

Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf  
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Windolf

Outcome nach Tauchunfällen mit Dekompressionserkrankungen  
und Therapie mittels hyperbarer Oxygenierung

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin  
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität  
Düsseldorf

vorgelegt von

Sven Tilhein

2020

Als Inauguraldissertation gedruckt mit der Genehmigung der  
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität  
Düsseldorf

gez.:

Dekan:

Erstgutachter:

Zweitgutachter:

Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

PD Dr. med. Johannes Schneppendahl

PD Dr. med. Timo Brandenburger

„Das Meer ist alles. Es bedeckt sieben Zehntel der Erde. Sein Atem ist rein und gesund. Es ist eine immense Wüste, wo ein Mann nie alleine ist, in dem er fühlen kann, wie das Leben aller in ihm bebt. Das Meer ist nicht nur ein Behälter für alle die ungeheuren, übernatürlichen Dinge, die darin existieren; es ist nicht nur Bewegung und Liebe; es ist die lebende Unendlichkeit.“ (Jule Verne, 20.000 Meilen unter dem Meer ,1869-70)

Gewidmet meiner geliebten Frau Selina und meinen Töchtern Romy und Mathea, die mich während aller Höhen und Tiefen der Arbeit begleitet und unterstützt haben.

## Zusammenfassung

Die Inzidenz von Tauchunfällen wird in der Literatur mit 1-2 Zwischenfällen pro 10.000 Tauchgänge angegeben. Die Inzidenz schwankt zwischen Sporttauchern, mit ca. 1 Tauchunfall pro 10.000, bis ca. 9,5 pro 10.000 bei Berufstauchern. Insgesamt werden ca. 500 Tauchunfälle pro Jahr in der Bundesrepublik Deutschland gemeldet. Die Dekompressionserkrankung (DCS) ist eine Entität, bei der es durch die zu schnelle Dekompression zum Ausfallen von Stickstoffblasen in den Geweben, mit daraus resultierender Hypoxie kommt. Die einzig kausale Therapie stellt die hyperbare Oxygenierung (HBO) dar. Hier werden die Patienten kontrolliert, nach etablierten Schemata (US-Navy-Treatment-Tables), in einer Druckkammer rekomprimiert und mit hyperbarem Sauerstoff therapiert. Ziel der Studie war es zu zeigen, dass modifizierte Therapieschemata nebenwirkungsarm und erfolgreich angewendet werden können. Im Universitätsklinikum Düsseldorf wurden im Zeitraum von 2001-2010 63 Patienten mit einer modifizierten Variante des US-Navy-Treatment-Table 5 therapiert. 62 (m=41; w=21) Patienten wurden in diese Studie eingeschlossen. Anschließend wurden sie bezüglich ihrer Lebensqualität mittels dem Standardisierten Fragebogen (SF-12) retrospektiv zu ihrer Lebensqualität vor dem Tauchunfall und nach dem Tauchunfall und HBO befragt. Hieran nahmen 27 (43,6%) Patienten teil. Von den eingeschlossenen 62 Patienten waren nach der HBO-Therapie mit dem untersuchten Therapieschema 46 (74,2%) beschwerdefrei. Es wurden, je nach Patient, 1-13 Therapieeinheiten durchgeführt. Schwerwiegende Nebenwirkungen traten nicht auf. 18 (66,7%) der Fragebogenteilnehmer waren nach der HBO-Therapie beschwerdefrei. Hier lag die Anzahl der durchgeführten Therapieeinheiten zwischen 1-9. Die Symptome der Patienten mit Beschwerdepersistenz waren überwiegend neurologische mit Kribbelparästhesien, Hypästhesien, Koordinations- und Gleichgewichtsstörungen, Schmerzen oder Hörverlust. Die Patienten mit Beschwerdepersistenz hatten beim SF-12 Fragebogen ein signifikant ( $p=0,04$ ) schlechteres Ergebnis nach dem Tauchunfall. Insbesondere beim Cluster „physischer Gesundheit“ war ein signifikant ( $p=0,02$ ) schlechteres Ergebnis bei den Patienten mit Beschwerdepersistenz zu erkennen. Maßgebliches Instrument der Studie war die Auswertung des SF-12 Fragebogens zur Objektivierung der Lebensqualität im Vergleich vor und nach dem Tauchunfall. Leider lag die Rückläuferquote mit 43,1% sehr niedrig. Es konnte jedoch aufgezeigt werden, dass das untersuchte modifizierte Therapieschema nebenwirkungsarm und im Vergleich zu anderen untersuchten Therapieschemata mit 74,2% Beschwerdefreiheit ebenfalls erfolgreich angewendet werden konnte. Das Therapieschema konnte in der untersuchten Arbeit keine signifikante Reduktion der notwendigen Therapieeinheiten zur Beschwerdefreiheit ableiten. Lag das therapiefreie Intervall  $>24$  h konnte auch in der vorliegenden Studie gezeigt werden, dass der Behandlungserfolg, wenn auch nicht statistisch signifikant, abnahm. Insgesamt ist das Therapieschema als wirksam und nebenwirkungsarm

anzusehen. Um statistisch belastbarere Daten zu erzielen sind noch weitere (prospektive) Studien notwendig.

## **Abstract**

The Incidence of diving-accidents is among 1-2 incidents of 10,000 dives. Scuba-divers incidences are lower than professionals (1/10,000 to 9.5/10,000 dives). In Germany are noted round about 500 diving-accidents each year. The decompression sickness (DCS) is the result of a fast decompression, which caused in precipitates nitrogen-bubbles in tissues an resulting hypoxia. The causal therapy is hyperbaric oxygenation (HBO). In HBO the patient is controlled recompressed in a hyperbaric dive-chamber, by an established dive-table (US-Navy-Treatment-Tables), and treated with oxygen. This study should show, that modified treatment-tables used securely and succesfully. Between 2001-2010 63 patients were treated with a modified US-Navy-Treatment Table 5 at the university hospital in Düsseldorf. 62 (m=41; f=21) patients were included in this study. After treatment of these patients, they were tried to be interviewed about their quality-of-life with a validated questionnaire (SF-12). 27 (43.6%) of the included patients answered this questionnaire. 46 (74.2%) of the 62 included patients had not got residual symptoms after treatment. The number of HBO-treatment were among 1-13 each patient. Serious side-effects or complications were not noted. 18 (66.7%) patients of the „questionnaire-group“ had not suffered from residual symptoms after HBO. The number of treatments were among 1-9 each patient. Residual symptoms were mostly neurological, paresthesia, hypesthesia, problems with vertigo and dumbness or pain. The patients with residual symptoms had got a significant ( $p=0.04$ ) worse result after the incident. Especially at the questionnaire-cluster „physical healthness“ they had an significant ( $p=0.02$ ) worse result. Important instrument to detect the quality-of-life after the diving accident were the results of the SF-12-Questionnaire. Unfortunatly was the response-level (43.1%) low. But anyway this study has shown, that the modified treatment table can be used succesfully. 74.2% of the treated patients did not suffer from any residual symptoms. The number of treatments by the modified treatment table hadn't reduced for a succsesful outcome in this study. The intervall of more than 24h to the first tretment by HBO showed a lesser succesful (not significant) outcome. The modified treatment-table 5 is an effective and safe option of HBO. For more significant statistical facts there are more (prospektive) studies necessary.

# Inhaltsverzeichnis

|       |                                                                |    |
|-------|----------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | Einleitung .....                                               | 1  |
| 1.1   | Geschichte des Tauchens .....                                  | 1  |
| 1.2   | Gegenwärtiges.....                                             | 2  |
| 1.3   | Physiologie und Pathophysiologie .....                         | 4  |
| 1.3.1 | Grundlagen.....                                                | 4  |
| 1.3.2 | Gasgesetze .....                                               | 5  |
| 1.3.3 | Tauchphasen .....                                              | 5  |
| 1.4   | Dekompressionserkrankung (DCS) .....                           | 8  |
| 1.4.1 | Pathophysiologie.....                                          | 9  |
| 1.4.2 | Klinik und Symptome der DCS .....                              | 10 |
| 1.4.3 | DCS-Prävention .....                                           | 11 |
| 1.5   | Hyperbare Sauerstofftherapie.....                              | 11 |
| 1.5.1 | Definition .....                                               | 11 |
| 1.5.2 | Geschichte der HBO .....                                       | 12 |
| 1.5.3 | Physiologische Grundlagen der HBO .....                        | 13 |
| 1.5.4 | Risiken und Nebenwirkungen der HBO .....                       | 16 |
| 1.5.5 | Indikationen .....                                             | 17 |
| 1.6   | Hyperbare Sauerstofftherapie bei Dekompressionserkrankung..... | 17 |
| 1.6.1 | Definition .....                                               | 17 |
| 1.6.2 | Leitlinienkonforme symptomatische Therapie der DCS .....       | 18 |
| 1.6.3 | Wirkweise .....                                                | 19 |
| 1.6.4 | Leitlinienkonforme kausale Therapie der DCS mit HBO .....      | 20 |
| 1.7   | Fragestellung .....                                            | 22 |
| 2.    | Material und Methoden .....                                    | 23 |
| 2.1   | HBO-Therapieschema.....                                        | 23 |
| 2.1.1 | USNTT-5(a)-SCMOD1C (verwendetes Therapieschema).....           | 23 |
| 2.2   | Patienten.....                                                 | 25 |

|       |                                                                                         |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3   | Aufbereitung der Patientendaten.....                                                    | 25 |
| 2.3.1 | Patientenakten.....                                                                     | 25 |
| 2.3.2 | Fragebogen.....                                                                         | 25 |
| 2.4   | Durchführung .....                                                                      | 26 |
| 2.4.1 | Demographische Daten.....                                                               | 26 |
| 2.4.2 | Tauchanamnese.....                                                                      | 26 |
| 2.4.3 | Medizinische Anamnese .....                                                             | 26 |
| 2.4.4 | Therapie und Verlauf .....                                                              | 27 |
| 2.4.5 | Allgemeiner Gesundheitszustand .....                                                    | 27 |
| 2.4.6 | Untersuchung von Einflüssen auf den Behandlungserfolg.....                              | 28 |
| 2.4.7 | Statistische Methoden .....                                                             | 28 |
| 3.    | Ergebnisse.....                                                                         | 29 |
| 3.1   | Eingeschlossene Patienten (n = 62).....                                                 | 29 |
| 3.1.1 | Demographische Daten.....                                                               | 29 |
| 3.1.2 | Tauchanamnese.....                                                                      | 30 |
| 3.1.3 | Medizinische Anamnese .....                                                             | 30 |
| 3.1.4 | Therapie und Verlauf .....                                                              | 31 |
| 3.2   | Fragebogenrückläufer (n = 27).....                                                      | 33 |
| 3.2.1 | Demographische Daten.....                                                               | 34 |
| 3.2.2 | Tauchanamnese.....                                                                      | 34 |
| 3.2.3 | Medizinische Anamnese .....                                                             | 36 |
| 3.2.4 | Therapie und Verlauf .....                                                              | 38 |
| 3.2.5 | Untersuchung von Einflüssen auf die Beschwerdepersistenz.....                           | 41 |
| 3.2.6 | Auswertung des SF-12 Fragebogens .....                                                  | 44 |
| 3.2.7 | Untersuchung von Einflüssen auf das Ergebnis des SF-12-Fragebogens.....                 | 46 |
| 3.2.8 | Übertragbarkeit der Ergebnisse der Fragebögen auf alle eingeschlossenen Patienten ..... | 48 |
| 4.    | Diskussion .....                                                                        | 49 |

|     |                                                                                                                   |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Wirksamkeit der HBO bei DCS .....                                                                                 | 49 |
| 4.2 | Anzahl der notwendigen Therapieeinheiten.....                                                                     | 50 |
| 4.3 | Einfluss des therapiefreien Intervalls auf die Rückbildung der Symptomatik.                                       | 51 |
| 4.4 | Einsatz modifizierter Therapieschemata .....                                                                      | 53 |
| 4.5 | Schlussfolgerung .....                                                                                            | 56 |
| 5.  | Literatur .....                                                                                                   | 57 |
| 6.  | Anhang .....                                                                                                      | 62 |
| 6.1 | Fragebogen zur Komplettierung der Tauchanamnese.....                                                              | 62 |
| 6.2 | Modifizierter „SF-12-Fragebogen“ zur Feststellung des allgemeinen<br>Gesundheitszustandes .....                   | 64 |
| 6.3 | Korrelationen der Fragebogenteilnehmer mit Beschwerdepersistenz und<br>Mittelwerten des „SF-12 Fragebogens“ ..... | 69 |

## Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 1: Zusammensetzung von Druckluft (Vol.-%) [1] .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 3  |
| Abb. 2: Zusammensetzung von Nitrox32 (Vol.-%)[1] .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 3  |
| Abb. 3: Zusammensetzung von Trimix18/50 (Vol.-%)[8] .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 4  |
| Abb. 4: Gasgesetze von Dalton, Boyle-Mariotte und Henry [10] .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5  |
| Abb. 5: Nomenklatur der DCI und deren zu Grunde liegender Pathomechanismus [21] 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
| Abb. 6: Sauerstoffgehalt des arteriellen Blutes ( $\text{CaO}_2$ ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 13 |
| Abb. 7: Sauerstoffgehalt (chemisch-gebunden), Hüfner-Zahl:1,34 ml/g Hb [10].....                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 13 |
| Abb. 8: Sauerstoffbindungskurve des Hämoglobins mit Halbsättigungsdruck [46] .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 14 |
| Abb. 9: Sauerstoffgehalt (physikalisch-gelöst) bei Normothermie und normobaren Bedingungen [10] .....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 14 |
| Abb. 10: Formel nach Murray zum Abschätzen des alterskorrigierten $\text{paO}_2$ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 14 |
| Abb. 11: Gesamtsauerstoffgehalt ( $\text{CaO}_2$ ) des Blutes unter normobaren ( $p = 1 \text{ bar}$ ) und hyperbaren Bedingungen ( $p = 2,8 \text{ bar}$ ) mit einer $\text{FiO}_2 = 1,0$ ; Hüfner-Zahl: 1,34ml; Hämoglobinsättigung ( $\text{SpO}_2$ ); arterieller Sauerstoffpartialdruck ( $\text{paO}_2$ ); Löslichkeitskoeffizient des Sauerstoffes im Blut: 0,024 ml / mmHg;..... | 15 |
| Abb. 12: Schematische Darstellung der $\text{tcPO}_2$ [Modifiziert nach Textbook of $\text{tcPO}_2$ Fa. Radiometer] .....                                                                                                                                                                                                                                                                | 16 |
| Abb. 13: USNTT-6, dunkelblau: Phase mit einer $\text{FiO}_2$ : 1,0; hellblau: Phase mit einer $\text{FiO}_2$ : 0,21 [28] .....                                                                                                                                                                                                                                                           | 20 |
| Abb. 14: USNTT-5(a), dunkelblau: Phase mit einer $\text{FiO}_2$ : 1,0; hellblau: Phase mit einer $\text{FiO}_2$ : 0,21 [28] .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 22 |
| Abb. 15: USNTT-5(a) SCMOD (verwendetes Therapieschema: hellblau sind die Druckluftphasen; dunkelblau sind die Phasen an den reiner Sauerstoff [ $\text{FiO}_2$ :1,0] appliziert wird. Die erste Plateauphase (5,0 bar) kann auf 30 Minuten verlängert werden. Die zweite Plateauphase (1,8 bar) kann auf bis zu 90 Minuten verlängert werden.....                                        | 24 |
| Abb. 16: Verteilung der Behandlungen der 62 eingeschlossenen Patienten im Untersuchungszeitraum pro Jahr .....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 29 |
| Abb. 17: Verteilung der 62 eingeschlossenen Patienten auf die Altersklassen: älter als 40 Jahre; zwischen 30 und 40 Jahren; jünger als 30 Jahre .....                                                                                                                                                                                                                                    | 30 |
| Abb. 18: Erstversorgung durch dritte am Ereignisort; Andere: (Kortikosteroide und ASS).....                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 31 |

|                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 19: Anzahl der Patienten mit 1-3 Therapieeinheiten, sowie mehr als 3 HBO-Therapieeinheiten.....                                                                                                                                  | 32 |
| Abb. 20: Therapiefreies Intervall: Zeitraum zwischen Auftreten der ersten Symptome und HBO .....                                                                                                                                      | 32 |
| Abb. 21: Patienten mit Restsymptomatik nach Abschluss der HBO.....                                                                                                                                                                    | 33 |
| Abb. 22: Verteilung der Behandlungen der 27 Fragebogenrückläufer im Untersuchungszeitraum pro Jahr .....                                                                                                                              | 34 |
| Abb. 23: Verteilung der 62 eingeschlossenen Patienten auf die Altersklassen: älter als 40 Jahre; zwischen 30 und 40 Jahren; jünger als 30 Jahre .....                                                                                 | 34 |
| Abb. 24: Ausbildungsstand des Tauchers nach Organisation: Professional Association of Diving Instructors (PADI) oder World Confederation of Underwater Activities (CMAS) .....                                                        | 35 |
| Abb. 25: Gruppierte Anzahl der Tauchgänge vor dem Tauchunfall .....                                                                                                                                                                   | 36 |
| Abb. 26: Wiederaufnahme des Tauchsports nach Abschluss der HBO-Therapie.....                                                                                                                                                          | 36 |
| Abb. 27: Erstversorgung durch dritte am Ereignisort; Andere: (Kortikosteroide) .....                                                                                                                                                  | 37 |
| Abb. 28: Gruppierte Anzahl der HBO-Therapieeinheiten mit dem modifizierten Therapieschema des UKD .....                                                                                                                               | 38 |
| Abb. 29: Gruppiertes Intervall zwischen Symptomeintritt und Therapiebeginn mit dem modifiziertem HBO-Therapieschema des UKD.....                                                                                                      | 38 |
| Abb. 30: Patienten mit Restsymptomatik nach Abschluss der HBO.....                                                                                                                                                                    | 39 |
| Abb. 31: Gruppierte Dauer der Arbeitsunfähigkeit nach dem Tauchunfall (n=27).....                                                                                                                                                     | 40 |
| Abb. 32: Weiterbehandlung nach Abschluss der HBO-Therapie am UKD (n=27) .....                                                                                                                                                         | 40 |
| Abb. 33: Im Zeitraum nach Abschluss der HBO-Therapie und Versendung des Fragebogens erlittene DCS (n=27) .....                                                                                                                        | 41 |
| Abb. 34: Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz nach Abschluss der HBO nach Geschlechtern. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Geschlechtern.....                                                      | 41 |
| Abb. 35: Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz nach Abschluss der HBO nach DCS Typ. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Entitäten der DCS. ....                                                | 42 |
| Abb. 36: Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz nach Abschluss der HBO nach gruppiertem Anzahl der Therapieeinheiten. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der gruppierten Anzahl an Therapieeinheiten..... | 42 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 37: Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz nach Abschluss der HBO nach<br>gruppiertem Dauer des therapiefreien Intervalls. Es zeigten sich keine signifikanten<br>Unterschiede abhängig von der Dauer des therapiefreien Intervalls. ....                                        | 43 |
| Abb. 38: Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz nach Abschluss der HBO nach<br>erneuter DCS nach Abschluss der HBO am UKD. Es zeigten sich keine signifikanten<br>Unterschiede zwischen den Patienten, die eine erneute DCS im<br>Nachuntersuchungszeitraum erlitten oder nicht. .... | 43 |
| Abb. 39: Veränderung des Gesamtscore SF-12 vor dem Tauchunfall und<br>Nachuntersuchung; mit Normalverteilungskurve (n=27) .....                                                                                                                                                            | 44 |
| Abb. 40: Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz, Vergleich der Mittelwerte vor<br>und nach dem Tauchunfall; Vergleich der Mittelwerte nach dem Tauchunfall .....                                                                                                                      | 48 |
| Abb. 41: Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz, Vergleich der Mittelwerte des<br>„physischen Gesundheitszustandes“ vor und nach dem Tauchunfall; Vergleich der<br>Mittelwerte nach dem Tauchunfall .....                                                                             | 48 |

# 1. Einleitung

## 1.1 Geschichte des Tauchens

Seit ca. 5000 Jahren, soweit gehen die ersten Beschreibungen des Tauchens zurück, strebt der Mensch danach, die Geheimnisse des Meeres zu erforschen und sich dessen Ressource zu Nutze zu machen. Die ersten Taucher benutzten keinerlei Hilfsmittel und erreichten Tiefen von bis zu 30 Metern. Dieses sog. Apnoetauchen diente in erste Linie dazu Meeresfrüchte, Perlen und Ähnliches vom Meeresgrund zu ernten [1]. Im 5. Jahrhundert vor Christi wurde ein Taucher „Scyllis“ beschrieben, der für den Persischen König Xerxes I. Schätze von versunkenen Schiffen bergen sollte. Als er später flüchtete, um die griechische Flotte vor einem Angriff zu bewahren, sprang er ins Wasser und tauchte unter die Wasseroberfläche ab, damit man ihn nicht entdeckte. Er schwamm mit einem Schilfrohr im Mund rund 15 km weit und schloss sich den Griechen an [1]. Die Apnoetauchgänge waren aufgrund der begrenzten Sauerstoffkapazität der Lunge kurz. Es wurden teilweise luftgefüllte Beutel mitgeführt, um die Tauchdauer zu verlängern, dies gelang jedoch aufgrund des abgeatmeten Kohlendioxids nicht [1]. Nach der Erfindung der Taucherglocke im Jahre 1530 war es möglich längere Zeit unter Wasser zu bleiben. Diese wurde von der Wasseroberfläche mit einem Überdruck versorgt, damit kein Wasser eindringen konnte. Die Entwicklung der Taucherglocke schritt rasch voran, so dass immer größere Tiefen erreicht werden konnten [1]. Im 19. Jahrhundert wurde von August Siebe ein Helmtauchanzug entwickelt. Dies war ein so genannter Trockentauchanzug, d.h., der Taucher kam während des Tauchgangs nicht mit Wasser in Kontakt. Er wurde durch eine an der Wasseroberfläche befindlichen Pumpe mit Atemluft versorgt. Zeitgleich wurde ein Überdruck erzeugt, der den Taucher umgab und so zusätzlich ein Eindringen von Wasser durch Leckagen verhinderte. Auf dieser grundlegenden Funktionsweise sind auch die heute noch gebräuchlichen Trockentauchanzüge zurückzuführen. August Siebe wird deshalb auch heute noch gerne als der „Urvater“ des Tauchens bezeichnet [1]. 1876 verfolgte Henry A. Fleuss einen anderen Ansatz des Tauchens. Er ersetzte die Druckluft durch reinen Sauerstoff. Die abgeatmete Luft wurde über einen Schlauch durch einen Behälter mit ätzender Pottasche geführt und so von anfallendem Kohlendioxid befreit. Man erreichte jedoch mit diesem System nur geringe Tauchtiefen (ca. 7-10 m), da man ab dieser Tiefe bereits die toxischen Wirkungen des Sauerstoffes, wie z. B. zerebrale Krampfanfälle,

beobachten konnte. Zum damaligen Zeitpunkt konnte man sich diese Mechanismen jedoch nicht erklären [1-2]. Dies war der Vorläufer, der auch heute noch, besonders im militärischen Bereich, angewendeten Rückatmungsgeräte („Rebreather“) [1]. In den Jahren 1942-43 entwickelten die Franzosen Cousteau und Gagnan die so genannte „Aqua-Lung“, die es ermöglichte mit Druckluft oberflächenunabhängig zu tauchen. Die Erfindung dieses auch als „Lungenautomaten“ bezeichneten Hilfsmittels ermöglichte das in der Folge begründete Sporttauchen („Scuba-Diving“) und machte es der breiten Masse zugänglich [1, 3].

## **1.2 Gegenwärtiges**

Auch gegenwärtig hat das Tauchen einen hohen Stellenwert. Neben dem Berufstauchen gilt Tauchen als Freizeitvergnügen und Urlaubsaktivität. Zurzeit gibt es alleine in der Bundesrepublik Deutschland ca. 1-1,5 Millionen Taucher [4-5]. Es wird sowohl ohne Hilfsmittel getaucht (Apnoetauchen), als auch mit Hilfsmitteln (Schnorchel) oder mit Geräten. Als Gerätetauchen werden alle Arten des Tauchens definiert, bei denen ein Tauchgerät zum Einsatz kommt. Die verwendeten Tauchgeräte sind dabei variabel. Beim Sporttauchen wird überwiegend mit oberflächenunabhängigen Druckluftgeräten getaucht, während bei Berufs- bzw. Militärtauchern verschiedenste Tauchgeräte zum Einsatz kommen, wie z.B. Helmtauchgeräte mit oberflächenabhängiger Druckluftversorgung oder, speziell bei Kampftauchern, Rückatmungsgeräte, die einen Atemkalkfilter besitzen, der die Atemluft von Kohlendioxid reinigt [6]. Das verwendete Atemgas ist hierbei sehr variabel und hängt vom Anforderungsprofil des Tauchers ab. Beim Sporttauchen wird überwiegend Druckluft (komprimierte Umgebungsluft) verwendet (vgl. Abb. 1), während beim Berufs- und Militärtauchen spezielle Mischgase verwendet werden, um Tauchzeiten zu verlängern und größere Tauchtiefen zu erreichen. Mittlerweile werden auch beim Sporttauchen spezielle Gasgemische als Atemluft verwendet. Diese Form des Sporttauchens wird als „Tech-Tauchen“ bezeichnet. Das verwendete Atemgas trägt Bezeichnungen wie „Nitrox“ oder „Trimix“ [1] (vgl. Abb. 2-3). Die Regelung der inspiratorischen Sauerstoffkonzentration geschieht entweder manuell durch den Taucher oder elektronisch [7]. Bei „Nitrox“ handelt es sich um ein Gasgemisch aus Sauerstoff und Stickstoff. Im Gegensatz zu Druckluft ist der Sauerstoffanteil erhöht, während der Stickstoffanteil konsekutiv erniedrigt ist. Dies ermöglicht dem Taucher längere Tauchzeiten, bei niedrigerem Risiko eine Dekompressionserkrankung zu erleiden. Allerdings ist durch den erhöhten Sauerstoffanteil eine geringere Tauchtiefe zu beachten (Sauerstoffintoxikation) [1].

Durch die Zugabe von Helium („Trimix“), wird der Stickstoffanteil reduziert, während der Sauerstoffanteil dem von Druckluft entspricht. Mit diesem verwendeten Atemgas kann eine größere Tauchtiefe erreicht werden, bei geringerem Risiko einer Dekompressionserkrankung oder Sauerstoffintoxikation [1]. Bei „Heliox“ wird der Stickstoffanteil komplett durch Helium ersetzt. Der Vorteil von Helium ist, dass die Wirkungen des Stickstoffs in der Tiefe (Tiefenrausch) minimiert werden. Es ist jedoch zu beachten, dass der Sauerstoffanteil im Vergleich zur Druckluft, je nach angestrebter Tauchtiefe, reduziert ist. Hier besteht die Gefahr, in zu geringen Tauchtiefen eine Sauerstoffunterversorgung zu erleiden, so dass in jedem Falle eine Überwachung der Sauerstoffkonzentration der Einatemluft erfolgen muss [1, 7].

