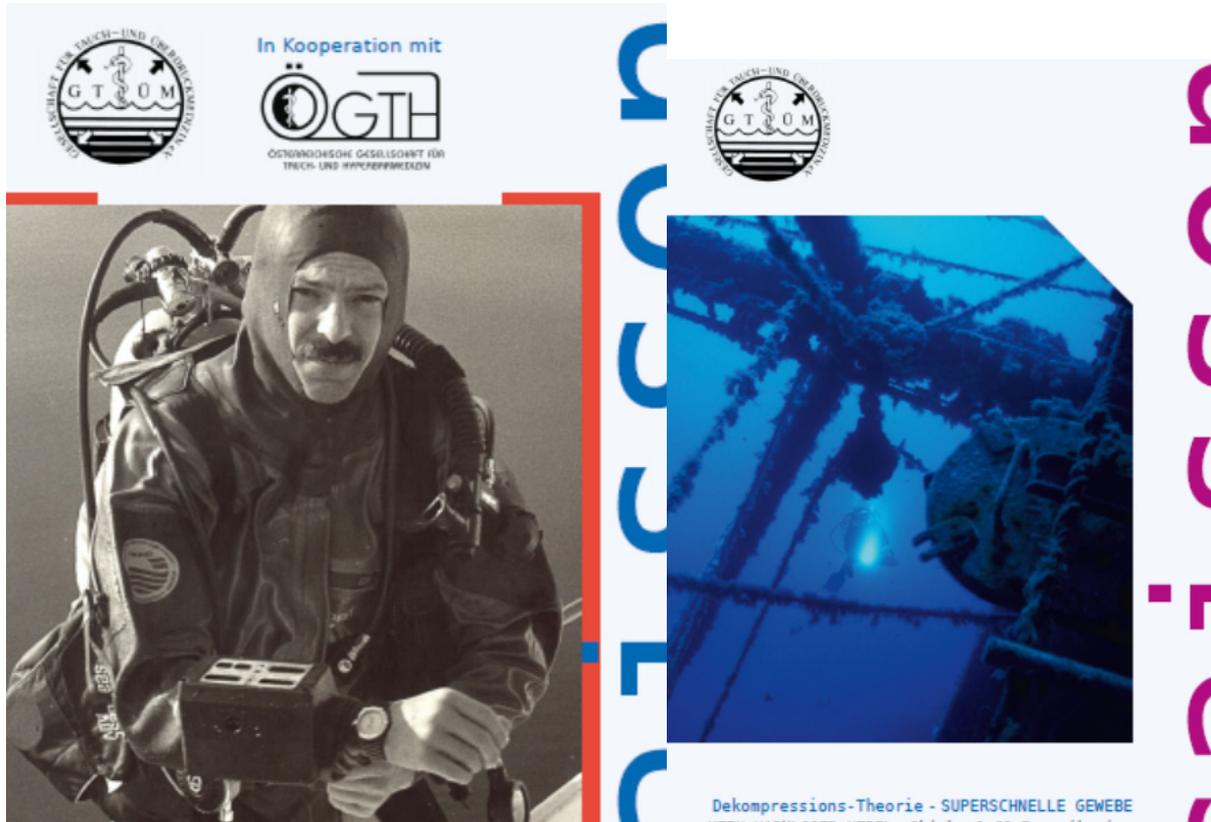


Sammelband von Veröffentlichungen im CAISSON: 2009 – 2020



THE

SUB
MARINE
CONSULTING

GROUP

TEL AVIV – SAN FRANCISCO – STUTTGART

WWW.SMC-DE.COM

Sammelband von Veröffentlichungen im CAISSON: 2009 - 2020

- CAISSON 34. Jg. Nr. 4/ 35. Jg. Nr. 1/ Januar 2020, S. 6 - 10
DeCompression Models: DeMystified
- CAISSON 34. Jg. Nr. 4/ 35. Jg. Nr. 1/ Januar 2020, S. 14 - 17
History and Development of Decompression Algorithms
- CAISSON 33. Jg./ April 2018 / Nr. 2, S. 8 - 22:
Superschnelle Gewebe
- CAISSON 30. Jg./ 2015 / Nr. 4, 31. Jg./ Januar 2016 / Nr. 1, S. 20 - 30:
Der etwas andere Vergleich - Teil III Über P(DCS)
- CAISSON 30. Jg./ 2015 / Nr. 3, S. 06 - 16:
Der etwas andere Vergleich - Teil II HELIUM
- CAISSON 30. Jg./ 2015 / Nr. 1, S. 14 - 22:
Der etwas andere Vergleich - Teil I LUFT
- CAISSON 26. Jg./ 2011 /Nr. 3, S. 4 - 12:
**Dekompressionsberechnungen für Trimix-Tauchgänge mit PC-Software:
Reparieren Gradientenfaktoren defekte Algorithmen oder defekte Software-
Implementierungen?**
- CAISSON 26. Jg./ 2011 /Nr. 2, S. 6:
Mach' mit: mach' Tauchen noch sicherer!
- CAISSON 26. Jg./ 2011 /Nr. 1, S. 61:
**Desktop Deco-Software und Mischgascomputer -
mögliche Fehlerquellen beim technischen Tauchen?**
- CAISSON 25. Jg./ 2010 /Nr. 1, S. 5 - 9:
Technisches Tauchen: Innenansicht einer Freizeitbeschäftigung
- CAISSON 24. Jg./ 2009 /Nr. 3, S. 36:
Leserbrief:
Ich weiß, ich weiß, ich bin zu spät, wie der Pathologe eben auch ...

und BONUS Material:

- pre print 2019:
[Is DCS a "cusp" catastrophe?](#)
- Frontiers in Psychology 09 / 2017:
post-publication comment on:
[Dive Risk Factors, Gas Bubble Formation, and Decompression Illness in Recreational SCUBA Diving: Analysis of DAN Europe DSL Data Base](#)
- sporttaucher, 05 / 2013, S. 10 - 12:
Pi mal Daumen: Ungenauigkeiten bei Tauchcomputern
[sporttaucher, 05 / 2013, S. 10 - 12](#)
- International Journal of the Society for Underwater Technology, November 2012:
Variations in the TTS: where do they come from?
[SUT, Vol. 31, No. 1, pp. 43 - 47, 2012](#)



In Kooperation mit



ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR
TAUCH- UND HYPERBARMEDIZIN

UNOSSTEALC



Albert Alois BÜHLMANN - Gedächtnis-Symposium
Teil 2 - DEKOMPRESSION FÜR SPORTTAUCHER
DAN EUROPE - Analyse der DAN-Datenbank

Editorial



Sehr geehrte Leserinnen,
sehr geehrte Leser,

CAISSON

Die Caisson-Ausgaben zum Jahreswechsel werden GTÜM-intern als "BOOT-Caisson" bezeichnet, da sie nicht nur an GTÜM- und ÖGTH-Mitglieder versendet, sondern auch auf der BOOT-Messe in Düsseldorf verteilt werden. Auch 2020 wird der Caisson wieder auf den Messeständen von VDST und DAN Europe ausliegen (BOOT 2020, Messe Düsseldorf, 18.-26.1.2020). Eine Mitgliedschaft in den tauchmedizinischen Gesellschaften GTÜM und ÖGTH ist auch für interessierte Nicht-Ärzte möglich. So können Sie CAISSON regelmäßig per Post und digital erhalten. Unten finden Sie Links zu den Antragsformularen, die sie als Druckversion auch in der Heftmitte finden (S. 54-55).

Untersuchung und Therapie

Unten finden Sie auch einen Link zum digitalen Untersuchungsbogen, den sie als Druckversion ebenfalls in der Heftmitte finden (S. 49-53). Qualifizierte deutsche und österreichische Ärzte mit einer tauchmedizinischen Ausbildung finden sie ebenso in diesem Heft (S. 68-84) wie die Adressen von Druckkammerzentren in D, A und CH (S. 85-97).

Bühlmann Gedächtnis-Symposium

Anlässlich des 25. Todestages von Prof. Albert A. Bühlmann veranstalteten die schweizerische Schwesergesellschaft der GTÜM, die "Swiss Underwater and Hyperbaric Medical Society" (SUHMS), und der "Verein Historisches Druckkammerlabor Universitätsspital Zürich" am 29. und 30. März 2019 gemeinsam ein "Albert A. Bühlmann Gedächtnis-Symposium" im Universitätsspital Zürich. Da das Material den Rahmen einer einzelnen Caisson-Ausgabe sprengt, konnten wir im letzten Caisson nur die erste Hälfte der Vorträge abdrucken. In diesem Caisson finden

sie die noch fehlenden Vorträge, die sich schwerpunktmäßig mit der Entwicklung der Dekompressionstabellen für Sporttaucher befassen (S. 06-47).

Vorträge zum Download

Wer durch die Lektüre der Beiträge zum Bühlmann-Symposium in diesem Caissons "Lust auf Mehr" bekommen hat, kann sich alle Vorträge (auch den 1. Teil aus dem letzten Caisson) zusätzlich als PDF-Präsentationen herunterladen. Albrecht Salm hat dankenswerter Weise alle Vorträge gesammelt und als geschützte PDF-Präsentationen unter einen Download-Link zur Verfügung gestellt. Die Caisson-Redaktion bedankt sich bei den Organisatoren und Referenten des Albert A. Bühlmann Gedächtnis-Symposiums für die gute Kooperation und wünscht allen Lesern viel Spaß mit diesem Caisson.

Ihr

Unter dem Link https://www.divetable.info/BS_ZH/ oder dem nebenstehenden QR-Code finden Sie alle Vorträge des Albert A. Bühlmann Gedächtnis-Symposiums zum kostenlosen Download. Außerdem finden sie dort auch Fotos vom Symposium und dem ehemaligen Druckkammerlabor von A.A. Bühlmann, sowie weitere interessante Links zum Thema.



Infos zur **Mitgliedschaft in der GTÜM** für Ärzte und Nichtärzte, Jahresbeitrag € 65: <https://www.gtuem.org/188/ueberuns/mitgliedsantrag>

Infos zur **Mitgliedschaft in der ÖGTH** für Ärzte und Nichtärzte, Jahresbeitrag € 46: <http://www.oegth.at/60/downloads>



Tauchmedizinischer Untersuchungsbogen von GTÜM und ÖGTH: <https://www.gtuem.org/files/579/2017-06-28-gtuem-untersuchungsbogen.pdf>

DeCompression Models DeMystified



Autor/Referent

Albrecht Salm •
Physiker •

PADI Master •
Scuba-Diver Trainer •
SSI Extended Range •
Instructor •
TL für Tauchsportcenter •
Esslingen •
Berater bei SubMarineCon- •
sulting (www.SMC-de.com) •
director@SMC-de.com •

Agenda

- From the Model to the Algorithm and Implementation
 - Variations in the TTS
- Basic Limits of Perfusion Models
 - Extrapolations ... & why linear extrapolations won't work
 - Yo-Yo, Repetitive Dives, apnea, the "Helium Penalty"
- empirical Adaptions: how do they work?
 - How was the RDP(r) created?
 - temperature, workload, oxygen corrections
 - deep stops
- "executive editing, typos & undocumented features"
- Bonus Material: VPM seems to simulate strange bubbles ...

Abstract of a presentation at AA Bühlmann Memorial Symposium on march 29th 2019 in Zurich, Switzerland.

This somewhat non-standard orthography refers to the (in-)famous McGraw-Hill series of books with this particular title: "DeMystified ... hard stuff made easy!", that is: we try to remove all the glitter and buzz-words, often imposed from the latest articles in the ubiquitous divers magazines and internet portals, hyperbaric medicine journals and advertisements of manufacturers of diving-equipment.

We will have a look at the various stages involved in the genesis of a new decompression model, a dive table or a dive computer. It turns out that various levels of perception of a model result in variancies. The freedom and un-standardised procedures during all these stages will result in wild variations, say in the time-to-surface (TTS) over all these implementations. To the end-users, i.e.: the divers this freedom is normally completely undocumented and intransparent.

To gain the required transparency we compare the

TTS over a couple of popular dive tables and dive computers. The TTS is the time-to-surface, i.e. the sum of all stop times plus the ascent time (bottom-depth divided by the ascent rate). We use a test-profile on air (42 m, 25 min) to dive the wreck of the "JURA", a dive site very popular in the lake of constance. The compared products all claim to have implemented one "ZH-L 16 C"; but the comparison shows variations of ca. +/- 20 min around an arithmetic average of ca. 30 min, i.e. a range in the TTS from 12 to 49 min [2]. (see figure 1 and 2)

In the next step we will explore the basic, that is: fundamental, limits of the widespread perfusion models. Perfusion models are here to stay due to their overwhelming success, starting with Haldane and his followers, the characteristics are the so-called compartments with their related halftimes (HT). The HT are just the inverses of a perfusion rate. The logical standard of all these implementations, be it in a piece of plastic (a dive table) or a piece of silicon (a dive computer) are their (linear) extrapolations. The associated problem with this procedures is, that they will not work properly due to the many ramifications with increased pamb (higher density) and

the non-linear response of a human body, for e.g. with an increased production of CO₂, a sort of phase transitions from laminar to turbulent flow in the airways. On top there are microscopic factors, only recently adressed, like endothelial dysfunctions, micro particles, ROS, and, and, and: you name it! The result is, that well accepted standard-procedures from the diving communities with many repetitive dives, multi-level dives, Helium-mixtures or non-standard behaviour like Yo-Yo dives (fish farming) may not be adressed in a consequential way. The root of all this are simply the exponential functions used to simulate the up-take and release of inertgases. The limits of the extrapolation procedures have been already clearly pointed out by Haldane (< 50 m, TTS < 30 min) simply because there have been no data at hand for deeper and/or longer dives (and, maybe, they run out of goats ...): but in the course of time his caveats have been rendered to oblivion. Then we will examine two real-life examples which have been out there in the wild, that even if you do not violate any prescribed decompression obligation there is, albeit very small, a probability of contracting a DCS: one is a classical case of DON of one of my diving buddies, the other my own, more or

Stop depth / method:	24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	TTS	Rem.:
<i>FwDV 8</i>									0	<i>Not allowed!</i>
BSAC 88						1	6	---	10	26', ascent 3'
OSTC 3 v 2.13							1	6	12	ZH-L 16 C, GF 99 / 99
RGBM				1	2	3	3	7	16	table
<i>MDv 450/1</i>							5	15	20	+ ca. 4,2 !
IANTD Air					1	4	3	18	26	Table
ZH-83						3	5	14	26	
<u>DIVE 3 3</u>						2	6	16	28	TDT = 52
Ratio iX3M APOS 3.1.6					1	4	5	14	28	TDT = 53,ZH-L16C with: GF 93/93
U.S.N. 2008							26		31	140 feet
USN 2016						3	24		33	140 feet
ZH-86						4	7	19	33	42 m / 27 min
DECO 2000					1	4	8	16	33	
<u>DIVE 3 3</u>						4	7	19	34	Bühlmann correction factor, density adapted
SAA DeepP	27/1'		1		1	1	25	---	34	ZH-L 16 C
DCIEM						7	8	17	36	
TEC						3	k.A.	k.A.	36	L0 (Level Stop)
ALADIN [2]						2	k.A.	k.A.	40	L0
Galileo G2						3	7	23	40	L0
Hahn DC-12					5	5	9	25	47	24 min bottom time
MATRIX						4	16	26	49	L0
<u>Subsurface</u>			2	3	5	6	10	15	52	VPM 0

figure 1 Total Time to Surface (TTS) for test-profile on air (42 m, 25 min) with different computers / programs

TDT = Total Dive Time
 TTS = time-to-surface (sum of all stop times + bottom depth / ascent rate)
 TEC = Uwaterc / Scubapro Aladin TEC 2G, ZH-L 8
 ALADIN [2] = Uwaterc / Scubapro Aladin Square
 DECO 2000: Max Hahn
 FwDV 8 = Feuerwehr-Dienstvorschrift 8 Tauchen, per 03/2014 (up to 36 m)
 Galileo G2 = Uwaterc / Scubapro, HW 1.0, SW 1.2 per 08/2017
 MATRIX = Uwaterc / Scubapro Aladin Sport, Matrix-Display; ZH-L 16 (09/2016)
 Ratio iX3M = Mix gas computer from DiveSystem (IT), Version APOS 3.1.6 from 07/2016
 RGBM = printed table from rgbmdiving.com
 SAA DeeP = British Subaqua Association, SAA Bühlmann DeeP-Stop System Handbook [187]
 Subsurface = Subsurface 4.5.6 2016 / 4.7.4 2017; (subsurface-divelog.org/de/)
 USN 2016 = Rev. 7 of the USN Diving Manuals, 01.12.2016
 MDv = Marine Dienstvorschrift 450/1 Anlage 6 (equivalent to DRÄGER Table 210, from 1984)
 OSTC 3: Testequipment, Softwareversion V 0.9 from 05/2013
 ZH-83 & ZH-86: Bühlmann; [4] 1983, p. 66; [65] 2002, p. 225

figure 2

Explanation of abbreviations in figure 1

less "un-deserved" DCS Type I hit from a depth to 8.5 m [1].

In the wake of the topical developments to cope with DCS there have been many empirical modifications to the existing tables and procedures: we will examine the PADI/DSAT RDP(c) [3]; empirical adaptations to ambient temperature resulting in reduced skin-perfusion; physical workload, resulting in elevated inertgas-saturation and elevated oxygen-partialpressures, which result in bradycardia and vasoconstriction; as well as "deep stops", deeper stops than prescribed by conventional methods. As insinuated already above: after removing the glitter, what stays are simple modifications of compartments HT and their corresponding surfacing (M0) values, all done with a "broad thumb" due to only limited data available. To this end we will scrutinize one of the unrivaled studies: it is the one from the USN about deep stops [4]: this is a magnificent piece of work using more than 195 dives (sic) per profile!

