

FOCUS ON

HALBE TIEFE FÜR DEN SICHERHEITSSTOPP?

*von Peter B. Bennett, Ph.D., D.Sc., Dr. med. Alessandro Marroni, Dr. med.
Frans J. Cronje. International DAN*

Obwohl die Dekompressionstabellen in den vergangenen zwanzig Jahren erheblich abgeändert wurden, und viele nun deutlich weniger Zeit auf Tiefe zulassen als die ursprünglichen U.S. Navy Tabellen, hat sich die Häufigkeit von Dekompressionskrankheiten doch nur wenig verändert. Auch die in neuerer Zeit eingeführten Tauchcomputer haben wenig an den Unfallzahlen geändert. Die Häufigkeit von Dekompressions-Erkrankungen und die Verteilung in Bezug auf Geschlecht, Alter und Ausbildungsstand der Taucher bleibt konstant, unabhängig davon, welche Computer oder Tabellen verwendet werden. Das Problem scheint eine zu kurze Dauer des Aufstiegs zu sein; das ist der einzige Parameter, der in den letzten 40 Jahren kaum verändert wurde und entsprechend der eigentliche Faktor sein könnte, der die Häufigkeit von Dekompressionskrankheiten bedingt.

Dazu passen auch die früheren Richtlinien über Aufstiegsgeschwindigkeiten. Zum Beispiel setzte im 19. Jahrhundert der französische Physiologe Paul Bert eine Aufstiegsgeschwindigkeit von 1 m/min an, 1907 empfahl der englische Physiologe Haldane Aufstiegsgeschwindigkeiten zwischen 1,5 und 9 m/min. Von 1920 - 57 wurde eine ,Aufstiegsgeschwindigkeit von 7,5 m/min empfohlen. Dann, 1958, wurde während der Ausarbeitung des U.S. Navy Diving Manual - als die zu empfehlende Aufstiegsgeschwindigkeit in Frage gestellt. Cdr. Fane vom West Coast Underwater Demolition Team wünschte sich für seine Froschmänner Aufstiegsgeschwindigkeiten von 30 m/min oder mehr. Im Gegensatz dazu betrachteten das die Helmtaucher als nicht praktikabel, da ihre Taucher gewohnt waren, mit ihren schweren Anzügen entlang einer Leine mit 9 m/min aufzutauchen. Also einigte man sich als Kompromiss auf 18 m/min (60 ft/min, woraus sich auch der praktische Wert von 1 ft/sec ergab). Also gaben die US. Navy Tabellen zwischen 1957 und 1993 durchgehend eine Aufstiegsgeschwindigkeit von 18 m/min vor, die auf dieser rein empirischen Entscheidung beruhte. Viele Sporttauchtabellen und sogar die frühen Tauchcomputer folgten diesem Beispiel. Seit einigen Jahren wurde auf 9 m/min verlangsamt und ein empfohlener Sicherheitsstopp von 3 - 5 Minuten auf 4,5 - 6 m eingeführt. Aber auch das bringt den Taucher ziemlich schnell zur Oberfläche, oftmals nach 30 - 60 Minuten auf Tiefe.

Die DCS-Zahlen im DAN Amerika Jahresbericht über Tauchunfälle und tödliche Tauchunfälle zeigen durchschnittlich 25 % DCS Typ 1 (nur Schmerzen oder Hautausschlag), 64,95 % DCS Typ II (neurologisch) und 9,8 % AGE (Gasembolie). Das bedeutet, dass bei Sporttauchern die meisten Unfälle vor allem neurologische Symptome aufweisen, statt einer reinen Schmerzsymptomatik, und ihren Ursprung wahrscheinlich im Gehirn oder Rückenmark haben, statt im Bindegewebe der Gelenke.