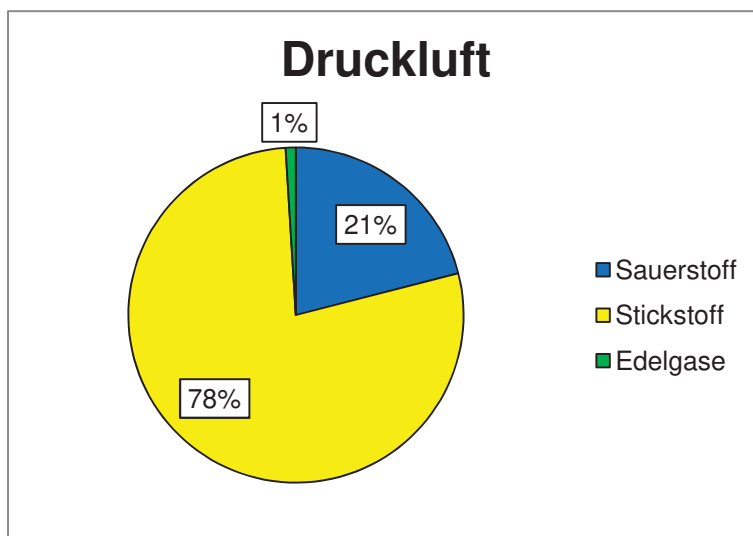


Abb. 1: Zusammensetzung von Druckluft (Vol.-%) [1]

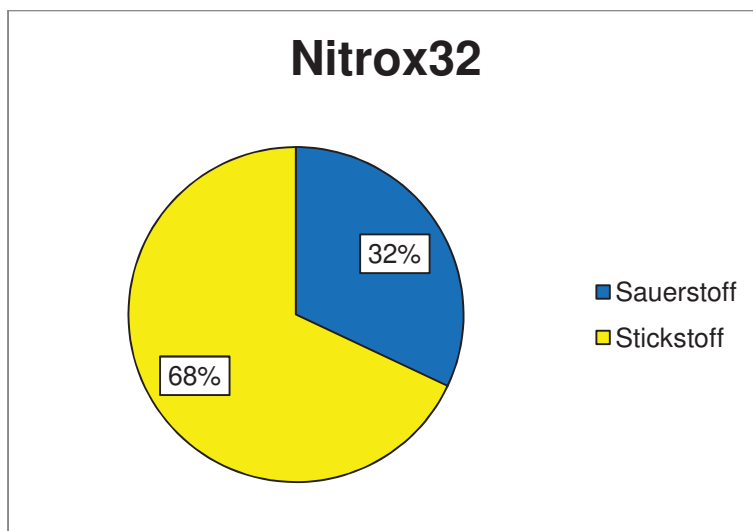


Abb. 2: Zusammensetzung von Nitrox32 (Vol.-%)[1]

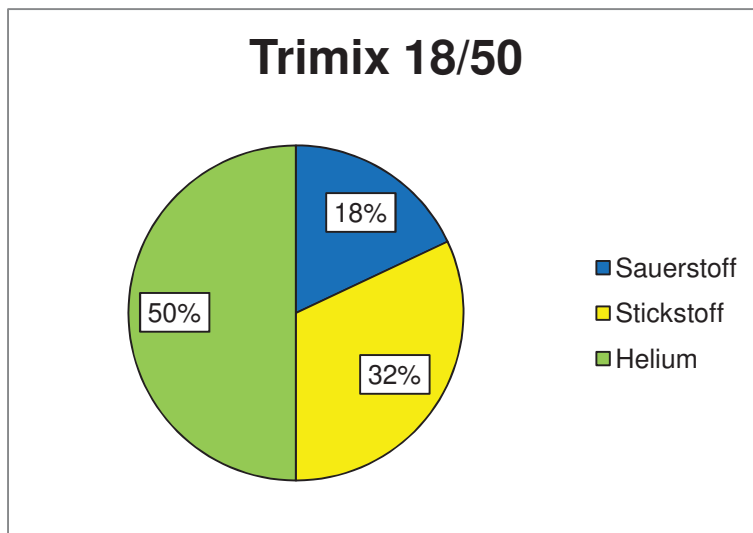


Abb. 3: Zusammensetzung von Trimix18/50 (Vol.-%)[8]

### 1.3 Physiologie und Pathophysiologie

#### 1.3.1 Grundlagen

Zum Verständnis der zu Grunde liegenden Vorgänge beim Tauchen, werden hier die notwendigen physikalischen Gesetzmäßigkeiten erläutert.

Auf dem Meeresspiegelniveau (NN) beträgt der Umgebungsdruck (= Luftdruck) ca. 1 bar (760 mmHg, 1013 hPa). Dieser wird durch die auf der Oberfläche lastende Luftsäule bedingt. Bei einem normalen Umgebungsdruck auf NN lastet auf jedem Quadratmeter eine Luftsäule mit ca. 10 Tonnen Masse [9]. Da Wasser, im Vergleich zur Luft, eine um den Faktor 800 höhere Dichte aufweist, nimmt der Umgebungsdruck unter Wasser durch die Last der Wassersäule rasch zu. Eine Wassersäule von 10 m erhöht den Umgebungsdruck um 1 bar. In einer Wassertiefe von 10 m herrscht also ein Umgebungsdruck von ca. 2 bar, der sich aus dem herrschenden Luftdruck und dem Wasserdruck zusammensetzt. In größeren Tauchtiefen nimmt der Umgebungsdruck, dieser Gesetzmäßigkeit folgend, linear zu [10]. Es gilt jedoch, dass sich der Umgebungsdruck bei einer Tauchtiefe von 10 m bereits verdoppelt hat. Ein weiteres Mal verdoppelt sich der Druck erst bei einer Tauchtiefe von 30 m [4]. Entsprechend nimmt mit zunehmender Höhe über NN der Umgebungsdruck (= Luftdruck) ab. Da sich diese Beziehung nicht linear verhält, sind die Druckänderungen in der Höhe entsprechenden Tabellen zu entnehmen. Näherungsweise gilt, dass der Luftdruck um ca. 0,1 bar pro 1000 Höhenmetern fällt [3, 10-14].

### 1.3.2 Gasgesetze

Gemäß dem Gesetz von Dalton sind die Komponenten eines Gasgemisches ihrem Volumenanteil entsprechend am Gesamtdruck beteiligt. Hierbei ergibt die Summe der Partialdrücke den Gesamtdruck. Dies bedeutet, dass mit steigendem Umgebungsdruck, der Partialdruck der einzelnen Gase ebenfalls zunimmt [10]. Das Gesetz von Boyle-Mariotte besagt, dass sich bei einer Verdoppelung des Druckes, das Volumen eines Gases halbiert und umgekehrt. Dies bedeutet, dass Druck und Volumen sich umgekehrt proportional zueinander verhalten [10]. Weiterhin besagt das Gesetz von Henry, dass Gase sich, entsprechend ihres Partialdruckes, physikalisch in Flüssigkeiten lösen. Hierbei ist das Lösungsvermögen abhängig von Temperatur und Lösungskoeffizienten [10] (vgl. Abb.4).

*„Gesetz von Dalton“: Gesamtdruck ( $p$ ) =  $p_1 + p_2 + \dots + p_n$*

*Die einzelnen Partialdrücke addieren sich zum Gesamtdruck auf (Superpositionsprinzip)*

*„Gesetz von Boyle-Mariotte“: Gesamtdruck ( $p$ )  $\times$  Volumen ( $V$ ) = Konstant*

*Bei abgeschlossener Gasmenge und konstanter Temperatur verhalten sich Druck und Volumen umgekehrt proportional zueinander*

*„Gesetz von Henry“:*

*$c$  (Gaskonzentration) =  $\alpha \div 760[\text{mmHg}] \times \text{Gesamtdruck } (p)$*

*Gase lösen sich physikalisch in Flüssigkeiten entsprechend ihrem Partialdruck; das Lösungsvermögen hängt vom Lösungskoeffizienten ( $\alpha$ ) und der Temperatur ab.*

**Abb. 4: Gasgesetze von Dalton, Boyle-Mariotte und Henry [10]**

### 1.3.3 Tauchphasen

Der Tauchgang gliedert sich in drei Phasen: Jeder dieser Phasen lassen sich einzelne Entitäten zuordnen. Die Entstehung dieser lässt sich durch die physiologischen und pathophysiologischen Vorgänge in den einzelnen Phasen des Tauchganges erklären [4].

#### 1.3.3.1 Kompressionsphase

In der Kompressionsphase, also in der Phase, in der der Umgebungsdruck zunimmt, stellen die luftgefüllten Hohlräume, pneumatisierte Knochen und Tympanum Schwerpunkt der druckbedingten Verletzungen (Barotraumata) dar [4]. Diese Verletzungsmuster sind meist nicht lebensgefährlich. Allerdings können die pneumatisierten Knochen bei einer unkontrollierten Kompression frakturieren, wobei erhebliche Verletzungen entstehen (z.B. Berstungsfraktur des Sinus maxillaris) [3-4].

Risikofaktoren für diese Verletzungen stellen Infekte im Pharynxbereich, wie Rhinitis oder eine Sinusitis dar, da diese einen notwendigen Druckausgleich zwischen Mittelohr und Pharynx erschweren können. Auch wenn es sich bei den o.g. Verletzungsmustern nicht um potenziell lebensbedrohliche Krankheitsbilder handelt, so ist doch zu berücksichtigen, dass ein solches Verletzungsbild zu einer Panikreaktion oder durch Perforation des Tympanum mit Wassereinbruch ins Mittelohr mit konsekutivem kalorischem Nystagmus zur Orientierungslosigkeit und folglich zu einem Notaufstieg führen kann [3].

#### 1.3.3.2 Isopressionsphase

Während der Isopressionsphase, also in der Phase, in der der Umgebungsdruck annähernd konstant bleibt, kann der Taucher durch Tiefenrausch, Sauerstoffintoxikation oder Unfälle (z.B. Ertrinken, keine ausreichende Atemluft für kontrolliertes Auftauchen, etc.) gefährdet sein. Auch hier können Situationen auftreten, die im Rahmen einer Panikreaktion zu einem unkontrolliertem Notaufstieg führen können [4]. Beim Tiefenrausch handelt es sich um eine Inertgasnarkose. Bei Tauchern die Druckluft verwenden, wird der in der Druckluft enthaltende Stickstoff durch den erhöhten Umgebungsdruck vermehrt aufgenommen und geht vermehrt in Lösung (vgl. Gesetz von Henry). Da dieser dann ins ZNS diffundieren kann, führt dies zu einem rauschartigen Zustand. Dieses Phänomen ist für eine Tauchtiefe ab ca. 40 m beschrieben [15]. Die Sauerstoffintoxikation (Hyperoxie) stellt ein Überangebot von Sauerstoff im menschlichen Organismus dar. Die physiologischen Mechanismen führen zu einer Reihe von Wirkungen, die teils erwünscht und teils unerwünscht sind. Ein Sauerstoffpartialdruck bis 1,6 bar (1.200 mmHg) wird als sicher angesehen, hier ist keine akute Sauerstoffintoxikation zu erwarten. Die kritische Grenze wird mit 2,0 bar (1.500 mmHg) angegeben [16]. Als Erstbeschreiber dieser Sauerstofftoxizität wird 1878 der Franzose *Paul Bert* benannt, der bei seinen Versuchstieren Krampfanfälle unter erhöhtem Sauerstoffpartialdruck beobachtete. Im Jahre 1899 entdeckte *James Lorrain Smith* ein Atemnotsyndrom bei seinen Versuchstieren, die zu lange einem zu hohen Sauerstoffpartialdruck ausgesetzt waren. Hier kam es zunächst zu Atelektasen, Ödemen des Alveolarepithels und in dessen Folge zu Umbauprozessen der Lungengefäße [2-3, 17-18].

#### 1.3.3.3 Hypothermie

Die Hypothermie stellt für den Taucher eine Gefahr während des Tauchgangs dar. Der veränderte Wärmehaushalt unter Wasser differiert ganz erheblich von dem an der Oberfläche. Grundsätzlich kann der menschliche Körper durch Konvektion (Wärmeabgabe über die direkt der Haut angrenzende Luftschicht), Konduktion (Wärmeabgabe bei Hautkontakt mit flüssigen oder festen Stoffen), Strahlung (Infrarot-Strahlung von der Haut aus; nur wenn der Körper mehr Strahlungswärme abgibt als aufnimmt), oder Evaporation (Verdunstungskälte beim Schwitzen Wärme an die Umgebung abgeben). Die Konduktion ist beim Tauchen ein entscheidender Faktor zur Entwicklung einer Hypothermie. Die Konduktion ist im Wasser rund 25-mal größer als in der Luft, so dass je nach Wassertemperatur, schnell eine Hypothermie entstehen kann. Die Symptome der Hypothermie beim Tauchen sind vielschichtig. Nachlassende Aufmerksamkeit und Dyspraxie sind häufig der Auslöser für eine Angstreaktion. Die daraus folgende Sympathikusaktivierung und Katecholaminausschüttung wirken sich negativ auf die Sauerstoffbilanz aus. Desweiteren besteht die Gefahr, dass der Taucher im Rahmen einer Panikreaktion unkontrolliert auftaucht [19]. Um sich vor der Hypothermie zu schützen, benutzt der Taucher einen Tauchanzug. Zum einen gibt es Nasstauchanzüge. Sie bestehen aus einer Neoprenschicht, die den Taucher, je nach Stärke entsprechend gegen Auskühlung schützt. Allerdings dringt bei dieser Form des Tauchanzuges immer Wasser ein, so dass durch die Wasserzirkulation im Anzug kein absoluter Schutz gegen Hypothermie gegeben ist und dieser nur für wärmere Gewässer geeignet ist. Für kältere Gewässer gibt es Trockentauchanzüge. Diese sind zum Beispiel aus einer Schicht Trilaminat und werden mit Unterwäsche getragen, die an die Wassertemperatur angepasst wird. Die Luftschicht, die sich in dem Anzug befindet, wird entweder mit Druckluft oder Argongas gefüllt, um dem Taucher so einen optimalen Schutz gegen Auskühlen zu bieten [20].

#### 1.3.3.4 Dekompressionsphase

In der Dekompressionsphase, der Phase des abnehmenden Druckes, entstehen die lebensbedrohlichen Entitäten der Dekompressionserkrankung (DCS), der arteriellen Gasembolie (AGE) oder auch des Barotrauma der Lunge [4]. Um diesen Mechanismen entgegenzuwirken, werden von den Tauchern, oder auch Überdruckarbeitern, sog. Austauchtabelle genutzt. Austauchtabelle sind empirisch ermittelte Tabellen, die je nach Tauchzeit, Tauchdauer und verwendetem Atemgas, in der Dekompressionsphase, auf bestimmten Tauchtiefen Dekompressions-Stopps vorschreiben, damit die in den

Gewebe und Blut vorhandenen Inertgasblasen ausreichend Zeit besitzen, um wieder ab zu diffundieren. Es gibt auch sog. Nullzeittauchgänge, die diese Pausen nicht vorschreiben [5].

#### **1.4 Dekompressionserkrankung (DCS)**

1667 beschrieb Robert Boyle in einem Tierexperiment bei einer Viper das erste Mal die DCS [1].

In der Nomenklatur haben sich die anglo-amerikanischen Begrifflichkeiten durchgesetzt, so dass in dieser Arbeit ebenfalls die anglo-amerikanischen Begriffe Verwendung finden.

Als Oberbegriff für die Dekompressionserkrankungen werden die Begriffe „Decompression illness (DCI)“, „Decompression incident“ oder auch „Decompression injury“ benutzt [4]. Die DCI wird wiederum unterteilt in die „Decompression sickness (DCS)“ und „pulmonales Barotrauma (PBT)“. Die DCS wird weiter in zwei Typen differenziert: Typ I ist durch die klinische Manifestation mit muskuloskelettalen Schmerzen gekennzeichnet, während bei der DCS Typ II zusätzlich neurologische Symptome, wie z.B. Halbseitenlähmungen auftreten [4]. In den aktuellen Leitlinien der Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin (GTÜM) wird auf die klinische Einteilung der DCS in Typ I und Typ II aus Gründen der fehlenden klinischen Relevanz verzichtet. Die klinische Differenzierung zwischen DCS Typ II und „arterieller Gasembolie (AGE)“ gestaltet sich sehr schwierig. Eine therapeutische Konsequenz ergibt sich in der Differenzierung ebenfalls nicht. Bereits 1991 schlugen Francis und Smith vor diese Einteilung zu verlassen. In dieser Arbeit wird die klassische klinische Einteilung jedoch beibehalten [21] (vgl. Abb. 5).

PBT vereint die Entitäten der AGE, die des Pneumothorax und des Mediastinalempysemes in sich [4, 21].

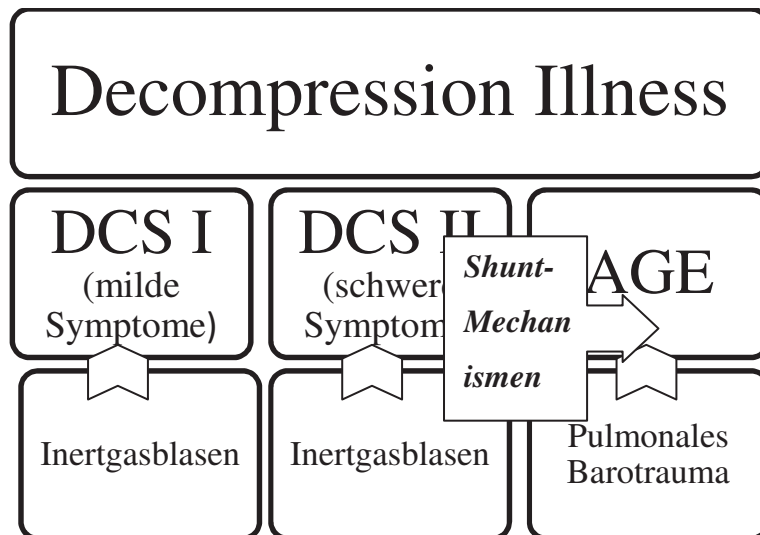


Abb. 5: Nomenklatur der DCI und deren zu Grunde liegender Pathomechanismus [21]

#### 1.4.1 Pathophysiologie

Bei der DCS kommt es durch den erhöhten Umgebungsdruck während der Kompressionsphase, gemäß dem Gesetz von Dalton, zum Anstieg der Partialdrücke der Gase. Der in der Druckluft als Atemgas enthaltene Stickstoff (78%) ist als Inertgas für den Pathomechanismus der DCS hauptverantwortlich. Durch den Anstieg des Partialdruckes ändert sich, gemäß dem Gesetz von Henry, das Lösungsverhalten des Stickstoffes und führt zu einer verstärkten Aufsättigung der Gewebe und des Blutes. Das Volumen des Stickstoffes nimmt durch den erhöhten Umgebungsdruck, gemäß dem Gesetz von Boyle-Mariotte, ab und es kommt zu keinerlei Mikrozirkulationsstörungen [22]. Weitere Faktoren, die die Aufsättigung der Gewebe und Blut mit Stickstoff begünstigen sind Adipositas [35], sowie eine größere Tauchtiefe und eine längere Tauchdauer [5].

In der Dekompressionsphase nimmt der Umgebungsdruck ab. Das Lösungsverhalten und das Volumen der gelösten Gase verändern sich wieder gemäß den Gasgesetzen. Die gesättigten Gewebe und das Blut werden nun vom Stickstoff wieder entsättigt. In Abhängigkeit von der Gewebeart geschieht dies in unterschiedlicher Geschwindigkeit, da es sog. schnell und langsam entsättigende Gewebe gibt. Austauchtabelle erlauben den jeweiligen Geweben, je nach Tauchdauer und Tauchtiefe ausreichend Zeit zu geben. Es lassen sich aber nach nahezu jedem Tauchgang sonographisch Inertgasblasen in den Geweben nachweisen, die jedoch nicht immer zu einer DCS führen müssen. Die Inertgasblasen, die intra- und extravasal nachzuweisen sind, setzen immunologische und prokoagulatorische Prozesse in Gang, die sich nicht bei jedem Menschen in gleicher ausgeprägter Form wiederfinden [5, 23].

Bei der AGE kommt es durch pulmonale Shuntmechanismen zu einem Übertritt von Gasblasen in das arterielle Stromgebiet [5]. Im arteriellen Stromgebiet erzeugen die Gasblasen am Endothel, analog zur DCS, pro-inflammatorische und koagulatorische Prozesse, jedoch kommt es hier in den Endstromgebieten auch zu einer direkten Okklusion des betreffenden Gefäßabschnittes [22-25].

#### 1.4.1.1 Persistierendes Foramen Ovale (PFO)

Einen Sonderfall nimmt die DCS bei Patienten mit PFO ein, da diese zu einer AGE führen kann, jedoch differiert der Pathomechanismus von der „klassischen AGE“. Hierbei kann es auch ohne ein pulmonales Barotrauma zur AGE kommen, da durch den Rechts-Links-Shunt entstandene Gasblasen direkt ins arterielle Stromgebiet gelangen und die oben beschriebenen Mechanismen der AGE in Gang setzten [23, 26].

Die Prävalenz eines PFO liegt bei ca. 25 % [27-29]. Wie hoch das absolute Risiko für einen Taucher mit PFO ist, eine schwere DCS respektive AGE zu erleiden ist nicht bekannt. Allerdings ist die statistisch berechnete Wahrscheinlichkeit mit 1:2.000 anzunehmen. Das entspricht ca. 4,3-5,7 schwere DCS bei PFO auf 10.000 Tauchgänge [26].

Weitere Faktoren, die eine DCS begünstigen können, spielen insbesondere bei „Urlaubstauchern“ eine Rolle. Intensive Tauchurlaube mit wenigen Oberflächenintervallen, sowie sog. „Jo-Jo-Tauchgänge“ bei denen während eines Tauchganges in kurzen Abständen wiederholt Auf- und Abgetaucht wird [30]. Wird nach dem letzten Tauchgang im Urlaub kein ausreichender Abstand zum Rückflug eingehalten, besteht ein erhöhtes Risiko eine DCS zu erleiden. Pathophysiologisch lässt sich dieses Risiko dadurch erklären, dass in einem herkömmlichen Passagierflugzeug der Kabinendruck einer Höhe von 2.000-3.000 m über NN entspricht. Durch den damit verbundenen niedrigeren Umgebungsdruck greift der gleiche Pathomechanismus, wie beim Tauchen in Bergseen. In der Literatur wird deshalb empfohlen, zwischen dem letzten Tauchgang und dem Fliegen, einen Abstand von 36 Stunden einzuhalten [31-32].

#### 1.4.2 Klinik und Symptome der DCS

Die DCS Typ I zeichnet sich durch kutane und muskuloskelettale Symptomatik aus. Im Einzelnen sind auffällige Müdigkeit, Hautsymptome, wie Schmerzen, Juckreiz, Rötungen und Marmorierungen, sowie Muskel und Gelenkschmerzen oder Lymphknotenschwellungen zu nennen. Bei der DCS Typ II treten zusätzlich zur oben

beschriebenen Symptomatik Dyspnoe, neurologische Ausfallerscheinungen (Lähmungen, Halbseitensymptomatik, zerebrale Krampfanfälle, Schwindel) oder Brustschmerzen mit Dyspnoe auf. Die Latenzzeit zwischen Dekompression und Symptombeginn kann bei der DCS 24 bis maximal 72 Stunden betragen [22].

Bei der AGE treten die Symptome meist unmittelbar, also ggf. auch schon unter Wasser auf. Der Schwerpunkt liegt auch hier auf der neurologischen Symptomatik (vgl. DCS Typ II), ggf. mit Kreislauf- und Atemdepression. Sie ist klinisch nur sehr schwer von der DCS Typ II zu differenzieren, sofern sich ein pulmonales Barotrauma nicht sofort diagnostizieren lässt [22].

### **1.4.3 DCS-Prävention**

Gegenstand aktueller Untersuchungen ist, ob es geeignete, präventive Maßnahmen zur Vermeidung einer DCS gibt. Denitrogenierung scheint präventiv zu sein und Falke et al. beschreiben ein ähnliches Phänomen bei Seerobben, bei denen durch einen Lungenkollaps keine weitere Stickstoffaufnahme ins Blut erfolgt [33]. Butler et al., 2006, beschreiben im Tierversuch Ratten, die vor dem Auslösen einer DCS durch Präoxygenierung mit reinem Sauerstoff (Denitrogenierung), einen positiven Effekt zur Verhinderung einer DCS aufweisen [5, 34-38]. Als allgemeine Risikofaktoren, die eine DCS begünstigen, ist die Dehydratation zu nennen, die zu einer Verschlechterung der Mikrozirkulation führen kann und somit verlängerte Entsättigungszeiten erzeugt. Zur Dehydratation führen unter anderem Alkoholkonsum und Erkältungskrankheiten [34-35]. In einer retrospektiven Studie aus dem Jahre 2003 wurde das Rauchverhalten von Sporttauchern untersucht. Es konnte zwar nicht gezeigt werden, dass das Rauchen ein Risikofaktor für eine DCI darstellt, jedoch korrelierte die Ausprägung der Symptomatik mit dem Rauchverhalten der Patienten. Je höher Anzahl und Jahre der gerauchten Zigaretten des verunfallten Tauchers mit DCI waren, desto ausgeprägter waren die Symptome [39].

## **1.5 Hyperbare Sauerstofftherapie**

### **1.5.1 Definition**

Unter „hyperbarer Sauerstofftherapie“ (HBO) versteht man eine medizinische Behandlungsform, bei der Sauerstoff unter erhöhtem Umgebungsdruck appliziert wird. Hierdurch wird ein höherer Sauerstoffpartialdruck erreicht, als dieser mit einem inspiratorischen Sauerstoffkonzentration ( $\text{FiO}_2$ ) von 1,0 auf Meeresspiegelniveau möglich wäre [40].

### **1.5.2 Geschichte der HBO**

Die Geschichte der hyperbaren Sauerstofftherapie beginnt bereits vor ca. 300 Jahren. Der britische Mediziner Hernshaw versuchte im Jahr 1664 in einer, mittels Blasebalg betriebenen, Druckkammer, diverse Erkrankungen zu therapieren. Ab dem Jahr 1834 setzten Junod, Pravez und Tabarie in Frankreich eine Überdruckbehandlung zur Therapie diverser Erkrankungen ein [41-42].

Um den Zeitraum des zweiten Weltkrieges herum, setzte die Royal- und US-Navy eine Überdruckanwendung von Sauerstoff ein, um Kampftauchern eine schnellere Dekompression zu erlauben. Die aus diesen Versuchen gewonnen Erkenntnisse, dienten als Grundlage für die heutige HBO [40].