Finally we will have a look at the mumbling behind the scenes: what goes unnoticed to the end-users, the divers. We will have a quick glance at "executive editing, typos and undocumented features" in dive tables. In conclusion, if time permits, we will explore the prepared bonus material and the somewhat bold thesis that bubble models like the VPM (Varying Permeability Model) seems to simulate strange

bubbles, since tissue compliance is easily neglected, the tensor for bulk modulus set to zero [5], [6].

Albrecht Salm

Literature

1. Salm, A (2016): Yet another benchmark, Part III. CAISSON, Januar 2016, p. 20 -30.
2. Salm, A (2012): Variations in the TTS: where do they come from? International Journal of the Society for Underwater Technology: SUT, Vol. 31, No. 1, pp. 43 - 47
3. Hamilton, Rogers, Powell, Vann: The DSAT Recreational Dive Planner, 28. February 1994.
4. NEDU TR 11-06 July 2011, Redistribution of decompression stop time from shallow to deep stops increases incidence of decompression sickness in air decompression dives. Navy Experimental Diving Unit, Authors: David J. Doolette, Wayne A. Gerth, Keith A. Gault.
5. Salm, A (2018): Dual Phase Decompression Theory and Bubble Dynamics; International Symposium on 21.st Century Decompression Theory; AMC, Amsterdam, 03/2018.
6. Goldman, Saul; Solano-Altamiro, J. Manuel; LeDez, Kenneth M (2018): Gas Bubble Dynamics in the Human Body, AP Elsevier, ISBN 978-0-12-810519-1

Als Ergänzung zur oben abgedruckten englischen Zusammenfassung finden Sie unter dem folgenden Link https://www.divetable.info/BS_ZH/DemystifieD_EN.pdf und unter dem nebenstehenden QR-Code die komplette Präsentation des Vortrags.



Hier folgt eine deutschsprachige Erklärung der Vortragspräsentation. Die Zahlen in Klammern (F. xx) gibt die Seitenzahl der dazugehörigen Folie an, die Referenzen [x] finden Sie oben unter "literature" am Schluss des abstracts.

Dekompressions-Modelle: entzaubert ...

Wie entsteht ein Dekompressions-Modell? Der Prozess wird anhand der Folien 5 & 6 skizziert. Im Falle von J.S. Haldane waren die Beobachtungen bei den Taucherarbeiten im Hafen von Gibraltar ausschlaggebend: auch nach ziemlich langen Tauchgängen traten keinerlei Anzeichen von DCS auf: der Hafen war relativ flach und so entstand wohl die Idee einer erlaubten/tolerierten Übersättigung von ca. 2:1. (Übrigens: der Bursche mit der Banane und dem Bleistift hinterm Ohr, auf Folie 6 links oben, ist Bob Hamilton. Der Herr rechts im Bild ist der persische Gelehrte Muhammad Ibn Musa al Chowarismi, der Namensgeber unseres Wortes "Algorithmus".)

Die Umsetzung des Algorithmus, der Rechenvorschrift in ein Stück Plastik (eine Tauchtafel zum mitnehmen) oder auch in ein Stück Silizium (im Tauchcomputer) ist die Implementierung. Bei allen diesen Schritten fließen subjektive Interpretationen ein, Verständnishorizonte, oder, wenn man so will, persönliche Vorlieben oder Abneigungen des Programmierers. Ein hübsches Beispielchen dafür ist auf F. 6 unten rechts, die unmißverständliche Aussage eines VR3 Computers (mit ZH-L 16 Modell), der sich bitterlich über mangelhafte Dekompression seines Benutzers beklagt: allerdings wurde völlig regelkonform ein 50 m Kammertauchgang nach der GTUEM Leitlinie „Druckkammer-Seminare“ durchgeführt ...

Dieser Prozeß der Umsetzung als solches ist für die End-Benutzer, die Taucher oder auch die Tauch-

Mediziner, völlig intransparent: sie müssen sich auf die Aussagen des Werbeprospekts verlassen und können lediglich die Auswirkungen, z.B. die abweichenden "Nullzeiten" für ein Tauchprofil quer durch die unterschiedlichen Tabellen und Computer wahrnehmen.

Dafür ist die Folie 9 ein Beispiel: es ist eine Zusammenstellung für ein übliches Kastenprofil mit 42 m Tiefe und 25 min Grundzeit, das Atemgas sei normale Pressluft. In den Spalten 3, 6, 9, 12 m etc. sind die Stopp-Zeiten aufgeführt, jeweils in der Zeile zu einer Tabelle / einem Computer gehörend. Die Spalte "TTS" (time-to-surface) ist die Summe aller Stoppzeiten + Grundtiefe/Auftauchgeschwindigkeit (aufgerundet). Zunächst fällt die grosse Spreizung der TTS von ca. 10 min (Zeile 2, BSAC Tabelle) bis zu ca. 50 min (Scubapro MATRIX und Subsurface Deko-Software) auf. Bei dem Faktor von ca. 5, also über 500 % Abweichung, schlagen nun die unterschiedlichen Dekompressions-Modelle zu. Wesentlich interessanter sind deshalb die rot markierten TTS: die dazugehörigen Produkte unterscheiden sich eben, zumindest laut öffentlich verfügbarer Dokumentation, nicht im Modell! Das benutzte Modell soll nämlich stets ein Bühlmann'sches ZH-L 16 sein (ZH wie Zuerich, L wie linear und 16 ist die Zahl der a- & b Koeffizientenpaare): trotzdem haben wir hier die Variation von ca. 12 min zu 33/34 min: immerhin noch ein ca.-Faktor von 3. Welches ist nun die korrekte Implementierung?

Die Möglichkeiten, innerhalb eines ZH-L 16 abweichend zu rechnen, sind sehr, sehr zahlreich (F. 8): doch sind nun die längeren TTS auch wirklich sicherer? Erschwerend kommt für den End-Benutzer eine weitere Intransparenz hinzu: undokumentierte Abweichungen vom eigentlich publizierten Algorithmus, die sogenannten „executive edits“ (F. 42) die eine Nachrechenbarkeit extrem erschweren, und, natürlich: auch Schreibfehler in gedruckten Tabellen.

Beim praktischen Tauchen gibt es weiterhin viele Faktoren, die das Ergebnis DCS ja/nein zusätzlich beeinflussen können (F.11): bedingt durch die große Inter-Individualität also auch der Intra-Individualität

(Tagesform) lassen sich solche Faktoren algorithmisch recht schwer greifen. Wird es dennoch versucht, ist die zugrundeliegende Datenbasis nicht aussagekräftig genug, da in der Regel statistisch mangelhaft: zuwenig Taucher, zuwenig Tauchgänge (F. 17 - 19).

Dies gilt ebenso für die Algorithmen für reduzierten Umgebungsdruck (Fliegen nach dem Tauchen, Bergseetauchen, F. 20 & 21).

Zusätzlich gibt es Verhaltensweisen, die das Dekompressions-Modell prinzipiell nicht, und damit auch die Implementierung im Tauchcomputer erst recht nicht, erfassen können. Es sind dies alle die Vorgänge, die wesentlich schneller wie die kürzeste HT ablaufen: z.B. Apnoe tauchen, YoYo-Profil oder auch die Profile der Fischfarm-Taucher (F. 13 & 23 - 25).

Eine Studie der USN zu dem bei Tek-Tauchern recht aktuellen Thema "tiefe Stopps" ("deep stops", F. 31 - 36) also Stopps, die künstlich eine oder auch mehrere Etagen tiefer gelegt werden, als es die Tabelle oder auch der Computer vorschreiben würde. Dem validen Argument der mangelhaften Statistik wurde mit einem sehr sorgfältigem Design und Abbruchkriterien begegnet: pro Profil wurden ca. 180 exakt kontrollierte Kammer-Tauchgänge veranstaltet; das Ergebnis somit im wirklich signifikanten Bereich: "deep stops" für dieses Profil (rote Linie, A2, F. 33) produzieren DCS (F. 35 & 36).

Ob es sich nun um empirische Anpassungen über tiefe Stopps, verkürzte Nullzeiten oder verlängerte Dekompressionsstopps auf Grund von Auskühlung, Dehydratation, Arbeitslast, Alter, BMI, Fitness, die Anzahl und Abfolge der Tauchgänge oder die Länge der Oberflächenpause oder auch um die Berücksichtigung von Vasoconstriction und Bradycardie auf Grund eines erhöhten Sauerstoffpartialdrucks handelt: stets sind die Grundlagen sehr einfache, i.d.R. lineare Gleichungen (F. 26 - 31). Lineare Gleichungen sind mathematisch leicht zu handhaben und meist intuitiv verständlich, greifen aber bei so komplexen bio-physikalischen Vorgängen wie einer DCS, eher zu kurz. Der "Erfinder des Apfelmännchens", Benoit Mandelbrot schrieb einmal (Fractal Geometry: what is it, and what does it do? (1989), S.4): *Es ist überhaupt keine Frage, daß sich die Natur nicht-linear verhält!*

Auch die Beschreibung der freien Gasphase in dem bei Tek-Tauchern relativ beliebten VPM (Varying

Permeability Model) lebt von linearen Vereinfachungen, die dann als Resultat keine DCS-Blasen mehr widerspiegeln (F. 43 - 51). Aber mathematische Komplexität allein garantiert noch keine praktikable Dekompressionsstrategie (F. 31 des vorigen Vortrags: wir sehen hier einen kleinen algorithmischen Alptraum aus mehreren Bessel-Funktionen)! An die physiologischen Verhältnisse allerdings wesentlich besser angepaßte Beschreibungen sind dem Werk Goldman et al. (F. 45) zu entnehmen. Und ja: aber auch wesentlich komplizierter ...

Albrecht Salm

History and Development of Decompression Algorithms



Autor/Referent

Albrecht Salm
Physiker

PADI Master
Scuba-Diver Trainer
SSI Extended Range &
Trimix Instructor
TL für Tauchsportcenter
Esslingen
Berater bei SubMarineCon-
sulting (www.SMC-de.com)
director@SMC-de.com

- Bonus Material:
 - Exotic Models & strange Implementations
 - DCS as a CUSP catastrophe?

From the first air-diving table with staged decompression stops in 10 feet increments as a remedy to decompression sickness for Royal Navy Divers around the turn of the last century to topical, multi-factorial hybrid models:

the historical landscape of decompression models and algorithms, starting with the famous publication of the scottish physiologist John Scott Haldane et al. and their experiments with goats [1], to the improvements through the United States Navy (USN) and other Navies via theory and diving experiments with military hard hat (helmet) divers to a now, somewhat heated and superfluous debate of whether this or that model is better than any other. The basic physiologic mechanisms of perfusion and diffusion are contrasted, as well models which cover both inertgas in solution and as a free phase (gas-bubble), thus called Dual Phase. The various setups of tissue models, called "compartments" in parallel or serial circuits, their connected perfusion-rates, designated as the mathematical inverses of exponential half-times (HT) will be discussed. To delineate these models as purely "deterministic" in comparison with the new, the statistical approaches, which combine the outcome of 10thousands of dives with stochastic methods and thus producing new diving tables with a pre-defined P(DCS), the statistical probability of contracting a decompression sickness. Topical models which combine these philosophies with ultrasound doppler-techniques (hybrid models like the COPERNICUS) are high-lighted and other very successful, working implementations, like the ones from the USN and DCIEM are picked and presented, thus leaving space for historical comments on the "Hans Hass Deco-Brain II", the first european

Abstract of a presentation at AA Bühlmann Memorial Symposium on march 29th 2019 in Zurich, Switzerland.

Agenda

- Haldane & beyond
 - What did he do? How did he do it? What did his son Jack (age 13)?
 - The landscape: " ...my model is better than yours!"
 - Perfusion, Diffusion, Dual Phase, Hybrid-Models
 - Parallel versus Serial Models
 - Deterministic versus Statistic Models
 - Prominent representatives of the others and working examples



figure 1

The landscape of researchers in history of decompression algorithms (figure: Albrecht Salm)

solid-state diver carried computer with a full-blown perfusion model with 16 compartments. If time permits, we will open up a pandaeonium of a (nearly infinite) list of abundant models and algorithms which have been only dreamed up or really implemented during the last 120 years. There we will encounter models with just a single compartment, with 20 or more or even model with an infinite number of compartments. As a closure, the theoretical path from René Thoms Catastrophe Theory from the 80's [2], [3] to "DCS as a CUSP catastrophe" [4] will be presented as my starting point for an innovative way to look at DCS related phenomena.

Albrecht Salm

Literature

1. Boycott, Damant, Haldane: The prevention of compressed-air illness, J. Hyg. Camb. 1908; 8: 342 - 443.
2. Thom, René: Stabilité Structurelle et Morphogénèse, W. A. Benjamin, Reading, MA, 1972; English transl. Structural Stability and Morphogenesis: An Outline of a General Theory of Models (by David Fowler), W. A. Benjamin, Reading, MA, 1975.
3. Gilmore, Robert (1981) Catastrophe Theory for Scientists and Engineers, Wiley, ISBN 0-471-05064-4.
4. Salm, Albrecht (2019) Is DCS a "CUSP" catastrophe?, Preprint @ researchgate.net: https://www.researchgate.net/publication/335402062_Is_DCS_a_CUSP_catastrophe

Als Ergänzung zur oben abgedruckten englischen Zusammenfassung finden Sie unter dem folgenden Link https://www.divetable.info/BS_ZH/Models_EN.pdf und unter dem nebenstehenden QR-Code die komplette Präsentation des Vortrags.



Hier folgt eine deutschsprachige Erklärung der Vortragspräsentation. Die Zahlen in Klammern (F. xx) gibt die Seitenzahl der dazugehörigen Folie an, die Referenzen [x] finden Sie oben unter "literature" am Schluss des abstracts.

Geschichte und Entwicklung von Tauchtabellen

Die Auswertung der Druckkammerexperimente von J.S. Haldane et al. ([1], F.4) führte zur Entwicklung der ersten Tauchtafel für Lufttauchgänge mit Stufen-Dekompression. Hierzu wurden mit ca. 80 Ziegen ca. 1.000 Kammer-Tauchgänge durchgeführt (F. 11); weiterhin wurden viele Druckkammer-Tauchgänge auch mit anderem Getier veranstaltet (F. 16). An sich selber, seinen Mitarbeitern und seinem Sohn "Jack" (J.S.B. Haldane, damals 13 Jahre alt) wurden Tauchprofile im Freiwasser getestet (F. 12).

Ab ca. 1907 wurde diese Tabelle operativ bei der British Royal Navy eingesetzt. Offenbar war die Tabelle (Table I, F. 13) so erfolgreich in der Verhinderung der Dekompressions-Krankheit, daß Haldane in seinem Buch "Respiration" von 1922 (S. 350, 442) behauptete, DCS sei praktisch verschwunden und nur den ganz seltenen Fällen der Nichtbeachtung der Austauchregeln geschuldet (F. 14).

Dieses Tabellenwerk umfaßte noch eine weitere (Table II) für längere Tauchgänge, bei denen die Summe der Austauschzeit 30 Minuten überschritt. Es wurde später für größere Tiefen und längere Grundzeiten weiterentwickelt (F. 19 im nächsten Vortrag) und bildete auch die Grundlage für Tabellen mit Heliox (Helium-Sauerstoff) als Atemgas. Allerdings formulierten die Autoren auch deutliche Randbedingungen zur Benutzung der Tabellen I & II: die Tauchtiefe sollte 50 m nicht übersteigen. Taucher älter als 45 Jahre und/oder zur Fettleibigkeit neigend sollten die vorgeschriebe-

nen Austauschzeiten verlängern und/oder keine längeren Tauchgänge unternehmen (F. 15).

Die theoretischen Grundlagen der Tabelle waren (F. 5 - 10):

- der menschliche Körper wurde in 5 Modell-Gewebe, die sog.:
- Kompartimente, zerlegt. Die Kenngröße ist die:
- Halbwertszeit; die 5 Kompartimente überdecken das Spektrum:
- 5, 10, 20, 40 und 75 Minuten (in den Folien mit "HT" = half time abgekürzt).
- die Inertgasaufnahme (sowie die -abgabe) gehorchen einer
- Exponentialfunktion, der Exponent ist die Halbwertszeit
- (die Halbwertszeit ist somit im Wesentlichen einfach der Kehrwert der Perfusionsrate)
- Inertgasaufnahme und -abgabe erfolgen symmetrisch
- und parallel in allen Kompartimenten gleichzeitig (F. 22)
- beim auftauchen darf eine Übersättigung von ca. 2:1 nicht überschritten werden (P_{ss} in F.10 sowie F. 21). Allerdings hatten die Autoren auch hierbei Einschränkungen geäußert: die "2:1" Theorie gelte nur für
- "ereignislose Dekompression", also ohne Inertgasblasen (F. 5), die zur Behinderung der Perfusion führen könnten.

Die oben zusammengefaßten Grundlagen werden auch noch heute in aktuellen Dekompressions-Modellen vom Typ "parallele Perfusion" verwendet, die mathematischen Grundlagen sind auf den Folien 5 - 10 zu finden. Im Lauf der Zeit gab es empirische Anpassungen, üblicherweise ausgelöst durch viele Tauchgänge der United States Navy, der Royal British Navy sowie der kanadischen, damals DCIEM:

- die Anzahl der Kompartimente wurde erhöht (9, 12, 16, 20, ...)
- das Spektrum der Halbwertszeiten erweitert (1,25 - 1.200 min)

- die vom Kompartiment zu tolerierende Inertgasübersättigung wurde als
- abhängig von der Halbwertszeit beobachtet; und somit der Wert von "2:1", der konstant für alle 5 Haldane-Kompartimente war (rote Linie in F. 7), durch einen
- variablen Bereich von ca. 3,5:1 für schnelle Kompartimente (mit einer kleinen Halbwertszeit, P_1 in F. 8) bis hin zu ca. 1,2:1 für langsame Kompartimente (große Halbwertszeit, P_5 in F. 8) (sowie F. 21).