In der Haldane'schen Dekompressionstheorie von 1906 wurde die Aufnahme und Abgabe gelösten Gases durch Verwendung von fünf "Gewebe-"Exponentialgrößen vereinfacht dargestellt. Dies wurde später von der U.S. Navy in sieben Gewebe, d.h. Gewebehalbzzeiten von 5, 10, 15, 20, 40, 80 und 120 Minuten abgeändert. Da davon ausgegangen wurde, dass die "schnellen Gewebe" Gas schnell aufnehmen und wieder abgeben können, nahm man allgemein an, dass DCS durch Übersättigung in den "langsamen Gewebe-" Exponenten bedingt ist. Folglich konzentrierten sich die Tabellenstrategien auf das Hinzufügen oder Abändern der Parameter für die langsamen Gewebe. In den Dekompressionsalgorithmen von Bühlmann landete man schließlich bei 16 Gewebehalbzzeiten zwischen 4 und 635 Minuten. Aber es kam immer noch zu DCS und eine Frage blieb offen: warum? Obwohl das mathematische Konzept der "Gewebe" bzw. "Kompartimente", das bei der Erstellung der Austauchtabeln verwendet wird, nie dazu ge-

dacht war, echte anatomische Gewebe wiederzuspiegeln, wissen wir doch, dass bestimmte Teile des Körpers schneller auf Gasdruckveränderungen reagieren als andere. Entsprechend stellen "schnelle" Gewebe mit 5, 10 oder 20-minütigen Halbzeiten wahrscheinlich das Blut und das stark durchblutete Nervengewebe von Rückenmark und Gehirn dar. Das Bindegewebe der Gelenke ist hingegen schwach durchblutet und benötigt viel mehr Zeit - vielleicht Halbzeiten von 40, 80 oder 120 Minuten - um Gas aufzunehmen und eine ausreichende Übersättigung zu erlangen, um beim Aufstieg Blasen zu bilden. Mathematisch gesehen sind sechs Halbzeiten erforderlich, um ein gegebenes "Gewebe" bzw. "Kompartiment" mit gelöstem Inertgas zu sättigen. Demnach ist das schnelle "5-Minuten Gewebe" in Tabelle 1 nach 30 Minuten zu 99 % gesättigt, wohin - gegen das langsame "60-Minuten Gewebe" 360 Minuten benötigt, um zu 99 % gesättigt zu sein.

Tabelle 1

Gewebehalbzeit 5 min (schnell)		Gewebehalbzeit 60 min (langsam)	
5 min	50 % gesättigt	60 min	50% gesättigt
10 min	75% gesättigt	120 min	75% gesättigt
15 min	87.5% gesättigt	180 min	87.5% gesättigt
20 min	93.8% gesättigt	240 min	93.8% gesättigt
25 min	97% gesättigt	300 min	97% gesättigt
30 min	99% gesättigt	360 min	99% gesättigt
Für die vollständige Entsättigung brauchen die Gewebe ebenso lange oder länger!			

Bei einem Tauchgang von 25 Minuten auf 30 m (Tabelle 2) - ein typischer Sporttauchgang - wären die Gewebe, in denen sich am meisten Inertgas ansammelt, das schnell sättigende Blut und Nervengewebe (5, 10 und möglicherweise 20 Minuten) in Rückenmark und Gehirn. Durch die relativ schnelle Aufstiegs geschwindigkeit zur Oberfläche (18 m/min oder auch 6 m/min) hat das Gas nicht genügend Zeit, um ohne erhebliche Übersättigung, mit einhergehender Blasenbildung, abgebaut zu werden. Diese Übersättigung ist wahrscheinlich im Blut, und, was noch wichtiger ist, im Rückenmark nachweisbar. Das Sporttauchen belastet die schnellen Gewebe stärker als die langsamen (siehe Tabelle 2) und die Art der entstehenden Schädigungen unterstützt diese Aussage.