Die moderne HBO nahm ihren Anfang in der Kardiochirurgie. Der niederländische Kardiochirurg Boerema wollte längere Asystoliezeiten ermöglichen. Durch die kontrollierte Hypothermie konnte er die Ischämietoleranzen zwar verdoppeln, aber erreichte lediglich 5 Minuten absolute Toleranzzeit. Zunächst konnte er an Hunden, durch eine Kombination aus Hypothermie und hyperbarer Oxygenierung, deutlich verlängerte Asystoliezeiten nachweisen. Schweine, an denen er zuvor mit einer „Ringerlösung-Äquivalenten“ Infusionslösung eine massive Hämodilution durchführte und damit konsekutiv einen Hämoglobinabfall erzeugte, setzte er ebenfalls der Kombination, aus kontrollierter Hypothermie und hyperbarer Sauerstofftherapie aus. Die Versuchstiere überlebten das Experiment. Er veröffentlichte diese Erkenntnisse 1960 in dem Artikel „Life without Blood“ und führte nun an Kindern mit kongenitalen Herzvitien in eigens dafür konstruierten Operationssälen Herzoperationen unter kontrollierter Hypothermie und hyperbarer Oxygenierung durch. Durch die Entwicklung der extrakorporalen Zirkulation, die sich mittlerweile bei kardiochirurgischen Eingriffen etabliert hat, verlor die „hyperbare Herzchirurgie“ immer mehr an Bedeutung. Zum einen waren die Kosten sehr hoch, zum anderen bestand während der Operationen das Risiko, sowohl für das Operationsteam, als auch für den Patienten, eine DCS zu erleiden. Boerema musste feststellen, dass 50 % seines Teams, die Bedingungen der „hyperbaren Herzchirurgie“ nicht gut tolerierten [43-44]. Dennoch trugen diese Erkenntnisse dazu bei, dass die HBO auch heute noch bei verschiedenen Indikationen erfolgreich eingesetzt werden kann [41, 45].

### 1.5.3 Physiologische Grundlagen der HBO

Sauerstoff wird sowohl über das Hämoglobin chemisch gebunden, als auch physikalisch im Blut gelöst zu den Effektorganen transportiert. Die Summe ergibt die arterielle Sauerstoffgesamtkonzentration ( $\text{CaO}_2$ ) des Blutes.

$$\text{CaO}_2 \text{ gesamt} \left( \frac{\text{ml}}{\text{dl}} \right) = \text{chemisch gelöst} \left( \frac{\text{ml}}{\text{dl}} \right) + \text{physikalisch gelöst} \left( \frac{\text{ml}}{\text{dl}} \right)$$

Abb. 6: Sauerstoffgehalt des arteriellen Blutes ( $\text{CaO}_2$ )

Chemisch gebunden wird der Sauerstoff am Hämoglobin. Jedes Hämoglobinmolekül ist in der Lage vier Sauerstoffmoleküle zu binden. Dies stellt unter normobaren Bedingungen den Haupttransportmechanismus des Sauerstoffes im Blut dar. Die Bindungskapazität lässt sich mithilfe der Hüfner-Zahl berechnen. Die Hüfner-Zahl besagt, dass pro Gramm Hämoglobin, jeweils 1,34 ml Sauerstoff gebunden werden können. Sowohl für die Oxygenierung in der Lunge, als auch für die Gewebsoxygenierung, ist der kooperative Effekt des Hämoglobinmoleküls von Relevanz. Anhand der Sauerstoffbindungskurve des Hämoglobins kann man dem vorhandenen Sauerstoffpartialdruck eine entsprechende Sauerstoffsättigung zuordnen. Dies bedeutet, dass in Organen in denen ein hoher Sauerstoffpartialdruck vorliegt, eine verbesserte Sauerstoffaufnahme erfolgen kann. In Geweben, in denen ein erniedrigter Sauerstoffpartialdruck herrscht - kapillare Endstromgebiete - findet dagegen eine erleichterte Sauerstoffabgabe statt [10] (vgl. Abb.7).

$$\text{Chemisch gelöst: } \text{CaO}_2 \left( \frac{\text{ml}}{\text{dl}} \right) = (\text{Hb}) \left( \frac{\text{g}}{\text{dl}} \right) \times 1,34 \left( \frac{\text{ml}}{\text{g}} \right) \times \text{SpO}_2$$

Abb. 7: Sauerstoffgehalt (chemisch-gebunden), Hüfner-Zahl: 1,34 ml/g Hb [10]

Dieser Effekt ist von mehreren physiologischen Parametern abhängig: So führt z.B. eine Azidose ( $\text{pH} < 7,35$ ) zu einer verbesserten Sauerstoffabgabe, während eine Alkalose ( $\text{pH} > 7,45$ ) den gegenteiligen Effekt ausübt. Man spricht hier auch von einer Links- respektive Rechtsverschiebung der Sauerstoffbindungskurve [10]. Mithilfe des Halbsättigungsdruckes ( $\text{pO}_250$ ) lässt sich die Lage der Kurve auf der x-Achse ablesen. Unter dem  $\text{pO}_250$  versteht man den Sauerstoffpartialdruck, bei dem 50 % des Hämoglobins gesättigt sind. Dieser liegt normalerweise bei 27 mmHg. Man kann hieran eine Links- oder Rechtsverschiebung der Sauerstoffbindungskurve diagnostizieren [10] (vgl. Abb. 8).

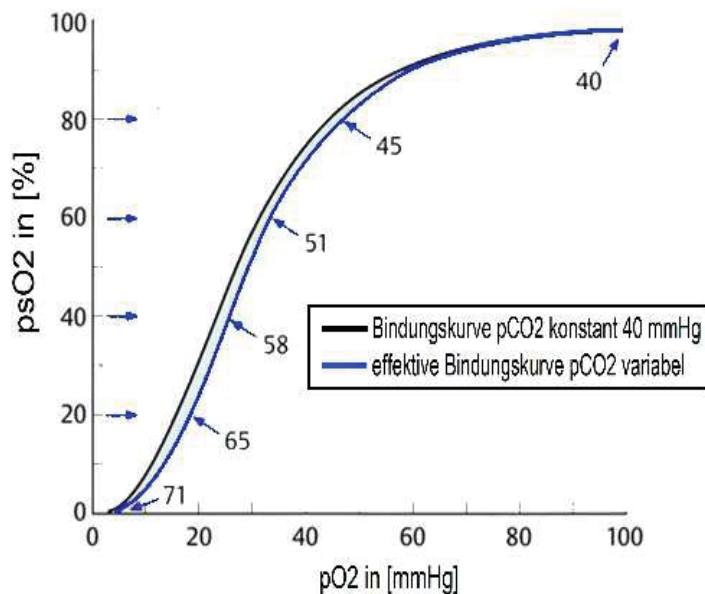


Abb. 8: Sauerstoffbindungskurve des Hämoglobins mit Halbsättigungsdruck [46]

Der physikalisch gelöste Sauerstoff nimmt unter normobaren Bedingungen einen geringen Stellenwert ein. In Abhängigkeit von Körpertemperatur und Sauerstoffpartialdruck lösen sich bei Normothermie (37°C) pro mmHg Sauerstoffpartialdruck 0,024 ml/dl Blut [10] (vgl. Abb. 9).

$$\text{Physikalisch gelöst: } O_2 \left( \frac{\text{ml}}{\text{dl}} \right) = \frac{0,024 \frac{\text{ml}}{\text{mmHg}}}{\text{dl}} \times paO_2 (\text{mmHg})$$

Abb. 9: Sauerstoffgehalt (physikalisch-gelöst) bei Normothermie und normobaren Bedingungen [10]

Die Alveolargasgleichung besagt, dass von der Umgebungsluft, welche im Nasopharynx angefeuchtet wird, der Wasserdampfdruck subtrahiert wird. Dieser beträgt 53 mbar (47 mmHg). Die Differenz wird mit der aktuellen inspiratorischen Sauerstoffkonzentration ( $FiO_2$ ) multipliziert. Gemäß dem Gesetz von Dalton muss von dem Produkt noch, der aktuell vorherrschende alveoläre Kohlendioxidpartialdruck ( $pCO_2$ ) subtrahiert werden. Hieraus ergibt sich ein alveolärer Sauerstoffpartialdruck ( $paO_2$ ) von ca. 110 mmHg. Bei lungengesunden Menschen liegt der arterielle Sauerstoffpartialdruck ( $paO_2$ ) bei ca. 100 mmHg. Mit zunehmendem Lebensalter, nimmt der  $paO_2$  ab. Den zu erwartenden Wert kann man mit der Formel nach Murray schätzen [47] (vgl. Abb. 10).

$$\text{Formel nach Murray: } paO_2 = 100,1 - (0,323 \times \text{Lebensalter [Jahren]})$$

Abb. 10: Formel nach Murray zum Abschätzen des alterskorrigierten  $paO_2$

Diese Gegebenheiten zeigen, dass unter normobaren Bedingungen unter Raumluft eine  $\text{CaO}_2$  von ca. 22 ml/dl erreicht wird. Bei einer  $\text{FiO}_2$  von 1,0 beträgt die  $\text{CaO}_2$  bereits ca. 36 ml/dl und unter hyperbaren Bedingungen mit einem Gesamtumgebungsdruck von 2,8 bar ca. 68 ml/dl. Mit einer dreifach-erhöhten  $\text{CaO}_2$  kann eine erythrozytenunabhängige Gewebsoxygenierung erreicht werden, was Boerema bereits belegen konnte (vgl. Abb. 11).

$$\begin{aligned} \text{CaO}_2 \left( \frac{\text{ml}}{\text{dl}} \right) &= (\text{Hb}) \left( \frac{\text{g}}{\text{dl}} \right) \times 1,34 \left( \frac{\text{ml}}{\text{g}} \right) \times \text{SpO}_2 (\%) + \frac{0,024 \frac{\text{ml}}{\text{mmHg}}}{\text{dl}} \times \\ &\text{paO}_2 (\text{mmHg}) \\ 22 \left( \frac{\text{ml}}{\text{dl}} \right) &\approx 15 \left( \frac{\text{g}}{\text{dl}} \right) \times 1,34 \left( \frac{\text{ml}}{\text{g}} \right) \times 97 (\%) + \frac{0,024 \frac{\text{ml}}{\text{mmHg}}}{\text{dl}} \times 100 \\ \textbf{(p = 1 bar)} \\ 68 \left( \frac{\text{ml}}{\text{dl}} \right) &\approx 15 \left( \frac{\text{g}}{\text{dl}} \right) \times 1,34 \left( \frac{\text{ml}}{\text{g}} \right) \times 97 (\%) + \frac{0,024 \frac{\text{ml}}{\text{mmHg}}}{\text{dl}} \times 2000 \\ \textbf{(p = 2,8 bar)} \end{aligned}$$

**Abb. 11: Gesamtsauerstoffgehalt ( $\text{CaO}_2$ ) des Blutes unter normobaren (p = 1 bar) und hyperbaren Bedingungen (p = 2,8 bar) mit einer  $\text{FiO}_2 = 1,0$ ; Hüfner-Zahl: 1,34ml; Hämoglobinsättigung ( $\text{SpO}_2$ ); arterieller Sauerstoffpartialdruck ( $\text{paO}_2$ ); Löslichkeitskoeffizient des Sauerstoffes im Blut: 0,024 ml / mmHg;**

Es wird jedoch auch deutlich, dass die bei der Patientenüberwachung standardmäßig eingesetzte, Pulsoxymetrie, als Oxygenierungsparameter unter HBO-Therapie nicht aussagekräftig ist. Hier wird lediglich der Anteil des gesättigten Hämoglobins gemessen und der physikalisch gelöste Sauerstoff nicht erfasst. Als Alternative bietet sich hier eine kontinuierliche transkutane Sauerstoffpartialdrucküberwachung ( $\text{tcpO}_2$ ) an [48]. Bei diesem Messverfahren wird eine Elektrode auf die Haut des Patienten gebracht. Diese beinhaltet eine Heizspirale, eine Anode und Kathode zwischen denen eine Spannung angelegt wird. Durch eine Sauerstoffpermeable Membran kann nun Sauerstoff in die Messzelle diffundieren. Die Elektrode wird auf eine Temperatur zwischen 43-45° C erwärmt, da bei dieser Temperatur die ermittelten  $\text{tcpO}_2$ -Werte am ehesten mit den arteriellen Sauerstoffpartialdrücken korrelieren. Es gibt jedoch einige Störeinflüsse auf dieses Messverfahren, wie z.B. eine schlechte periphere Durchblutung (Katecholamintherapie), oder Hautveränderungen, wie z.B. eine verdickte Epidermis, oder entzündliche Prozesse im Messbereich [49] (vgl. Abb. 12).

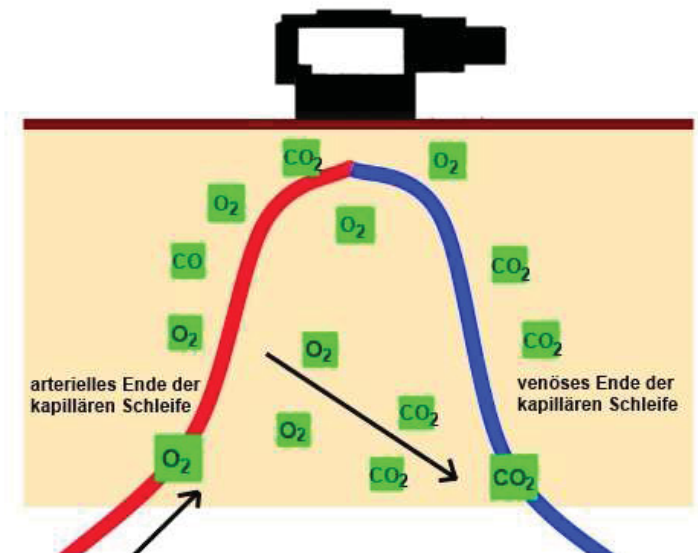


Abb. 12: Schematische Darstellung der tcPO<sub>2</sub> [Modifiziert nach Textbook of tcpO<sub>2</sub> Fa. Radiometer]

#### 1.5.4 Risiken und Nebenwirkungen der HBO

Die hohen Umgebungsdrücke, die Kompressions-, Isopressions- und Dekompressionsphasen, sowie die hohen Sauerstoffpartialdrücke, bergen das Risiko für eine Reihe unerwünschter Wirkungen.

Analog zur Beschreibung des Tauchganges, kann es bei der Anwendung dieser Therapieform zu Komplikationen kommen, die denen des Tauchgangs entsprechen. In der Kompressionsphase sind vor allen Dingen die pneumatisierten Knochen gefährdet als auch das Tympanum, welches bei fehlendem Druckausgleich perforieren kann. In der Isopressionsphase besteht die Gefahr einen Tiefenrausch zu erleiden. Hierbei kommt es, wie bereits beschrieben, zu einer Inertgasnarkose durch den in der Druckluft enthaltenen Stickstoff, der mit steigendem Umgebungsdruck vermehrt gelöst wird und ins zentrale Nervensystem diffundiert [19]. Die Dekompressionsphase birgt das Risiko einer DCS oder AGE. Im Unterschied zum Tauchunfall besteht bei der hyperbaren Sauerstofftherapie die Gefahr für den Patienten und das medizinische Personal, welches den Patienten während der Therapie betreut. Allerdings sind die Gefahren für das medizinische Personal bei Einhaltung der allgemeinen Verfahrensanweisungen zu vernachlässigen. Die Brandgefahr ist allerdings jederzeit bei der Anwendung von hyperbarem Sauerstoff gegeben und sollte beachtet werden [40, 42].

Wie oben beschrieben kann bei einer Therapieanwendung nach dem US-Navy-Treatment-Table (USNTT), der Sauerstoffpartialdruck deutlich über dem physiologischen Normalen liegen. Smith und Mohideen wiesen bei Ratten nach einer Exposition von normobaren Sauerstoff (FiO<sub>2</sub>: 1,0) über eine Stunde eine erhöhte

Sauerstoffradikalproduktion in alveolaren Makrophagen nach [50]. Ein hoher  $p\text{AO}_2$  kann über die Bildung von Sauerstoffradikalen zu einer Schädigung der Alveolarmembranen führen, die dann im Rahmen eines Acute respiratory distress syndrome (ARDS) im Verlauf zu massiven Störungen der Oxygenierung mit konsekutivem Atemnotsyndrom führen kann [50-51].

### **1.5.5 Indikationen**

Es gibt eine Reihe von unterschiedlichsten Erkrankungen, bei denen eine HBO indiziert ist. Laut der internationalen Fachgesellschaft Undersea and Hyperbaric Medical Society (UHMS) werden seit 1999 als Indikationen zur HBO die Kohlenmonoxidintoxikation, Clostridiale Myonekrose („Gasbrand“) und andere nekrotisierende Weichteilinfektionen, ausgedehnte Weichteilschäden (z.B. nach durchgemachtem Kompartmentsyndrom), sowie „chronische Ulcera und Wundheilungsstörungen“, die klassische Dekompressionserkrankung (DCS) und Luft- und Gasembolien, sowie intrakranielle Abszesse, Osteomyelitis, (Osteo-) Radionekrosen, Verbrennungen, sowie außergewöhnlich hoher Blutverlust bei kritischer Abwägung zur Bluttransfusion, allgemein anerkannt [52]. Allerdings gibt es für viele Indikationen nur sehr geringe Evidenz, da die Daten zum Teil nur auf Fallserien beruhen. Je nach Indikation wird ein spezifisches HBO-Therapieschema empfohlen, wie z.B. für die CO- Intoxikation das USNTT-5a.

## **1.6 Hyperbare Sauerstofftherapie bei Dekompressionserkrankung**

Zur Inzidenz von Tauchunfällen gibt es in der Literatur keine genauen Angaben. Zahlen aus dem Jahre 1996 gehen von 1-2 Zwischenfällen pro 10.000 Tauchgänge aus. Neuere Daten von Vann et al. aus dem Jahre 2011 decken sich im Prinzip mit denen aus 1996. Vann gibt für Sporttaucher eine Inzidenz von 1 Tauchunfall pro 10.000 Tauchgängen und für Berufstaucher von 9,5 pro 10.000 Tauchgängen an [31]. Für den Bereich der Bundesrepublik Deutschland gab Plafki [4] eine Häufigkeit von ca. 500 Tauchunfällen pro Jahr an [4]. Diese Zahlen decken sich immer noch mit denen aus dem Jahr 1997 [19, 31, 53-54]. Allerdings bestehen keine evidenzbasierten Daten, da die erhobenen Statistiken aufgrund methodischer Unterschiede schwer vergleichbar sind [21].

### **1.6.1 Definition**

Ein Tauchunfall ist in der aktuellen Leitlinie Tauchunfall (2014) folgendermaßen definiert:

„Zwischenfälle beim Tauchen können unterschiedliche Ursachen haben, die nicht notwendigerweise mit der hyperbaren Exposition in Verbindung stehen müssen. Grundsätzlich sollte jedoch zunächst von einem Tauchunfall ausgegangen werden. Ein „Tauchunfall“ im Sinne dieser Leitlinie ist ein potentiell lebensbedrohliches oder gesundheitsschädigendes Ereignis, hervorgerufen durch Abfall des Umgebungsdruckes beim Tauchen oder sonstiger hyperbarer Atmosphäre mit und ohne Tauchgerät in der sogenannten Dekompressionsphase“ [21].

### **1.6.2 Leitlinienkonforme symptomatische Therapie der DCS**

Die aktuelle `Leitlinie Tauchunfall` empfiehlt bei einem Tauchunfall mit Herz-Kreislaufstillstand die Therapie gemäß den European Resuscitation Council (ERC) Leitlinien in Ihrer jeweils gültigen Fassung. D.h., die Durchführung der kardiopulmonalen Reanimation (CPR) [21]. Die weitere Versorgung richtet sich in der Leitlinie nach Schwere der Symptomatik, also nicht nach der Einteilung, wie sie in dieser Arbeit vorgenommen wurde.

Unter milden Symptomen versteht man in der Leitlinie, auffällige Müdigkeit und Pruritus der Haut („Taucherflöhe“). Die Akutmaßnahmen werden bei dieser Symptomatik von Laienhelfern und professionellen Helfern gleichwertig durchgeführt [21]. Nach der in dieser Arbeit verwendeten Einteilung würde diese Symptomatik der DCS Typ I entsprechen. Es wird eine 100% Sauerstoffinsufflation (möglichst  $FiO_2$ : 1,0), orale Flüssigkeitsgabe, Schutz vor Auskühlung, kontinuierliche Kontrolle von Bewusstsein, Atmung und Puls empfohlen. Bei Fortbestehen der Symptomatik wird wie bei schweren Symptomen vorgegangen [21].

Unter schweren Symptomen werden in der Leitlinie Hautflecken, Schmerzen, Dysästhesien, Lähmungen, Atembeschwerden oder neurologische Symptome zusammengefasst. Diese Konstellation würde weitestgehend einer DCS Typ II entsprechen [21]. Hier unterscheidet die Leitlinie zwischen der Akutversorgung durch medizinische Laien und medizinisches Fachpersonal, wobei sich die Erstversorgung durch Laien nicht von der bei milden Symptomen unterscheidet [21]. Für Fachpersonal wird - zusätzlich zu den Akutmaßnahmen bei milder Symptomatik - eine intravenöse Flüssigkeitszufuhr von Vollelektrolytlösungen (0,5 bis 1 l intravenös in der ersten Stunde), ggf. die Atemwegsicherung, Anlage von Thoraxdrainagen bei Verdacht auf pulmonales Barotrauma mit Pneumothorax und Transportplanung in ein Druckkammerzentrum zur kausalen Therapie empfohlen [21]. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, keine sog. „nasse Rekompensation“ durchzuführen (d.h., den

Patienten erneut unter Wasser rekomprimieren), da hier die Bedingungen nicht kontrollierbar sind [19, 21, 31, 55].

Hingegen besteht die kausale Therapie der DCS in der HBO, der der Patient schnellstmöglich zugeführt werden sollte [21].

### **1.6.3 Wirkweise**

Die wesentliche Wirkweise der HBO bei der DCS lässt sich durch die erhöhten Sauerstoffpartialdrücke erklären. Durch den therapeutischen Überdruck wird der Sauerstoffpartialdruck durch physikalische Lösung im Blut erhöht und hierdurch die Gewebsoxygenierung verbessert. Gleichzeitig werden die ausgefallenen Stickstoffbläschen wieder in Lösung gebracht [23, 56]. Durch den „*Oxygen-Window-Effekt*“ diffundiert, aufgrund des hohen Sauerstoffpartialdruckes, der Sauerstoff in die Zellen und der Stickstoff konsekutiv aus den Zellen heraus. Dies führt einerseits zur Verminderung der Stickstoffbläschen in den Zellen, zum Anderen wird durch den hohen Sauerstoffgehalt die Oxygenierung der hypoxischen Gewebe verbessert. Je höher der applizierte Sauerstoffpartialdruck, desto höher ist dieser Effekt [23].

Ein anti-ödematöser Effekt der hyperbaren Sauerstofftherapie wird durch die Vasokonstriktion der präkapillären Arteriolen, infolge des hohen Sauerstoffpartialdruckes erreicht [41].

Durch HBO vor einem Tauchgang konnte experimentell durch Studien nachgewiesen werden, dass die Inzidenz und Schwere einer DCI sinkt [23]. Katsenelson et al. untersuchten hierzu 2009 74 Ratten, die in drei Gruppen unterteilt wurden. Eine Gruppe erhielt vor einem simulierten Tauchgang eine HBO, eine zweite Gruppe erhielt keine HBO vor dem simulierten Tauchgang und eine dritte diente als Kontrollgruppe. Die DCI wurde mittels Somato-sensorisch-evozierter-Potenziale (SSEP) gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass die hyperbare Präkonditionierung mit Sauerstoff zu einer signifikanten Reduktion pathologischer SSEPs führte [57]. Allerdings bleibt dies aufgrund der unklaren Nebenwirkungen vorerst auf Tiermodelle beschränkt [23].

Je früher nach Eintritt einer DCS die HBO eingeleitet wird, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer Größenreduktion der Inertgasblasen in den Geweben kommt [41]. Allerdings lassen sich auch bei einem späteren Behandlungsbeginn positive Wirkungen nachweisen [41, 58]. Konsekutiv kommt es nach erhöhter Gewebsoxygenierung zur Ödemreduktion durch arterielle Vasokonstriktion [41].

#### 1.6.4 Leitlinienkonforme kausale Therapie der DCS mit HBO

Gemäß den Leitlinien der GTÜM (Fassung 2014) ist nach der symptomatischen Erstbehandlung der Patient schnellstmöglich einer Druckkammertherapie zu unterziehen. Dies ist unabhängig vom verwendeten Atemgas (Druckluft, Heliox) [21].

##### 1.6.4.1 USNTT-6

Es wird empfohlen, die erste Druckkammerbehandlung gemäß der „USNTT-6“ oder deren Modifikationen durchzuführen. Bei diesem Schema wird ein Überdruck von 1,8 bar (Umgebungsdruck = 2,8 bar) erzeugt [21, 28]. Der therapeutische Behandlungsdruck wird für 95 Minuten gehalten. Die reine Sauerstoffapplikation ( $\text{FiO}_2$ : 1,0) wird ab Erreichen des Zielbehandlungsdruckes (1,8 bar) begonnen. Intermittierend wird nach diesem Schema nach ca. 20-30 Minuten reiner Sauerstoffapplikation eine Sauerstoffpause von ca. 10-15 Minuten mit Druckluft ( $\text{FiO}_2$ : 0,21) eingelegt. 95 Minuten nach Therapiebeginn, wird evaluiert, ob das Schema weiter fortgeführt wird. In diesem Falle wird der Behandlungsdruck auf 0,9 bar reduziert und der o.g. Wechsel zwischen reiner Sauerstoff- und Druckluftapplikation wird unter kontinuierlicher Reevaluation des Patienten fortgesetzt. Insgesamt kann das USNTT-6 über bis zu 315 Minuten angewendet werden [21] (vgl. Abb. 13).