Andere Typen von modernen Dekompressionsmodellen (F. 17 - 20) beschreiben die Perfusion von seriell geschalteten Kompartimenten: es werden 4 Modell-Gewebe in Serie, d.h. hintereinander geschaltet mit Inertgas versorgt (F. 28). Weiterhin gibt es die „Dual Phase“-Modelle, die versuchen, nicht nur das im Blut gelösten Inertgas zu berücksichtigen, sondern auch die freie Gasphase, die Gasbläschen. Ebenso gibt es Modelle, die statt der Perfusion zunächst eine einfache Diffusionsgleichung an der Schnittstelle Blut / Gewebe lösen (Thermodynamische Modelle, F. 31 - 33). Da aber sicherlich beide Prozesse (Diffusion und Perfusion, F. 30) zu betrachten sind, waren diese Modelltypen etwas ein-dimensional. Der Typ von "Hybriden"-Modellen will hier Abhilfe schaffen. Die Folie 61 verweist auf eine lange Liste, sicherlich unvollständig, auf ca. 14 alte, neue und ganz unterschiedliche Modelle. Die diesen Modellen gemeinsame Vorgehensweise wird als "deterministisch" bezeichnet: auf Grund von Tauchtiefe, Tauchzeit und Sauerstoffpartialdruck wird eine "sichere Austausch-tiefe", "ceiling" genannt, berechnet: wird diese unterschritten, droht DCS.

Ein Modell versucht, durch einen Algorithmus, eine Rechenvorschrift, einen kleinen Teil der Realität rechenbar zu beschreiben. Da hierbei der Blickwinkel eingeschränkt, auf wenige Aspekte begrenzt ist, die Anzahl der experimentell ermittelten Daten überschaubar und die mathematische Behandlung in endlicher Zeit ein Ergebnis liefern muß, sind die Modelle naturgemäß alle mehr oder weniger falsch. Der sich entwickelnde Streit der Verfechter der unterschiedlichen Modelle, welches denn nun "besser" sei, ist somit als ziemlich überflüssig entlarvt.

Einen Ausweg aus diesem Dilemma liefert die rein statistische Behandlung der Tauchgangsergebnisse („probabilistic“). Im nachhinein müssen zig-10.000de von genau erfaßten Tauchgangsprofilen ausgewertet werden (Folien 41 - 47): damit können

neue Tabellen, ohne Modellaussagen, aber mit einer definierten Wahrscheinlichkeit, sich eine DCS zu kontrahieren ($P(\text{DCS})$) erstellt werden.

Trotz aller physiologischer Unwägbarkeiten (siehe auch F. 13 im nächsten Vortrag) und rechen-technischer Problemchen: DCS ist tatsächlich ein recht seltenes Phänomen geworden: es gibt viele erfolgreiche Implementierungen (F. 48, 50, 51). Mit der vollständigen Publikation der ZH-L 12 und ZH-L 16 Modelle (F. 49) ab 1983 sowie der zunehmenden Verbreitung preiswerter PC-Hardware konnte Jedermann / Jedefrau diese auch nachrechnen bzw. in die elektronische Form eines Tauchcomputers bringen (F. 53, 54). Auf der anderen Seite des Atlantiks dominierten die Modelle der United States Navy (USN) bzw. deren experimenteller Arm, der NEDU (F. 55 - 59). Auch hier wieder die linearen Gleichungen des Workman-Models (F. 56, 57 im Vergleich zu F. 21) welche durch empirische Anpassungen des Entsättigungsvorgangs (grüne und gelbe Linien in F. 58) die DCS Rate in der USN noch weiter nach unten drückten.

Als Wort zum Sonntag mag F. 59 von Bob Hamilton gelten, der uns im nächsten Foliensatz (F. 6) wieder begegnet: Haldane funktioniert, man muß es halt richtig machen ...

Da letztenendes auch anerkannte Mediziner und Forscher nicht so richtig verstehen können, warum denn nun genau dieses Individuum bei einem völlig harmlosen Profil der DCS zum Opfer fällt (z.B. auf F.16 des nächsten Vortrags), wurde durch George F. Bond, dem Vater des Sättigungstauchens, sicherlich nicht ganz Ernst gemeint, ein Ausdruck göttlichen Willens unterstellt (nächster Vortrag, F. 15) und, durchaus als Spaß erkenntlich, hat Edmonds (F.62) die Chaostheorie angeboten. Es ist aber überhaupt nicht abwegig, sich mit der nicht-linearen Beschreibung von komplexen Naturvorgängen vertraut zu machen; dies wird unter dem Begriff "Katastrophen Theorie" subsummiert (F. 63 & 64, und [4]).

Albrecht Salm



UNOSSTIERC

Dekompressions-Theorie - SUPERSCHNELLE GEWEBE
KEIN HARMLOSER NEBEL - Shisha & CO-Intoxikation
Überarbeitet - APNOE-FLYER VON VDST & GTÜM
HBO-THERAPIE - ECHM Empfehlungen auf Deutsch

Editorial



Sehr geehrte Leserinnen,
sehr geehrte Leser,

Aktuelle HBO-Indikationen

Der vorliegende Caisson wird von zwei großen Artikeln geprägt. Zum einen hat sich die Redaktion entschlossen, eine Deutsche Übersetzung der aktuellen Empfehlungen des European Committee for Hyperbaric Medicine (ECHM) im Volltext zu veröffentlichen, um diesen wichtigen Text für die HBO-Therapie auch im deutschsprachigen Raum einer möglichst großen Leserschaft zugänglich zu machen.

Der Text ist zum Lesen zwar etwas sperrig und trocken, zum Nachschlagen mit konkreter Fragestellung kann er aber wertvolle Entscheidungshilfen liefern. Das erscheint nicht ganz unwichtig angesichts der Tatsache, dass die HBO-Therapie in Deutschland mit der Anerkennung der Indikation Diabetisches Fußsyndrom durch die Gesetzliche Krankenversicherung ganz vorsichtig wieder an Boden gewinnt. Eine strikte Einhaltung internationaler Qualitätsstandards ist hier sicher hilfreich.

Superschnelle Gewebe

Der deutsche Physiker Albrecht Salm kam bereits mehrfach im Caisson zu Wort. Immer mit Artikeln zur Dekompressionsberechnung - und ihren Problemen. In diesem Caisson widmet er sich der hochinteressanten Fragestellung der Dekompression nach ultrakurzen Tauchgängen. Hier sind im Besonderen Apnoe-Tauchgänge gemeint. Veröffentlichte Case-Reports und Fallserien über Fälle von DCI (decompression incident) bei Apnoetauchern gibt es mittlerweile einige. Die Existenz dieses Krankheitsbildes kann nicht mehr ignoriert werden.

Offen ist im Einzelfall die Genese der Symptome. Handelt es sich tatsächlich um eine Form der DCS (decompression sickness), die sich aufgrund des am Ende eines Apnoetauchgangs hypoxischen Gewebes evtl. etwas anders entwickelt und darstellt als nach kurzen, tiefen SCUBA-Tauchgängen? - oder handelt es sich um Symptome einer AGE (arterial gas embolism) in den gleichen hypoxischen Geweben? - oder aber handelt es sich um Partikel-Embolien im Sinne eines Apoplex durch die besonderen (patho)physiologischen Verhältnisse bei extremen Apnoe-Expositionen?

Albrecht Salm gibt mit seinem Essay über superschnelle Gewebe eine gute Übersicht über alles, was man im Hinblick auf die Inertgassättigung als mögliche Ursache für die Fälle von DCI bei Apnoetauchern sagen kann - diesseits des schnellsten ZH-L16-Gewebes von Bühlmann mit 4 min Sättigungshalbwertzeit für das Inertgas Stickstoff.

Ihr

Hinweis zum Datenschutz und zur neuen Datenschutzgrundverordnung (DSGVO)

Die GTÜM e.V. hat den Datenschutz schon immer beachtet und entsprechende Sicherheitsstandards eingehalten. Auch in Zukunft werden wir die Daten nur für die direkten Zwecke des Vereines verwenden. Die Datenschutzerklärung haben wir überarbeitet und an die aktualisierte Gesetzgebung angepasst. Für weitere Informationen schauen Sie bitte auf unserer Homepage nach oder kontaktieren Sie uns.

Dr. Karin Hasmler für den Vorstand der GTÜM e.V.

Superschnelle Gewebe



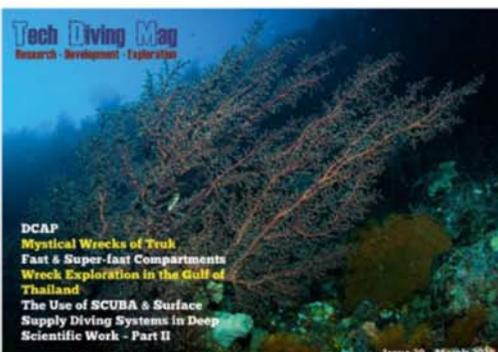
AUTOR

Albrecht Salm
Physiker

PADI Master Scuba-Diver Trainer
SSI Extended Range Instructor
TL für Tauchsportcenter
Esslingen
(www.tauchturm.com)
Berater bei SubMarineCon-
sulting (www.SMC-de.com).
Email: director@SMC-de.com

Bei dem folgenden kleinen Essay über schnelle und super-schnelle Kompartimente handelt es sich nicht um ein streng wissenschaftliches Papier, weder in Form noch im Inhalt, sondern eher um ein paar vorläufige Gedanken zum Thema mit der Absicht das Verständnis und die Diskussion zu fördern.

Leser, welche neu beim CAISSON sind, neu im TEC-Tauchen oder überhaupt Tauchanfänger, mögen sich an ein paar Hintergrundinformationen über deterministische Dekompressionsmodelle und -algorithmen erfreuen (Abschnitt 2: Hintergrund); der erfahrene Taucher kann dies gefahrlos überspringen. Leser, die sich auch nicht gerne mit mathematischen Details herumplagen wollen, dürfen sogar direkt zum Abschnitt 12, dem Fazit, springen. Des weiteren taucht hier die Abkürzung „ca.“ (=circa, ungefähr, ...) sehr häufig auf: **keinesfalls** soll durch die angeführten Zahlen und Formeln der Eindruck erweckt werden, es würde sich hierbei um exakte Wissenschaft handeln.



Die englischsprachige Version dieses deutschen Originalartikels ist am 01.03.2018 im ägyptischen TEC Diving Magazine erschienen.

Er steht unter dem folgenden Link als PDF zum Download bereit:

<http://www.techdivingmag.com/download030.asp>



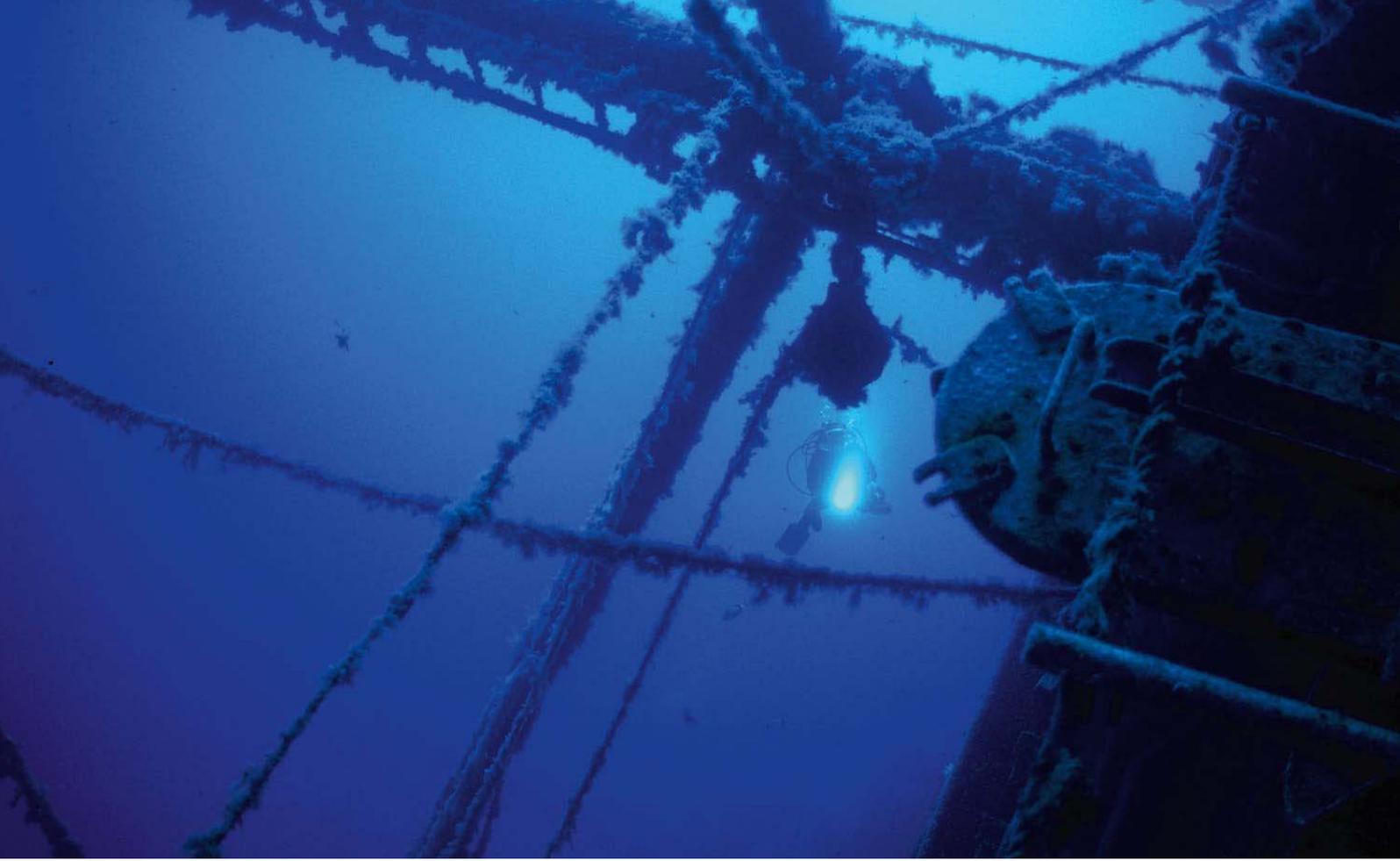


Foto:
Schiffswrack im Mittelmeer (Mykonos) (Foto: Albrecht Salm)

1. Einführung

Während meines allerersten Kurses über Apnoe-Tauchen, so vor ca. 20 Jährchen, bin ich über die Unfähigkeit der üblichen Dekompressions-Tabellen und -Algorithmen gestolpert, ein wirkliches Freitauchprofil abbilden zu können. Mein damaliger Tauchlehrer für diese Themen, Andy Anlauf, zu dieser Zeit zur internationalen Apnoe-Elite gehörend, fragte mich nämlich, ob ich nicht eine Dekompressionstabelle für die Rekordtauchgänge berechnen könne. So getreu dem Motto: „Hey, Albi, du bist doch Physiker! Rechne doch amal: z.B. in 2 min auf 130 m Tiefe und danach wieder zurück zur Oberfläche. Passiert da was???“

Als Einstieg betrachten wir ein Kompartiment, z.B. eines mit der Halbwertszeit ($\tau_{1/2}$) von 12,5 min (es ist das Kompartiment #3 in der üblichen ZH-L Bezeichnungsweise; mehr zu den Kompartimenten und Halbwertszeiten im Abschnitt 2. Abschnitt 7 streift kurz die ZH-L Thematik). Dieses Kompartiment ändert seine anfängliche Inertgassättigung pN_2 von ca. 0,8 Bar (Sättigung auf Meereshöhe) auf nur 1,1 Bar nach 1 min @ 90 m. Die Übersättigung von ca. 0,3 Bar ist nicht ausreichend, irgendeine nennenswerte Dekompressionsverpflichtung zu erzielen. Bis zum Erreichen der Oberfläche sättigt sich das Kompartiment immer noch auf und erreicht ca. 0,5 Bar

Übersättigung. Dies ist aber immer noch nicht hinreichend für einen sinnvollen Dekompressionsstopp. Die höheren Kompartimente, so ab ca. #8, nehmen die Druckexkursion des Apnoe-Tauchgangs nicht einmal wahr: für diese ist der Vorgang viel zu schnell!

Desweiteren existiert ein Phänomen namens „Taravana“: dies beinhaltet die vielen anekdotenhaften Berichte über unerklärbare Fälle von DCS bei Apnoe-Tauchgängen. Besonders bei den Unterwasser-Erntearbeitern von Naturvölkern scheint dies aufzutreten, welche zum Nahrungserwerb viele Wiederholungstauchgänge unter Apnoe innerhalb kürzester Zeit durchführen.

Paulev (vgl. Abschnitt 11) beobachtete Fälle von DCS Typ II während der Notaufstiegsübungen aus U-Booten; Schaefer (vgl. Abschnitt 4) berichtete über N_2 -Blasen in Blutproben bei Apnoe-Tauchern: die Zeitbasis für dieses Phänomen sei innerhalb von 10 sec.

Weiterhin wird in der „TEC Gemeinde“ seit langem eine, stellenweise leicht überhitzte Debatte, über die Wirksamkeit von 1- bis 2-minütigen, sogenannten „tiefen Stopps“ bei Mischgastauchgängen geführt.

Der zeitliche Ablauf aller dieser Beobachtungen bewegt sich in einem „sub 5 Minuten“-Rahmen. Eine

rein phänomenologische Beschreibung benötigt daher eine exponentielle Halbwertszeit ($\tau_{1/2}$) in der Größe eines Bruchteils der maximalen Zeitspanne. Da die grobe Faustregel ca. 6 Halbwertszeiten für eine komplette Sättigung oder auch Entsättigung für jedwedes Kompartiment vorsieht (bei konstantem Druck), erhalten wir folgenden Bruchteil: wir dividieren die max. Zeitspanne von ca. 5 min durch die Anzahl (6) der benötigten Halbwertszeiten und erhalten damit einen ersten Näherungswert von $\tau_{1/2}$ zu ca. 60 sec. Bereits damit kann man mathematisch relativ elegant die raschen Druckänderungen nachvollziehen!