**Tabelle 2. Modell
Inertgas-Gewebespannungen
bei 25 min. / 30 m Tauchgang**

Aufstiegs- geschwindigkeit	Haldane Gewebegasspannung 1/2 Zeiten				
	5 min	10 min	20 min	40 min	80 min
A. 18 m/min	68	62	45	28	15
B. 6m/min	56	56	44	28	16
C. 18m/min 3 m auf 6 m	50	53	42	27	15
D. 5 min auf 6 m	42	48	40	27	15
E. 3 min auf 3 m	48	51	41	27	15
F. 5 min auf 3 m	38	46	39	26	15

Interessanterweise, und nicht unbedingt selbstverständlicherweise, scheint ein Stopp mit relativ hoher Aufstiegs geschwindigkeit Inertgas wirkungsvoller abzubauen als eine sehr langsame Aufstiegs geschwindigkeit. Tabelle 2 ist zu entnehmen, dass ein 5-min. Stopp unter Wasser sehr viel wirkungsvoller ist als die bloße Verlangsamung der Aufstiegs geschwindigkeit, obwohl die Gesamtdauer des Aufstiegs immer noch sehr kurz ist und sich kaum unterscheidet (6,6 Minuten gegenüber 5 Minuten). Doch wir wissen, dass das Rückenmark eine Halbwertszeit von 12,5 Minuten hat. Auch 6,6 Minuten sind kei-

ne ausreichende Aufstiegsdauer für das Rückenmark, das dann fast vollständig gesättigt ist (Tabelle 1).

Bei 9 m/min, der heute üblicheren Aufstiegs geschwindigkeit, und einem 5-Minuten-Stopp auf 6 m beträgt die Aufstiegsdauer aus 30 m etwa 8 Minuten, was schon besser ist, aber immer noch deutlich weniger als die 12,5 min. Halbwertszeit des Rückenmarks (wobei noch nicht einmal berücksichtigt wird, dass die Gasabgabe langsamer abläuft als die Gasaufnahme). Eine plausible Alternative könnte es daher sein, mit 9 m/min aufzusteigen, aber etwa auf halber Tiefe (hier: 15 m) einen zusätzlichen "Haldane'schen" Stopp von 5 Minuten Dauer einzulegen, sodass sich eine Gesamtdauer von 13,3 Minuten ergibt¹.

1906 stellte Haldane die Theorie auf, dass Taucher bis zu einer Tiefe entsprechend dem halben absoluten Druck ihrer erreichten Maximaltiefe schnell aufsteigen könnten, ohne DCS zu bekommen - das sog. 2:1 Modell. Diese Methode wurde als stufenweise Dekompression bekannt. Sir Leonard Hill vertrat die Theorie, dass die Dekompression als linearer Aufstieg zur Oberfläche erfolgen sollte; er hatte starke Vorbehalte gegen Haldanes Ansatz. Letztlich kannte Haldane aber an Ziegen nachweisen, dass ein langsamer linearer Aufstieg nicht nur wirkungslos, sondern unsicher war; beim Erreichen der Oberfläche war noch zu viel Stickstoff vorhanden, was regelmäßig zu DCS führte. Der tiefe Stopp war für die Touchsicherheit erforderlich.

Warum machen wir dann heute aus 30 Metern und mehr bis zur Oberfläche einen praktisch direkten Aufstieg? Seither haben sich manche für einen kurzen Stopp auf 6 m ausgesprochen, aber dieser dauert selten länger als 3 Minuten. Mit diesem Sir Leonord Hill Dekompressionsschema ist DCS eigentlich zu erwarten. Der Grund für diese Anomalie in der Geschichte der Dekompression ist, dass die U.S. Navy zu der Annahme gelangte, dass die schnellen Gewebe tatsächlich ein Verhältnis von bis zu 4:1 vertragen könnten. Das würde bedeuten, dass man aus 30 m bis zur Oberfläche ohne Dekompression aufsteigen könnte. Für die handverlesenen Navy Taucher schienen so schnelle Dekompressionen auch kein allzu großes Problem darzustellen. Als aber Sporttaucher begannen, diese Tabellen zu benutzen, kam es zu einem rapiden Anstieg der DCS-Fälle - vorrangig neurologischen Typs. Seit damals haben sich verschiedene empirische Strategien entwickelt, einschließlich - vor relativ kurzer Zeit - der Sicherheitsstopp auf 5 - 6 Metern. Das bisher Gesagte legt den Schluss nahe, dass der flache Stopp zu wenig und zu spät ist, und dass ein zusätzlicher Tiefenstopp tatsächlich nötig sein könnte, um die DCS-Häufigkeit in den schnellen Geweben zu verringern. Das brächte uns wieder näher an das ursprüngliche 2:1 Modell von Haldane heran, das für die von Sporttauchern üblicherweise unternommenen tiefen, kurzen Tauchgänge angemessener erscheint.

