- 2 Neubauer JC, Dixon JP, Herndon CM. Fatal Pulmonary Decompression Sickness: A Case Report. *Aviat Space Environ Med* 1988;12:1181-4.
- 3 Odland LT. Fatal decompression illness at an altitude of 22,000 feet. *Aerospace Med* 1959;30:840-6.
- 4 Kumar KV, Waligora JM, Calkins D. Threshold Altitude Resulting in Decompression Sickness. *Aviat Space Environ Med* 1990;8:685-9.
- 5 Rudge FW. A Case of Decompression Sickness at 2,437 Meters (8,000 Feet). *Aviat Space Environ Med* 1990;11: 1026-7.
- 6 Weien RW, Baumgartner N. Altitude Decompression Sickness: Hyperbaric Therapy Results in 528 Cases. *Aviat Space Environ Med* 1990;9:833-6.
- 7 Rudge FW. Decompression Sickness in a Private Pilot. *South Med J* 1995; 2:227-9.
- 8 Wirjosemito SA, Touhey EJ, Workman WT. Type II Altitude Decompression Sickness (DCS): U.S. Air Force Experience with 133 Cases. *Aviat Space Environ Med* 1989;3: 256-62.
- 9 Hornberger W. Decompression Sickness in German Aviation Medicine World War II, Department of the Air Force. Washington D.C. US Government Printing Office: 1950. Chapter IV-L; p. 354-94.