Im nächsten Abschnitt folgt eine ziemlich zackige Einführung in (deterministische) Dekompressionsmodelle und -algorithmen, danach kommt eine kurze (und begrenzte) und schlaglichtartige Literatur-Übersicht, wie andere (durchaus subjektiv ausgewählte) Forscher dieses Thema bereits behandelt haben.

2. Hintergrund: was ist das überhaupt, ein Kompartiment ?

Das folgende ist eine recht freche Kopie aus einem Buch meines Freundes Carl Edmonds (Ref.: Edmonds, Carl. Diving and Subaquatic Medicine, Fifth Edition, 5th Edition. CRC Press, 20150713. VitalBook file). Die Bildchen dazu hat ein anderer Freund beige-steuert: David Doolette, der im Moment für die NEDU arbeitet, die „Naval Experimental Diving Unit of the USN“ (USN = the United States Navy).

Aufbauend auf der Darstellung in Abbildung 1 betrachten wir nun das Szenario eines Tauchganges mit mehreren, nämlich mit 5 Kompartimenten: das untere Bildchen zeigt die Stickstoff-Aufnahme von 5 hypothetischen Kompartimenten. Diese 5 Kompartimente sind alle durchblutet, allerdings mit unterschiedlichen Perfusionsraten, ergo auch mit unterschiedlichen Halbwertszeiten. Der Tauchgang wird mit Luft auf eine Tiefe von 30 m (ca. 4 atm) durchgeführt. P_{amb} ist der absolute, der Umgebungsdruck in Atmosphären (atm). Der inspiratorische als auch der alveolare Inertgasdruck steigen auf ~ 3.1 atm (hier nicht dargestellt): der arterielle Inertgaspartialdruck (P_{aN_2}) paßt sich (mehr oder weniger) unmittelbar an.



Foto:
Flusstauschen in der Verzasca (Tessin)
(Foto: Albrecht Salm)

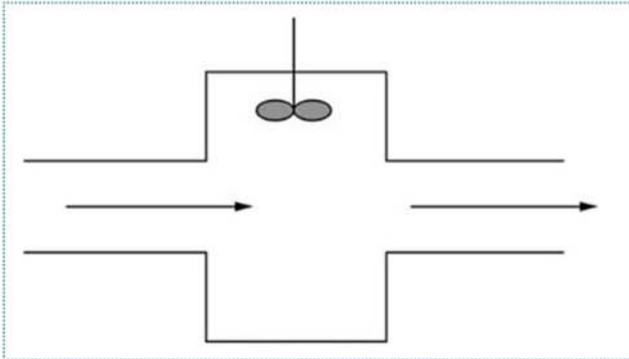


Abbildung 1

Das obige Bildchen zeigt ein einfaches Modell für ein begrenztes Volumen irgendeiner durchbluteten Region des Körpers eines Säugetieres: gezeigt ist nur ein einziges Kompartiment, also mit nur einer Halbwertszeit. Es ist das Modell für ein sogenanntes „gut durchmisches“ Gewebe, daher das Symbol mit dem kleinen Mixer. „Gut durchmischt“ bedeutet, daß das mit dem arteriellen Blutfluß (linker Pfeil) antransportierte Inertgas sich relativ zügig mit dem umliegenden Gewebe durchmischt und ein, nun etwas veränderter, Inertgasanteil sich im venösen Blut (rechter Pfeil) entweder zu weiteren Kompartimenten bzw. zur Lunge, bewegt (mit freundlicher Genehmigung der Herren Carl Edmonds & Dr. David Doolette, USN).

Bedingt durch die endlichen (Transport-)Kapazitäten von Blut, Lunge und Kreislauf steigen die Inertgasdrücke in den verschiedenen Körpergeweben und damit auch in den Kompartimenten, etwas langsamer an. Nur die Modellgewebe #1 und #2 erreichen in etwa eine Sättigung während dieses Tauchganges. Mit der oben erwähnten Faustregel kann man aus dem Graph die Halbwertszeiten der fraglichen Kompartimente abschätzen: z.B. erreicht P_1 seine 50% Sättigung nach 5 min, also wird es nach $6 * 5 = 30$ min gesättigt sein; P_2 nach $6 * 10$ min (Abbildung 2).

Die Graphen der Kompartiment-Sättigung zeigen ein sogenanntes „exponentielles“ Verhalten der Form $[1 - e^{-kt}]$ mit $k = \ln(2) / \tau$, der Halbwertszeit τ und der Tauchzeit t in min: typisch für sehr viele Phänomene in der echten Natur. Die Mathematik dahinter, eine einfache lineare Differential-Gleichung, ist bereits vielfach an anderen Orten ausführlich beschrieben z.B. da: <https://www.divetable.info/theorie.htm>.

In diesem einfachen Modell befinden sich P_1 bis P_5 in einer *Parallel*-Schaltung (vergleiche das untere Schaubild, unterer Teil). Selbstverständlich sind auch andere Modelle mit anderen Schaltungen der Kompartimente denkbar. Die berühmtesten Dekompressionsmodelle, also diejenigen von Haldane, Workman (USN Tabellen), Schreiner und Bühlmann (ZH-L) und Bühlmann-Hahn benutzen genau diese Parallel-Schaltung. Dagegen wird im obigen Teil des unteren Bildchens eine *Serien*-Schaltung der Kompartimente dargestellt. Ein solches Modell benutzen Kidd, Stubbs, Nishi et al für die DCIEM Tabellen: die Luft- und Mischgas-Tauchtabellen für kanadische Militär- und Berufstauchgänge. Wir sehen 4 Kompartimente, bezeichnet mit # 1 → # 4, mit den Halbwertszeiten $t_{1/2}$: HWZ 1 → HWZ 4. In dieser speziellen Serien-Schaltung müssen die Halbwertszeiten nicht unbedingt unterschiedlich sein.

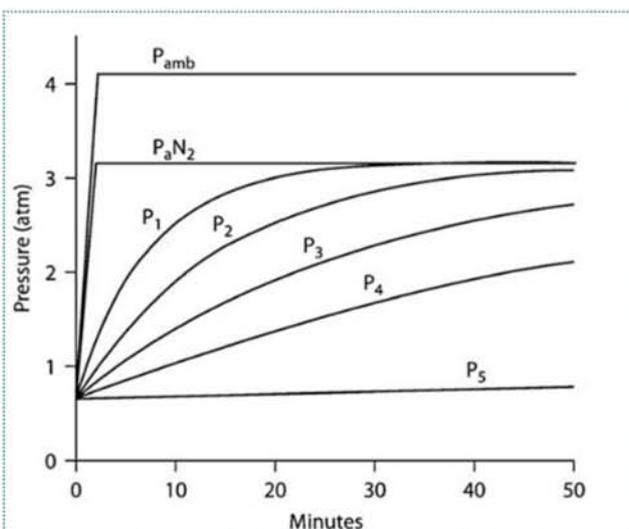


Abbildung 2

Mit der erwähnten Faustregel kann man aus dem Graphen die Halbwertszeiten der fraglichen Kompartimente abschätzen: z.B. erreicht P_1 seine 50% Sättigung nach 5 min, also wird es nach $6 * 5 = 30$ min gesättigt sein; P_2 nach $6 * 10$ min (mit freundlicher Genehmigung von Dr. David Doolette, USN).

Alle diese Modelle werden „deterministisch“ genannt: sie versuchen eine sichere Dekompression vorherzusagen. Sichere Dekompression bedeutet eine voraus berechnete Kombination von Stopp-Zeiten und Stopp-Tiefen, beruhend ausschließlich auf der bisherigen Historie des Tauchganges; d.h. auf dem Tiefen-Zeitprofil sowie des Inertgasgehaltes des Atemgemisches.

In einer komplett anderen Liga spielen die „statistischen“ Dekompressionsmodelle: hier werden die Ergebnisse von -zig tausenden Tauchgängen im Nachhinein analysiert: die Ergebnisse (DCS: JA oder

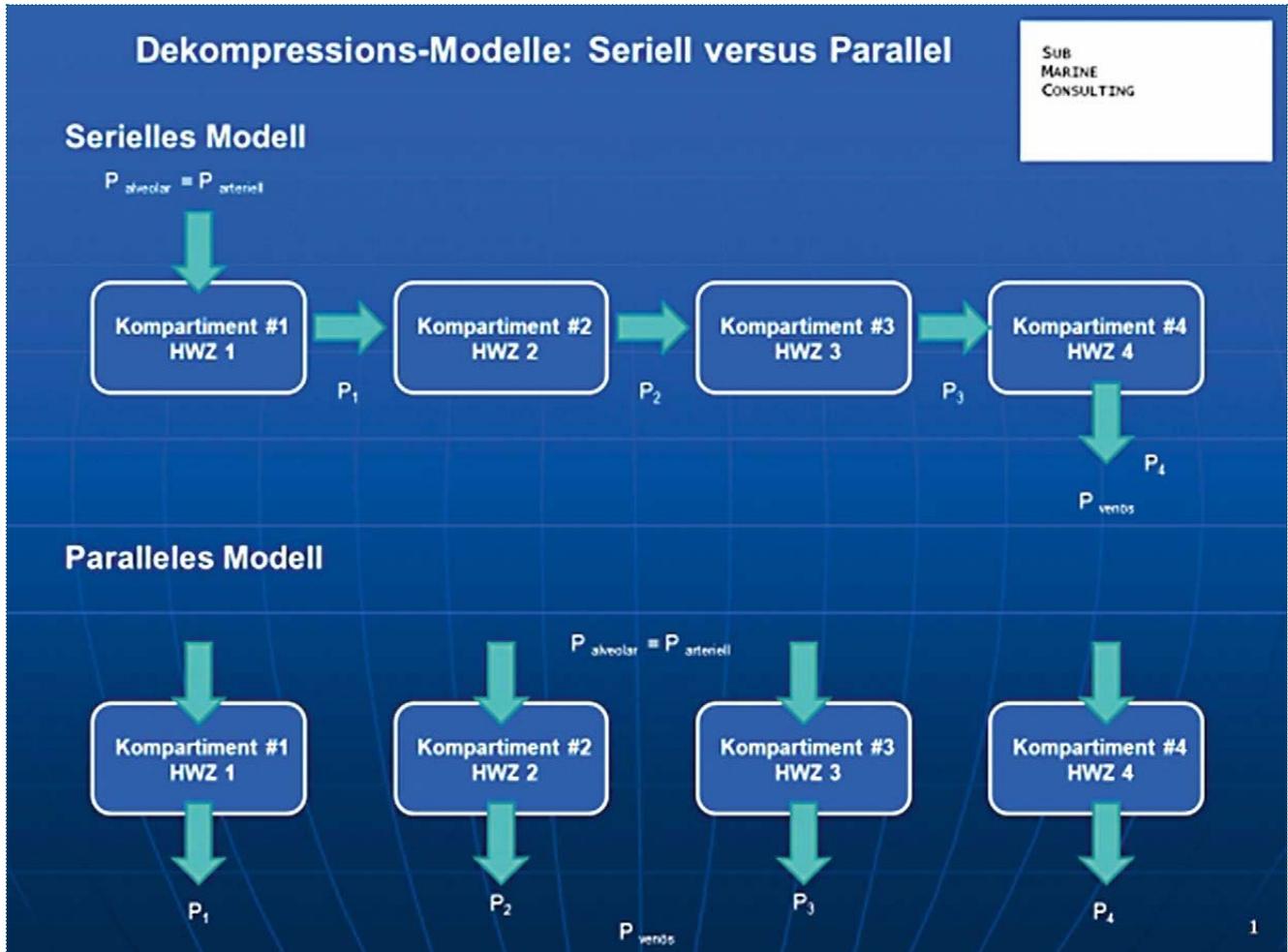


Abbildung 3
Serielle versus Parallele Dekompressionsmodelle (Grafik Albrecht Salm)

NEIN) werden dann mathematisch in Einklang (best „fit“) mit einer theoretischen Übersättigung gebracht und erst anschließend wird eine neue Tauchtafel produziert mit einer bereits vorberechneten Wahrscheinlichkeit (p(DCS)) die Dekompressionskrankheit zu kontrahieren.

Physiologische Definition der Kompartiment-Halbwertszeit

Wie oben skizziert, sind die Halbwertszeiten ($\tau_{1/2}$) mit dem bewegten Blutvolumen verknüpft, d.h. Volumen pro Zeit (ml pro min) pro ml Kompartimentvolumen; daher sieht die streng physiologische Definition so aus:

$$\tau_{1/2} = 0,693 * \alpha_{ti} / (\alpha_{bi} * dQ/dt) \quad (0)$$

Definition der weiteren Variablen:

- α_{ti} : Löslichkeit des Inertgases im Gewebe (tissue = ti), $ml_{(S)gas} * ml_{ti}^{-1} * (100 \text{ kPa})^{-1}$
- α_{bi} : Löslichkeit des Inertgases im Blut (Blut = bl), $ml_{(S)gas} * ml_{blood}^{-1} * (100 \text{ kPa})^{-1}$
- dQ/dt: Perfusionsrate, $ml_{blood} * ml_{ti}^{-1} * \text{min}^{-1}$

Das Verhältnis der Löslichkeiten Blut / Gewebe ($\alpha_{bl} / \alpha_{ti}$) führt einen bekannten Namen: es ist der „Partitions-Koeffizient“; dieser kann aus Tabellen entnommen werden, z.B. aus denen der sogenannten PBPK (vgl. Abschnitt 8). Wenn weder zum Partitions-Koeffizient noch zur Perfusions-Rate präzise gemessene Daten vorliegen, wird einfach alles zu einem einzigen Wert zusammengezogen! Diese Vorgehensweise führt direkt zur pragmatischen Schreiner Matrix (vgl. Abschnitt 5).

Ein Kompartiment als „Tief-Pass“!

Die Exponentialfunktionen die die Auf- und Entsättigung der Kompartimente beschreiben, ähneln denen eines elektronischen Schaltkreises, bestehend aus einem Widerstand und einem Kondensator. Solche Schaltungen kann man benutzen, um z.B. Wechsel- in Gleichstrom umzuformen: die höherfrequenten Anteile des Wechselstromes werden gefiltert. Übrigbleiben lediglich die niederfrequenten Anteile des Signals; daher der Name „Tief Pass“.

Wenn jetzt im Tauchprofil Bewegungen mit einem „Hochfrequenz“-Verhalten erscheinen, also substantielle Tiefenänderungen in relativ kurzer Zeit, wie z.B. beim „Jo-Jo“-Tauchen, ist der Dekompressionsalgorithmus „blind“ dafür: der Tauchcomputer mag sicherlich in der Logbuch-Datei diese Werte speichern, die relativ langsamen Kompartimente können das garnicht bemerken.

(Ref.: Hahn MH (1989): Responses of decompression computers, tables and models to „yo-yo“ diving, Undersea Biomed Res 16 (Suppl.): 26.)

3. Experimente mit Ziegen: Haldane

THE PREVENTION OF COMPRESSED-AIR ILLNESS.

By A. E. BOYCOTT, D.M.,

G. C. C. DAMANT,

Lieut. and Inspector of Diving, R.N.,

AND J. S. HALDANE, M.D., F.R.S.

IN: J. Hyg. Camb. 1908; 8:342-443.

Zur Erstellung der weltweit ersten Dekompressionstabelle mit Stufendekompression für Lufttauchgänge haben die Autoren ca. 1.000 Druckkammer-Tauchgänge von über 80 Ziegen (und weiteren, ungezählten kleineren Tierchen) ausgewertet. Die Schar der 5 benutzten Halbwertszeiten wurde einfach über Verdoppelungen der 5-Minuten Halbwertszeit des Kompartiments #1 erzeugt: 5, 10, 20, 40 min. Die letzte, die 5. Halbwertszeit von 75 min entsprach einer theoretischen Sättigung mit Stickstoff der Ziegen nach geschätzten ca. 5 bis 7,5 h (a.a.O.: S. 349 & 350). Gemäß diesen Regeln wären auch Kompartimente mit Halbwertszeiten von 2,5 oder 1,25 min denkbar. Und tatsächlich gab es schon Hinweise auf rasch ablaufende physiologische Prozesse mit schnellerer Sättigung. Auf S. 348 werden 10 min postuliert. Aus dieser ca. 10-minütigen Sättigung kann man somit eine Halbwertszeit von 10 min / 6 → ca. 1,6 min ableiten.

Dies wiederum könnte man benutzen, um mit der berühmten „2:1“ Regel von Haldane et al. die alten, originalen (Luft-)Tauchtabelle der o.g. Veröffentlichung zu modifizieren. Das Ergebnis der modifizierten „neuen“ Haldane-Tabellen zeitigt in der Tat „tiefe Stopps“, also tiefere Stopps wie im Original vermerkt von einer 1 - 2 minütigen Dauer, ohne allerdings die flacheren Stopps substantiell zu verlängern!



Anmerkung: eine ziemlich einfache Prozedur, wie man das selber machen und auch nachrechnen kann sowie eine ausführliche Würdigung der Arbeit von Haldane et al findet man in: [TDM, Issue 25, December 2016, S. 13-20](http://www.techdivingmag.com/download025.asp). Download-Link: <http://www.techdivingmag.com/download025.asp>

4. U-Boot Notausstiege: Schaefer

In seinem Beitrag zum 1. „Underwater Physiology Symposium“ im Jahre 1955:

4.6 THE ROLE OF CARBON DIOXIDE IN THE PHYSIOLOGY OF HUMAN DIVING

K. E. Schaefer
Physiology Branch
U. S. Naval Medical Research Laboratory

beschreibt Schaefer auf S. 135 Notaufstiege im U-Boot Trainingsturm. Nach Tauchgängen unter Apnoe auf 90 feet (ca. 27,5 m) wurden in arteriellen und venösen Blutproben Gasbläschen entdeckt, welche nicht dem CO₂ sondern N₂ zugeschrieben wurden. Die Blutproben wurden den Tauchern unmittelbar bei Erreichen der Oberfläche entnommen. Der Blutschaum schien nach ca. 10 sek. an der Oberfläche zu verschwinden oder ca. 40 sek. nach Beginn des Aufstiegs. Eine tolerierte Übersättigung von ca. 3:1 schien überschritten. Die Tauchgänge waren im Bereich 1 bis max. 2 Minuten.