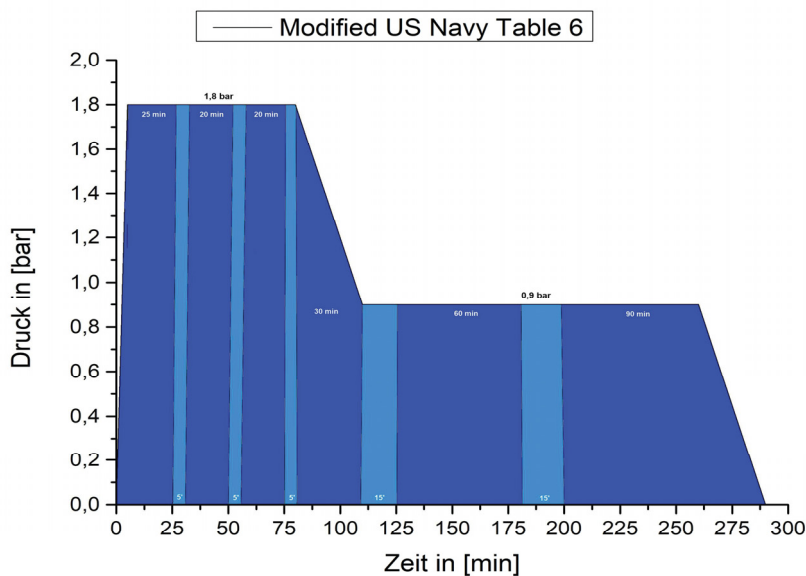


Abb. 13: USNTT-6, dunkelblau: Phase mit einer  $\text{FiO}_2$ : 1,0; hellblau: Phase mit einer  $\text{FiO}_2$ : 0,21 [28]

Es müssen während der Behandlung, regelmäßige neurologische Kontrolluntersuchungen durchgeführt werden, wie der „5-Minuten-Neurocheck“, der in der aktuellen Leitlinie Tauchunfall empfohlen wird. Dieser überprüft grob orientierend sensorische und motorische Leistungen der Hirnnerven, die grobe Muskelkraft,

Sensibilität und Gleichgewicht und Koordination. Bei beatmeten Patienten ist dieser auf die Pupillomotorik beschränkt. Die Auskultation der Lungen sollte intermittierend durchgeführt werden und regelmäßige Kontrolle der mit Luft gefüllten Materialien am Patienten (Tubus, Infusion, etc.) kontrolliert werden [21].

Persistieren nach der ersten Druckkammerbehandlung weiterhin Symptome, so wird die Durchführung weiterer hyperbarer Sauerstoffbehandlungen, nach dem oben genannten Therapieschema, empfohlen. Ergänzend sind frühestmögliche physiotherapeutische Maßnahmen anzustreben [21].

Wird nach mehreren Behandlungen Symptombefreiung erreicht, sind weitere 1-2 Therapien sinnvoll [21]. Bei Symptompersistenz für mehr als 3-5 Tage unter Therapie, ist die HBO abubrechen, da sich hier das Nutzen-Risiko-Verhältnis verschiebt [21]. Mit der physiotherapeutischen Behandlung sollte fortgefahren werden [21]. Zusätzlich sollte der Patient nach modernen intensivmedizinischen Aspekten auch außerhalb der HBO behandelt und überwacht werden [21, 59].

Wenngleich die Leitlinien der GTÜM zur Therapie der DCS (Fassung 2014) das USNTT-6 empfehlen, können auch abweichende Therapieschemata verwendet werden. Wenn beispielsweise nach unzureichender Dekompression ohne Symptomatik eine Indikation für eine HBO gesehen wird [21]. Modifizierte Therapieschemata werden in den Leitlinien nicht grundsätzlich abgelehnt, jedoch wird darauf verwiesen, dass diese nur in speziellen Zentren angewendet werden sollen, die über die personellen und materiellen Ressourcen verfügen und die auch mit unerwünschten Ereignissen und Ergebnissen umgehen können [21].

#### 1.6.4.2 USNTT-5(a)

Das in den Leitlinien empfohlenen Therapieschemata USNTT-5(a), dessen Modifikationen Grundlage dieser Arbeit ist, sieht einen maximalen Behandlungsdruck von 1,8 bar (Umgebungsdruck = 2,8 bar) vor. Bis zum Erreichen des Behandlungsdruckes, wird reiner Sauerstoff ( $\text{FiO}_2$ : 1,0) appliziert. Der Behandlungsdruck von 1,8 bar wird über einen Zeitraum von insgesamt 45 Minuten erhalten. Während dieser Plateauphase wird nach 20 Minuten eine sog. Druckluftpause ( $\text{FiO}_2$ : 0,21) von 5 Minuten durchgeführt. Im Zeitraum von 30 Minuten wird der Behandlungsdruck zunächst halbiert (0,9 bar) und unmittelbar, nach Erreichen des Zieldruckes, erneut eine Druckluftpause von 5 Minuten eingelegt. Nach weiteren 20 Minuten Plateauphase auf dem Behandlungsdruck von 0,9 bar wird erneut für 5 Minuten eine Druckluftpause eingelegt. Innerhalb von 30 Minuten wird der Überdruck

der Behandlung wieder auf Umgebungsdruck auf Meeresniveau erreicht. Es wird bis 5 Minuten vor Beendigung der Therapieeinheit eine reine Sauerstoffapplikation durchführt. Die letzten 5 Minuten werden wieder nur Druckluft appliziert. Die Gesamttherapiedauer dieses Schemas beträgt somit 135 Minuten. Diese kann ggf. bei Bedarf und je nach Patienten Zustand auch verlängert werden. Es existieren viele Modifikationen dieses Therapieschemas in der Literatur [28] (vgl. Abb. 14).

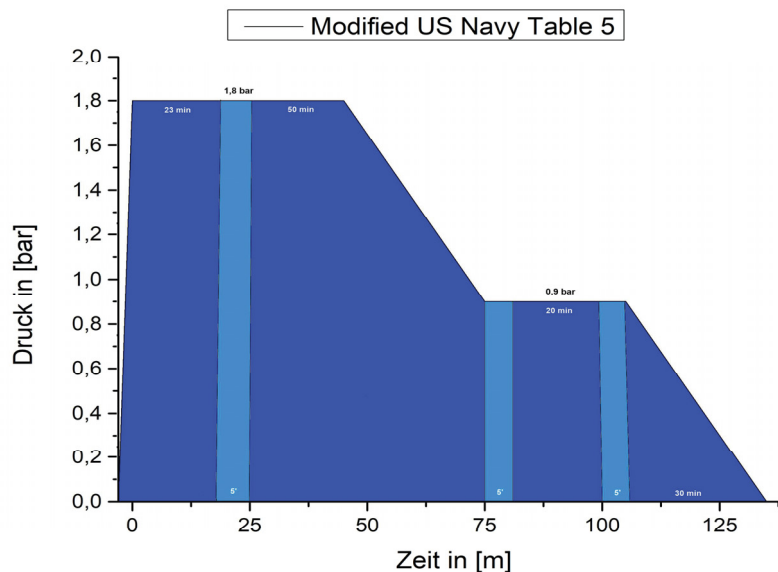


Abb. 14: USNTT-5(a), dunkelblau: Phase mit einer  $\text{FiO}_2$ : 1,0; hellblau: Phase mit einer  $\text{FiO}_2$ : 0,21 [28]

## 1.7 Fragestellung

In der hyperbaren Sauerstoffbehandlung der Klinik für Unfall- und Handchirurgie des Universitätsklinikum Düsseldorf (UKD) wurde in der Zeit von Mai 2001 bis September 2010 zur Behandlung der DCS eine hinsichtlich des Therapiedruckes modifizierte Variante der USNTT-5(a) verwendet. Mittels des modifizierten Therapieschemas können höhere Sauerstoffpartialdrücke ermöglicht werden und hierdurch eine Beschleunigung der Auflösung der DCS bedingten Stickstoffausfällungen erreicht werden. In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob durch ein optimiertes Monitoring mit regelmäßigem neurologischem Screening auch unter der modifizierten Therapievariante gefürchtete Komplikationen zu vermeiden sind. Darüber hinaus, sollen im Rahmen dieser Arbeit Wirksamkeit und Nebenwirkungen des benannten und verwendeten, modifizierten Therapieschemas untersucht werden.

## **2. Material und Methoden**

### **2.1 HBO-Therapieschema**

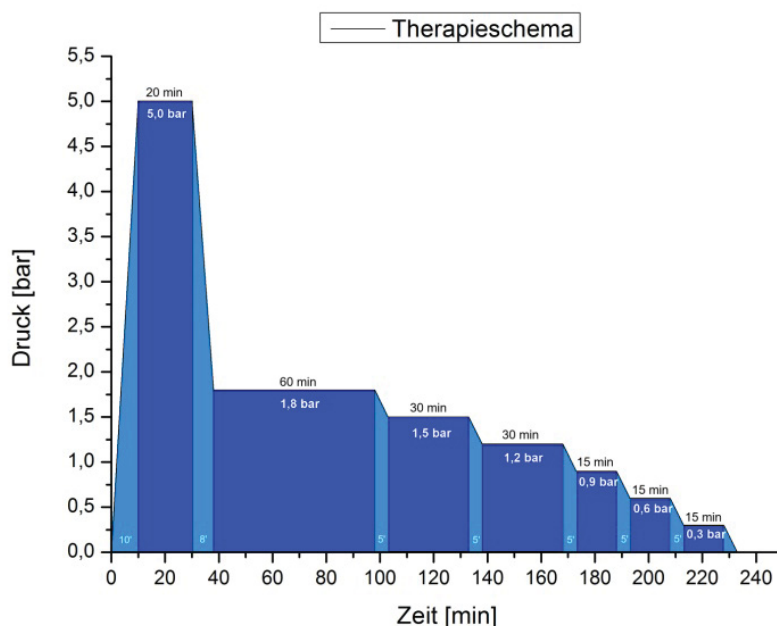
Am Universitätsklinikum Düsseldorf wurde in den Jahren 2001 bis 2010 zur Behandlung der DCS ein modifiziertes Therapieschema verwendet. Grundlage des USNTT-5(a)-SCMOD1C ist das Therapieschema USNTT-5(a).

#### **2.1.1 USNTT-5(a)-SCMOD1C (verwendetes Therapieschema)**

Während der gesamten Therapieeinheit wird der Patient kontinuierlich überwacht. Dies beinhaltet neben dem Standardmonitoring mittels EKG (4-Pol), oszillometrischer RR-Kontrolle und Messung der Sauerstoffsättigung, zusätzlich eine tcpO<sub>2</sub>. Der für dieses Therapieschema festgelegte Grenzwert für den transkutan ermittelten Sauerstoffpartialdruck betrug 1.800 mmHg. Er orientierte sich an transkutan gemessenen Werten, die beispielsweise beim Problemwundenschema zu einer deutlichen Reduzierung der Letalität führten [60]. Die tcpO<sub>2</sub>-Werte wurden durchgehend bettseitig gemessen und es gab keine dokumentierten Überschreitungen des Wertes, die zu einem Therapieabbruch führten.

Im verwendeten Schema wird die Rekompensation mit einem maximalen Behandlungsdruck von 5 bar (Gesamtdruck = 6 bar) durchgeführt, welcher nach 10 Minuten erreicht wird. Während der Kompressionsphase erhält der Patient zunächst Druckluft (FiO<sub>2</sub>: 0,21). Zwischen einem Therapiedruck von 1,8-3,5 bar wird dem Patienten reiner Sauerstoff (FiO<sub>2</sub>: 1,0) appliziert und, sofern keine klinischen Zeichen einer Sauerstoffintoxikation auftreten und der oben genannte Grenzwert für den transkutan gemessenen Sauerstoffpartialdruck nicht erreicht wird. Zwischen den Behandlungsdrücken 3,5-5 bar und der sich anschließenden Plateauphase von 20-30 Minuten erhält der Patient Druckluft. An die Plateauphase (Behandlungsdruck 5 bar) schließt sich eine Dekompressionsphase auf 1,8 bar Behandlungsdruck an, welche nach 8 Minuten erreicht wird. Ab einem Behandlungsdruck von 3,5 bar, sofern der klinische Zustand und der oben genannte Grenzwert für den transkutan gemessenen Sauerstoffpartialdruck es erlauben, wird erneut reiner Sauerstoff appliziert. Nach Erreichen des Behandlungsdruckes von 1,8 bar wird wiederum eine Plateauphase von 60-90 Minuten eingehalten. Nach Beendigung des Plateaus, wird innerhalb von 5 Minuten erneut der Behandlungsdruck reduziert. Die nächste Plateauphase wird bei einem Behandlungsdruck von 1,5 bar für 30 Minuten beibehalten. Die Dekompression wird innerhalb von 5 Minuten weiter auf einen Behandlungsdruck von 1,2 bar reduziert.

Auch dieses Plateau wird für 30 Minuten beibehalten. Die sukzessive Reduzierung des Behandlungsdruckes um 0,3 bar, mit einer Plateauphase von 15 Minuten wird bis zum Erreichen des Umgebungsdruckes auf Meeresspiegelniveau durchgeführt. Sofern der Zustand des Patienten und die tcpO<sub>2</sub> Werte dies nicht notwendig machen, werden ab dem Behandlungsdruck von 3,5 bar keinerlei Unterbrechungen der Atmung reinen Sauerstoffes durchgeführt. Die Gesamttherapiedauer des Behandlungsschemas beträgt somit ca. 233 Minuten. Es ist allerdings hierbei zu beachten, dass die Behandlungszeiten der Plateauphasen bei 5 bar (20-30 Minuten) und 1,8 bar (60-90 Minuten), flexibel angewendet werden können. Ein Vorteil dieser Flexibilität im Behandlungsschema ist die Möglichkeit zur individuellen und patientenorientierten Therapie. Bei auftretenden Komplikationen können sowohl der Behandlungsdruck, als auch die Sauerstoffapplikation verändert werden, ohne dabei die eigentliche Therapieeinheit abbrechen zu müssen (vgl. Abb. 15).



**Abb. 15: USNTT-5(a) SCMOD (verwendetes Therapieschema: hellblau sind die Druckluftphasen; dunkelblau sind die Phasen an den reinen Sauerstoff [FiO<sub>2</sub>:1,0] appliziert wird. Die erste Plateauphase (5,0 bar) kann auf 30 Minuten verlängert werden. Die zweite Plateauphase (1,8 bar) kann auf bis zu 90 Minuten verlängert werden.**

Dieses Therapieschema ist auf die schnellstmögliche Auswaschung von Inertgasen aus den Geweben ausgelegt (*Oxygen-Window-Effect*). Die Applikation von reinem Sauerstoff während der gesamten Dekompressionsphasen, dient der Verhinderung einer erneuten Aufsättigung mit Inertgasen und fördert deren kontinuierliche Auswaschung bis zum Erreichen des Umgebungsdruckes.

Zusammenfassend lässt sich, der deutlich höhere Behandlungsmaximaldruck (5 bar), sowie das Auslassen der festgelegten Druckluftpausen (vgl. USNTT-5a), als wesentliche Modifikationen im Vergleich zum klassischen USNTT-5(a) beschreiben.

## **2.2 Patienten**

Im Zeitraum von Mai 2001 bis September 2010 wurden im Universitätsklinikum 64 Patienten (m = 42; w = 22), mit einer DCS aufgenommen. Einer HBO wurden 63 Patienten (m = 41; w = 22) unterzogen und 62 in die vorliegende Studie eingeschlossen. Bei den beiden Patienten, die nicht in diese Arbeit eingeschlossen wurden handelte es sich in einem Fall um eine iatrogene Luftembolie bei Katheteranlage und im anderen Fall hatte der Patient einen hochsuspekten Lungenbefund. An die eingeschlossenen Patienten wurden zwei Fragebögen versendet und einmalig der Versuch einer telefonischen Kontaktaufnahme unternommen. Von allen eingeschlossenen Patienten konnten von 27 (43,6%) (m = 14; w = 13) eine vollständige Datengewinnung erfolgen.

## **2.3 Aufbereitung der Patientendaten**

### **2.3.1 Patientenakten**

Zur Erhebung der Tauchanamnese, der medizinischen Anamnese, der körperlichen Symptome und der Untersuchungsbefunde, wurden die Patientenakten ausgewertet. Die für diese Arbeit relevanten Angaben der Patienten und deren Befunde wurden aufgearbeitet.

### **2.3.2 Fragebogen**

Zur Komplettierung der Tauchanamnese und Objektivierung des allgemeinen Gesundheitszustandes wurde jeweils ein Fragebogen erstellt.

Der erste Fragebogen diente der Komplettierung der Tauchanamnese. Bei dem zweiten Fragebogen handelte es sich um den „SF-12 zur Feststellung des allgemeinen Gesundheitszustandes“ [61]. Bei diesem handelte es sich um eine Kurzversion des „SF-36 zur Feststellung des allgemeinen Gesundheitszustandes“, der bereits 1998 vom Robert-Koch-Institut als Instrument der Lebensqualität in den Bundesgesundheitssurvey aufgenommen wurde [61]. Der „SF-12“ stellt eine reduzierte Version dar und enthält im Gegensatz zu den 36 *Items* des „SF-36“ lediglich 12 *Items*. Die einzelnen *Items* des Fragebogens sind so gewählt, dass man Auskunft über das allgemeine Wohlbefinden, das körperliche Wohlbefinden als auch das seelische Wohlbefinden erhält. Es wird ebenfalls der Einfluss von bestehenden Schmerzen auf den Alltag untersucht [62].

## **2.4 Durchführung**

Die vorliegende retrospektive Studie wurde von der Ethikkommission der Universität Düsseldorf genehmigt (Studennummer: 3704) und die beteiligten Patienten haben in die Verwendung Ihrer Angaben eingewilligt. Alle Daten wurden nach vollständiger Erfassung pseudonymisiert verwendet.

Die Fragebögen wurden auf dem Postweg versendet. Redundant hierzu wurde nach einer Latenzzeit von 2 Wochen eine einmalige telefonische Kontaktaufnahme durchgeführt, bei der den Patienten eine Möglichkeit zur Assistenz bei der Bearbeitung des Fragebogens angeboten wurde.

### **2.4.1 Demographische Daten**

Zunächst wurden demographische Daten erhoben. Hierzu zählten Alter des Patienten bei Eintritt des Tauchunfalls, sowie das Geschlecht.

### **2.4.2 Tauchanamnese**

Zur Erhebung der Tauchanamnese wurden die notwendigen Daten aus den Akten entnommen und durch die Auswertung der Fragebögen ergänzt oder ggf. berichtigt.

Relevante Parameter zur Tauchanamnese waren: Datum des Tauchunfalles, die maximale Tauchtiefe am Unfalltag, die Gesamttauchdauer des auslösenden Tauchganges, das verwendete Atemgas und Besonderheiten beim Tauchgang, wie z.B. Notaufstieg.

Weiterhin wurde die Gesamtanzahl der Tauchgänge bis zum Unfallzeitpunkt, Taucherfahrung in Jahren, sowie Freizeit oder Berufsprofession evaluiert. Auch nach einer anamnestischen DCS in der Berufs- / Sporthistorie der Patienten wurde erfasst. Mit Hilfe des Fragebogens, konnten die Daten bezüglich einer Tauchtauglichkeitsuntersuchung vor dem Ereignistag und der Ausbildungsstand, ergänzt werden. Hier wurde angenommen, dass ein hoher Ausbildungsstand oder eine hohe Anzahl an Tauchgängen für eine große Taucherfahrung steht. Ebenfalls wurde der Zeitpunkt der Wiederaufnahme des Tauchens erfragt.

### **2.4.3 Medizinische Anamnese**

Die Erhebung der medizinischen Anamnese erfolgte durch Auswertung der Patientenakten. Die wesentlichen für die Auswertung relevanten Informationen waren der Zeitpunkt des Symptomeintrittes, die vorherrschende Symptomatik am Ereignisort und Änderung der Symptomatik bis zur Einleitung der HBO. Weitere relevante

Informationen beziehen sich auf die Erstversorgung am Ereignisort und die Therapie vor Beginn der HBO.

#### **2.4.4 Therapie und Verlauf**

Für den Therapielauf wurde der Zeitpunkt der Therapie, insbesondere in Hinblick auf die Latenzzeit zwischen Unfalleintritt und kausaler Therapie erhoben. Darüber hinaus wurden die Anzahl der Therapieeinheiten mit HBO, Nebenwirkungen unter HBO, Dauer einer Arbeitsunfähigkeit, Residuen nach Therapieabschluss und die notwendige Weiterbehandlung nach Beendigung der hyperbaren Sauerstofftherapie erfasst. Sofern ein Befund über eine transcranielle Dopplersonographie (TCD) vorlag, um ein PFO nachzuweisen, wurde dieser erfasst und in die Auswertung eingeschlossen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die TCD in der hyperbaren Sauerstofftherapie des Universitätsklinikums Düsseldorf bei Verdacht auf eine DCS oder AGE erst seit dem Jahr 2007 routinemäßig durchgeführt wurde. Die Patienten, bei denen kein Befund vorlag, wurden vor dem Jahr 2007 mit einer DCS in der HBO des Universitätsklinikums Düsseldorf behandelt. Als Verlaufsparemeter wurde ebenfalls ermittelt, ob es nach Abschluss der HBO erneut zu einer DCS kam.

#### **2.4.5 Allgemeiner Gesundheitszustand**

Bei der Erhebung des allgemeinen Gesundheitszustandes ging es um die Objektivierbarkeit der angegebenen Daten. Zu diesem Zwecke wurde der oben beschriebene Fragebogen „SF-12 zur Feststellung des allgemeinen Gesundheitszustandes“ an die Patienten versendet. Dieser war insofern modifiziert, dass sich die gleichen Fragen, zum Zeitpunkt „vor dem Tauchunfall“ und „nach dem Tauchunfall“ wiederholten. Die Studienteilnehmer wurden gebeten, die Fragebögen für die Zeitpunkte vor dem Tauchunfall und nach dem Tauchunfall zu beantworten. Hierdurch sollte der Einfluss, der stattgehabten DCS, mit nachfolgender HBO, auf die allgemeine Lebensqualität des Patienten erfasst werden. Im Rahmen der Auswertung des „SF-12 zur Feststellung des allgemeinen Gesundheitszustandes“ werden die *Cluster* „allgemeines Wohlbefinden“, „physisches Wohlbefinden“, „psychisches Wohlbefinden“ und „physisches und psychisches Wohlbefinden“ gebildet. Hierdurch wurde eine weitere Demaskierung der unter Umständen vorhandenen Symptome oder Residuen möglich.

Den einzelnen *Items* des Fragebogens wurden Wertelabels zugeordnet. Je nach Antwortmöglichkeiten waren dies die Wertelabels „1 bis 2“, „1 bis 3“, „1 bis 5“ oder „1

bis 6“, wobei der jeweils höhere Wert der Wertelabels für einen besseren Gesundheitszustand steht.

Es waren insgesamt „12 bis 47“ Punkte zu erreichen, wobei die höhere Punktzahl einem besseren Gesundheitszustand entspricht.

In den *Clustern* waren ebenfalls Punktzahlen zu erreichen. Je höher der Punktwert, desto besser das jeweilige clusterspezifische Wohlbefinden:

*Cluster 1-* „allgemeines Wohlbefinden“: „1 bis maximal 5“ Punkte

*Cluster 2-* „physisches Wohlbefinden“: 7 bis maximal 19“ Punkte

*Cluster 3-* „psychisches Wohlbefinden“: „3 bis maximal 18“ Punkte

*Cluster 4-* „physisches und psychisches Wohlbefinden“: „1 bis maximal 5“ Punkte

#### **2.4.6 Untersuchung von Einflüssen auf den Behandlungserfolg**

Hier wurde untersucht, ob das Geschlecht, das Alter, der DCS-Typ, die Tauchdauer oder -tiefe, der Ausbildungsstand bzw. Taucherfahrung oder eine im langen Nachuntersuchungszeitraum erlittene DCS sich auf das Ergebnis des SF-12 bzw. die Beschwerdepersistenz ausgewirkt hat.

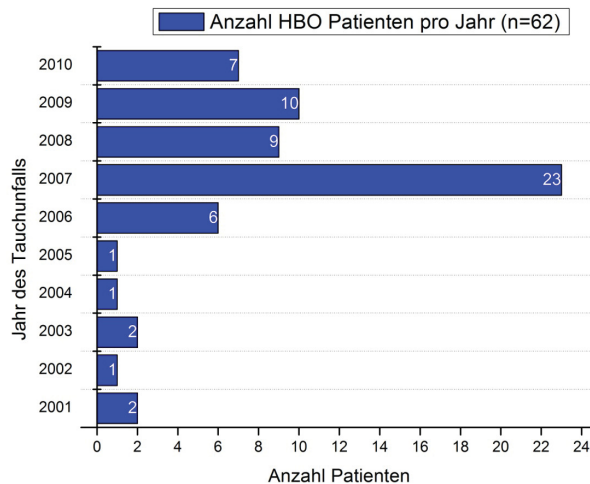
#### **2.4.7 Statistische Methoden**

Für die statistische Auswertung der Ergebnisse in dieser Arbeit wurden die Programme SPSS (IBM, Version 20), Excel (Microsoft Office 2007) und Origin-Pro (Origin Lab Version 8G) verwendet. Für die Datenanalyse wurde zunächst eine deskriptive Auswertung durchgeführt und anschließend mittels ungepaarten, zweiseitigen t-Test auf Signifikanz untersucht. Relative Werte wurden mittels Chi-Quadrat Test auf Signifikanz untersucht. Signifikanzen wurden ab  $p < 0,05$  angenommen. Die Werte wurden bis auf die erste Nachkommastelle gerundet.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Eingeschlossene Patienten (n = 62)

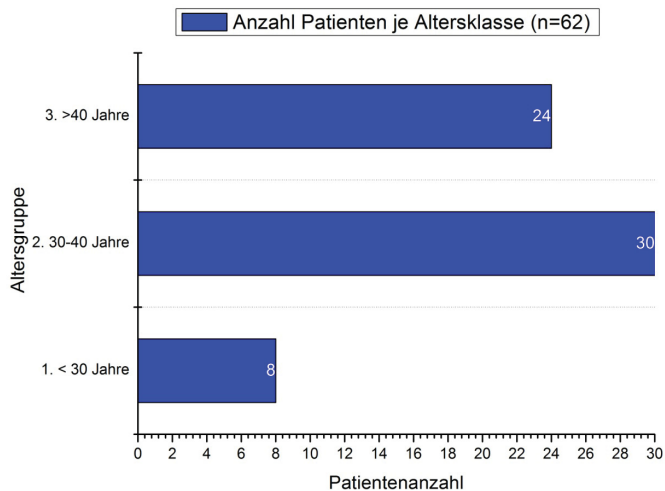
Von den eingeschlossenen Patienten, die im Untersuchungszeitraum mit einer DCS im UKD vorstellig wurden sind 7 (11,3%) Patienten in den ersten 5 Jahren und 45 (88,7%) in den zweiten 5 Jahren mittels HBO therapiert worden. Die meisten Patienten (n = 23) wurden 2007 therapiert (vgl. Abb. 16).



**Abb. 16: Verteilung der Behandlungen der 62 eingeschlossenen Patienten im Untersuchungszeitraum pro Jahr**

##### 3.1.1 Demographische Daten

Von den 62 eingeschlossenen Patienten, die mit der HBO nach modifiziertem Behandlungsschema behandelt wurden, waren 41 (66,1%) männlich und 21 (33,9%) weiblich. Das mittlere Alter zum Zeitpunkt des Tauchunfalls betrug 37,7 (SD: +/- 9) Jahre. Der älteste Patient war 60 Jahre und der jüngste 11 Jahre alt. Die Altersverteilung zeigte, dass 8 (12,9%) Patienten jünger als 30 Jahre waren. 30 (48,4%) Patienten befanden sich in der Altersgruppe 30-40 Jahre und 24 (38,7%) Patienten waren älter als 40 Jahre (vgl. Abb. 17).