Um diesen Hypothesen nachzugehen, untersuchte Professor Marroni 1418 Sporttauchgänge, die im Rahmen des DAN Forschungsprogramms - Project Safe Dive - von freiwilligen italienischen Sporttauchern durchgeführt wurden. Bei normalen Tauchgängen stellte er mit Hilfe verblinderter "Black Box" Tauchcomputer und durch das Aufzeichnen von Doppler Blasenmessungen alle 75 - 90 Minuten, fest, dass die Aufstiegs geschwindigkeit, die Gesamtdauer des Aufstiegs und die Übersättigung der schnellen Gewebe für die höchsten Blasengrade verantwortlich sind, und damit wohl auch für DCS bei Sporttauchern².

Die verwendeten Uwatec ZH-L8ADT (Black Box) Computer ermöglichten eine Einschätzung der Stickstoffmenge im zum Herzen zurückfließenden Blut und welcher maximale Stickstoffpartialdruck in den einzelnen Gewebekompartimenten zu jedem gegebenen Zeitpunkt herrschte. Dieser wurde als führender Stickstoffpartialdruck im Gewebe bzw. kritische Stickstoffspannung bezeichnet. In Übereinstimmung mit den oben ausgeführten Hypothesen wurde festgestellt, dass das Vorhandensein von Blasen in direktem Zusammenhang mit überschüssigem Gas in den Geweben mit schnellen bis mittleren Halbwertszeiten steht. Je größer die Übersättigung der schnellen Gewebe war, umso schlimmer wurden die Blasen.

Andererseits wurde festgestellt, dass auch bei Wiederholungstauchgängen Blasen vermieden werden konnten, wenn der Stickstoff des führenden Gewebes auf unter 80 % des zulässigen M-Werts (d.h. der als sicher berechnete Stickstoffpartialdruck, der sicher zugelassen werden kann), oder auf unter

1100 mbar (1 bar = Oberflächendruck) gehalten wird. In der Praxis konnte das durch Einführung eines zusätzlichen Tiefenstopps erreicht werden. Durch diese einfache Methode wurde die Dauer des Aufstiegs, ohne Änderung der Aufstiegs geschwindigkeit, von 11,2 Minuten auf 18,55 Minuten verlängert, und die vorherigen 30,5 % Häufigkeit, in denen es zu hohen Blasengraden kam, sank auf Null.

Internationale DAN Studien haben diese Hypothesen kürzlich klar bestätigt: 15 italienische Taucher wurden in eine Studie aufgenommen, jeder bekam 8 mögliche Kombinationen von Aufstiegs geschwindigkeiten und entweder einen flachen Stopp oder einen tiefen und einen flachen Stopp. Die Ersttauchgänge führten auf 25 m und dauerten 25 Minuten, mit einer anschließenden Oberflächenpause von 3 Std. 30 Min., gefolgt von einem Wiederholungstauchgang auf 25 m mit einer Dauer von 20 Minuten. Die Aufstiegs geschwindigkeiten betrugen 18, 10 und 3 m/min. Tabelle 3 zeigt die Matrix und Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse von 181 Mann-Tauchgängen. Die eindeutig beste Dekompression lieferte Profil 6. Mit einer Aufstiegs geschwindigkeit von 10 m/min und zwei Stopps auf 15 m und 6 m wies dieses Profil die niedrigste Gasspannung (Sättigung des 5-Minuten Gewebes 25 %) und mit 1,76 den niedrigsten Blasengrad auf. Den nächstbesten Aufstieg lieferte Profil 8, mit den selben Stopps, aber einer langsameren Aufstiegs geschwindigkeit von 3 m/min.