Dies würde einen Entsättigungsprozeß mit einer angenommenen Halbwertszeit von $10 + 40 / 6 \rightarrow$ ca. 10 sek. sowie einen Sättigungsprozeß mit Halbwertszeiten von 1/6 bis ca. 2/6 min. beschreiben.

5. Die pragmatische Schreiner Matrix

In dem Beitrag zum 4. Symposium von "Proceedings of the Fourth Symposium on Underwater Physiology 1971" sehen wir die „pragmatische“ 4 * 4 Schreiner Matrix mit ihren 16 Kompartimenten; das Kompartiment #0 wurde aber nie benutzt.

A PRAGMATIC VIEW OF DECOMPRESSION

H. R. Schreiner and P. L. Kelley

“The whole meaning of a conception expresses itself in practical consequences, either in the shape of conduct to be recommended or in that of experience to be expected if the conception is true.”

William James, 1842–1910 (20)

		Tissue fat fraction (X)			
		0	0.3	0.7	1.0
Specific rate of tissue perfusion (Q/R)	min^{-1}	0	0.3	0.7	1.0
	0.3	0	1	2	3
	0.1	4	5	6	7
	0.03	8	9	10	11
	0.0085	12	13	14	15

FIG. 2. Derivation of inert gas exchange compartments by the arbitrary pairing of four specific rates of tissue perfusion and four levels of tissue fat fraction. The resulting compartments are numbered 0 to 15 as shown.

min^{-1})* in solving Eq. (13), one obtains a total of 16 different values of k representing 16 inert gas exchange *units* or *compartments*. These entities are not necessarily identifiable anatomical substructures of the body but rather represent assemblages of those regions within the human body that happen to be characterized by one and the same specific time constant of inert gas transport. These 16 inert gas exchange *compartments* (numbered 0 to 15 for ease of reference) are shown schematically in Fig. 2. It is immediately clear that any other arbitrary array of \dot{Q}/R and x may be employed to derive gas exchange *compartments* as long as representative and minimal rates of the specific rate of tissue perfusion and extreme values of fat fraction are included.

Damit kann man (*) sehr einfach ein „super-schnelles“ Kompartiment ableiten, z.B. mit Halbwertszeiten von 2,5 oder 1,25 min, wenn man das Schema auf S. 210 mit folgenden Parametern ausnutzt: $dQ/dt * R = 0,2772 \text{ min}^{-1}$ resp. 0,5544 (Fett-Anteil $X = 0,0$).

6. (USN) United States Navy Methode: Workman

(Workman, Robert D. "Calculation of Decompression Tables for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives," Research Report 6-65, U.S. Navy Experimental Diving Unit, Washington, D.C.; 26 May 1965)

Hier haben wir die Kompartiment-Halbwertszeiten für N₂ von 5 bis 240 min (a.a.O.: S. 5) sowie die dazugehörigen sogen. "M"-Werte; die erlaubten, maximalen (daher M) Inertgasübersättigungen:

half time (h)	5	10	20	40	80	120	160	240
M (ft)	104	88	72	56	54	52	51	50
ΔM/Δ10 ft.	+18	+16	+15	+14	+13	+12	+11	+11

Die M-Werte können anhand einer sehr einfachen, empirischen linearen (Geraden-) Gleichung für jedes Kompartiment separat berechnet werden (Gleichung 1):

$$M = M_0 + \Delta M * d \quad (\text{Gleichung 1})$$

Hierbei ist M₀ der maximale Inertgasüberdruck für die Tauchtiefe 0 feet und ΔM ist die Steigung der Geraden, multipliziert mit der Tauchtiefe (in feet). Die angegebenen M-Werte sind allerdings nicht in der Längeneinheit feet sondern in einer Druckeinheit zu interpretieren (fsw oder fswa: feet of seawater, absolute).

Spaßeshalber haben wir (*) die ΔM (Delta M) und M₀ Werte über die Halbwertszeiten angepasst und mit diesem "best fit" schnellere Kompartimente und die dazugehörigen maximalen Übersättigungen berechnet:

fit für M₀

Unsere „Generator-Funktion“ ergibt, mit einem Korrelationskoeffizient von nahezu 1, als Beispiel für Halbwertszeiten von 1,25, 2,0 & 2,5 min folgende Werte für M₀: 156, 134 & 126 fswa.

fit für ΔM

Das gleiche Generator Polynom gibt uns hier, ebenso mit einem überraschend großen Korrelationskoeffizient, für die oben ausgesuchten Halbwertszeiten von 1,25, 2,0 & 2,5 min die Geradensteigungen ΔM mit: 37,5, 8,4 & 4,5.

7. Schweizer Bergseetauchen: Bühlmann

Referenz: "Tauchmedizin", Albert A. Bühlmann, Ernst B. Völlm (Mitarbeiter), P. Nussberger; 5. Edition in 2002, Springer, ISBN 3-540-42979-4). Das dort beschriebene, sogenannte „ZH L-16“ System (ZH für Zürich, L für lineare Übersättigungsgleichung; sowie 16 für die Anzahl der a- & b-Koeffizientenpaare für jedes Inertgas) ist der direkte Nachfolger der Schreiner 4 * 4 Matrix (a.a.O., S. 158):

Tabelle 25. Die Koeffizienten ZH-L16 für N₂

Kompartiment Nr.	t _{1/2} N ₂ [min]	ZH-L16A „theoretisch“		ZH-L16B Tabelle	ZH-L16C Computer
		b	a	a	a
1	4,0	0,5050	1,2599	1,2599	1,2599
1b	5,0	0,5578	1,1696	1,1696	1,1696
2	8,0	0,6514	1,0000	1,0000	1,0000
3	12,5	0,7222	0,8618	0,8618	0,8618
4	18,5	0,7825	0,7562	0,7562	0,7562
5	27,0	0,8126	0,6667	0,6667	0,6200
6	38,3	0,8434	0,5933	0,5600	0,5043
7	54,3	0,8693	0,5282	0,4947	0,4410
8	77,0	0,8910	0,4701	0,4500	0,4000
9	109,0	0,9092	0,4187	0,4187	0,3750
10	146,0	0,9222	0,3798	0,3798	0,3500
11	187,0	0,9319	0,3497	0,3497	0,3295
12	239,0	0,9403	0,3223	0,3223	0,3065
13	305,0	0,9477	0,2971	0,2850	0,2835
14	390,0	0,9544	0,2737	0,2737	0,2610
15	498,0	0,9602	0,2523	0,2523	0,2480
16	635,0	0,9653	0,2327	0,2327	0,2327

Hier gibt es bereits eine einfache, empirische Beziehungen zwischen der Halbwertszeit $\tau_{1/2}$ eines Kompartiments und der erlaubten, tolerierten Übersättigung für das Inertgas N₂. Wenn wir nun diese beiden angegebenen Gleichungen für die Koeffizienten a & b (von S.129, Gleichung 2) mit der linearen Gleichung für den tolerierten Umgebungsdruck (Gleichung 3, a.a.O., S. 117) zu einer Gleichung kombinieren:

$$a = 2,0 \text{ bar} * (\tau_{1/2} \text{ N}_2 [\text{min}])^{-1/3} \quad \text{(Gleichung 2)}$$

$$b = 1,005 - 1 * (\tau_{1/2} \text{ N}_2 [\text{min}])^{-1/2}$$

$$P_{\text{Kompartiment}} = (P_{\text{ambient, tolerated}} / b) + a \quad \text{(Gleichung 3)}$$

erhalten wir das Generator-Polynom von Gleichung 4 und setzen den tolerierten Umgebungsdruck auf 1 Bar für einen direkten Aufstieg zur Oberfläche:

$$P_{\text{Kompartiment}} = (1 \text{ Bar} / (1,005 - \tau^{-1/2})) + (2 \text{ Bar} * \tau^{-1/3}) \quad \text{(Gleichung 4)}$$

Auch hiermit kann man nun schnellere Kompartimente und die dazugehörigen erlaubten Übersättigungen berechnen. Allerdings divergiert dieser kleine Algorithmus bei einer Halbwertszeit von $\tau_{1/2} = 1,005$ min, somit ist dies das schnellste Kompartiment hier.

Unsere bisherigen gewählten Halbwertszeiten von 1,25, 2,0 & 2,5 min liefern dann die tolerierten Kompartiments-Überdrücke von ca. 11, 4,95 & 4,1 Bar. Diese vergleichen wir jetzt direkt mit den Ergebnissen aus der Workman-Anpassung für M_0 : i.e. für die Tauchtiefe $d = 0$ feet in (Gleichung 1): 4,8, 4 & 3,9 Bar.

8. PBPK: Mapleson, Nishi, Flook et al.

Eines der ersten, sogenannten PBPK (**P**hysiologically **B**ased **P**harmaco-**K**inetic Model) welches mittels einer Simulation mit einem elektrischen, analogen Schaltkreis gelöst wurde, war dasjenige von Mapleson. Es war dazu gedacht, die Gasaufnahme von Narkosegasen wie Halothan im menschlichen Körper zu simulieren: Mapleson, W.W. An electrical analogue for uptake and exchange of inert gases and other agents. J. Appl. Physiol. 18: 197 - 204, 1963.

Frühere Versuche (Morales, M.F. and R.E. Smith, 1944, 1945 & 1948 in: Bulletin of Mathematical Biophysics) waren nicht ganz so erfolgreich, da zu dieser Zeit die erforderliche schnelle Hardware einfach nicht erhältlich war.

Da die PBPK auch für weitere Simulationen, z.B. für die Drogenaufnahme oder auch ganz andere Umwelteinflüsse gebraucht werden können, kann mit Fug' und Recht das Haldane Modell als eines der wirklich ersten PBPK bezeichnet werden.

Die Parameter von Mapleson wurde auch für den operativen Tauchbetrieb ausgebeutet: Flook, V., R. Nishi, A. Khan. Modelling and Validation of Treatment Tables for Severe Decompression Accidents; in: Operational Medical Issues in Hypo-and Hyperbaric Conditions [les Questions medicales a caractere operationel liees aux conditions hypobares ou hyperbares] ADA395680, DCIEM, Oct. 2000.

Hier finden wir bereits super-schnelle Kompartimente, nämlich die # 1 & 2 in der unteren Tabelle:

Characteristics of each compartment. Time constant in minutes.

Compartment	Tissues	Time constant	
1	Adrenals, kidneys, thyroid	0.86	
2	Heart, brain grey matter	1.87	
3	Liver plus portal system, other small glands and organs	3.07	
4	Brain white matter	5.31	
5	Red marrow	12.25	
6	Muscle and skin	50.62	
7	Nonfat subcutaneous	69.14	
8	Fatty marrow and fat	nitrogen	211.3
		helium	78.3

Zum Vergleich nehmen wir die Referenzdaten für den menschlichen Körper (Ref.: L R Williams* and R W Leggett; Metabolism and Dosimetry Research Group, Health and Safety Research Division, Oak Ridge; National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831-6383, USA, 21 February 1989). A.a.O. finden wir auf S. 188 eine Zusammenstellung der relevanten Perfusionswerte:

Table 1. Blood flow rates (ml per kg tissue per min) to tissues of resting man, as given in some reviews and physiology texts.

Tissue	Mapleson 1963 ^(a)	Bell <i>et al</i> 1968 ^(b)	Cowles <i>et al</i> 1971 ^(c)	Brobeck 1979 ^(d)	Ganong 1979 ^(e)	Guyton 1982 ^(f)
Adipose tissue	20	–	24	–	–	–
Adrenals	5000	–	5100	–	–	1800
Bone	0	120	0	–	–	50
Brain	510	650	530	540	540	500
Lung tissue	–	–	–	570	–	180
Heart tissue	800	1000	810	700	840	610
Intestines	–	700	390	540	–	700
Kidneys	4100	1500	4000	4300	4200	3600
Liver (total)	410	1500	840	540	580	750
Red marrow	90	–	400	–	–	–
Skeletal muscle	20-50	20	21	27	27	26
Skin	20-50	30	57	–	130	120
Spleen	–	400	390	–	–	700
Thyroid	4000	5600	5000	–	–	2500

Die Raten variieren nicht nur um einen Faktor von ca. 250 von Knochen (ca. 20) bis hinzu 5000, sondern auch im Laufe der Zeit und von Autor zur Autor. Allerdings sollte auch genau diese Varianz im Spektrum der verwendeten Halbwertszeiten eines Dekompressionsalgorithmus zu finden sein. Darüber hinaus fällt auf, dass i.d.R. 14 oder weniger („echte“) Kompartimente adressiert werden. Dies könnte durchaus bedeuten, daß einige Tauchcomputer, welche ja mehr wie 14 benutzen, nicht wirklich näher an die physiologische Realität herankommen. Das vielleicht einzige Argument für ein dichtes Spektrum an Halbwertszeiten wäre dann eher philosophisch, in dem Sinne, dass „die Natur keine Sprünge macht“ (Gottfried Wilhelm Leibniz: La nature ne fait jamais de sauts).

9. Mix aus zwei Modellen: Egi & Gürmen

Eine sehr hübsche Methode ist in diesem Papier zu finden: Egi SM, Gürmen NM: Computation of decompression tables using continous Kompartiment half-lives. Undersea Hyper Med 2000; 27(3): 143 – 153.

Die Autoren betrachteten die Workman- als auch die Bühlmann-Methoden: aber anstatt, wie oben im Abschnitt über Workman & USN, jeweils die M-Werte separat über die Halbwertszeiten anzupassen, kombinierten sie alle M-Werte aus beiden Systemen miteinander. Das Ergebnis ist eine geglättete Kurve von M-Werten über die Halbwertszeiten, ebenso mit einem sehr hohen Korrelationskoeffizient (R^2 in der unteren Abbildung). Der Graph der logarithmischen Funktion $\ln(M)$ über dem Logarithmus der Halbwertszeiten $\ln(\tau_{1/2})$ ergibt eine gerade Linie (a.a.O., Fig. 7 auf S. 149).

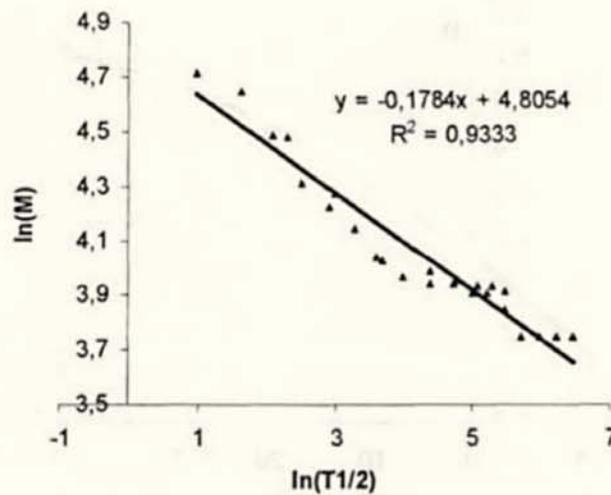


FIG. 7—Correlation between $\ln(M)$ and $\ln(T_{1/2})$ for the hybrid data set (Workman and Bühlmann) at sea level.. Table 4 lists the slope of the line and y-intercepts of different data set combinations.

Auch dies können wir ausschichten und benutzen die angeführte Funktion y mit $x = 0,25$ (i.e.: Halbwertszeit = 1,28 min) und erzielen hiermit $M_0 = 117$ fswa; mit $x = 0,1$ (Halbwertszeit = 1,1 min) erreichen wir $M_0 = 126$ fswa.

10. Apnoe und DCS Typ II: Goldman et al.

Ref.: Decompressionsickness in breath-holddiving, and its probable connection to the growth and dissolution of small arterial gasemboli; Saul Goldman, J.M.Solano-Altamirano, Mathematical Biosciences 262 (2015): 1-9.

In der aktuellsten der geprüften Veröffentlichungen finden wir ein schönes super-schnelles Kompartiment (Brain) mit der Halbwertszeit von 72 sec (Ref.: a.a.O., S. 5):

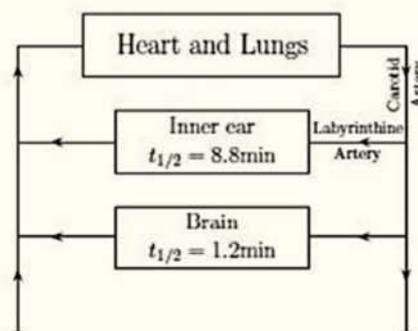


Fig. 3. Independent parallel compartmental model of the head showing the brain and inner ear, each represented as independent mono-exponential compartments, with their respective half-lives ($t_{1/2}$).

11. Ein „Fit“ über die Daten von Paulev

Meine Quelle für die Veröffentlichungen von Paulev war Karl Huggins, mit dem ich die Diskussionen zum Thema seit der Jahrtausendwende führte. Karl erstellte seine Version der USN Tabelle („HUGI Table“) und war dabei, als Anfang der 80'ger einer der ersten kommerziell erhältlichen Tauchcomputer, der Orca EDGE, entwickelt wurde. Der Orca EDGE war auch einer der Ersten, der eine vollständige Sättigungs-/Entsättigungsrechnung durchführte und nicht nur eine Interpolation einer gespeicherten Tauchtafel.