**Abb. 17: Verteilung der 62 eingeschlossenen Patienten auf die Altersklassen: älter als 40 Jahre; zwischen 30 und 40 Jahren; jünger als 30 Jahre**

### 3.1.2 Tauchanamnese

Die mittlere Tauchdauer und Tiefe betrug zum Zeitpunkt des Tauchunfalls 46,4 Minuten (Min.: 0,5 Minuten; Max.: 360 Minuten; SD:  $\pm 48,7$ ) bzw. 24 m (Min.: 2 m; Max.: 50,7 m; SD:  $\pm 11,05$ ). Hier konnten für die Tauchtiefe nur 51 gültige Werte erhoben werden und für die Tauchdauer 49. Es wurde mit unterschiedlichen Atemgasen getaucht. 53 Patienten (85,5 %) verwendeten am Tag des Tauchunfalls Druckluft. Die anderen 11 Patienten verwendeten als Atemgas in 8 Fällen (12,9%) Nitrox-32 und in einem Fall (1,6%) Trimix. Lediglich ein (1,6%) eingeschlossener Patient war Berufstaucher, die übrigen 61 (98,4%) betrieben dies zum Freizeitvergnügen.

### 3.1.3 Medizinische Anamnese

Die Verteilung der Entitäten DCS Typ I und II zeigte, dass 31 (50%) eine Typ I und 31 (50%) eine Typ II erlitten hatten. Besonderheiten beim Tauchgang traten sehr inhomogen auf. Im Einzelnen zu nennen waren hier: nicht auskurierte Erkältungskrankheiten, Alkoholkonsum, Nicht-Einhaltung von Deko-Stopps oder auch das Tauchen in Höhenlagen.

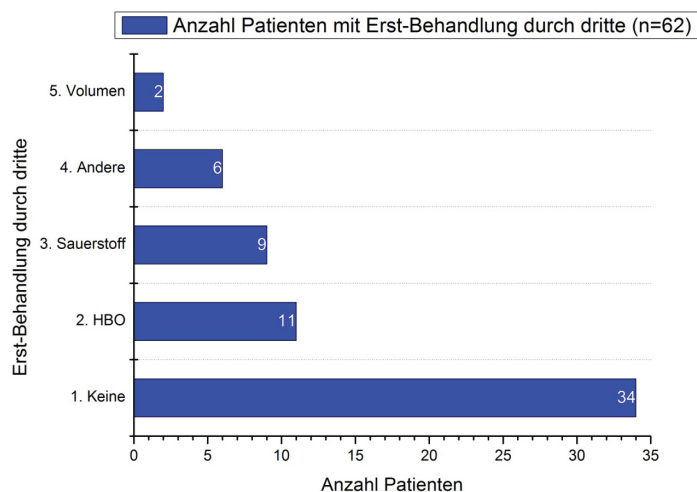
#### 3.1.3.1 Latenzzeit

Die Latenzzeit, also die Zeit zwischen dem Tauchunfall und der Manifestation der ersten Symptome, variierte zwischen sofortigem Symptomeintritt bis maximal einer Woche. 36 (58,1%) Patienten wiesen einen Symptomeintritt von weniger als 1 Stunde auf. Die Symptomatik der Patienten war insgesamt sehr unterschiedlich. Sie erfüllte jedoch in allen Fällen die beschriebenen Kriterien der DCS. Schwere kardiovaskuläre

oder respiratorische Vorerkrankungen waren bei den eingeschlossenen Patienten nicht diagnostiziert.

### 3.1.3.2 Erstversorgung durch Dritte am Ereignisort

Die Auswertung der Erstversorgung am Ereignisort durch Dritte (Laien, Rettungsdienst, Notarzt, Tauchmediziner) zeigte, dass 34 (54,8%) Patienten keine Erstversorgung erhielten. 11 (17,7%) Patienten wurden einer HBO mit nicht dokumentierten Therapieschemata behandelt. Eine reine Sauerstoffinhalation erhielten 9 (14,5%) Patienten. 6 (9,7%) bekamen eine sehr inhomogene Erstbehandlung. Diese reichte von der Gabe von der Gabe von intravenösen Kortikosteroiden bis zur einmaligen Gabe von Acetylsalicylsäure (ASS). Eine reine Volumentherapie erhielten 2 (3,2%) Patienten (Vgl. Abb. 18).

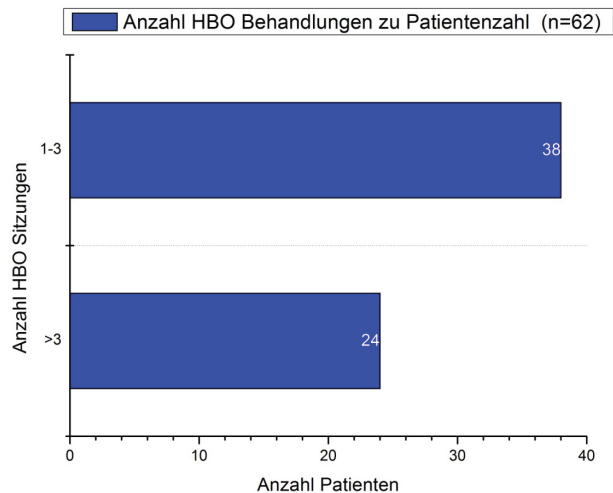


**Abb. 18: Erstversorgung durch dritte am Ereignisort; Andere: (Kortikosteroide und ASS)**

### 3.1.4 Therapie und Verlauf

#### 3.1.4.1 Anzahl der Therapieeinheiten

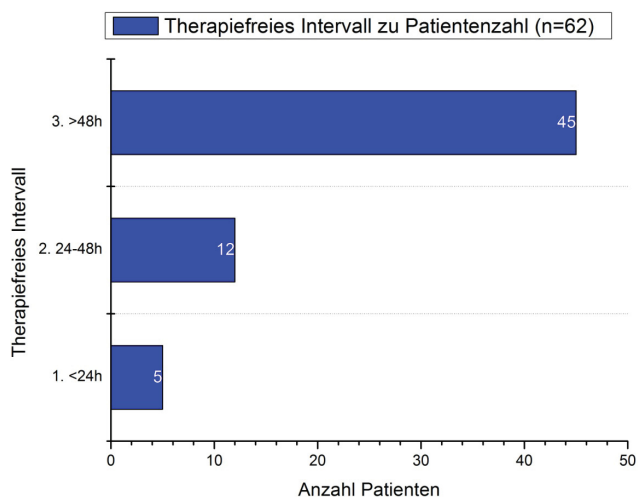
Nach der Diagnose DCS erhielten die Patienten eine HBO (verwendetes Therapieschema). Je nach Beschwerdepersistenz wurden mehrere Therapieeinheiten angewendet. Insgesamt wurden zwischen 1 und 13 Therapieeinheiten angewendet. 38 (61,3%) Patienten erhielten zwischen 1 bis 3 Therapieeinheiten. 24 (38,7%) Patienten erhielten mehr als 3 Einheiten (vgl. Abb. 19).



**Abb. 19: Anzahl der Patienten mit 1-3 Therapieeinheiten, sowie mehr als 3 HBO-Therapieeinheiten**

#### 3.1.4.2 Therapiefreies Intervall

Das therapiefreie Intervall war bei 5 (8,1%) Patienten kleiner als 24 Stunden. Bei 12 (19,4%) betrug dieses zwischen 24 und 48 Stunden. 45 (72,3%) Patienten hatten ein therapiefreies Intervall von mehr als 48 Stunden (vgl. Abb. 20).



**Abb. 20: Therapiefreies Intervall: Zeitraum zwischen Auftreten der ersten Symptome und HBO**

#### 3.1.4.3 Nebenwirkungen

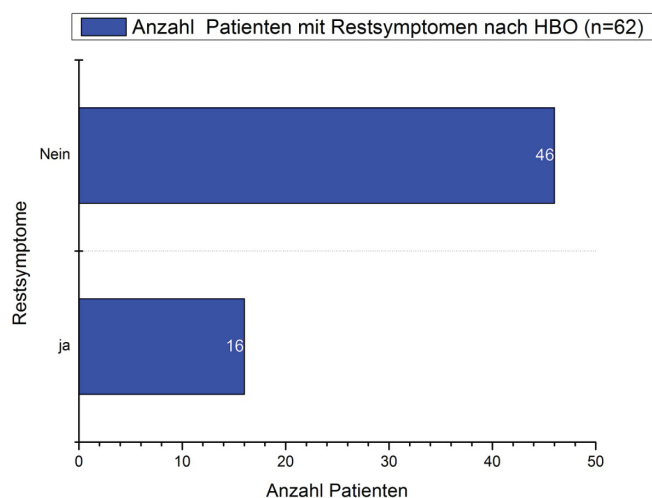
Bei 95,2% der Patienten traten während der HBO keine Nebenwirkungen auf. Es bestanden jedoch bei 3 (4,8%) Patienten leichte Nebenwirkungen, wie Kribbelparästhesien oder Erkältungssymptome, während bzw. direkt im Anschluss an die HBO. Diese Beschwerden führten in keinem Falle zum Abbruch der Therapie.

#### 3.1.4.4 PFO

Ein PFO lag bei 13 Patienten (21%) vor. Bei 10 (16,1%) Patienten lag kein Befund vor und bei 39 (62,9%) ließ sich mittels transcranieller Dopplersonographie (TCD) kein PFO nachweisen.

#### 3.1.4.5 Beschwerdepersistenz

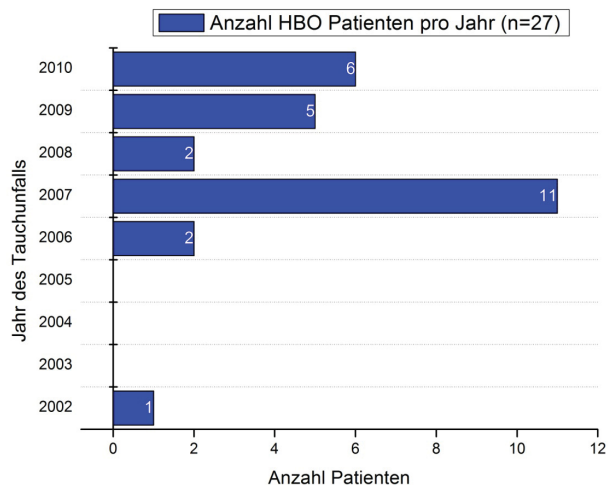
Nach Abschluss der HBO klagten 16 (25,8%) Patienten über persistierende Beschwerden. Diese reichten von Kribbelparästhesien, Hypästhesien, Schmerzen, Koordinationsstörungen bis hin zu Hörverlust. 46 (74,2%) Patienten hatten nach Abschluss der HBO keine Beschwerden (vgl. Abb. 21).



**Abb. 21: Patienten mit Restsymptomatik nach Abschluss der HBO**

### 3.2 Fragebogenrückläufer (n = 27)

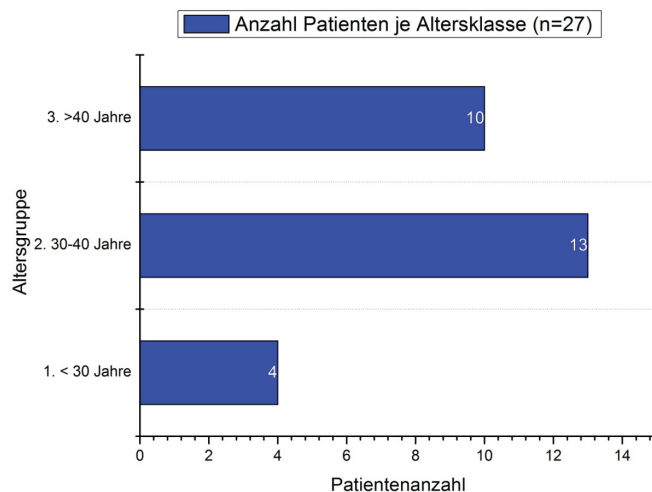
Von den Fragebogenrückläufern, die im Untersuchungszeitraum mit einer DCS im UKD vorstellig wurden, sind 3 Patienten in den ersten 5 Jahren und 24 in den zweiten 5 Jahren mittels HBO therapiert worden. Auch in diese Subgruppe sind die meisten Patienten (n = 11) 2007 therapiert worden (vgl. Abb. 22).



**Abb. 22: Verteilung der Behandlungen der 27 Fragebogenrückläufer im Untersuchungszeitraum pro Jahr**

### 3.2.1 Demographische Daten

In der Subgruppe der 27 Fragebogenrückläufer, die mit der modifizierten HBO behandelt wurden, waren 14 (51,9%) männlich und 13 (48,1%) weiblich. Das mittlere Alter zum Zeitpunkt des Tauchunfalls betrug 38,4 (SD: +/- 10,7) Jahre. Der älteste Patient war 60 Jahre und der jüngste 12 Jahre alt. Die Altersverteilung zeigte, dass 4 (14,8 %) Patienten jünger als 30 Jahre waren. 13 (48,1 %) Patienten befanden sich in der Altersgruppe 30-40 Jahre und 10 (37,1 %) Patienten waren älter als 40 Jahre.



**Abb. 23: Verteilung der 62 eingeschlossenen Patienten auf die Altersklassen: älter als 40 Jahre; zwischen 30 und 40 Jahren; jünger als 30 Jahre**

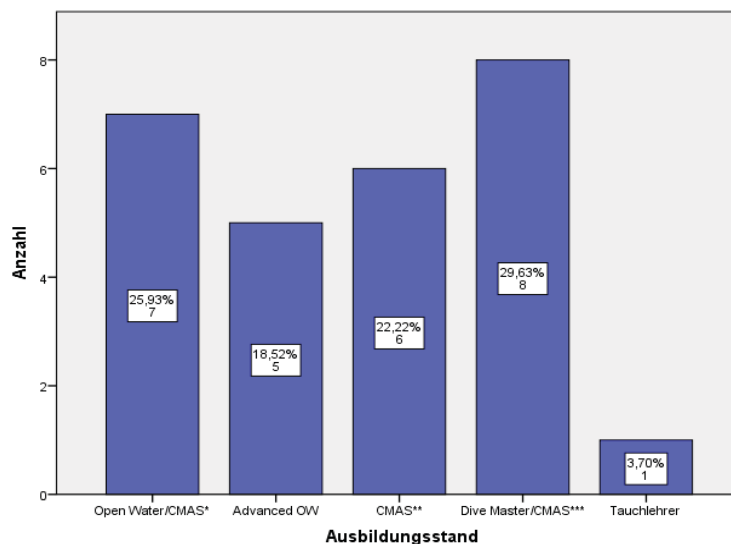
### 3.2.2 Tauchanamnese

Die mittlere Tauchdauer und Tiefe betrug zum Zeitpunkt des Tauchunfalls 42,7 (Min.: 5 Minuten; Max.: 63,7 Minuten; SD: +/- 16,7) Minuten bzw. 26,6 (Min.: 8 m; Max.: 50,7 m; SD: +/- 11,5) m. Hier konnten für die Tauchdauer und Tauchtiefe nur 22 gültige

Werte erhoben werden. Es wurde mit unterschiedlichen Atemgasen getaucht. 23 Patienten (85,2%) verwendeten am Tag des Tauchunfalls Druckluft. Die anderen 4 Patienten verwendeten als Atemgas in 3 Fällen (11,1%) Nitrox-32 und in einem Fall (3,7%) Trimix. Unter den 27 Fragebogenrückläufern befand sich ein (3,7%) Berufstaucher.

### 3.2.2.1 Ausbildungsstand (Fragebogen)

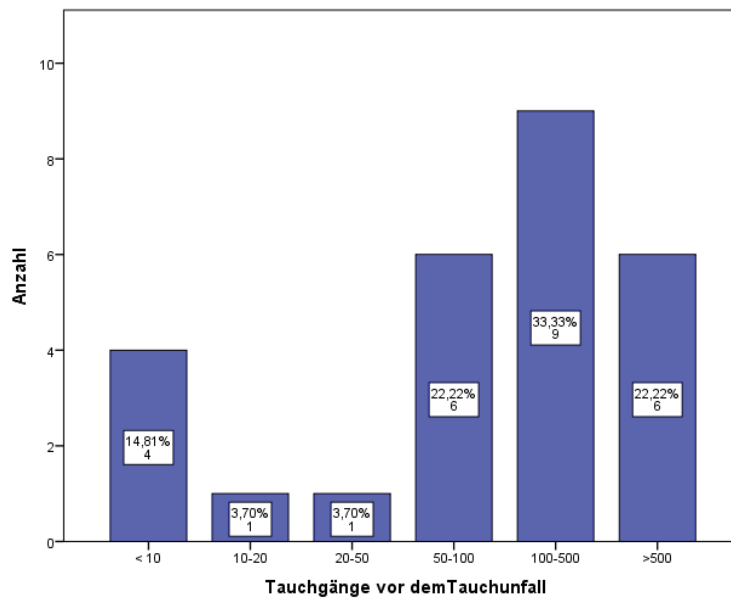
Dem Fragebogen war zu entnehmen, dass mehr als die Hälfte der Patienten einen fortgeschrittenen Ausbildungsstand besaßen. Im Einzelnen hatten 7 (25,9%) die Tauchanfängerqualifikationen (Open Water / CMAS \*), 5 (18,5%) bzw. 6 (22,2%) die fortgeschrittenen Qualifikationen (Advanced Open Water bzw. CMAS \*\*). 8 (29,6%) Patienten besaßen die höchste Ausbildungsstufe der Tauchsportorganisationen (Dive Master / CMAS \*\*\*) und 1 (3,7%) war Tauchlehrer (vgl. Abb. 24).



**Abb. 24: Ausbildungsstand des Tauchers nach Organisation: Professional Association of Diving Instructors (PADI) oder World Confederation of Underwater Activities (CMAS)**

### 3.2.2.2 Anzahl Tauchgänge (Fragebogen)

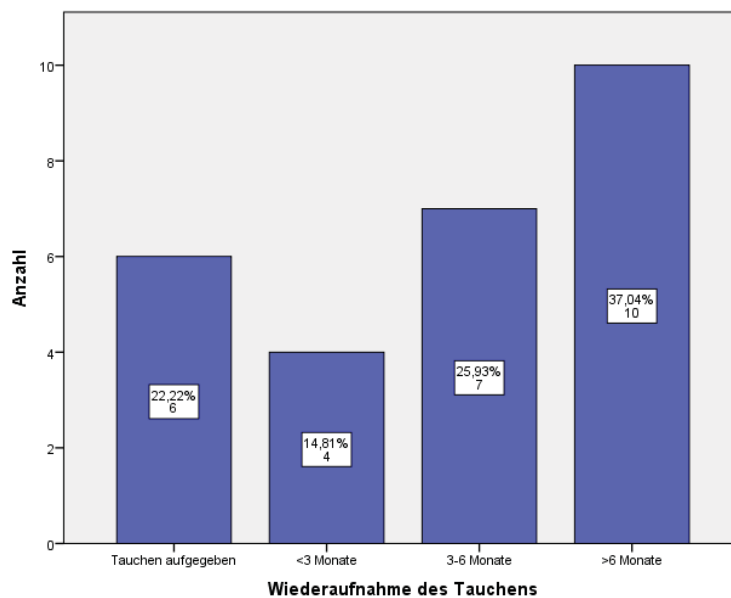
Die Anzahl der Tauchgänge wurde für die Auswertung in sechs Kategorien geclustert, um eine bessere Vergleichbarkeit der Daten zu erzielen. Auch hier waren mehr als die Hälfte der Fragebogenrückläufer erfahrene Taucher, die 100 oder mehr Tauchgänge absolviert haben. 6 Patienten (22,2%) waren unerfahrene Taucher mit 50 oder weniger Tauchgängen. Im Mittelfeld befanden sich 6 (22,2%) Patienten mit 50 bis 100 Tauchgängen (vgl. Abb. 25).



**Abb. 25: Gruppierte Anzahl der Tauchgänge vor dem Tauchunfall**

### 3.2.2.3 Wiederaufnahme des Tauchens (Fragebogen)

Zehn (37%) Patienten haben mehr als 6 Monate keinen Tauchgang durchgeführt. Sieben (25,9%) Patienten unterließen das Tauchen für einen Zeitraum zwischen 3-6 Monaten und 4 (14,8%) weniger als 3 Monate. Sechs (22,2%) der behandelten Patienten haben nach dem Tauchunfall das Tauchen komplett aufgegeben (vgl. Abb. 26).



**Abb. 26: Wiederaufnahme des Tauchsports nach Abschluss der HBO-Therapie**

### 3.2.3 Medizinische Anamnese

Die Verteilung der Entitäten DCS Typ I und II zeigte, dass 10 (37%) eine Typ I und 17 (63%) eine Typ II erlitten hatten. Besonderheiten beim Tauchgang traten sehr inhomogen auf. Im Einzelnen zu nennen waren hier: nicht auskurierte

Erkältungskrankheiten, Alkoholkonsum, Nicht-Einhaltung von Deko-Stopps oder auch das Tauchen in Höhenlagen.

### 3.2.3.1 Latenzzeit

Die Latenzzeit, also die Zeit zwischen dem Tauchunfall und der Manifestation der ersten Symptome, variierte zwischen sofortigem Symptomeintritt bis maximal einer Woche. 19 (70,4%) Patienten wiesen einen Symptomeintritt von weniger als 1 Stunde auf. Die Symptomatik der Patienten war insgesamt sehr unterschiedlich. Sie erfüllte jedoch in allen Fällen die beschriebenen Kriterien der DCS. Schwere kardiovaskuläre oder respiratorische Vorerkrankungen waren bei den eingeschlossenen Patienten nicht diagnostiziert.

### 3.2.3.2 Erstversorgung durch Dritte am Ereignisort

Die Erstversorgung am Ereignisort durch Dritte (Laien, Rettungsdienst, Notarzt, Tauchmediziner) zeigte, dass 16 (59,3%) Patienten keine Erstversorgung erhielten. Sechs (22,2%) Patienten wurden einer HBO mit nicht dokumentierten Therapieschemata behandelt. Eine reine Sauerstoffinhalation erhielten vier (14,8%) Patienten. Einer (3,7%) bekam erhielt eine Kortikosteroidtherapie. Eine reine Volumentherapie (unklar ob Kristallide oder Kolloide) erhielt keiner der Patienten (vgl. Abb. 26).

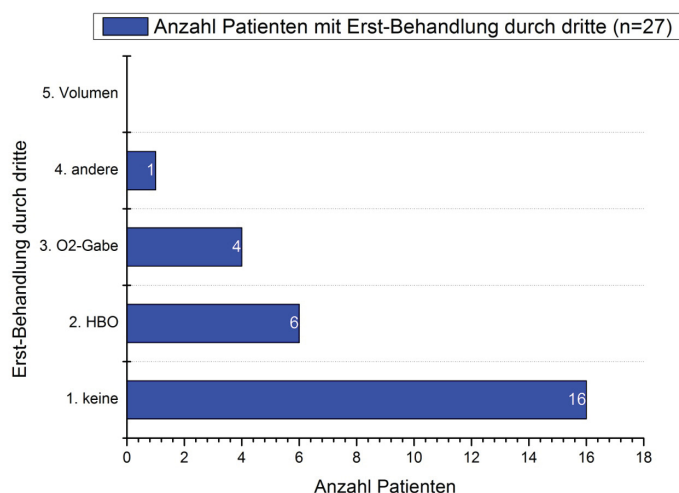
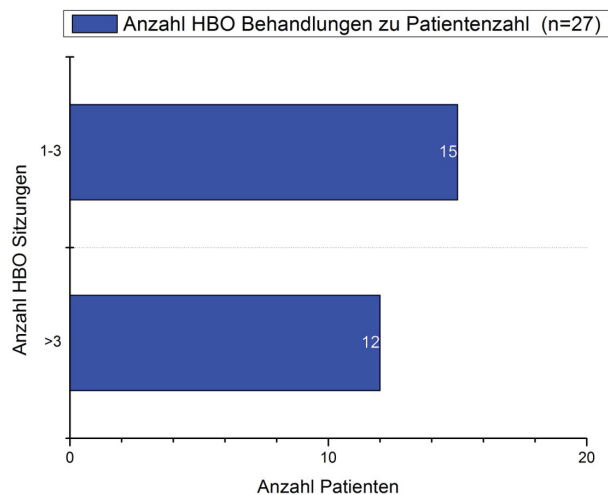


Abb. 27: Erstversorgung durch dritte am Ereignisort; Andere: (Kortikosteroide)

### 3.2.4 Therapie und Verlauf

#### 3.2.4.1 Anzahl der Therapieeinheiten

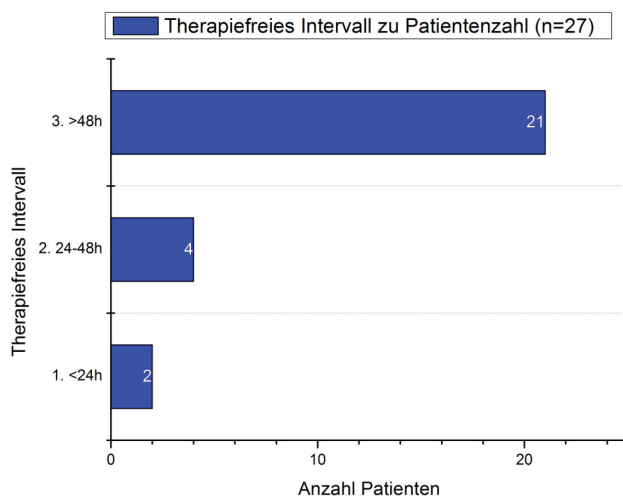
Nach der Diagnose DCS erhielten die Patienten eine HBO (verwendetes Therapieschema). Je nach Beschwerdepersistenz wurden mehrere Therapieeinheiten angewendet. Insgesamt wurden zwischen 1 und 9 Therapieeinheiten angewendet. 15 (55,6%) Patienten erhielten zwischen 1 bis 3 Therapieeinheiten. 12 (44,4%) Patienten erhielten mehr als 3 Einheiten (vgl. Abb. 27).



**Abb. 28: Gruppierte Anzahl der HBO-Therapieeinheiten mit dem modifizierten Therapieschema des UKD**

#### 3.2.4.2 Therapiefreies Intervall

Das therapiefreie Intervall war bei 2 (7,4%) Patienten kleiner als 24 Stunden. Bei 4 (14,8%) betrug dieses zwischen 24 und 48 Stunden. 21 (77,7%) Patienten hatten ein therapiefreies Intervall von mehr als 48 Stunden (vgl. Abb. 28).