Das Konzept des "Tiefenstopps" tauchte in der Geschichte des Tauchens immer wieder auf. Brian Hills beobachtete, dass australische Perlentaucher, bei denen es zuvor an Orten wie Broome und Thursday Island viele Todesfälle und schwere DCS gegeben hatte, schließlich ihre eigene Dekompressionsmethode ausarbeiteten, um dem ein Ende zu machen. Das ganze Geheimnis ihres Erfolges war, empirisch einen tieferen ersten Stopp einzuführen.

Tabelle 3 - Matrix der experimentellen Tauchgangsprofile

Profil	Tiefe (m)	Dauer (min)	Aufstiegs geschwindigkeit t in /min	Stopp auf 15 m	Stopp auf 6 m	Gesamtdauer des Aufstiegs (min)
1	25	25	10	0	0	2.5
1R(Wh. -TG)	25	20	10	0	0	2.5
2	25	25	3	0	0	8
2R(Wh. -TG)	25	20	3	0	0	8
3	25	25	18	0	5	6.5
3R(Wh. -TG)	25	20	18	0	5	6.5
4	25	25	10	0	5	7.5
4R(Wh. -TG)	25	20	10	0	5	7.5
5	25	25	3	0	5	13
5R(Wh. -TG)	25	20	3	0	5	13
6	25	25	10	5	5	12.5
6R(Wh. -TG)	25	20	10	5	5	12.5
7	25	25	18	5	5	11.5
7R(Wh. -TG)	25	20	18	5	5	11.5
8	25	25	3	5	5	18
8R(Wh. -TG)	25	20	3	5	5	18

In jüngerer Zeit haben auch technische Sporttaucher eigene Dekompressionsmethoden erarbeitet, aus denen sich für die Berechnung sogenannte "Blasenmodelle" entwickelten. Das Wienke Reduced Gradient Bubble Model (RGBM - Reduzierter Blasengrad Modell) und das Yount Variable Permeability Model (VPM - Variable Permeabilität Modell) versuchen beide vorherzusagen, wann sich Blasen bilden und berechnen dann Dekompressionen, die die Blasenbildung vor dem Erreichen der Oberfläche verhindern³. NAUI Tech-Taucher haben das Wienke RGBM Modell ziemlich ausgiebig eingesetzt und es wurde kein DCS-Fall verzeichnet. Diese Daten und die Ergebnisse dieser IDAN Studie an Tauchern wurden Anfang 2003 bei einem NAUI Workshop in Florida diskutiert. Als Ergebnis regte NAUI nun an, dass ein Tiefenstopp gut auch beim Sporttauchen eingeführt werden könne, und zwar solle auf halber Tiefe ein 1-minütiger Stopp durchgeführt werden, gefolgt von einem 2-minütigen Sicherheitsstopp

auf 5 - 6 m, statt der derzeit empfohlenen 3 Minuten. Wir testen dieses Konzept derzeit mit unseren italienischen Forschungstauchteams.

Die International DAN Studie über Tiefenstopps läuft weiter. Weitere Forschungsgebiete beinhalten die Verkürzung des Tiefenstopps und möglicherweise den routinemäßigen Einsatz von Nitrox und/oder Sauerstoff beim flachen Stopp - wie dies die Perlentaucher schon seit einigen Jahren und die heutigen Tech-Taucher tun.