Wie im Abschnitt „Einführung“ kurz erwähnt, beobachtete Paulev an sich selber DCS Type II während eines Notaufstiegsstrainings (Ref. 1). Dies wurde erfolgreich in der Druckkammer behandelt. Daraufhin führte er Messungen an ausgeatmeten Gasen nach Apnoe Tauchgängen durch (Ref. 2 & 3):

1. PAULEV, P. Decompression sickness following repeated breathhold dives. *J. Appl. Physiol.* 20(5) : 1028-1031. 1965
2. PAULEV, POUL-ERIK, AND NOE NAERAA. Hypoxia and carbon dioxide retention following breath-hold diving. *J. Appl. Physiol.* 22(3) : 436-440. 1967.
3. PAULEV, POUL-ERIK. Nitrogen tissue tensions following repeated breath-hold dives. *J. Appl. Physiol.* 22(4): 714-718. 1967:

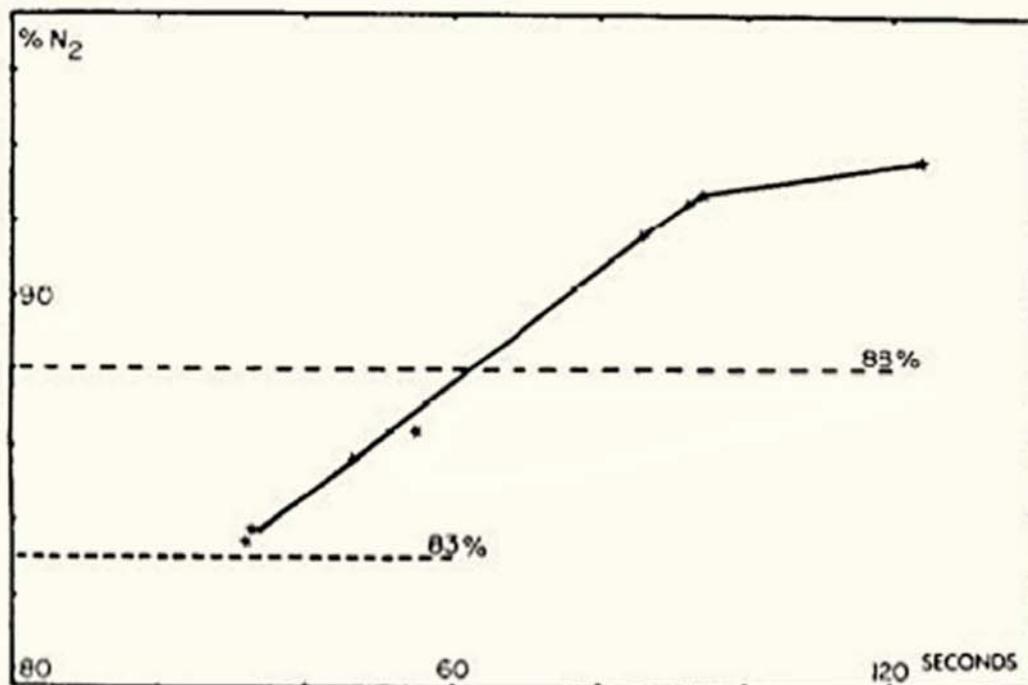


FIG. 1. N₂ percentages from alveolar samples obtained at the bottom of a 18.5 m deep submarine escape-training tank (7). The abscissa is the period from the start of the dive to the time of sampling. The mean durations for descent and ascent in such dives are in seconds [\pm SE (n = 14)]: 22.6 \pm 0.3 and 13.3 \pm 0.6, respectively.

Aus der veröffentlichten Messung (Fig. 1 auf S. 715 der Ref. 3; wie auch die Fig. 3 auf S. 438 der Ref. 2) haben wir (SubMarineConsulting: www.SMC-de.com) die Roh-Daten graphisch extrahiert und eine Kurvenanpassung gerechnet um die N_2 Aufnahme für ein super-schnelles Kompartiment zu simulieren. Die Anpassung an eine mono-exponentielle Sättigungsfunktion wie:

$$Y = 1 - a * \text{EXP}(- b * X) \quad (\text{Gleichung 5})$$

mit $Y = N_2$ Sättigung, alveolar [%]
und $X = \text{Tauchzeit}$ [Sekunden]
ergibt das folgende:

$$a = 0,24$$

$$b = 0,01$$

ebenfalls mit einem recht hohen Korrelationskoeffizient von ca. 0,97; die weiteren mathematischen Details würden allerdings den Rahmen des Essays hier sprengen. Aber nichtsdestotrotz haben wir natürlich so etwas wie eine:

Fehlerfortpflanzung

Der allgegenwärtige Fehler beträgt hierbei ca. +/- 12% aus den Messwerten, da diese ja nur graphisch und nicht digital vorliegen.

Halbwertszeit des super-schnellen Kompartiments

Daraus resultiert nun eine Halbwertszeit, die, wie definiert, $\tau_{1/2} = \ln 2 / b \rightarrow \tau_{1/2} \text{ ca. } 70 \text{ sec } +/- 12 \text{ to } 15\%$ beträgt und damit überraschend genau mit dem theoretischen Wert von Goldman (vgl. Abschnitt 10) übereinstimmt. Daraus wiederum würden sich mit den Gleichungen (2 - 4) im Bühlmann-System ein maximal tolerierter Überdruck von ca. 8 bis 20 Bar berechnen lassen. Selbstverständlich können derart große Werte kontrovers diskutiert werden, aber im Moment sind einfach nicht genügend belastbare Daten vorhanden. Deshalb ist auch eine umgekehrte Variante durchaus denkbar: die üblichen erlaubten Überdrücke von ca. 3 - 3,5 Bar für die bisherigen traditionellen Kompartimente mit den Halbwertszeiten 5 bis 2,5 min könnten auch für die super-schnellen Kompartimente benutzt werden.

12. Fazit

- Ein Kompartiment ist kein definierter physiologischer Körperteil,
- im Gegenteil: es ist eher eine Gruppe von mehreren Geweben, die einige Gemeinsamkeiten teilen, z.B.:
- die Durchblutungsrate;
- die ist der einfache mathematische Kehrwert der Halbwertszeit welche in den Exponentialkurven der Sättigungsrechnung benutzt wird.
- Werden mehrere Kompartimente benutzt, z.B. in einem Tauchcomputer oder einem Dekompressionsmodell, fördert das keinerlei neue medizinische Einsichten, lediglich:
- die vorliegenden experimentellen Daten können besser angepasst werden.
- Für ziemlich schnelle Prozesse, z.B. beim „Jo-Jo“- oder Apnoetauchen, sind die bisher benutzten Halbwertszeiten bei weitem zu groß, i.e.:
- der Tauchcomputer (bzw. eigentlich das Dekompressionsmodell) verhält sich wie ein „Tief Pass“.
- Um derart schnelle Prozesse zu simulieren werden ziemlich schnelle oder auch superschnelle Kompartimente benötigt; z.B. im Bereich der „Minutenbruchteile“ mit Halbwertszeiten $\tau_{1/2}$ von ca. 30 sec bis zu 1,5 min.

Albrecht Salm

Yet Another Benchmark

Der etwas andere Vergleich - Teil III



AUTOR

Albrecht Salm •
Physiker •

PADI Master Scuba-Diver Trainer •
SSI Extended Range Instructor •
TL für Tauchsportcenter •
Esslingen •
(www.tauchturm.com) •
Berater bei SubMarineCon- •
sulting (www.SMC-de.com). •
Email: director@SMC-de.com •

Motivation

Um es ganz einfach und plakativ zu sagen: die Dekompressionskrankheit (DCS) als solches ist:

- ein völlig zufälliges Ereignis
- und nicht reproduzierbar,
- d.h. wenn wir die Austauschvorschrift einer Tauchtabelle oder einen ND (,,No Decompression Limit“) verletzen, bedeutet dies nicht zwingend DCS [1]

Und (umso schlimmer) auch das genaue Gegenteil scheint zu gelten: Wir betrachten die ca. 70 Tauchgänge von gesunden Militärtauchern der USN (United States Navy) aus den 1950er Jahren [2, 3]. Es handelte sich hierbei um kontrollierte Kammer-Tauchgänge: die Taucher waren hinterher in Ruhe oder unter körperlicher Belastung. Die Aufstiegsrate war bei allen Tauchgängen identisch und entsprach den damals vorgeschriebenen 25 feet/min (ca. 7,6 m/min, also langsamer als die heute maximal erlaubten 10 m/min). Es wurden hierbei ganz bewußt keine Dekompressionsstopps eingehalten.

Zum ersten Experiment

Vier Taucher wurden mit normaler Pressluft auf 150 feet (45,7 m) für 36 min abgedrückt, tauchten mit den o.g. 25 feet/min auf und machten wirklich keine Deko-Stopps.

Frage: Wieviele der vier Taucher hatten hernach unter einer DCS zu leiden?

Kleine Erinnerung an die TTS (the time-to-surface, die Summe aller Stoppzeiten und die Zeit für den Aufstieg) der beiden militärischen Dekompressionstabellen, der alten USN von ca. 1957 und der neuen USN-Tabelle von 2008:

Vorwort

In „Der etwas andere Vergleich - Teil I und Teil II“ (vgl. caisson 30 Jg./ 2015 / Nr. 1, S. 14 - 22 sowie caisson 30 Jg./ 2015 / Nr. 3, S. 6 - 16) haben wir (SubMarine Consulting, www.SMC-de.com) versucht, etwas Licht in das Dunkel verschiedener Dekompressionsstrategien und -manifestationen (d.h. Tauchtabellen und Tauchcomputer) zu bringen. Zum Abschluß dieser dreiteiligen Serie tauchen wir ein bisschen ein in die Welt des statistischen Modellierens von Tauchtabellen. Aber bevor wir uns komplett in abstrakte Zahlenwelten versenken, eine kleine Vorbemerkung: wir dürfen uns bei der Beurteilung, ob nun ein Tauchgang mit dem Risiko behaftet ist, sich eine Dekompressionskrankheit zuzuziehen, nicht auf unser Bauchgefühl, sondern nur auf reale Daten verlassen. Diese realen Daten sind ganz einfach die Ergebnisse von echten Tauchgängen, EUREN Tauchgängen.

- USN Air Table (1957) verlangt ca. 60 min TTS, d.h. ca. 1h Stunde Austauschzeit
- USN Air Table (2008) verlangt ca. 128 min TTS, also gut das doppelte, nämlich über 2 h Austauschzeit.
(Zum Vergleich: eine Tabelle für zivile Sporttauchgänge (ZH 83) verlangte damals schon 71 min TTS.)

Antwort: Das Ergebnis war: KEINER! Im Klartext: kein Fall von nachgewiesener DCS bei diesen vier Tauchern.

Zum zweiten Experiment

ein paar Taucher mehr, gleiche Tiefe, aber kürzer: Elf gesunde Militär-Taucher, 150 feet @ 30 min mit Luft, Auftauchgeschwindigkeit 25 feet/min und wiederum keine Deko-Stopps.

Frage: Wieviele der 11 hatten hernach unter einer DCS zu leiden?

- USN Air Table (1957) verlangt ca. 35 min TTS
- USN Air Table (2008) verlangt ca. 59 min TTS
(zum Vergleich: ZH 83 (1983): 47 min TTS)

Antwort: Alle Elfe! D.h. 11 Fälle von diagnostizierter DCS (5 milde, 6 „echte Bends“).

Grundlagen und Schwierigkeiten

Glücklicherweise gibt es für dieses schwierige Kapitel der Tauchmedizin (der statistischen Grundlage von Tauchtabellen) eine Vielzahl von lesbaren und auch nachrechenbaren Veröffentlichungen. Das wollen wir hier nicht alles zitieren; trotzdem lohnt sich ein Blick auf die ersten und bahnbrechenden Quellen [4, 5] und die 11-bändige Serie des NMRI / NEDU: „Statistically Based Decompression Tables: I - XI“ aus den Jahren 1985–1999, ca. 1.000 Seiten (ein komprimierter Überblick mit Kommentaren folgt am Ende dieses Artikels).

Grundsätzlich funktioniert diese Sache einfach so: es werden hierbei nicht nur ein paar hundert, sondern wirklich zig-tausende von gut dokumentierten Tauchgängen gesammelt. „Gut dokumentiert“ bedeutet in

diesem Zusammenhang die Dokumentation einer kontrollierten und reproduzierbaren Umgebung, nicht nur der Tauchtiefe und der Tauchzeit sondern insbesondere des Atemgases, des CO₂-Gehaltes und der Luftfeuchtigkeit, der Temperaturen in der Kammer und im Wasser, der körperlichen Belastung, der genauen Aufstiegs- und Abstiegsraten, und natürlich der Biometrie der „Versuchskaninchen“. Die medizinisch kontrollierten Ergebnisse werden gemäß der gewählten Tauchprozeduren zusammengefaßt: Die Ergebnisse der Sättigungstauchgänge kommen in einen „Topf“, ebenso die der EAN- oder Heliox-Tauchgänge. Auch wird unterschieden, ob es sich um einfache „Kasten-“, oder „Rechteckprofile“ oder um „Multi-Level-“ Tauchgänge gehandelt hat. Das gemeinsame Merkmal aller Tauchgänge in einem „Topf“ ist dann die „Inertgas-Dosis“, eine vergleichbare Kombination aus Tauchtiefe und Tauchzeit. Der sachliche Hintergrund ist ganz einfach der, daß es keine „grosse vereinheitlichte Dekompressionstheorie“ gibt, die alle Phänomene der unterschiedlichsten Tauchprozeduren erklären könnte.

Der nächste Schritt ist die Quantifizierung der medizinischen Ergebnisse: üblicherweise wird hierzu (parallel zur Erfassung und Dokumentation der sichtbaren DCS-Symptome) eine sogenannte „Doppler-Skala“ benutzt: die Anzahl der per Ultraschall dopplermessung nach festgelegtem Verfahren nachweisbaren Inertgasblasen wird geschätzt und auf einer relativ subjektiven Skala, z.B. I bis IV, festgehalten. Auch *Haldane* [6] hat das schon so ähnlich gemacht: allerdings etwas „digitaler“: nämlich in der schwarz-weiss-Einordnung: DCS „ja“ oder DCS „nein“ bzw. Tod des Versuchstieres.

Hier liegt auch schon der Hase im Pfeffer, oder, um im Bild zubleiben, die Ziege in der Deko-Kammer: wie wollen wir ein bisschen „Taucherflöhe“ werten, ein kleiner Bezirk marmorierter Haut oder eine schnell verschwindende Episode von Migräne oder Gelenkschmerzen? Zählt das überhaupt? Wenn ja, wie? Sollen wir das mit 5, 10, 20 oder 50% einer DCS in die Quantifizierung einfließen lassen? Diese Geschichten nennt der Meßtechniker das „Rosa Rauschen“ einer Messung. Weiterhin werden die Taucher auch noch nach dem Tauchgang beobachtet, und zwar solange, bis DCS-Symptome auftreten oder zweifelsfrei keine Symptome zu beobachten sind. Auch diese Zeit bis zum Auftritt der DCS-Symptome wird dokumentiert.

Und wir treffen auf noch mehr Doppeldeutigkeiten: Es gab, gibt und wird künftig geben: jede Menge Veröffentlichungen über die Zusammenhänge zwischen DCS (bzw. gezählten Gasblasen) und Alter, Geschlecht und BMI (body-mass-index). Üblicherweise erweist sich der Zusammenhang statistisch signifikant mit hohen Korrelationskoeffizienten. Allerdings stellt sich das wirklich grundlegende statistische Problem so dar, daß die sogenannte „Multi-Kollinearität“ nicht adressiert wird. Diese „Multi-Kollinearität“ bedeutet, daß die o. g. Faktoren nicht völlig unabhängig voneinander sind, sondern u.U. einem gemeinsamen, ganz anderen, bisher noch unbewerteten Parameter gehorchen, z.B. der aeroben Kapazität oder einem anderen „Fitness“-Parameter. Dadurch wird aber einem Großteil dieser Veröffentlichungen bzw. den Schlüssen, die daraus gezogen worden sind, radikal der Boden entzogen.

Ein berühmtes Beispiel hierfür ist das PFO. Es gab einst eine sehr bekannte, technisch brillante Studie, die Gehirn-Läsionen bei ca. 215 Tauchern untersuchte. Das sensationelle und sehr beunruhigende Ergebnis war, daß wenn die Taucher häufig (> 100 Tauchgänge jährlich), tiefer als 40 m, im kalten Süßwasser und mit großen Dekompressionsverpflichtungen tauchten, tatsächlich diese Gehirnschädigungen statistisch signifikant nachzuweisen waren [7]. Das kleine, aber entscheidende Manko war, daß diese Taucher (u.a.) nicht auf PFO untersucht wurden. Um es milde auszudrücken: dieses Manko öffnete ein weites Feld von

wilden Kontroversen um diese Studie. Der entscheidende Punkt ist: wenn die Biometrie der Versuchskaninchen (der Taucher) nicht mehr-dimensional erfaßt wird, wird sich der ernsthafte Statistiker mit Grausen abwenden ...

Aus dieser Bewertung ergibt sich eine numerische Skala: diese muß an ein, wie auch immer geartetes, Gaskinetik-Modell angepaßt werden. Hierbei ist es völlig egal, ob ein pures Haldane-Modell (nur gelöste Gasphase), ein Blasen-Modell oder eine kryptische Kombination aus beiden benutzt wird. Die Qualität der Anpassung wird gerne mit der logarithmischen Skala der „Likelihood“ gemessen. Die Ergebnisse der besten Anpassung werden mit einem „Schildchen“ versehen: d.h. jeder der erfaßten Tauchgänge hat nun ein Schildchen mit der Wahrscheinlichkeit, DCS-behaftet zu sein. Diese Schildchen sind i.d.R. mit einer 1-, 2- oder auch einer 5-%igen DCS-Wahrscheinlichkeit gekennzeichnet. Die hierbei verwendete Bezeichnung lautet: P(DCS), engl.: *Probability of decompression sickness*, die statistische Wahrscheinlichkeit, sich eine DCS zuzuziehen.