**Abb. 29: Gruppiertes Intervall zwischen Symptomeintritt und Therapiebeginn mit dem modifizierten HBO-Therapieschema des UKD**

### 3.2.4.3 Nebenwirkungen

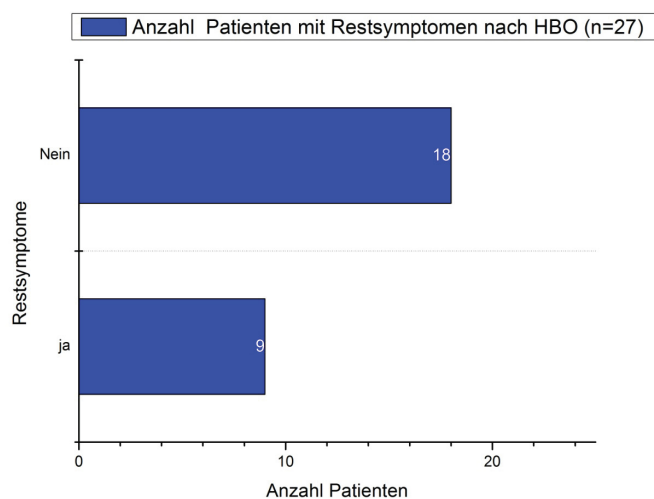
Schwerwiegende Nebenwirkungen traten während der HBO nicht auf. Es bestanden jedoch bei 1 (3,7%) Patient leichte Nebenwirkungen (Kribbelparästhesien). Diese Beschwerden führten zu keinem Abbruch der Therapie.

### 3.2.4.4 PFO

Ein PFO lag bei 5 Patienten (18,5%) vor. Bei 2 (7,4%) Patienten lag kein Befund vor und bei 20 (74,1%) ließ sich mittels TCD kein PFO nachweisen.

### 3.2.4.5 Beschwerdepersistenz

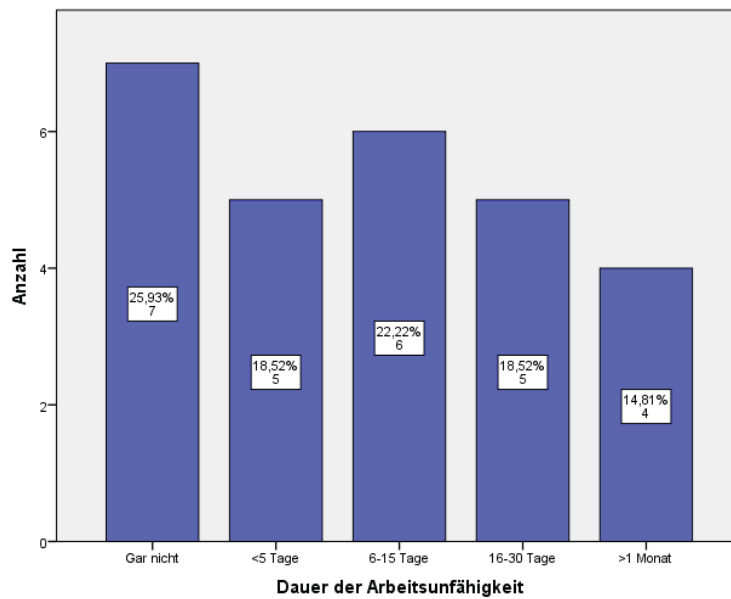
Nach Abschluss der HBO klagten 9 (33,3%) Patienten über persistierende Beschwerden. Diese reichten von Kribbelparästhesien, Hypästhesien, Schmerzen, Koordinationsstörungen bis hin zu Hörverlust. 18 (66,7%) Patienten hatten nach Abschluss der HBO keine Beschwerden (vgl. Abb. 29).



**Abb. 30: Patienten mit Restsymptomatik nach Abschluss der HBO**

### 3.2.4.6 Dauer der Arbeitsunfähigkeit (Fragebogen)

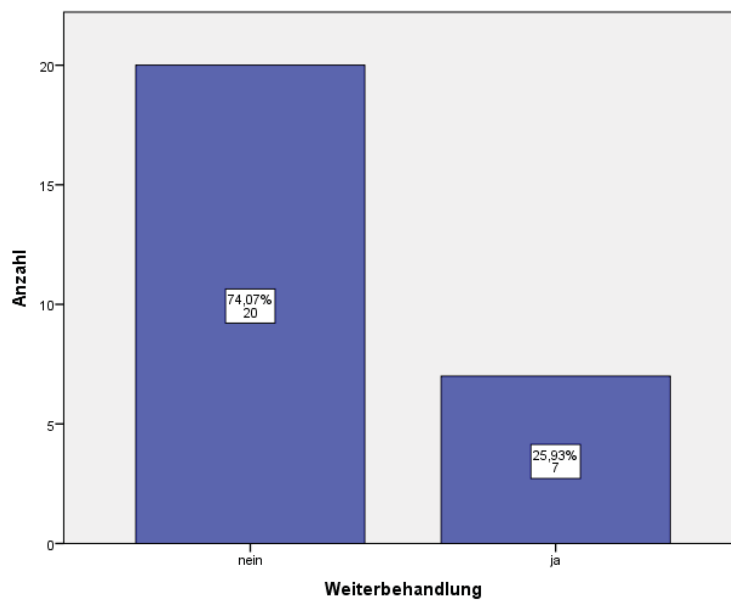
Bei der Dauer der Arbeitsunfähigkeit konnten 7 (25,9%) Patienten ihrer Erwerbstätigkeit sofort wieder nachgehen. 4 (14,8%) waren länger als 1 Monat arbeitsunfähig. Bei 5 (18,5%) Patienten bewegten sich die Zeiten zwischen 16-30 Tagen, bei 6 (22,2%) zwischen 5-15 Tagen. Weitere 5 (18,5%) waren weniger als 5 Tage krankgeschrieben (vgl. Abb. 31).



**Abb. 31: Gruppierte Dauer der Arbeitsunfähigkeit nach dem Tauchunfall (n=27)**

#### 3.2.4.7 Weiterbehandlung (Fragebogen)

Im Anschluss an die HBO Therapie am UKD erhielten 7 Patienten (25,9%) eine weitere Behandlung aufgrund der aus dem Tauchunfall resultierenden Symptomatik. Hierbei wurden Krankengymnastik, PFO-Verschluss oder Psychotherapie angewandt (vgl. Abb. 32).



**Abb. 32: Weiterbehandlung nach Abschluss der HBO-Therapie am UKD (n=27)**

### 3.2.4.8 Erneute DCS seit Abschluss der Therapie im UKD (Fragebogen)

4 (14,8%) Patienten im Zeitraum zwischen HBO und Befragung erneut eine DCS (vgl. Abb. 33).

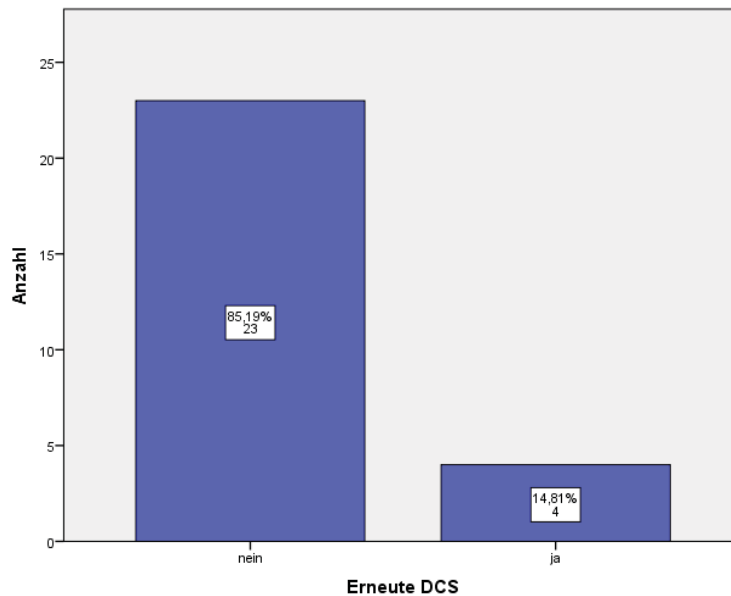


Abb. 33: Im Zeitraum nach Abschluss der HBO-Therapie und Versendung des Fragebogens erlittene DCS (n=27)

### 3.2.5 Untersuchung von Einflüssen auf die Beschwerdepersistenz

#### 3.2.5.1 Geschlecht

Das Geschlecht zeigte keinen signifikanten Unterschied bei Patienten mit ( $p = 0,76$ ) oder ohne Beschwerdepersistenz ( $p = 0,09$ ) (Vgl. Abb.34).

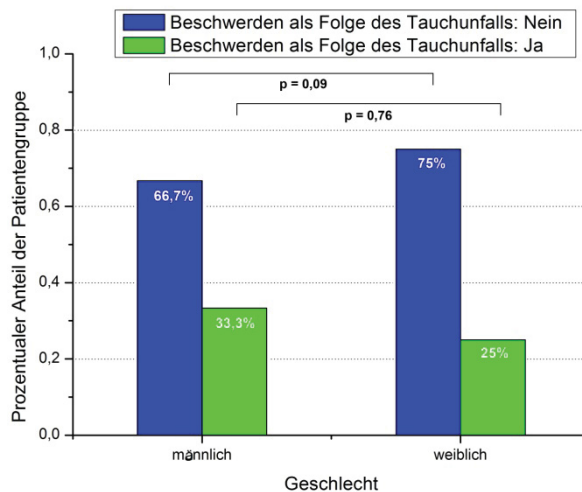
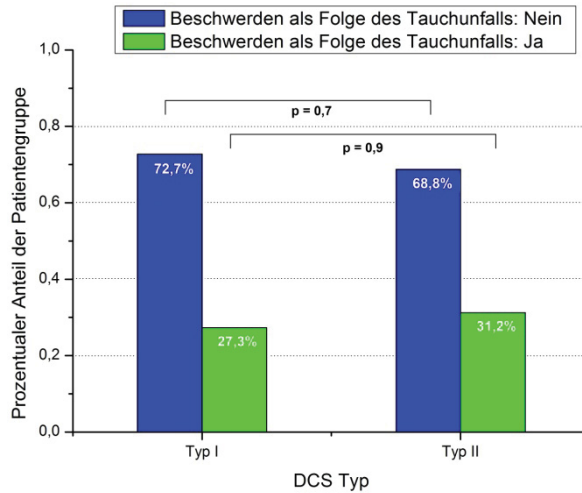


Abb. 34: Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz nach Abschluss der HBO nach Geschlechtern. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Geschlechtern.

### 3.2.5.2 DCS-Typ

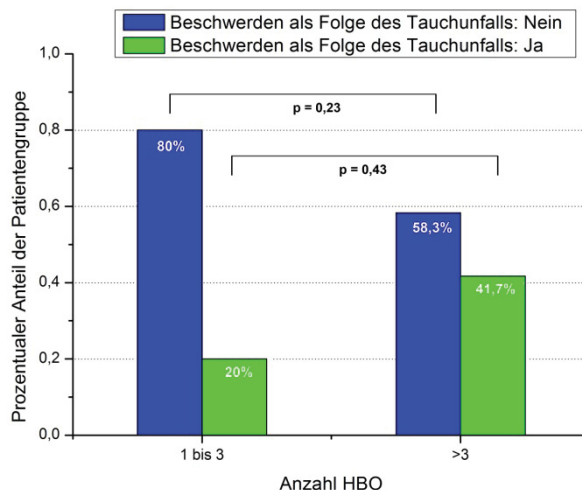
Der DCS-Typ zeigte keinen signifikanten Unterschied bei Patienten mit ( $p = 0,9$ ) oder ohne Beschwerdepersistenz ( $p = 0,7$ ) (Vgl. Abb. 35).



**Abb. 35:** Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz nach Abschluss der HBO nach DCS Typ. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Entitäten der DCS.

### 3.2.5.3 Anzahl HBO

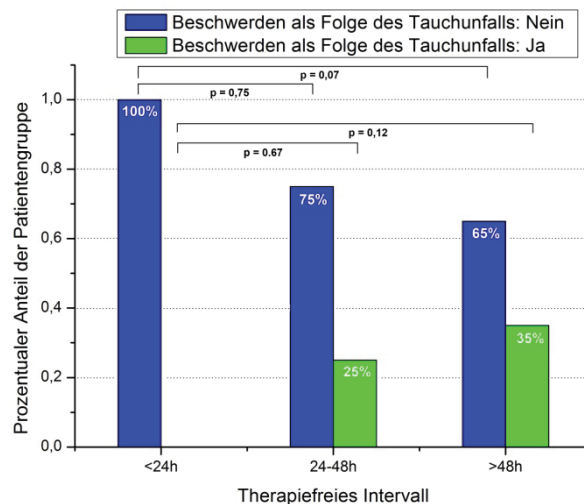
Die Anzahl der angewendeten Therapieeinheiten (gruppiert: 1-3 und  $> 3$ ) zeigte keinen signifikanten Unterschied bei Patienten mit ( $p = 0,43$ ) oder ohne Beschwerdepersistenz ( $p = 0,23$ ) (Vgl. Abb.36).



**Abb. 36:** Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz nach Abschluss der HBO nach gruppiertem Anzahl der Therapieeinheiten. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der gruppierten Anzahl an Therapieeinheiten.

### 3.2.5.4 Therapiefreies Intervall

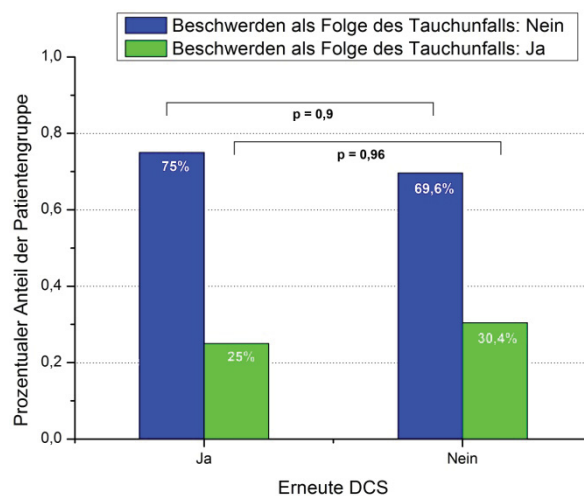
Das therapiefreie Intervall zeigte keine signifikanten Unterschiede bei Patienten mit ( $p = 0,67$ ;  $0,12$ ) oder ohne Beschwerdepersistenz und zeigte somit keinen Einfluss auf die Beschwerdepersistenz ( $p = 0,75$ ;  $0,07$ ) (Vgl. Abb.37).



**Abb. 37: Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz nach Abschluss der HBO nach gruppierter Dauer des therapiefreien Intervalls. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede abhängig von der Dauer des therapiefreien Intervalls.**

### 3.2.5.5 Erneute DCS im Nachuntersuchungszeitraum

Die Anzahl der Patienten, die nach Abschluss der HBO mit dem untersuchten Therapieschema erneut eine DCS erlitten, zeigte keinen signifikanten Unterschied bei Patienten mit ( $p = 0,96$ ) oder ohne Beschwerdepersistenz ( $p = 0,9$ ) (Vgl. Abb.38).



**Abb. 38: Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz nach Abschluss der HBO nach erneuter DCS nach Abschluss der HBO am UKD. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Patienten, die eine erneute DCS im Nachuntersuchungszeitraum erlitten oder nicht.**

### 3.2.6 Auswertung des SF-12 Fragebogens

#### 3.2.6.1 Gesamtscore

Im Mittel betrug die Punktzahl vor dem Tauchunfall 41,5 (SD: 3,9) Punkte und nachdem Tauchunfall 40,5 (SD: 5,1). Dies zeigte eine Abnahme der Punktezahl von 1 Punkt. Diese Differenz war nicht signifikant ( $p = 0,42$ ). Die maximal zu erreichende Punktzahl wurde vor dem Tauchunfall von 2 (7,4%) Patienten erreicht und nach dem Tauchunfall von 1 (3,7%) Patienten erreicht. Der niedrigste Punktwert vor dem Tauchunfall betrug 27 Punkte und nach dem Tauchunfall 21. Diese wurden vor dem Tauchunfall von 2 (7,4%) Patienten und nach dem Tauchunfall von 1 (3,7%) erreicht. Bei 12 (44,4%) Patienten gab es keine Veränderung der Punktzahl. 7 (25,9%) Patienten zeigten eine Abnahme der Punktzahl und 8 (29,6%) Patienten eine Zunahme. Die größte Abnahme an Punkten zeigte 1 Patient (3,7%) mit 27 Punkten, die stärkste Zunahme 1 (3,7%) Patient mit 17 Punkten. Die Differenz des Gesamtscore zeigte sich Normalverteilt (vgl. Abb. 39).

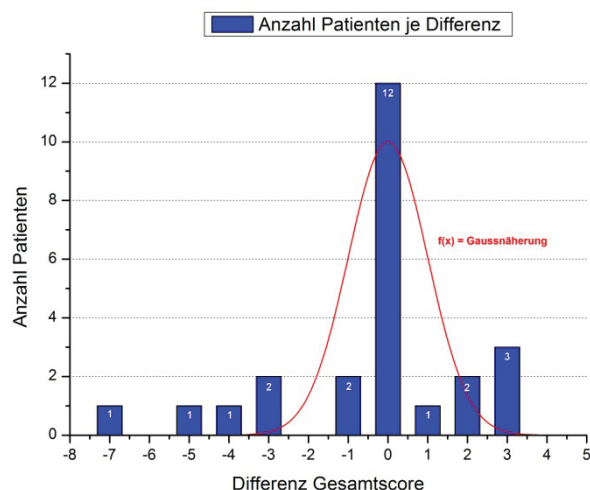


Abb. 39: Veränderung des Gesamtscore SF-12 vor dem Tauchunfall und Nachuntersuchung; mit Normalverteilungskurve (n=27)

#### 3.2.6.2 Allgemeiner Gesundheitszustand

Im Cluster „allgemeiner Gesundheitszustand“ zeigte sich vor dem Tauchunfall ein Mittelwert von 4,1 (SD: 0,8) Punkten und nach dem Tauchunfall von 3,8 (SD: 0,9). Die Differenz betrug 0,3 Punkte und war statistisch nicht signifikant ( $p = 0,2$ ). Bei insgesamt 19 Patienten kam es zu keiner Veränderung des Punktwertes. 6 Patienten zeigten eine Abnahme. Die stärkste Abnahme hatte 1 (3,7%) mit 3 Punkten.

#### 3.2.6.3 Physischer Gesundheitszustand

Der Mittelwert der Fragebogenrückläufer betrug vor dem Tauchunfall 18,6 (SD: 1,4) Punkte und nach dem Tauchunfall 17,9 (SD: 2,1) Punkte. Die Differenz betrug also 0,7 Punkte und zeigte sich statistisch nicht signifikant ( $p = 0,16$ ). Hier wurde vor dem Tauchunfall die maximal zu erreichende Punktzahl von 25 (92,6%) Patienten erreicht. Die minimale Punktzahl vor dem Tauchunfall betrug 14 Punkte und konnte bei 2 (7,4%) Patienten ermittelt werden. Nach dem Tauchunfall erreichten 19 (70,4%) Patienten die maximale Punktzahl. Der niedrigste Wert betrug 12 Punkte und wurde bei 1 (3,7%) Patienten gemessen. Die größten Differenzen vor und nach dem Tauchunfall hatten 2 (7,4%) Patienten mit jeweils einem Verlust von 7 bzw. 5 Punkten.

#### 3.2.6.4 Psychischer Gesundheitszustand

Beim psychischen Gesundheitszustand zeigte sich ein Mittelwert von 14 (SD: 3,0) Punkten vor dem Tauchunfall und 14,1 (SD: 3,0) nach dem Tauchunfall. Die Differenz der Mittelwerte betrug 0,1. Diese waren aber nicht signifikant zueinander ( $p = 0,9$ ). Die maximale Punktzahl von 18 Punkten erreichten 3 (11,1%) Patienten vor dem Tauchunfall und 5 (18,5%) Patienten nach dem Tauchunfall. Der minimale Punktwert betrug 9 Punkte vor dem Tauchunfall und 7 nach dem Tauchunfall. Vor dem Tauchunfall erreichten 4 (14,8%) Patienten den niedrigsten Wert, nach dem Tauchunfall nur 1 (3,7%) Patient. Hier zeigte 1 (3,7%) Patient einen Punktabfall von 10. 4 (14,8%) Patienten hatten nach dem Tauchunfall einen 3-5 Punkte höheren Score als vor dem Tauchunfall.

#### 3.2.6.5 Physischer und psychischer Gesundheitszustand

Im Cluster „physischer und psychischer Gesundheitszustand“ betrug der Mittelwert vor dem Tauchunfall 4,9 (SD: 0,9) Punkte und danach 4,7 (SD: 0,9). Hier betrug die Differenz der Mittelwerte 0,2 Punkte und war nicht signifikant ( $p = 0,28$ ). Die Maximalpunktzahl wurde von 25 (92,6%) Patienten vor dem Tauchunfall erreicht. Nach dem Tauchunfall erreichten diese noch 24 (88,9%) Patienten. Der niedrigste Punktwert vor dem Tauchunfall betrug 4. Nach dem Tauchunfall 1 Punkt, hier zeigte sich mit einer Abnahme von 4 Punkten die größte Differenz.

### **3.2.7 Untersuchung von Einflüssen auf das Ergebnis des SF-12-Fragebogens**

#### **3.2.7.1 Geschlecht**

Es zeigten sich zwischen Männern und Frauen keine statistisch signifikanten Unterschiede in den Clustern des SF-12. Das Geschlecht zeigte keine Beeinflussung des Ergebnisses.

#### **3.2.7.2 Alter**

In den Altersklassen < 30 Jahre, 30-40 Jahre und >40 Jahre gab es auch keine signifikanten Veränderungen in den Clustern des SF-12. Das Alter zum Zeitpunkt des Tauchunfalls zeigte keine Beeinflussung des Ergebnisses.

#### **3.2.7.3 Taucherfahrung**

Bei der Taucherfahrung zeigte sich, dass die Ergebnisse bei gleicher Taucherfahrung nicht signifikant unterschiedlich waren. Allerdings zeigte sich im Cluster „physischer Gesundheitszustand“ ein signifikant schlechteres Ergebnis ( $p = 0,02$ ) nach dem Tauchunfall, bei geringerem Ausbildungsstand.

#### **3.2.7.4 DCS-Typ**

Die unterschiedlichen Formen DCS-Typ I und II zeigten im Cluster „Allgemeiner Gesundheitszustand“ ein signifikant ( $p = 0,01$ ) schlechteres Ergebnis für die DCS Typ II. In den übrigen Clustern zeigten sich keine statistisch signifikanten Veränderungen.

#### **3.2.7.5 Erstversorgung**

Die unterschiedlichen Erstversorgungen vor HBO zeigten keinen signifikanten Unterschied in den Scores des SF-12 bei Patienten die keine Symptome mehr aufwiesen.

#### **3.2.7.6 Therapiefreies Intervall**

Es zeigte sich kein Einfluss des therapiefreien Intervalls von > 48 Stunden auf alle Cluster des SF-12. Ebenso war für das therapiefreie Intervall von 24-48 Stunden kein statistisch signifikanter Einfluss auf die Ergebnisse des SF-12. Für das Intervall von <24 Stunden war aufgrund zu kleiner Anzahl an Patienten keine valide Aussage möglich.

#### **3.2.7.7 Anzahl der HBO**

Die Anzahl der applizierten Therapieeinheiten 1-3 und >3 waren in Bezug auf die Ergebnisse der Cluster des SF-12 nicht signifikant zueinander.

#### 3.2.7.8 Dauer der AU

Die Dauer der Arbeitsunfähigkeit zeigte, dass je länger die AU dauerte desto signifikant schlechter waren die Scores im Cluster „physisches Wohlbefinden“. Die Patienten die länger als 1 Monat arbeitsunfähig waren hatten im Vergleich zu Patienten, die keine AU benötigten ein hochsignifikant ( $p = 0,01$ ) schlechteren Score. Die Patienten mit einer AU-Dauer von 16-30 Tagen hatten ebenfalls einen signifikant ( $p = 0,03$ ) schlechteren Score im Cluster „physischer Gesundheitszustand“.

#### 3.2.7.9 PFO, Nebenwirkungen, verwendetes Atemgas

Aufgrund zu geringer Patientenanzahl war hier keine statistisch valide Aussage über die Einflüsse eines PFO, Nebenwirkungen oder „verwendetes Atemgas“ nicht möglich.

#### 3.2.7.10 Erneute DCS im Nachuntersuchungszeitraum

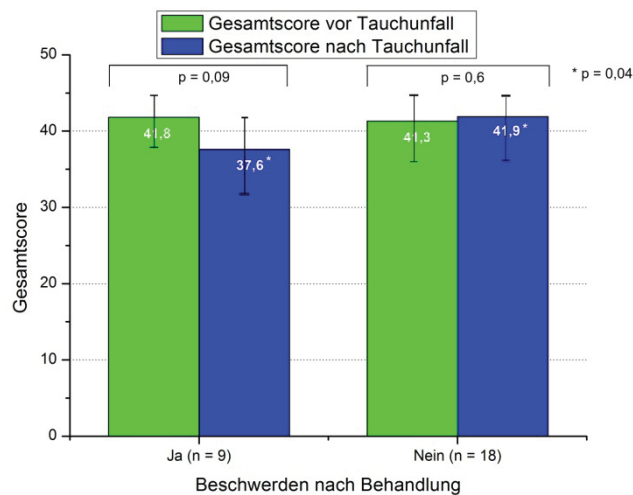
Hier war aufgrund zu kleiner Anzahl an Patienten keine statistisch valide Aussage möglich.

#### 3.2.7.11 Weiterbehandlung nach Abschluss der HBO

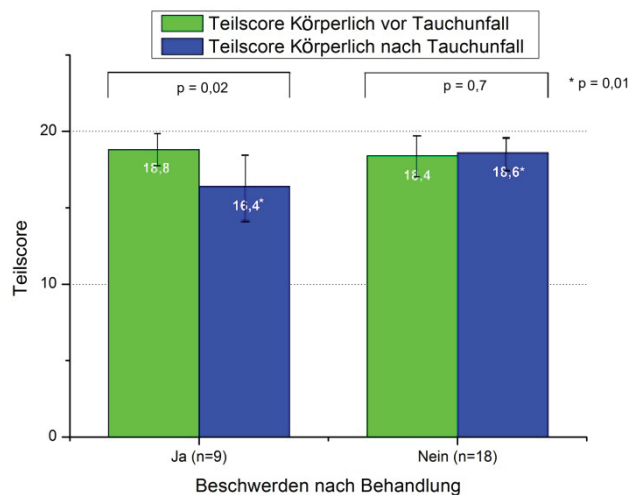
Die Patienten die eine Weiterbehandlung nach Abschluss der HBO hatten keine signifikanten Unterschiede in den Scores des SF-12. Es konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede zur den Patienten, die keine Weiterbehandlung erhielten festgestellt werden.