Das Geheimnis des Tiefenstopps liegt im Paradigmenwandel zwischen "die Blase bekämpfen" und "die Blase behandeln". Ersteres verwendet den Tiefenstopp, um sicherzustellen, dass die kritische Gasüberspannung in den schnellen Geweben nicht überschritten wird und hindert die Blasen daran, auf Tiefe überhaupt zu entstehen. Der lange Aufstieg bis zum 6 m Stopp, wie er derzeit durchgeführt wird, fällt unter "Behandeln der Blase"; wir wissen, dass diese Vorgehensweise 30 % "stille Blasen" an der Oberfläche hervorruft, die als Anzeichen für potentielle DCS gelten können.

Tabelle 4 - Sättigung schneller Gewebe und Blasengrade nach verschiedenen Tauchgangsprofilen

Aufstiegs- geschwindigkeit	Stopps	5 min Gewebe Sättigung (0-100 %)	10 min Gewebe Sättigung (0-100 %)	Blasen- Grad BSI	Gesamt- dauer des Aufstiegs (min)
3 m/min (Profil 2)	kein Stopp	48	75	8.79	8
3 m/min (Profil 5)	6 m/5 min	30	60	8.07	13
3 m/min (Profil 8)	15+6 m/5 min	22	49	3.51	18
10 m/min (Profil 1)	kein Stopp	61	82	7.34	2.5
10 m/min (Profil 4)	6m/5 min	43	65	5.23	7.5
10 m/min (Profil 6)	15+6 m/5 min	25	52	1.76	12.5
18 m/min (Profil 3)	6m/5 min	42	60	7.38	6.5
18 m/min (Profil 7)	15+6 m/5 min	28	55	3.23	11.5

Das fehlende Glied in dieser Forschung ist die unbekannte Beziehung zwischen den mit dem Doppler feststellbaren Blasen und neurologischer DCS. Unsere derzeitige Hoffnung ist, dass wir durch das Eliminieren der 30 % sog. stiller Blasen im Herzen auch ihr Auftreten im Rückenmark verhindern können. DAN Research wird in dieser Hinsicht weiterforschen.

1) Bei Tauchgängen auf 24 m und tiefer steuert das 5-Minuten Kompartiment die Dekompression, da es schnell aufsättigt und beim Aufstieg schnell übersättigt wird. Bei solchen Tauchgängen ist ein Unterwasserstopp auf 6 bis 5 m sehr wirkungsvoll, um das schnelle Kompartiment zu klären. Im Gegensatz dazu ist die Einführung eines tiefen Stopps bei flachen Tauchgängen mit langen Grundzeiten weniger effektiv; hier sind die langsamen Gewebe führend und ein Stopp von 3 oder 5 Minuten Dauer wird weniger wirkungsvoll.

2) Interessanterweise traten die Blasen, wie schon bei anderen derartigen Doppler Studien, erst 30 bis 40 Minuten nach dem Wiedererreichen der Oberfläche auf. Nach Wiederholungstauchgängen traten allerdings bei 85 % der Tauchgänge Blasen auf, bei 18 % mit geringem Blasengrad (auf der Spencer Skala 1 - 2), aber bei dramatischen 67 % mit hohen Blasen graden von 3 - 4, die mit einer erhöhten DCS-Wahrscheinlichkeit in Zusammenhang gebracht werden.

3) Dies steht im Gegensatz zu den meisten heutigen Dekompressionstabellen und Computeralgorithmen, die auf Haldane'scher Gasaufnahme und -abgabe in den Körpergeweben ohne Tiefenstopp beruhen. Die Daten zeigen, dass diese "gelöste Gas" Theorien bisher durchschnittlich bei etwa 30 %-iger Häufigkeit sog. "stille Blasen" an der Oberfläche zur Folge haben, die über dem Herzen mit Hilfe der Dopplertechnik abgehört und aufgezeichnet werden können. Allerdings ist ihr Bezug zu DCS bislang ungeklärt.

Quelle: DAN EUROPE NEWS, European editino of Alert Diver, I QUATER - 2004