Die P(DCS) folgt einer Dosis-Wirkungs-Kurve, ähnlich wie die Wirkung (Antwort, Reaktion) auf ein Medikament oder eine O₂-Gabe [8]. In unserem Fall ist die Dosis z.B. die Tauchtiefe d, die Tauchzeit t oder eine Kombination der beiden. Eine oft verwendete Kombination ist Dosis = d * Quadratwurzel(t). Die Formel für die so genannte „Hill-Dosis-Gleichung“ sieht so aus:

P(DCS) = Dosis a / (Dosis a + b)

Tiefe vs. „NDL“	USN 1957	USN VVAL18	Standard Air Model		
			[min.]	[min.]	[min.]
[fswg] (*)	[min.]	[min.]	[min.]	[min.]	[min.]
ca. [m]			2% P(DCS)	1% P(DCS)	3% P(DCS)
80 / 24	40	40	37	24	45
90 / 27	30	34	31	20	38
100 / 30	25	29	26	17	32
110 / 33	20	26	23	15	28

Tabelle 1
 “Nullzeit“- Grenzen aus drei verschiedenen Quellen: Tabelle 3. S. 28 Auszug aus: A SIMPLE PROBABILISTIC MODEL FOR ESTIMATING, THE RISK OF STANDARD AIR DIVES, Van Liew, Flynn: TA 01-07 NEDU TR 04-41
 (*) feet of seawater, gauge

Als Tabelle kann man z.B. die so berechneten "Nullzeiten" mit den verschiedenen P(DCS) gegeneinander vergleichen; siehe Tabelle 1 (Quelle: [9]).

Aus der Tabelle 1 entnehmen wir für die Zeile bei 100 feet (ca. 30 m) folgendes: die alte USN-Tabelle setzte den NDL auf 25 min fest und somit ganz in der Nähe einer P(DCS) von ca. 2 %. Das ist eigentlich eine ganze Menge. Würde es doch bedeuten, daß von ca. 50 derartigen Tauchgängen ziemlich genau einer in der Deko-Kammer beendet werden würde. Wollte man diese P(DCS) von 2% auf ca. 1% drücken, würde der "NDL" auf ca. 17 min schrumpfen.

Und dann gibt es da noch dieses andere Problemchen, intrinsisch der Natur der DCS: die Tatsache der kleinen Zahlen. Im Schnitt gibt es ca. einen Fall von DCS pro 10.000 Erholungstauchgängen. Das ist zum Glück nicht viel. Oder aber, wie Paul K. Weathersby einmal sagte: „Wenn ihr DCS erforschen wollt, braucht ihr schon ein paar konkrete Fälle!“

Es gab, als Beispiel aus der Vergangenheit, gleich mehrere Veröffentlichungen, in denen behauptet wurde, daß die Benutzung von Tauchcomputern sehr viel sicherer sei als die Benutzung herkömmlicher Tauchtabellen. Der Punkt hierbei ist, daß mangels genau erfaßter Tauchgänge, niemand genau weiß, wie eng die Tauchprofile der Tauchcomputerbenutzer sich an diejenigen der Tabellenbenutzer anschmiegt hatten. Im Klartext: wenn dein Tauchgang sicher war, weißt du eigentlich nicht, wie nahe du an der DCS vorbeigetaucht bist. Oder, anders gesagt: ein wirklich sinnvoller Beitrag zur Erforschung von DCS ist eben ein nachgewiesener Fall von DCS. Der absolute Endpunkt von DCS ist der Tod: sicherlich ein Ereignis, welches bei Experimenten mit Tauchern nicht so wünschenswert ist. Dies ist aber genau die Begründung, warum Millionen ziemlich kleiner und nicht ganz so kleiner Versuchskaninchen auf dem Altar (der grausamen Geliebten) der Wissenschaft geopfert wurden (und immer noch werden).

Bis jetzt hatten wir nur die „üblichen Verdächtigen“ im Visier: das Tauchprofil, fO_2 , die Hauttemperatur und die körperliche Belastung. Bis jetzt ließen wir aussen vor: die Blutchemie, das Endothel (also die innere Wandung von Blutgefäßen incl. der dort herrschenden sogenannten Mikrozirkulation), die „persönliche Empfindlichkeit für DCS“, die „Prä-Konditionierung“ (eine Vorbehandlung des Tauchers, sei es über Temperatur, Vibration oder Essen von dunkler

Schokolade) und die sogenannten „MP“ (*Micro particle*). Diese MP sind ca. 0,1 bis 1 μm große Bläschen aus doppelagigen Fettmembranen. Durch oxidativen Stress, Dekompressionsstress oder Tod von Körperzellen nehmen sie an Zahl und Durchmesser zu und können z.B. Entzündungsreaktionen auslösen [10]. Und an diesen vielen Parametern greift die neue DCS-Forschung an, siehe dazu auch ein hübsches Büchlein, welches die aktuellen Ideen von DAN im Überblick schildert [11], Kapitel: 5, 7 & 8.

Resultate

Die Frage ist, warum wollen wir uns dem statistischen Modellieren zuwenden, wenn wir so viele unterschiedliche Variablen zu kontrollieren haben? War das alte Modell von *Haldane* nicht viel einfacher und hat aber trotzdem funktioniert? Na ja, schon. Aber nur bis zu einem gewissen Grade. Wenn die Tauchgänge ziemlich lange oder ziemlich tief waren, hat es eben nicht funktioniert. Das war aber zum Zeitpunkt der aktiven Benutzung des *Haldane*-Modells kein Problem: ganz tiefe Tauchgänge waren wegen der begrenzten Leistungsfähigkeit der Luftpumpen und des hohen Preises für Helium relativ selten. Ebenso ganz lange Tauchgänge wegen mangelndem Kälteschutz. *Haldane* selbst war sich dieser Grenzen sehr wohl bewußt; auch der Probleme im Zusammenhang mit Alter und Adipositas (ältere, übergewichtige Taucher...). Heutzutage haben wir eine Menge mehr Modelle. Auch welche, die sich mit der freien Gasphase, den Inertgasbläschen, befassen. Oder auch welche, die sich sowohl mit der gelösten als auch der freien Gasphase befassen.

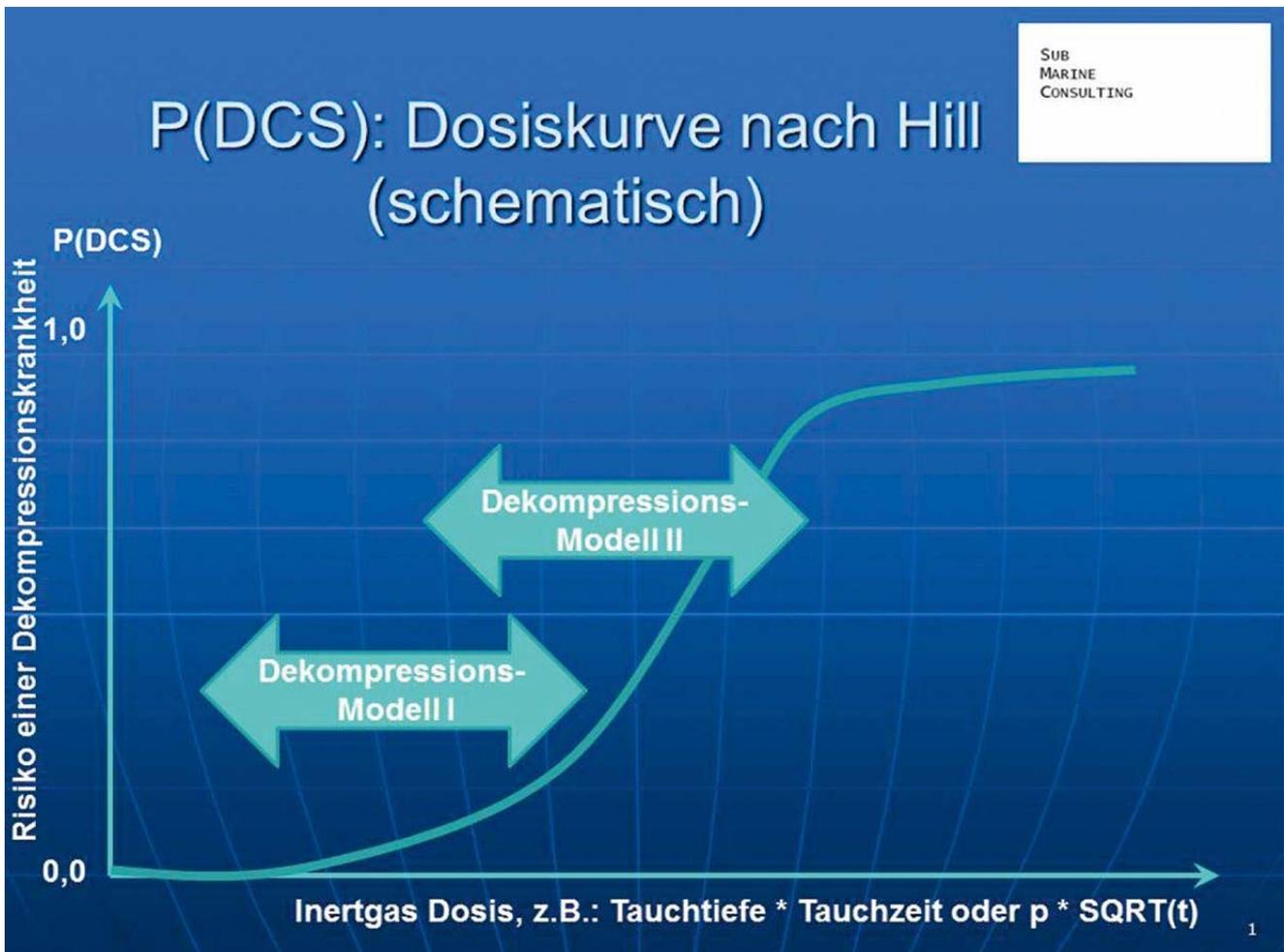
Folglich begann eine, stellenweise überhitzt geführte, Debatte, welches der Modelle denn nun das Beste sei. Die Schattenseite dieser Debatten ist es, den Taucher völlig im Dunkeln zulassen angesichts den gigantischen Variationen der TTS für unsere beiden Test-Tauchgänge (vgl. Teil I und II dieser Serie in: caisson 30 Jg./ 2015 / Nr. 1, S. 14 – 22 sowie caisson 30 Jg./ 2015 / Nr. 3, S. 6 – 16). Die Vorkämpfer für ihre jeweiligen Philosophien vergessen allerdings eine bittere und grundlegende Wahrheit: alle diese Modelle sind falsch, grundsätzlich! Es gibt aber eine relativ elegante Methode, dieser Debatte auszuweichen. Die oben genannten, traditionellen Modelle versuchen das medizinische Ergebnis eines Tauchganges vorherzusagen, sozusagen als Wette auf die

Zukunft, in einer Art Schwarz-Weiß-Entscheidung (DCS ja oder nein). Basis sind die physiologischen Annahmen dieser Modelle. Aus diesem Grund heißt die Gruppe der Modelle **deterministische Modelle**. Die Gruppe der statistisch basierten Modelle vermeidet genau diese Wette, da in zeitlich entgegengesetzter Richtung gearbeitet wird: im Rückblick werden die bereits vorhandenen Daten der Tauchgänge analysiert. Auf dieser Basis kann dann für relativ ähnliche Profile inter- oder extrapoliert werden. Somit wird für jeden nichttrivialen Tauchgang, ganz im Gegensatz zu den deterministischen Modellen, eine P(DCS) ungleich Null unterstellt. Ein generisches Ergebnis stellt die P(DCS) bzw. das "Risiko" versus der Inertgasdosis beispielhaft in Graphik 1 so dar (Quelle: [12], S. 89):

Eine P(DCS) von 0 bedeutet im Wesentlichen keine DCS, während hingegen eine P(DCS) in der Nähe von 1 mit ziemlicher Sicherheit einen Aufenthalt in einer Dekompressions-Kammer bedeutet. Eine P(DCS) in der Nähe von 0 ist nur mit einer verschwindenden Inertgasdosis möglich. Im Klartext: jeder nicht-triviale Tauchgang hat ein von Null verschiedenes Risiko für DCS. Dazwischen ist großer Raum für individuelle und intra-individuelle Empfänglichkeit für DCS, bei der die Dinge nicht ganz so klar liegen, da Menschen und Versuchskaninchen eben nicht in einer digitalen Ja/Nein-Manier auf eine Inertgasdosis reagieren. Dies führt zur

Frage: wenn es dich bei deinem letzten Tauchgang wie eine Brezel zusammengefaltet hat, ist es dann

Graphik 1



wahrscheinlicher oder eher nicht, daß es dich beim nächsten, ähnlichen Tauchgang gleich wieder so erwischt und vielleicht bei einem dritten Tauchgang nochmals?

Antwort: Rein statistisch gesprochen: eher ja.

Warum? Wir reden hier nicht über die individuelle Empfänglichkeit, die bei allen Statistiken eine wirklich dominante Rolle spielt. Wenn die medizinischen Auswertungen einer wirklich grossen Anzahl von Tauchgängen (vorzugsweise mit immer den gleichen Subjekten, z.B. von grossen Ölbohrgesellschaften oder bei Tunnelbauprojekten) analysiert werden, fällt sofort auf, daß es ein paar ausgewiesene Kandidaten für DCS gibt. Also solche Subjekte, die sich eine DCS signifikant häufiger zuziehen als ihre Kollegen (oder Kolleginnen). Dies ist jetzt nicht der Hintergrund der o.g. Frage, sondern pure Statistik. Wir werfen eine Münze und wetten auf Kopf oder Zahl. Dies ist eine gültige Analogie zur binominalen Verteilung von DCS, die ja bei allen deterministischen Modellen unterstellt wird. Und so ist es einfach eher wahrscheinlich, dreimal Kopf oder dreimal Zahl hintereinander zu erhalten als eine andere Sequenz. Hierfür ist die Wahrscheinlichkeit in 10 Würfeln (analog 10 Tauchgängen, von denen 3 mit DCS behaftet wären) 864/1024, d.h. ca. 82% (Quelle: [13]).

Was lernen wir daraus für das exponierte Tauchen

(technisch, wissenschaftlich, militärisch)?

Lektion 1: Gib deine Tauchgangsprofile an DAN

Leider trifft der größte Teil dieser Tauchgänge, egal ob TEC oder nicht, eben nicht die oben erwähnten erforderlichen Qualitätskriterien. Weder die Hauttemperatur noch die körperliche Belastung oder die komplette Biometrie sind verfügbar. Darüber hinaus ist auch die Erkennungsrate von DCS mehr als fraglich. Werden Doppler-Messungen veranstaltet, dann üblicherweise nicht in einer „doppelblind“-Methode. Aber, wie im Teil II (vgl. caisson 30 Jg./ 2015 / Nr. 3, S. 6 - 16) bereits ausgeführt: es ist ein erster Start. Und irgendwo müssen wir ja mal anfangen. Auf jeden Fall ist dies wesentlich wissenschaftlicher als die oft in irgendwelchen Papieren zitierte Datenbasis, welche eine DCS-Rate von 19 in 2.823 tiefen und Mischgastauchgängen angibt und somit die hohe Sicherheit eines undokumentierten Dekompressions-

algorithmus unterstellt. Es gibt keine öffentlich zugänglichen Tauchgangsprofile und die Daten sollen teilweise (sinngemäßes Zitat aus dem englischen) „Unterwasser-Notizen erfahrener Taucher“ sein (sic!). Grundsätzlich betrachtet ist dies nur unwissenschaftlicher Datenmüll, somit weist das Vorgehen von DAN schon in die richtige Richtung. Werden die Tauchprofile des Tauchcomputers im *DAN file format divelog #7* (DL7) [18] gespeichert, können die Inertgasdosen vergleichbar gemacht werden und auch noch Jahre später mit weiterentwickelten Methoden analysiert werden. Ein schöner Überblick über diese Methoden ist in [14] zusammengestellt.

Lektion 2: Mach' keine gedankenlosen Extrapolationen

Was die Dekompressions-Software für den PC oder die Implementierung in einem Mischgascomputer anstellt, wenn geprüfte und dokumentierte Grenzen von Tiefen und Zeiten überschritten werden, steht auf statistisch ziemlich wackeligen, dünnen Beinchen. Aber, so arbeitet eben die pure Mathematik eines Algorithmus. Wirklich verlässliche Daten von längeren und tieferen Tauchgängen, insbesondere solche mit grossen Sauerstoff-Gaben während der Dekompression, fehlen. Und mit „verlässlich“ ist eben nicht der anekdotenhafte Mischgastauchgang vom letzten Wochenende gemeint. Aber sehr wahrscheinlich willst du ja wissen, wo entlang der P(DCS) Kurve (siehe Graphik 1) dich dein Tauchcomputer oder deine Tauchtabelle schickt [12]

Lektion 3: Kontrolliere das Ergebnis deines Tauchgangs

Will heißen: schreibe die individuellen Parameter (wie z.B. deine Hydrierung, deine Gradientenfaktoren, dein subjektives Befinden) auf und mache, wenn möglich, Doppler-Messungen. Dies ist deine für dich gültige „Base Line“.

Lektion 4: Beachte die Grenzen

Es gibt keinen Weg, aus einer vorhandenen Basis von Tauchprofilen eine vernünftige Dekompressions-Prozedur zu extrahieren, wenn das gewünschte Profil nicht zur Datenbasis paßt. Versuch' es erst gar nicht! Oder du mußt es nun einfach mal akzeptieren, daß z.B. solche Tauchgänge, wie *Mark Ellyatt* sie durchgeführt hat [15], deine P(DCS) ziemlich genau an 1 heranführen.

Lektion 5: Sei mißtrauisch kleinen Zahlen gegenüber

Will heißen: glaube keiner Veröffentlichung, die auf einer kleinen Zahl an Tauchern/Tauchgängen basiert. Vor ein paar Jahren hat eine medizinische

Veröffentlichung die TEC/REC-Welt erschüttert (und vor allem: die Taucher-Stammtische, siehe den Ausriß aus der *Apotheken-Umschau*), gemäß dem Motto: „Nitroxtaucher sterben früher“ ...