#### 3.2.7.12 Beschwerdepersistenz

Beim Gesamtscore hatten die Patienten, die nach der Behandlung noch über Beschwerden klagten, ein signifikant schlechteres Ergebnis ( $p = 0,04$ ) nach dem Tauchunfall, als die ohne persistierende Symptomatik (vgl. Abb. 40). Im Cluster „physischer Gesundheitszustand“ waren die Unterschiede ebenfalls signifikant ( $p = 0,01$ ). Patienten mit persistierender Symptomatik hatten auch einen signifikant ( $p = 0,02$ ) schlechteres Ergebnis nach dem Tauchunfall im Vergleich zu vorher (vgl. Abb. 41).



**Abb. 40: Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz, Vergleich der Mittelwerte vor und nach dem Tauchunfall; Vergleich der Mittelwerte nach dem Tauchunfall**



**Abb. 41: Patienten mit und ohne Beschwerdepersistenz, Vergleich der Mittelwerte des „physischen Gesundheitszustandes“ vor und nach dem Tauchunfall; Vergleich der Mittelwerte nach dem Tauchunfall**

### 3.2.8 Übertragbarkeit der Ergebnisse der Fragebögen auf alle eingeschlossenen Patienten

Aufgrund fast identischer relativer Werte der Fragebogenrückläufer und eingeschlossenen Patienten, darf die Stichprobe der Fragebogenrückläufer als repräsentativ für alle eingeschlossenen Patienten angesehen werden.

## 4. Diskussion

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Evaluation der Anwendung einer modifizierten Variante des USNTT-5a zur Behandlung der DCS mit dem Ziel Wirksamkeit und Nebenwirkungen der Therapie aufzuzeigen und ob durch ein optimiertes Monitoring mit regelmäßigem neurologischem Screening allgemein bei der Therapie der DCS gefürchtete Komplikationen zu vermeiden sind.

Ein maßgebliches Element der Untersuchung war die Nutzung und Auswertung des SF-12 Fragebogens. Die Rückläuferquote lag mit 43,1% sehr niedrig, was wahrscheinlich auf den langen Nachuntersuchungszeitraum zurückzuführen ist. Gleichwohl konnten belastbare Ergebnisse aufgrund der Gesamtteilnehmerzahl an der Studie erlangt werden wie unter Punkt 3.2.8 dargestellt.

### 4.1 Wirksamkeit der HBO bei DCS

Die allgemeine Wirksamkeit der HBO bei DCS zur Erreichung von Therapieerfolgen ist praktisch erprobt und anerkannt. So zeigten bereits 1985 Myers et al. die Wirksamkeit der hyperbaren Sauerstofftherapie bei der DCS in 3 Anwendungen auf. Zunächst konnten sie einen 40-jährigen Mann erfolgreich mit dem USNTT-6 behandeln. In den Folgeanwendungen wurde eine 35 jährige Frau und ein 39 jähriger Mann erfolgreich mit dem USNTT-6 behandelt.[63]. In der Folge wurde die Wirksamkeit der HBO zur Behandlung von Dekompressionserkrankungen in mehreren Studien belegt [58, 64-70] und ist seitdem in der Fachliteratur als wirksam anerkannt [21, 41, 50].

Das Outcome der DCS nach Anwendung der HBO in der Variante USNTT-6, dass heißt vollständige Rückbildung der Symptome, wird zwischen 67-75,6% beschrieben [71]. In der vorliegenden Arbeit ist der Behandlungserfolg des angewendeten Therapieschemas USNTT-5a mit 74,2% (n=62) für die eingeschlossenen Patienten vergleichbar.

Einen höheren Therapieerfolg (81,5%) weist eine Arbeit aus dem Jahr 2000 von Elrefaei et al. aus. Sie untersuchte 23 Patienten, die im Rahmen eines Tauchunfalles eine DCS erlitten und mittels HBO behandelt wurden: 61% der eingeschlossenen Patienten wiesen eine DCS Typ II auf. Die Arbeit ist für die hiesige Fragestellung deshalb besonders interessant, da sowohl das Patientenkollektiv, als auch die Verteilung der Entitäten auf DCS Typ I und Typ II ähnlich zur vorliegenden Arbeit sind. Leider findet sich in der Veröffentlichung kein Hinweis auf das angewendete Therapieschema. Es wurde nach dem „US-Navy-Standard“ verfahren, ohne dass ein konkretes Behandlungsschema genannt und mögliche Therapienebenwirkungen erfasst wurden. Dies verringert den Nutzen der zitierten Studie für die hiesige Fragestellung, da ein

Vergleich von Therapievarianten unter Berücksichtigung möglicher Nebenwirkungen nicht möglich ist. Der Therapieerfolg wurde in der zitierten Studie anhand klinischer Manifestationen neurologischer Symptome gemessen.

Durch die Anwendung des SF-12 konnte in der vorliegenden Arbeit aufgezeigt werden, dass sich für die Patienten mit einer DCS Typ II ein signifikant schlechteres Ergebnis ergibt, als für die Patienten mit einer DCS Typ I. Da bei Elrefaei et. Al. ein solches standardisiertes Messverfahren nicht verwendet wurde, darf man den dort dokumentierten hohen Therapieerfolg nicht unkritisch hinnehmen. Auch wurde nichts über vorhandene Nebenwirkungen berichtet, was denkbar erscheinen lässt, dass ein sehr enges Begriffsverständnis des „Therapieerfolges“ gewählt wurde, ohne Nebenwirkungen zu berücksichtigen. Die Arbeit von *Elrefaei et. al.* erscheint aus diesen Gründen nicht geeignet, eine geringere Wirksamkeit der hier geprüften Behandlungsvariante annehmen oder vermuten zu müssen.

Zusammenfassend bedeutet dies für die vorliegend untersuchte Teilfrage des Therapieerfolges, dass sich für die untersuchte Behandlungsmethode (USNTT-5a) jedenfalls kein Nachteil im Therapieerfolg im Vergleich zu anderen Varianten der Behandlung der DCS für den Patienten feststellen lässt.

#### **4.2 Anzahl der notwendigen Therapieeinheiten**

Zu den Auswirkungen der Anzahl notwendiger Therapieeinheiten existiert eine Studie, veröffentlicht im Jahr 2008 von *Kot et al.* Es handelt sich um eine retrospektive Untersuchung von 51 Patienten, die in den Jahren 2003-2007 eine DCS erlitten hatten und mittels HBO therapiert wurden. Hier wurde bei 24 (47,1%) Patienten wurde nach initialer HBO Symptommfreiheit erreicht. Nach Anwendung weiterer Therapieeinheiten erhöhte sich die Zahl der symptomfreien Patienten auf 37 (72,5%). Dabei variierte die Anzahl der zusätzlich angewendeten Therapieeinheiten zwischen 1 bis 20 [67]. Als Therapieschemata wurden USNTT-5 und -6 und in 4 Fällen die verlängerte (modifizierte) USNTT-5 und -6 eingesetzt. Bei jeweils einem Patienten wurde das Therapieschema USNTT-5 um eine anschließende Therapieeinheit mit dem USNTT-6 oder dem „Comex-Schema“ ergänzt. Hierbei sind Rekompessions- und Dekompensionsphasen deutlich länger (Isobare Phase: 3 bar Behandlungsdruck 60 Minuten, Dekompensionsphase 30 min). Dabei wird nicht nur Sauerstoff und Druckluft verabreicht, sondern auch *Heliox* [50% Helium und 50% Sauerstoff]. Darüber hinaus erfolgt die sukzessive Reduktion des Behandlungsdrucks (30 minütlich) bis das Meeresniveau erreicht wird.[28] Der Patient mit anschließender „Comex-Behandlung“

wies persistierende Symptome auf. Bei insgesamt 12 (24%) Patienten verblieben Restsymptome, bei 2 Patienten wurde nach initialer HBO die Diagnose revidiert, da nach Reevaluation der Einschlusskriterien (Risikofaktoren und Symptomatik) keine Dekompressionserkrankung vorlag [67].

Auch bei dieser Studie erfolgte keine Lebensqualitätsbeurteilung mit einem standardisierten Verfahren, wie vorliegend mit dem SF-12-Fragebogen durchgeführt. Aufgrund der bei der vorliegenden Arbeit bei den eingeschlossenen Patienten (n=62) durchgeführten 1 bis 13 Therapieeinheiten ist indes eine Vergleichbarkeit (Teilnehmerzahl und Intervalle) gegeben, die Erkenntnisse zu der Frage der Wirksamkeit des hier geprüften Verfahrens (USNTT-5a) im Vergleich zu den genannten dort verwendeten Verfahren gewinnen ließ bei dem die Therapieeinheiten immer mit einem deutlich höheren Behandlungsdruck durchgeführt wurden, als es bei *Kot et al.* der Fall gewesen ist. Da der Behandlungserfolg vorliegend mit 74,2 % gemessen werden konnte, ist eine (signifikante) Abweichung in der Wirksamkeit bei der hier untersuchten Therapiemethode nicht zu verzeichnen.

#### **4.3 Einfluss des therapiefreien Intervalls auf die Rückbildung der Symptomatik**

Weiterhin wird aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit deutlich, dass das therapiefreie Intervall vermutlich einen Einfluss auf die Beschwerdepersistenz hat. Dies konnte in dieser Arbeit nicht statistisch signifikant belegt werden, aber die relativen Werte könnten hierauf hindeuten. Den Zusammenhang zwischen Unfallereignis und Therapiebeginn beschrieben bereits *Kizer et al.* 1982 und *Ball et al.* in einer Arbeit von 1993. *Kizer* zeigte bei 26 Patienten, dass der Therapieerfolg von einem zeitnahen Therapiebeginn abhängig ist. Die Erfolgsrate lag bei Patienten im Zeitintervall < 24 Stunden bei 84% und > 24 Stunden bei 54% [65, 68]. *Ball et al.* untersuchte in seiner Arbeit zunächst 132 Patienten, die im Zeitraum von 1985 bis 1990 mit einer HBO behandelt wurden. 49 dieser Patienten (mittleres Alter: 27,1) wurden in die Studie eingeschlossen. Die Patienten wurden mithilfe des klinischen *DCS-Severity-Index* (DCSSI) weiter *subklassifiziert*. Je nach ermitteltem Punktwert wurden die Patienten einer milden (1-3 Punkte), moderaten (4-6 Punkte) oder schweren Form (7-10 Punkte) der DCS zugeordnet.[68] Die angewendeten Therapieschemata waren das verlängerte USNTT 6 (n = 28), USNTT 6 (n = 18), USNTT 5 (n = 1) und HBO-45-Schema (n = 2). Bei dem HBO-45-Schema handelt es sich um ein Therapieschema, bei dem 3x 30 Minuten reiner Sauerstoff (Kompression 1,35) appliziert wird. Zwischen den Anwendungen wird für jeweils 5 Minuten nur Raumluft gegeben (Sauerstoffpause). Es

wurde zwischen therapiefreien Intervallen von 0-12 Stunden (Intervall 1), 12-24 Stunden (Intervall 2) und > 24 Stunden (Intervall III) unterschieden. Insgesamt wurden 21 Patienten im Intervall 1, 8 Patienten im Intervall 2 und 20 Patienten in einem Intervall 3 behandelt. Es zeigte sich, dass Patienten mit einem DCSSI < 5, unabhängig von der Dauer des therapiefreien Intervalls in 95% einen Therapieerfolg hatten. Patienten mit einem DCSSI von > 6 hatten eine Erfolgsrate von lediglich 6% und auch wenn das therapiefreie Intervall < 12 Stunden betrug [68]. In der vorliegenden Arbeit wurde keine Subklassifizierung mittels eines *Scoring*-Schemas wie dem DCSSI durchgeführt, sondern die klassische Einteilung in DCS Typ I und Typ II verwendet. Es zeigte sich hier keine Korrelation zwischen Ausprägung der Symptome und Therapieerfolg.

*Pujante Escudero et al.* zeigte 1990 in einer Studie ebenfalls den Zusammenhang zwischen dem therapiefreien Intervall und dem Therapieerfolg. Im Zeitraum von 1969-1986 untersuchte er 121 Patienten (mittleres Alter: 31,5), die eine DCS erlitten hatten. Er zeigte, dass die Erfolgsrate bei Patienten, die in einem Zeitfenster von 6 Stunden nach dem Unfall therapiert wurden höher war, als bei Patienten die außerhalb des Zeitfensters therapiert wurden.[69]

*Tirpitz et al.* untersuchte im Jahr 1996 ebenfalls den Einfluss des therapiefreien Intervalls auf den Behandlungserfolg. Retrospektiv wurden 111 von 117 Patienten in die Studie eingeschlossen, die im Zeitraum von 1975-1995 eine DCS (DCS Typ 1: 43%, DCS Typ 2: 57%) erlitten hatten. Diese Arbeit ist interessant, da bei der Behandlung der Patienten, für die HBO ein Therapieschema (USNTT-5a) angewendet wurde, welches dem in dieser Arbeit verwendeten sehr ähnlich ist. Hier wurde zunächst eine Rekompensation mit einem Behandlungsdruck von 5 bar durchgeführt. In einem Zeitraum von 15 Minuten wurde hier in 3-minütigen Intervallen, jeweils reiner Sauerstoff (FiO<sub>2</sub>: 1,0) und Druckluft (FiO<sub>2</sub>: 0,21) appliziert. *Tirpitz et al.* klassifizierten die therapiefreien Intervalle in 12 Stunden (Intervall 1), 12-24 Stunden (Intervall 2) und größer 24 Stunden (Intervall 3). Die mittlere Anzahl der applizierten Therapieeinheit lag bei 2,7. Der Therapieerfolg betrug im Intervall 1 92%, im Intervall 2 100% und im Intervall 3 72%. Die Autoren schlossen daraus, dass ein Behandlungsbeginn von mehr als 24 Stunden den Erfolg der Therapie verschlechtert. [70] Allerdings wurde in keiner der Arbeiten ein standardisiertes Instrument zur Messung der Lebensqualität benutzt. Es wurden auch keine transcutanen Sauerstoffpartialdrücke gemessen, wie es in dieser Arbeit der Fall war. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass der Therapieerfolg bei einem

Intervall von mehr als 24 Stunden, wenn auch nicht statistisch signifikant, abnahm. Indes lag das therapiefreie Intervall wie unter 3.1.4.2 dargestellt bei der hiesigen Arbeit lediglich bei 5 Patienten (8,1 %) unter 24 Stunden. Bei 12 Patienten (19,4 %) betrug es zwischen 24 und 48 Stunden und bei 45 Patienten (72,3 %) mehr als 48 Stunden. Im Vergleich zu der Studie von *Kizer et. al.*, *Ball et al.* und *Pujante Escudero et al.* konnten auch bei einem therapiefreien Intervall von über 24 Stunden und sogar über 45 Stunden gute Therapieerfolge erreicht werden. Auch unter Berücksichtigung der vorgenannten Studie von Tirpitz et al (Verwendung eines dem hiesigen sehr ähnlichen Therapieschemas) lassen sich offensichtlich mit einem modifizierten Therapieschemata auch nach einem therapiefreien Intervall von mehr als 24 Stunden höhere Erfolgsraten erzielen, als dies z.B. bei *Kizer et al.* der Fall war [65, 70]. Diese Erkenntnis spricht für einen weitaus höheren Nutzen des hier betrachteten Verfahrens für den betroffenen Patienten im Fall der Überschreitung des therapiefreien Intervalls von 24 Stunden.

#### **4.4 Einsatz modifizierter Therapieschemata**

In der Literatur werden die verwendeten Therapieschemata zur Behandlung der DCS *kontrovers* diskutiert. Konsens besteht in der Anwendung der seit den 1960er Jahren etablierten USNTT [70]. Dies entspricht auch den Empfehlungen der GTÜM in der Leitlinie zur Behandlung von Tauchunfällen [21]. Es gibt jedoch auch Arbeiten, die die Wirksamkeit anderer bzw. modifizierter Therapieschemata darstellen. *Ito et al.* konnten 1999 in drei Fällen zeigen, dass Patienten mit einer schweren Rückmarksymptomatik, die Initial nach USNTT6 behandelt wurden, weiterhin unter Symptomen litten. Das therapiefreie Intervall betrug hier 4 Tage. Daraufhin erfolgte die Anwendung des USNTT-7: Hier sind Rekompessions- und Dekompensionsphasen deutlich verlängert. Die isobare Phase wird bei einem Behandlungsdruck von 1,8 bar 12 Stunden oder nach Reevaluation des Patienten auch länger aufrechterhalten. 2 Patienten hatten nach Anwendung des Schemas keine Symptompersistenz mehr, 1 Patient wurde bei Symptompersistenz erneut mit dem USNTT-6 behandelt und zeigte daraufhin keine Symptome mehr [58]. Diese Fallberichte deuten darauf hin, dass bei einem längeren therapiefreien Intervall, die *etablierten* Therapieschemata USNTT 6 zu einer befriedigenden Therapie der DCS nicht ausreichen und deshalb neue Therapiemodelle oder Modifizierungen der etablierten Schemata notwendig sind, wie in der vorliegenden Arbeit untersucht. Weitere Lösungsansätze zur Anwendung anderer Therapieschemata zeigten *Van Liew et al.* 2005 und *Smerz et al.* 2005 in ihren Veröffentlichungen. *Smerz, et al.* zeigten in ihrer Arbeit, dass die Therapieschemata USNTT-5, USNTT-6 und 6A

häufig nicht den gewünschten Therapieerfolg bei der Behandlung der DCS bewirken [64]. Deshalb wurden im Zeitraum von 1983- 2003 1285 Patienten retrospektiv untersucht, die mit den unterschiedlichsten Therapieschemata, unter anderem den *Hawaiian-Treatment-Center (HTC) Treatment-Tables (TT)*, behandelt worden waren: Im Einzelnen sind diese: TT-280 (280 feet-of-seawater [fsw] = 9,61bar), TT-220 (7,77 bar), TT-160 (5,93 bar) und TT-60 (2,82 bar). Bis zum Erreichen des maximalen Druckes wird dem Patienten bei allen Therapieschemata Druckluft appliziert. Bis auf das TT-60 verwenden alle anderen Schemata *Nitrox* (Stickstoff-Sauerstoff-Gemisch) welches nach Erreichen des Behandlungsdruckes *appliziert* wurde. In den TT-280 und TT-220 *Nitrox* 65 für 15 Minuten, im TT-160 *Nitrox* 50 für 30 Minuten. Im TT-60 wird reiner Sauerstoff appliziert (3x 20 Minuten mit 2x Druckluftpause für 5 Minuten). Die Therapieschemata bauen aufeinander auf, [64] Auch hier wurde ein „Score“ *implementiert*, der wie der DCSSI in anderen Arbeiten, die Schwere der DCS zu standardisieren versucht. Dieser wurde vor und nach der Therapie retrospektiv erhoben. [64] Bei Behandlung nach TT-60, welcher dem in der Arbeit verwendeten Therapieschema sehr ähnlich ist, lag der Therapieerfolg bei 100%. Auch die anderen Therapieschemata zeigten hohe Erfolgsraten von mehr als 90% Symptomremission. Mögliche Nebenwirkungen und 1 Todesfall in der Untersuchung wurden nicht weiter diskutiert [64]. Durchschnittlich wurden 1,3-2,4 Therapieeinheiten durchgeführt. 74,5% sprachen bereits bei 2 oder weniger Therapieeinheiten [64] auf die Therapie an. Entscheidend für den Therapieerfolg war in dieser Arbeit nicht das therapiefreie Intervall, sondern das Alter der Patienten und die Schwere der DCS [64]. Auch in dieser Arbeit konnte bereits belegt werden, dass der Therapieerfolg mit modifizierten Therapieschemata, die deutlich höhere Sauerstoffpartialdrücke erlauben mit 74,5% deutlich höher ist, als in der Arbeit von Kizer *et al.*

Die zurückhaltende Empfehlung zum Einsatz modifizierter Therapieschemata zur Behandlung von Tauchunfällen liegt in der Vermeidung von Nebenwirkungen und der damit verbundenen Versorgung. [24]. Zwei Veröffentlichungen von Louge *et al.* aus dem Jahr 2001 und Heyboer *et al.*, 2014 bestätigen diese Hypothese [51, 72]. Louge *et al.* berichten in einer Fallbeschreibung von einem 42-jährigen Patienten, der nach Anwendung des USNTT-7 ein „Acute Respiratory Distress Syndrome“ (ARDS) erlitt. Die Folge war ein fibrotischer Umbau der Lunge, die zum Tod des Patienten führte [51]. Drastische Nebenwirkungen wurden bei Anwendung des verwendeten Therapieschemas in der vorliegenden Arbeit nicht beobachtet. Lediglich 3 Patienten

(4,8%) zeigten Nebenwirkungen wie Kribbelparästhesien oder Erkältungssymptomen. Ursächlich für den geringen Anteil an schwerwiegenden Nebenwirkungen ist die strenge Indikationsstellung, insbesondere bei radiologisch vorbekannten Lungenbefunden. Zusätzlich erfolgte ein erweitertes Vitalzeichenmonitoring mit kontinuierlichem transkutan gemessenem Sauerstoffpartialdruck. Dies lässt den Schluss zu, dass angesichts der vorliegend untersuchten Fallzahl (62 Patienten) ein erweitertes Vitalzeichenmonitoring geeignet ist, die befürchteten schwerwiegenden Nebenwirkungen zu unterbinden, sodass hierin kein schlagkräftiges Argument liegen sollte, die Therapievariante trotz ihres höheren Nutzens insbesondere bei einem therapiefreien Intervall von über 24 Stunden nicht anzuwenden.

*Heyboer et al.* untersuchten 2014, in einer retrospektiven Arbeit, 931 Patienten, die an einer Universitätsklinik mit HBO behandelt wurden. Er stellte fest, dass mit steigendem Behandlungsdruck und Behandlungsdauer, die Inzidenz von Krampfanfällen anstieg. Die Inzidenz lag bei einem Behandlungsdruck bis 2,0 bar bei 0, bei 2,5 bar bei 15 und bei 2,8 bar bereits bei 51 Krampfanfällen pro 10000 Behandlungen [72]. Diese Untersuchung belegt den zurückhaltenden Einsatz von Therapieschemata, die deutlich höhere Behandlungsdrücke erfordern. Kontrovers zu dieser Untersuchung sind in den Studien von *Tirpitz et al.*, *Ito et al.* sowie auch in der vorliegenden Arbeit keine Krampfanfälle aufgetreten. Auch der beschriebene Todesfall von *Smerz et al.* ist nicht sicher auf eine unerwünschte Reaktion auf das angewendete Therapieschema zurückzuführen [58, 64]. Zu dem beschriebenen erweiterten Vitalzeichenmonitoring sollte man, (insbesondere) bei modifizierten Therapieschemata eine kontinuierliche transcutane Sauerstoffpartialdruckmessung durchführen um Hyperoxie zu vermeiden.

Diese Arbeit weist aber im Vergleich zu den anderen diskutierten Studien ein Alleinstellungsmerkmal auf. Durch die Auswertung der „SF-12-Fragebögen“ ist erstmals eine Unterteilung in physische und psychische Beschwerden möglich. Ursächlich für psychische Beschwerden nach einem Tauchunfall könnte eine Traumatisierung des Patienten sein, die sich negativ auf die Lebensqualität auswirkt [74]. Psychische Beschwerden könnten aber auch Folge eines neurologisch-organisch bedingten Schadens, wie z.B. bei der DCS Typ II, sein. Interessanterweise hat sich das untersuchte Patientenkollektiv in dem „psychischem Gesundheitszustand“ teils verbessert. Allerdings können psychosomatische Beschwerden diesen Umstand verschleiern. Diese Hypothese sollte zukünftig in weiteren Studien untersucht werden.

#### 4.5 Schlussfolgerung

Im Gesamtstudienkollektiv ist der Therapieerfolg mit 73 % durchaus mit dem anderer Arbeiten wie der von *Elrefaei et al.* vergleichbar [66].

Das kleinere Patientenkollektiv liegt zum einen an der geringen Inzidenz der DCS als auch an der niedrigen Rücklaufquote der Fragebögen trotz Nachverfolgungsmaßnahmen. Dennoch konnte gezeigt werden, dass sich die Ergebnisse der Gruppe der „Fragebogenteilnehmer“ aufgrund der fast identischen relativen Werte auf die Gesamtpatientenzahl übertragen lässt. Weiter führende Korrelationen und Regressionsanalysen führen aufgrund der geringen Fallzahl nicht zu validen signifikanten Aussagen [73]. Diese Arbeit zeigt, dass das angewendete Therapieschema wirksam und bei gleicher Indikationsstellung und entsprechendem Monitoring sicher ist. Gestützt wird das Ergebnis durch die Auswertung des „SF12-Fragebogens“ zur Feststellung der Lebensqualität, die keine signifikanten Unterschiede zum Zeitpunkt „vor dem Tauchunfall“ und „nach dem Tauchunfall“ zeigt. Das Nutzen-Risiko-Verhältnis liegt eindeutig auf Seite des Nutzens. Zur weiteren Evaluation sollten weitere prospektive Studien mit besonderer Berücksichtigung der psychischen Traumatisierung nach einem Tauchunfall folgen. Modifizierte Therapieschemata mit verlängertem Intervall sind in kleinen Kollektiven - wie der vorliegenden Arbeit - sicher und sollten zu einer Modifikation der gängigen Empfehlungen in den Leitlinien anregen. Weitere, größere, prospektive randomisierte kontrollierte Studien sollten folgen.

## 5. Literatur

1. M. Lawrence, M.D., ed. *Scuba Diving Explained: Questions and Answers on Physiology and Medical Aspects of Scuba Diving*. 1997.
2. Silbernagl, S. and F. Lang, *Taschenatlas der Pathophysiologie*. 2005: Thieme.
3. Ehm, O.F., *Tauchen noch sicherer !: Leitfaden der Tauchmedizin für Sporttaucher, Berufstaucher und Ärzte ; 15 Tabellen*. 1993: Müller Rüslikon.
4. Muth, C.M., E.S. Shank, and B. Larsen, [Severe diving accidents: physiopathology, symptoms, therapy]. *Anaesthesist*, 2000. **49**(4): p. 302-16.
5. Schroder, S., H. Lier, and S. Wiese, [Diving accidents. Emergency treatment of serious diving accidents]. *Anaesthesist*, 2004. **53**(11): p. 1093-102.
6. Gardette, B., [Decompression of deep divers]. *Schweiz Z Sportmed*, 1989. **37**(2): p. 69-73; discussion 99-102.
7. Navy, U.S.D. and N.S.S. Command, *U.S. Navy Diving Manual (Revision 6, April 2008)*. 2012: Military Studies Press.
8. Joiner, J.T. and N.D. Program, *NOAA Diving Manual*. 2001: Best Publishing Company.
9. Malberg, H., *Meteorologie und Klimatologie: Eine Einführung*. 2013: Springer Berlin Heidelberg.
10. Oczenski, W., *Atmen - Atemhilfen: Atemphysiologie und Beatmungstechnik*. 2012: Thieme.
11. König, P., *Lehrbuch für Forschungstaucher: Manuskript einer Vorlesung am Institut fuer Meereskunde der Universtät Hamburg*. 2006: Peter König.
12. Paulev, P.E. and G. Zubieta-Calleja, *High altitude diving depths*. *Res Sports Med*, 2007. **15**(3): p. 213-23.
13. Sahni, T.K., et al., *High altitude dives from 7000 to 14,200 feet in the Himalayas*. *Undersea Biomed Res*, 1991. **18**(4): p. 303-16.
14. Lin, Y.C., *Applied physiology of diving*. *Sports Med*, 1988. **5**(1): p. 41-56.
15. Rintelen, H., C. Hick, and A. Hick, *Intensivkurs Physiologie: mit Zugang zum Elsevier-Portal*. 2011: Elsevier Health Sciences Germany.
16. Neitzel, C. and K. Ladehof, *Taktische Medizin: Notfallmedizin und Einsatzmedizin*. 2015: Springer Berlin Heidelberg.
17. Seckin, M., et al., *Focal status epilepticus induced by hyperbaric oxygen therapy*. *Neurologist*, 2011. **17**(1): p. 31-3.
18. Holzapfel, R.B., *Praxis der Tauchmedizin: Physiologie - Pathologie - Therapie*. 1993: Thieme.

19. Piepho, T., et al., [*Oxygen therapy in diving accidents*]. Anaesthesist, 2007. **56**(1): p. 44-52.
20. Oldenhuizing, J., *Open Water Scuba Diver*: S.c.u.b.a. Ag.
21. Juttner, B., et al., [*Diagnosis and treatment of diving accidents. New German guidelines for diving accidents 2014-2017*]. Anaesthesist, 2015. **64**(6): p. 463-8.
22. Muth, C.M., et al., *Diving and drowning accidents*. Notfall und Rettungsmedizin, 2013. **16**(4): p. 309-323.
23. Winkler, B., C.M. Muth, and T. Piepho, [*Hyperbaric therapy and diving medicine - diving medicine - present state and prospects*]. Anasthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther, 2015. **50**(10): p. 638-45; quiz 646.
24. Wherrett, C.G., R.J. Mehran, and M.A. Beaulieu, *Cerebral arterial gas embolism following diagnostic bronchoscopy: delayed treatment with hyperbaric oxygen*. Can J Anaesth, 2002. **49**(1): p. 96-9.
25. Tetzlaff, K., et al., *Risk factors for pulmonary barotrauma in divers*. Chest, 1997. **112**(3): p. 654-9.
26. Lier, H., S. Schroeder, and R. Hering, [*Patent foramen ovale: an underrated risk for divers?*]. Dtsch Med Wochenschr, 2004. **129**(1-2): p. 27-30.
27. Anzola, G.P., *Clinical impact of patent foramen ovale diagnosis with transcranial Doppler*. Eur J Ultrasound, 2002. **16**(1-2): p. 11-20.
28. Scotland, N. *Decompression illness*. [http://www.sdm.scot.nhs.uk/decompression\\_illness/](http://www.sdm.scot.nhs.uk/decompression_illness/) 21 August , 2004.
29. Cantais, E., et al., *Right-to-left shunt and risk of decompression illness with cochleovestibular and cerebral symptoms in divers: case control study in 101 consecutive dive accidents*. Crit Care Med, 2003. **31**(1): p. 84-8.
30. Pokan, R., et al., *Kompendium der Sportmedizin: Physiologie, Innere Medizin und Pädiatrie*. 2013: Springer Vienna.
31. Vann, R.D., et al., *Decompression illness*. Lancet, 2011. **377**(9760): p. 153-64.
32. Siedenburger, J., [*Emergencies in long distance flights*]. Internist (Berl), 2002. **43**(12): p. 1518-9, 1522-8.
33. Falke, K.J., et al., *Seal lungs collapse during free diving: evidence from arterial nitrogen tensions*. Science, 1985. **229**(4713): p. 556-8.
34. Li, Y., et al., [*Clinical characterization and treatment of acute decompression sickness after group repeated dives*]. Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi, 2007. **25**(8): p. 476-9.
35. Bennett, M.H., et al., *Recompression and adjunctive therapy for decompression illness*. Cochrane Database Syst Rev, 2007(2): p. CD005277.

36. Butler, B.D., et al., *Hyperbaric oxygen pre-breathe modifies the outcome of decompression sickness*. Undersea Hyperb Med, 2006. **33**(6): p. 407-17.
37. Bennett, M.H., et al., *Recompression and adjunctive therapy for decompression illness: a systematic review of randomized controlled trials*. Anesth Analg, 2010. **111**(3): p. 757-62.
38. Bennett, M., S. Mitchell, and A. Dominguez, *Adjunctive treatment of decompression illness with a non-steroidal anti-inflammatory drug (tenoxicam) reduces compression requirement*. Undersea Hyperb Med, 2003. **30**(3): p. 195-205.
39. Buch, D.A., et al., *Cigarette smoking and decompression illness severity: a retrospective study in recreational divers*. Aviat Space Environ Med, 2003. **74**(12): p. 1271-4.
40. Frey, G., et al., *[Hyperbaric oxygenation. An area for the anesthetist?]*. Anaesthesist, 1998. **47**(4): p. 269-89.
41. C. Haltern, U.P.F.S., A.F.E. Rump, R.Rossaint, *Hyperbare Oxygenationstherapie (HBO): eine Standortbestimmung*. Anästhesiologie, Intensivmedizin, Notfallmedizin, Schmerztherapie, 2000. **35**: p. 487-502.
42. Neuman, T.S. and S.R. Thom, *Physiology and Medicine of Hyperbaric Oxygen Therapy*. 2008: Saunders/Elsevier.
43. Boerema, I., et al., *[Life without blood]*. Ned Tijdschr Geneesk, 1960. **104**: p. 949-54.
44. Neuman, T.S., Thom, S. R., *Physiology and Medicine of hyperbaric Oxygen Therapy*. 1 ed. 2008: Saunders. 768.
45. Moon, R.E. and E.M. Camporesi, *Hyperbaric oxygen therapy: from the nineteenth to the twenty-first century*. Respir Care Clin N Am, 1999. **5**(1): p. 1-5.
46. Annette Melhedegaard Thomsen, *The tcpO2 Handbook*. 2008, Bronhoj, Denmark: Radiometer Medical ApS.
47. Striebel, H.W., *Die Anästhesie: Band I Grundlagen - Formen der Allgemeinanästhesie - Lokal- und Regionalanästhesie - Besonderheiten - Narkoseprobleme Band II Nebenerkrankungen - Fachspezifische Anästhesie - Aufwachraum - Lebensrettende Sofortmaßnahmen - Anhang*. 2013: Schattauer.
48. Wiese, S., et al., *[Hyperbaric oxygenation: characteristics of intensive care and emergency therapy]*. Anaesthesist, 2006. **55**(6): p. 693-705.
49. Stucker, M., *Transcutaneous measurement of oxygen and carbon dioxide – process engineering and fields of application*. Phlebologie, 2000. **29**: p. 81-91.
50. Jaeger, K., B. Juttner, and W. Franko, *[Hyperbaric oxygen therapy--options and limitations]*. Anasthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther, 2002. **37**(1): p. 38-42.

51. Louge, P., E. Cantais, and B. Palmier, [*Acute respiratory distress syndrome after prolonged hyperbaric oxygen therapy: a case of pulmonary oxygen toxicity?*]. *Ann Fr Anesth Reanim*, 2001. **20**(6): p. 559-62.
52. Strelow, H., *Therapie in einer Druckkammer: Hyperbare Sauerstofftherapie (HBO)- Grundlagen, Indikationen und Forschung*. *Praktische Arbeitsmedizin*, 2009. **16**: p. 38-41.
53. Sivertsen, W., J. Risberg, and G. Norgard, [*Patent foramen ovale and decompression illness in divers*]. *Tidsskr Nor Laegeforen*, 2010. **130**(8): p. 834-8.
54. Beckett, A. and M.F. Kordick, *Risk factors for dive injury: a survey study*. *Res Sports Med*, 2007. **15**(3): p. 201-11.
55. Gardette, B., *Correlation between decompression sickness and circulating bubbles in 232 divers*. *Undersea Biomed Res*, 1979. **6**(1): p. 99-107.
56. Muth, C.M., A. Kemmer, and W. Weslau, [*Decompression injuries*]. *MMW Fortschr Med*, 2005. **147**(27-28): p. 34-5.
57. Katsenelson, K., et al., *Hyperbaric oxygen pretreatment according to the gas micronuclei denucleation hypothesis reduces neurologic deficit in decompression sickness in rats*. *J Appl Physiol*, 2009. **107**(2): p. 558-63.
58. Ito, M., et al., *Three cases of spinal decompression sickness treated by U.S. Navy Treatment Table 7*. *Aviat Space Environ Med*, 1999. **70**(2): p. 141-5.
59. James, P.B., *The treatment of decompression sickness*. *Schweiz Z Sportmed*, 1989. **37**(2): p. 109-14; discussion 124-30.
60. Hencke, J., *Transcutane Sauerstoffpartialdrücke und Letalität in der Behandlung von nekrotisierenden Weichteilinfektionen*. *Caisson*, 1999. **14**(3).
61. Bengel, J., M. Wirtz, and C. Zwingmann, *Diagnostische Verfahren in der Rehabilitation*. 2008: Hogrefe Verlag.
62. Bullinger, M. and I. Kirchberger, *SF-36-Fragebogen zum Gesundheitszustand: Handanweisung*. 1998: Hogrefe, Verlag für Psychologie.
63. Myers, R.A. and P. Bray, *Delayed treatment of serious decompression sickness*. *Ann Emerg Med*, 1985. **14**(3): p. 254-7.
64. Smerz, R.W., R.K. Overlock, and H. Nakayama, *Hawaiian deep treatments: efficacy and outcomes, 1983-2003*. *Undersea Hyperb Med*, 2005. **32**(5): p. 363-73.
65. Kizer, K.W., *Delayed treatment of dysbarism: a retrospective review of 50 cases*. *JAMA*, 1982. **247**(18): p. 2555-8.
66. Elrefaei, J.M., *Management of decompression sickness in Jordan*. *East Mediterr Health J*, 2000. **6**(1): p. 93-9.

67. Kot, J., et al., *Recompression treatment for decompression illness: 5-year report (2003-2007) from National Centre for Hyperbaric Medicine in Poland*. Int Marit Health, 2008. **59**(1-4): p. 69-80.
68. Ball, R., *Effect of severity, time to recompression with oxygen, and re-treatment on outcome in forty-nine cases of spinal cord decompression sickness*. Undersea Hyperb Med, 1993. **20**(2): p. 133-45.
69. Pujante Escudero, A.P., J.M. Inoriza Belzunce, and A. Viqueira Caamano, *[121 cases of decompression disease]*. Med Clin (Barc), 1990. **94**(7): p. 250-4.
70. Tirpitz, D., *Verzögerte Behandlung von Dekompressions-Erkrankungen*. Caisson, 1996. **13**(4): p. 138-145.
71. Juttner, B. and K. Tetzlaff, *[Hyperbaric therapy and diving medicine - hyperbaric therapy part 1: evidence-based emergency care]*. Anasthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther, 2015. **50**(10): p. 618-25; quiz 626.
72. Heyboer, M., 3rd, et al., *Seizure incidence by treatment pressure in patients undergoing hyperbaric oxygen therapy*. Undersea Hyperb Med, 2014. **41**(5): p. 379-85.
73. Urban, D. and J. Mayerl, *Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung*. 2011: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
74. Hausmann, C., *Notfallpsychologie und Traumabewältigung: ein Handbuch*. 2010: Facultas.wuv.

## 6. Anhang

### 6.1 Fragebogen zur Komplettierung der Tauchanamnese

#### Fragebogen zur Ihrer Taucherfahrung und Tauchunfall

*In diesem Fragebogen geht es um Ihre Erfahrung im Tauchsport, sowie den Folgen Ihres Tauchunfalls.*

*Bitte beantworten Sie jede der Fragen, indem Sie bei den Antwortmöglichkeiten das ankreuzen, das am besten auf Sie zutrifft (Bitte nur 1 Auswahl treffen) bzw. die Freitextfelder kurz ausfüllen.*

Seit welchem Jahr tauchen sie?

|  |
|--|
|  |
|--|

Sie sind...

|                                             |                                           |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Freizeittaucher<br><input type="checkbox"/> | Berufstaucher<br><input type="checkbox"/> |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------|

Welchen Ausbildungsstand haben Sie?

|                                   |                                        |                                         |                                         |
|-----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Keine<br><input type="checkbox"/> | Open Water<br><input type="checkbox"/> | Advanced OW<br><input type="checkbox"/> | Dive Master<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|

Wie viele Tauchgänge haben Sie vor Ihrem Tauchunfall absolviert?

|                                  |                                     |                                     |                                      |                                       |                                  |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| < 10<br><input type="checkbox"/> | 10 – 20<br><input type="checkbox"/> | 20 – 50<br><input type="checkbox"/> | 50 – 100<br><input type="checkbox"/> | 100 – 500<br><input type="checkbox"/> | >500<br><input type="checkbox"/> |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|

Wann war Ihre letzte Tauchtauglichkeitsuntersuchung vor dem Tauchunfall

|                                      |                                      |                                     |                                 |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| < 1 Jahr<br><input type="checkbox"/> | <3 Jahre<br><input type="checkbox"/> | >3Jahre<br><input type="checkbox"/> | nie<br><input type="checkbox"/> |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|

Wie lange waren Sie nach dem Tauchunfall Arbeitsunfähig?

|                                       |                                      |                                        |                                         |                                     |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| Gar nicht<br><input type="checkbox"/> | < 5 Tage<br><input type="checkbox"/> | 6- 15 Tage<br><input type="checkbox"/> | 16- 30 Tage<br><input type="checkbox"/> | >1Monat<br><input type="checkbox"/> |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|

Wann haben Sie nach dem Tauchunfall mit dem Tauchen wieder angefangen?

|                                                   |                                       |                                        |                                       |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| Tauchen<br>aufgegeben<br><input type="checkbox"/> | <3 Monate<br><input type="checkbox"/> | 3-6 Monate<br><input type="checkbox"/> | >6 Monate<br><input type="checkbox"/> |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|

Haben Sie erneut eine Dekompressionserkrankung erlitten?

|                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Ja<br><input type="checkbox"/> | Nein<br><input type="checkbox"/> |
|--------------------------------|----------------------------------|

Haben Sie im Anschluss an die Hyperbare Sauerstofftherapie eine Weiterbehandlung erhalten?

|                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Ja<br><input type="checkbox"/> | Nein<br><input type="checkbox"/> |
|--------------------------------|----------------------------------|

Wenn ja, welche?

---

Haben Sie noch Beschwerden, als Folge des Tauchunfalls?

|                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Ja<br><input type="checkbox"/> | Nein<br><input type="checkbox"/> |
|--------------------------------|----------------------------------|

Wenn ja, welcher Art? (z.B. Schwindel, Lähmungserscheinungen, o.ä.)

---

## 6.2 Modifizierter „SF-12-Fragebogen“ zur Feststellung des allgemeinen Gesundheitszustandes

### Fragebogen zum allgemeinen Gesundheitszustand

*In diesem Fragebogen geht es um Ihre Beurteilung Ihres Gesundheitszustandes. Der Bogen ermöglicht es, im Zeitverlauf nachzuvollziehen, wie Sie sich fühlen und wie Sie im Alltag zurechtkommen.*

*Bitte beantworten Sie jede der Fragen, indem Sie bei den Antwortmöglichkeiten „vor dem Tauchunfall“ und „heute“ das ankreuzen, das am besten auf Sie zutrifft (Bitte nur 1 Auswahl treffen).*

Wie würden Sie Ihren Gesundheitszustand im Allgemeinen beschreiben?

„vor dem Tauchunfall“

|                                           |                                      |                                 |                                         |                                      |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| Ausgezeichnet<br><input type="checkbox"/> | Sehr gut<br><input type="checkbox"/> | Gut<br><input type="checkbox"/> | Weniger gut<br><input type="checkbox"/> | Schlecht<br><input type="checkbox"/> |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|

„heute“

|                                           |                                      |                                 |                                         |                                      |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| Ausgezeichnet<br><input type="checkbox"/> | Sehr gut<br><input type="checkbox"/> | Gut<br><input type="checkbox"/> | Weniger gut<br><input type="checkbox"/> | Schlecht<br><input type="checkbox"/> |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|

*Im Folgenden sind einige Tätigkeiten beschrieben, die Sie vielleicht an einem normalen Tag ausüben*

Sind Sie durch Ihren derzeitigen Gesundheitszustand bei diesen Tätigkeiten eingeschränkt. Wenn ja, wie stark?

mittelschwere Tätigkeiten (z.B. einen Tisch verschieben, staubsaugen, kegeln, Golf spielen)

„vor dem Tauchunfall“

|                                                     |                                                     |                                                   |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Ja, stark eingeschränkt<br><input type="checkbox"/> | Ja, etwas eingeschränkt<br><input type="checkbox"/> | Nein, überhaupt nicht<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|

„Heute“

|                                                     |                                                     |                                                   |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Ja, stark eingeschränkt<br><input type="checkbox"/> | Ja, etwas eingeschränkt<br><input type="checkbox"/> | Nein, überhaupt nicht<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|

mehrere Treppenabsätze steigen

**„vor dem Tauchunfall“**

|                                                     |                                                     |                                                   |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Ja, stark eingeschränkt<br><input type="checkbox"/> | Ja, etwas eingeschränkt<br><input type="checkbox"/> | Nein, überhaupt nicht<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|

**Heute**

|                                                     |                                                     |                                                   |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Ja, stark eingeschränkt<br><input type="checkbox"/> | Ja, etwas eingeschränkt<br><input type="checkbox"/> | Nein, überhaupt nicht<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|

Hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen bzw. vor dem Tauchunfall aufgrund Ihrer körperlichen Gesundheit irgendwelche Schwierigkeiten bei der Arbeit oder anderen alltäglichen Tätigkeiten im Beruf bzw. zu Hause?

Ich habe weniger geschafft als ich wollte

**„vor dem Tauchunfall“**

|                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Ja<br><input type="checkbox"/> | Nein<br><input type="checkbox"/> |
|--------------------------------|----------------------------------|

**„in den vergangenen 4 Wochen“**

|                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Ja<br><input type="checkbox"/> | Nein<br><input type="checkbox"/> |
|--------------------------------|----------------------------------|

Ich konnte nur bestimmte Dinge tun

**„vor dem Tauchunfall“**

|                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Ja<br><input type="checkbox"/> | Nein<br><input type="checkbox"/> |
|--------------------------------|----------------------------------|

**„in den vergangenen 4 Wochen“**

|                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Ja<br><input type="checkbox"/> | Nein<br><input type="checkbox"/> |
|--------------------------------|----------------------------------|

Hatten Sie in den vergangenen 3 Wochen bzw. vor dem Tauchunfall aufgrund seelischer Probleme irgendwelche Schwierigkeiten bei der Arbeit oder anderen alltäglichen Tätigkeiten im Beruf bzw. zu Hause (z.B. weil Sie sich niedergeschlagen oder ängstlich fühlten)?

Ich habe weniger geschafft als ich wollte

„vor dem Tauchunfall“

|                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Ja<br><input type="checkbox"/> | Nein<br><input type="checkbox"/> |
|--------------------------------|----------------------------------|

„in den vergangenen 3 Wochen“

|                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Ja<br><input type="checkbox"/> | Nein<br><input type="checkbox"/> |
|--------------------------------|----------------------------------|

Ich konnte nicht so sorgfältig wie üblich arbeiten

„vor dem Tauchunfall“

|                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Ja<br><input type="checkbox"/> | Nein<br><input type="checkbox"/> |
|--------------------------------|----------------------------------|

„in den vergangenen 3 Wochen“

|                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Ja<br><input type="checkbox"/> | Nein<br><input type="checkbox"/> |
|--------------------------------|----------------------------------|

Inwieweit haben die Schmerzen Sie in den vergangenen 4 Wochen bzw. vor dem Tauchunfall bei der Ausübung Ihrer Alltagstätigkeiten zu Hause und im Beruf behindert?

„vor dem Tauchunfall“

|                                             |                                          |                                   |                                      |                                  |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Überhaupt nicht<br><input type="checkbox"/> | Ein bisschen<br><input type="checkbox"/> | Mäßig<br><input type="checkbox"/> | Ziemlich<br><input type="checkbox"/> | Sehr<br><input type="checkbox"/> |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|

„in den vergangenen 4 Wochen“

|                                             |                                          |                                   |                                      |                                  |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Überhaupt nicht<br><input type="checkbox"/> | Ein bisschen<br><input type="checkbox"/> | Mäßig<br><input type="checkbox"/> | Ziemlich<br><input type="checkbox"/> | Sehr<br><input type="checkbox"/> |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|

*In diesen Fragen geht es darum, wie Sie sich fühlen und wie es Ihnen in den vergangenen 4 Wochen bzw. vor dem Tauchunfall gegangen ist. (Bitte kreuzen Sie in jeder Zeile die Zahl an, die Ihrem Befinden am ehesten entspricht)*

Wie oft waren Sie in den vergangenen 4 Wochen bzw. vor dem Tauchunfall

.....ruhig und gelassen?

**„vor dem Tauchunfall“**

|                                   |                                      |                                          |                                      |                                    |                                 |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Immer<br><input type="checkbox"/> | Meistens<br><input type="checkbox"/> | Ziemlich oft<br><input type="checkbox"/> | Manchmal<br><input type="checkbox"/> | Selten<br><input type="checkbox"/> | Nie<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|

**„in den vergangenen 4 Wochen“**

|                                   |                                      |                                          |                                      |                                    |                                 |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Immer<br><input type="checkbox"/> | Meistens<br><input type="checkbox"/> | Ziemlich oft<br><input type="checkbox"/> | Manchmal<br><input type="checkbox"/> | Selten<br><input type="checkbox"/> | Nie<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|

.....voller Energie?

**„vor dem Tauchunfall“**

|                                   |                                      |                                          |                                      |                                    |                                 |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Immer<br><input type="checkbox"/> | Meistens<br><input type="checkbox"/> | Ziemlich oft<br><input type="checkbox"/> | Manchmal<br><input type="checkbox"/> | Selten<br><input type="checkbox"/> | Nie<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|

**„in den vergangenen 4 Wochen“**

|                                   |                                      |                                          |                                      |                                    |                                 |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Immer<br><input type="checkbox"/> | Meistens<br><input type="checkbox"/> | Ziemlich oft<br><input type="checkbox"/> | Manchmal<br><input type="checkbox"/> | Selten<br><input type="checkbox"/> | Nie<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|

.....entmutigt und traurig?

**„vor dem Tauchunfall“**

|                                   |                                      |                                          |                                      |                                    |                                 |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Immer<br><input type="checkbox"/> | Meistens<br><input type="checkbox"/> | Ziemlich oft<br><input type="checkbox"/> | Manchmal<br><input type="checkbox"/> | Selten<br><input type="checkbox"/> | Nie<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|

**„in den vergangenen 4 Wochen“**

|                                   |                                      |                                          |                                      |                                    |                                 |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Immer<br><input type="checkbox"/> | Meistens<br><input type="checkbox"/> | Ziemlich oft<br><input type="checkbox"/> | Manchmal<br><input type="checkbox"/> | Selten<br><input type="checkbox"/> | Nie<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|

Wie häufig haben Ihre körperliche Gesundheit oder seelischen Probleme in den vergangenen 4 Wochen bzw. vor dem Tauchunfall Ihre Kontakte zu anderen Menschen (Besuche bei Freunden, Verwandten usw.) beeinträchtigt?

**„vor dem Tauchunfall“**

|                                   |                                      |                                      |                                    |                                 |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Immer<br><input type="checkbox"/> | Meistens<br><input type="checkbox"/> | Manchmal<br><input type="checkbox"/> | Selten<br><input type="checkbox"/> | Nie<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|

**„in den vergangenen 4 Wochen“**

|                                   |                                      |                                      |                                    |                                 |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Immer<br><input type="checkbox"/> | Meistens<br><input type="checkbox"/> | Manchmal<br><input type="checkbox"/> | Selten<br><input type="checkbox"/> | Nie<br><input type="checkbox"/> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|

### 6.3 Korrelationen der Fragebogenteilnehmer mit Beschwerdepersistenz und Mittelwerten des „SF-12 Fragebogens“

| <b>Beschwerdepersistenz: JA und NEIN (n=27)</b> |                                       |                                         |             |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|
|                                                 | MW<br>(nach dem<br>Tauchunfall)<br>JA | MW<br>(nach dem<br>Tauchunfall)<br>NEIN | p-Wert      |
| Gesamtscore                                     | 37,6                                  | 41,9                                    | <b>0,04</b> |
| Allgemeines Wohlbefinden                        | 3,4                                   | 4,9                                     | 0,1         |
| Physisches Wohlbefinden                         | 16,4                                  | 18,6                                    | <b>0,01</b> |
| Psychisches Wohlbefinden                        | 13,3                                  | 14,5                                    | 0,3         |
| Physisches & Psychisches Wohlbefinden           | 4,3                                   | 4                                       | 0,09        |

| <b>Beschwerdepersistenz: JA (n=9)</b> |                                |                                 |                                |                                 |             |
|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|
|                                       | MW<br>(vor dem<br>Tauchunfall) | MW<br>(nach dem<br>Tauchunfall) | SD<br>(vor dem<br>Tauchunfall) | SD<br>(nach dem<br>Tauchunfall) | p-<br>Wert  |
| Gesamtscore                           | 41,8                           | 37,6                            | 1,8                            | 6,8                             | 0,09        |
| Allgemeines Wohlbefinden              | 4,3                            | 3,4                             | 0,7                            | 1,1                             | 0,05        |
| Physisches Wohlbefinden               | 18,8                           | 16,4                            | 0,7                            | 2,6                             | <b>0,02</b> |
| Psychisches Wohlbefinden              | 13,8                           | 13,3                            | 2,8                            | 3,7                             | 0,8         |
| Physisches & Psychisches Wohlbefinden | 4,9                            | 4,3                             | 0,3                            | 1,4                             | 0,2         |

| <b>Beschwerdepersistenz: NEIN (n=18)</b>    |                                |                                 |                                |                                 |            |
|---------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------|
|                                             | MW<br>(vor dem<br>Tauchunfall) | MW<br>(nach dem<br>Tauchunfall) | SD<br>(vor dem<br>Tauchunfall) | SD<br>(nach dem<br>Tauchunfall) | p-<br>Wert |
| Gesamtscore                                 | 41,3                           | 41,9                            | 3,5                            | 3,4                             | 0,6        |
| Allgemeines<br>Wohlbefinden                 | 3,9                            | 4,9                             | 0,8                            | 0,7                             | 0,7        |
| Physisches<br>Wohlbefinden                  | 18,4                           | 18,6                            | 1,6                            | 1,5                             | 0,7        |
| Psychisches<br>Wohlbefinden                 | 14,1                           | 14,5                            | 3,1                            | 2,5                             | 0,7        |
| Physisches &<br>Psychisches<br>Wohlbefinden | 3,9                            | 4                               | 0,5                            | 0,3                             | 0,5        |