Ausriß:
Apotheken Umschau 15.07.2011, Version B, S. 20

Hierfür wurden erhöhte Werte von speziellen, kontrovers diskutierten, biochemischen Markern (EPC und CAC) nach EAN-Tauchgängen angeführt [16]. Diese interessante Studie hatte jedoch mit dem üblichen Problem zu kämpfen: es waren halt nur ein paar Taucher (8) mit ganz wenigen Tauchgängen (4) ... Die Fehlerbalken waren folgerichtig so groß, daß die Originalmeßwerte ziemliche Beliebigkeit erreichten.

Lektion 6: Die bittere Pille für Menschen wie mich: verkauft keine "NDLs"

Streng wissenschaftlich betrachtet, gibt es so etwas wie NDL (*no decompression limit*) gar nicht:

- Jeder Tauchgang ist ein Dekompressionstauchgang
- Jeder Tauchgang hat ein Risiko einer Dekompressionskrankheit, welches von Null verschieden ist

Die Angaben in einigen Handbüchern für Tauchcomputer und die Art, wie manche Ausbildungsorganisationen diese NDLs „verkaufen“, ist deshalb als ziemlich grenzwertig zu betrachten.

FINALE FURIOSO

Wen die Zahlenbeispiele am Anfang des Artikels nicht beeindruckt haben (wer taucht denn schon eine halbe Stunde auf über 40 m, steigt dann direkt zur Oberfläche auf und wartet da, bis er in die Druckkammer darf?), für den jetzt zum Abschluß die zwei folgenden kleinen Geschichten:

Erste Geschichte

Ein/e Tauchlehrer/in stellt sich mit starken Schmerzen im Bereich der Hüftgelenke beim Taucherarzt vor. Der naheliegende Verdacht auf ABN / DON wird durch das Kernspintomogramm erhärtet; s. Abbildungen 1 und 2:



Abbildung 1

Dies ist das Ergebnis von ca. 5.000 REC-Tauchgängen und Tauchsulbetrieb, meist mit Luft unter ständiger Benutzung irgendwelcher Tauchcomputer des Herstellers Pelagic Pressure Systems. Damit wir das richtig einordnen können: dieses arme Wesen kann nun seine Karriere als Tauchlehrer/in vorzeitig beenden. Es hat wesentlich weniger Tauchgänge wie ich vorzuweisen, i.d.R. in wesentlich geringere Tiefen, keine Verwendung von irgendwelchen Mischgasen oder gar Sauerstoff-Dekompression. Darüberhinaus

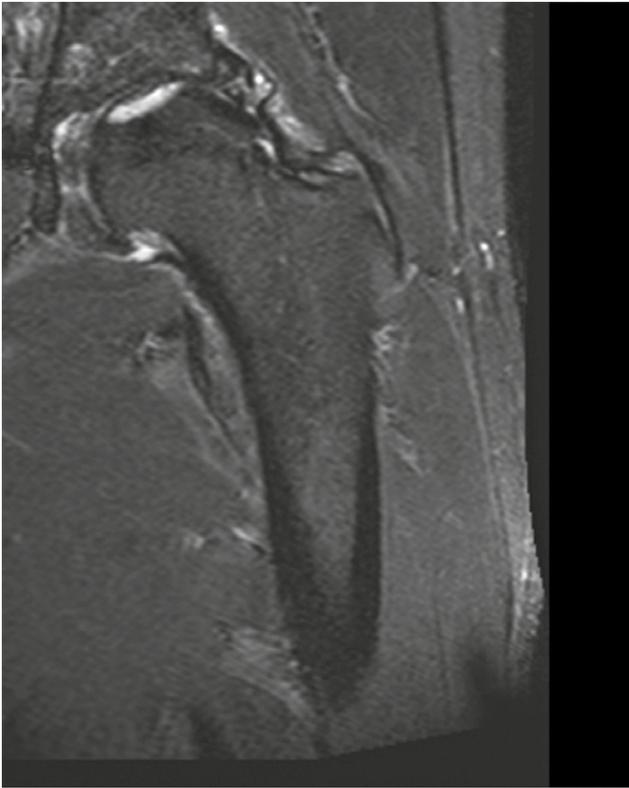


Abbildung 2

bin ich wesentlich älter und habe wesentlich mehr Notaufstiegsprozeduren hinter mich gebracht und vermutlich auch ein paar Episöden mehr an subklinischer DCS ... ABN / DON bei mir? Fehlanzeige (Zumindest im Moment ☺). Nicht mal ein klitzekleiner Infarkt im Augenhintergrund ...

Zweite Geschichte

Vor ein paar Jahren, während unseres Tauchversuches mit „Unterwasser-Radfahren“ in das „Guinness-Buch der Rekorde“ zu gelangen (jaja, sowas haben wir gemacht, vor 13 Jahren) ist folgendes passiert:

9 Tauchgänge, mit Pressluft, auf 8,5 m in unserem Tauchturm, für genau 60 Minuten in warmem Süßwasser (ca. 25 - 26° Celsius), mit nur geringfügiger körperlicher Belastung durch „radeln“ auf Ergometern (Oberflächen-AMV war bei mir ca. 11 L/min) und anschließendem langsamen Aufstieg inkl. eines „Sicherheitsstopps“ von ca. 5 min. auf ca. 2 m und der Oberflächenpause von genau 3 h. Auf der Abbildung 3 ist im Hintergrund, links neben meinen Luftblasen, unser „Deko Rig“ zu sehen. In Summe waren vier Teams mit jeweils drei Tauchern genau 36 h unterwegs.

Keine Tauchtafel dieser Welt (nicht einmal die

DCIEM-Tabelle [17] mit erweitertem Sicherheitszuschlag: zur Vermeidung von „Schleifen“ bei Wiederholungstauchgängen wird der Wiederholungsfaktor, sprich die Restsättigung der vorhergehenden Tauchgänge, künstlich erhöht) hätte diese Sicherheitsstopps verlangt. Und trotzdem, so um den 6. bis 7. Tauchgang hatten fast alle Taucher irgendwelche Problemchen. Zwei Taucher hatten leichte Taucherflöhe, ein Taucher diffuse Beschwerden mit der Atmung, und ein Taucher eine DCS Typ I im linken Unterarm (Handgelenk bis Ellenbogen: ich! Schon zu dieser Zeit war ich der Tauch-Opa des gesamten Teams...). Ein bisschen normobares O₂ und ein paar Aspirin® und weiter gings in Richtung Guinness-Rekord mit Tauchgang Nr. 7, 8 und 9. Allerdings jetzt mit EAN32, dann EAN36 und 15- bis 20-minütigen Deko-Stopps mit EAN60... (Anm. d. Red.: Die alleinige Therapie einer DCS mit O₂ normobar und ASS entspricht nicht der „Leitlinie Tauchunfall“ und ist nicht zur Nachahmung empfohlen).



Abbildung 3

Wer sich durch die mathematischen Details der Bildschirmkopie aus Teil II quälen will (siehe Caisson Nr. 3 (2015), S. 6-16), hier sind die Quellen und die Parameter:

Methode I; Southerland, S. 77, 78, 82; mit:
 $\text{Logit (DCS)} = \ln (P/(1-P))$.
 $\text{Logit (DCS)} = -25.95 + 6.64 * \ln(\text{Depth}) + \beta_2 * (\ln(\text{Depth}))^2 + 5.31 * \ln(\text{Time}) - 0.33 * (\ln(\text{Time}))^2 + \beta_5 * \ln(\text{Depth}) * \ln(\text{Time})$
 with: $\beta_2 = \beta_5 = 0$

Methode II:
 ist ein expandiertes "PME Model". PME bedeutet: „Parallel Mono-Exponential“ und ist ein Modell aus der Mitte der 80iger auf der Basis von ca. 1.700 Lufttauchgängen. Die hiermit kalibrierten Parameter wurden dann nochmals mit den 10.391 gut dokumentierten Tauchgänge des ersten Bandes der NMRI/NEDU Serie „Statistically Based Decompression Tables“, S. 5-7 & S. 31, verglichen. Dies Modell wurde dann von uns nochmals erweitert auf 6 Kompartimente und Helium-tauglich gemacht.

Methode III:
 ist ein vereinfachtes Integral über eine Risiko—Funktion die wir aus dem Band VI, „Statistically Based Decompression Tables“, S. 5 & S. 55, entnommen haben. Zum Spaß werden vom DIVE-Programmchen noch die oberen und unteren Fehlergrenzen für die angegebenen Standard-Abweichungen berechnet.

Methode IV; NEDU TA 01-07 TR 04-41, S. 8 & S. 11:
 $\text{Logit(DCS)} = a + b * (D - c) * (1 - \exp(- d * T f)) / (TDT -g)$
 mit:
 $a = -6.022169$
 $b = 86.596315$
 $c = 25.091718$
 $d = 0.002929$
 $f = 0.918547$
 $g = -170.304442$
 D: Depth (fsw)
 TDT: Total Decompression Time (min.)

Methode V; NEDU TR 2009-03, S. 9, 11:
 $\text{Logit (DCS)} = \beta_0 + \beta_1 * \ln(\text{fsw}) + \beta_2 * \ln(\text{Time}) + \beta_3 * (\ln(\text{Time}))^2 + \beta_4 * \ln(\text{Ascent Rate})$

mit:
 $\beta_0 = - 53.0$
 $\beta_1 = 7.97$
 $\beta_2 = 3.32$
 $\beta_3 = 0.04$
 $\beta_4 = -0.03$

Zitierte Literatur

- [1] UHMS ASM 2012, Session D71: Estimating DCS Risk for Emergency Conditions; Paul K. Weathersby & Keith A. Gault. Naval Submarine Medical Research Laboratory, Groton CT and Navy Experimental Diving Unit, Panama City FL
- [2] Van der Aue et al, NEDU Report 8-49: The Effect of Exercise during Decompression from increased barometric pressures on the incidence of Decompression Sickness in Man, 1949
- [3] Temple et al, NMRC Report 99-02, 1999
- [4] Weathersby, P.K., Homer, L.D. and Flynn, E.T. On the likelihood of decompression sickness, J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol. 57(3): 815-825, 1984.
- [5] Berghage, T.E., Wolley, J.M. and Keating, L.J. (1974) The probabilistic nature of decompression sickness. Undersea Biomed. Res. 1(2): 198-196
- [6] Boycott, A.E., Damant, G.C.C., & Haldane, J.S.: The Prevention of Compressed Air Illness, Journal of Hygiene, Volume 8, (1908), S. 342-443)
- [7] Negative neurofunctional effects of frequency, depth and environment in recreational scuba diving: the Geneva "memory dive" study: Br J Sports Med 2004;38:108-114
- [8] Eckenhoff, Roderic G., Christopher S. Olstad, George Carrod. Human dose-response relationship for decompression and endogenous bubble formation. J. Appl. Physiol. 69(3): 914-918, 1990.
- [9] Van Liew, Flynn: A simple probabilistic model for estimating the risk of standard air dives, TA 01-07 NEDU TR 04-41

- [10] Thom SR, Milovanova TN, Bogush M, Yang M, Bhopale VM, Pollock NW, Ljubkovic M, Denoble P, Madden D, Lozo M, Dujic Z. Bubbles, microparticles, and neutrophil activation: changes with exercise level and breathing gas during open-water SCUBA diving. *J Appl Physiol* 114: 1396–1405, 2013
- [11] Balestra, Costantino; Germonpre, Peter (ed.) *The Science of Diving: Things your instructor never told you* (2015) Lambert Academic Publishing, ISBN: 978-3-659-66233-1 (more infos under entry [170] at: http://www.divetable.info/books/index_e.htm)
- [12] Huggins, Karl E.: Decompression Algorithms, Chapter 5: p. 81 - 94, in: Fife, Caroline E, St. Leger Dowse, Marguerite (2010) *Women and Pressure, Diving and Altitude*, Best Publishing Company, ISBN 978-1-930536-60-9 (more infos under entry [146] at: http://www.divetable.info/books/index_e.htm)
- [13] du Sautoy, Marcus (2011): *The Numbers Mysteries: a mathematical odyssey through everyday life*, Palgrave Macmillan, S. 113 - 114
- [14] A computationally advantageous system for fitting probabilistic decompression models to empirical data; Laurens E.Howe, Paul W.Weber, Richard D.Vann. *Computers in Biology and Medicine* 39(2009): 1117-1129.
- [15] Ellyatt, Mark (2005) *Ocean Gladiator, Battles beneath the Ocean*, Emily Eight Publications Ltd., ISBN 978-0-9551544-0-9, (more infos under entry [128] at: http://www.divetable.info/books/index_e.htm)
- [16] *The European Journal of Cardiovascular Prevention and Rehabilitation* (April 2011) 18 (Supplement 1), S96
- [17] DCIEM Diving Manual, DCIEM No. 86-R-35: Part 1 AIR Diving Tables and Procedures, Part 2 Helium-Oxygen Surface-Supplied Decompression Procedures and Tables; Defense and Civil Institute of Environmental Medicine, Canada
- [18] DL7 Standard, Divers Alert Network, Project Dive Exploration, Petar J. Denoble, August 1998, Durham

Zitierte Caisson-Ausgaben

- caisson 30. Jg./2015/Nr. 1, S. 14 – 22: Der etwas andere Vergleich – Teil I,
- caisson 30. Jg./2015/Nr. 3, S. 6 – 16: Der etwas andere Vergleich – Teil II
- caisson 26. Jg./2011/Nr. 3, S. 4 - 12: Dekompressionsberechnungen für Trimix-Tauchgänge mit PC-Software: Reparieren Gradientenfaktoren defekte

Algorithmen oder defekte Software-Implementierungen?

- caisson 26. Jg./2011/Nr. 2, S. 6: Mach' mit: mach' Tauchen noch sicherer!
- caisson 2009; 24(2), 9 – 15: Tauchmedizin: von einer Kunst zu einer Pseudo-Wissenschaft

Weiterführende Literatur

- The 51st . UHMS workshop: „Survival Analysis and Maximum Likelihood Techniques as applied to Physiological Modeling“, 1989
- „Logistic Regression and Decompression Sickness“; David Graham Southerland, Duke University, 1992
- „Statistical Bubble Dynamics Algorithms for Assessment of Altitude Decompression Sickness Incidence“, Gerth, W. A. & Vann, R.D., July 1995, Duke University Medical Center
- Statistically Based Decompression Tables, a 11-volume series of papers from the NMRI, Maryland:
 - NMRI 85-16, Part I: Analysis of Air Dives: 1950 - 1970
 - NMRI 85-17, Part II: Equal Risk Air Diving Decompression Schedules
 - NMRI 86-50, Part III: Comparative Risk using U.S. Navy, British, and Canadian Standard Air Schedules
 - NMRI 86-51, Part IV: Extension to Air and N2-O2 Saturation Diving
 - NMRI 89-34, Part V: Haldane-Vann Models for Air Diving
 - NMRI 91-84, Part VI: Repeat Dives on Oxygen/Nitrogen Mixes
 - NMRI 92-85, Part VII: Selection and Treatment of Primary Air and N2O2 Data
 - NMRI 92-73, Part VIII: Linear-Exponential Kinetics
 - NMRI 96-05, Part IX: Probabilistic Models of the role of Oxygen in Human Decompression Sickness
 - NMRI 96-06, Part X: Real-Time Decompression Algorithm using a probabilistic Model
 - NMRC 99-01, Part XI: Manned Validation of the LE Probabilistic Model for Air and Nitrogen-Oxygen Diving

Subjektive Kommentare zur o.g. weiterführenden Literatur

Zu NMRI 85-16, Part I:

Table 9 (p. 37) stellt die DCS-Häufigkeit während des operationalen Gebrauchs der USN 1957 Tabelle dar: Tiefen von 100 bis 300 feet, Grundzeiten von 10 bis 50 min. Bei 10.391 Tauchgängen gab es 83 Fälle von DCS. Die berichtete DCS-Häufigkeit innerhalb des jeweiligen Vertrauensintervalls erstreckte sich von 0,1 bis hin zu 4,6 (z.B. bei 200 feet). Das Problem mit dem „operationalen Gebrauch“ war zu dieser Zeit ganz klar, daß nur handschriftliche Aufzeichnungen vorlagen. Deshalb wurden einige Tiefen- und Zeitwerte in den Dive-Logs als (Zitat:) „somewhat creative“, d.h. als nicht reproduzierbar gekennzeichnet.

Zu NMRI 85-17, Part II:

Fig. 5 (p. 14) stellt eine Graphik der sogenannten "Risk Surface" für einen speziellen Tauchgang vor. Die Senke in der dreidimensionalen Hyperbel zeigt die optimale Verteilung der Stopp-Zeiten in verschiedene Tiefen. In dem lokalen Minimum ist somit die berechnete P(DCS) minimiert.

Zu NMRI 86-50, Part III:

Gleich auf S. 1 beginnt dieser Teil mit (Zitat, sinngemäß aus dem Englischen) "...wenn in einer Stichprobe von 10 Tauchern keine DCS auftrat, erlaubt das 95%-Vertrauensintervall immerhin noch eine tatsächliche DCS-Wahrscheinlichkeit von 31 %. Ein einziger Fall von DCS bei 30 Tauchgängen bedeutet immer noch ein Intervall von 0,1 bis 17 % tatsächlicher DCS-Wahrscheinlichkeit. Hunderte identischer Tauchgänge wäre hier nötig, um eine größere Präzision zu erzielen."

Zu NMRI 89-34, Part V:

auf p. 3, Table 1, werden die sogenannten "decompression data sets" A, B, C, D & L beschrieben. Diese Data-Sets umfassten 1.835 Tauchgänge mit 101 Fällen von DCS und somit einen Bereich von 1,3 bis hin zu 45.7 % DCS Häufigkeit.

Zu NMRI 91-84, Part VI:

stellt einen guten Überblick über die mathematischen Grundlagen des gesamten Themas dar

zu NMRI 92-73, Part VIII:

gibt einen Überblick über die sogn. "LE models" (linear-exponential Modelle); auf S. 48 (Table 5) finden wir eine Zusammenstellung der benutzen Data-Sets: 5 Risikokategorien in 2,5 % Intervallen. Zum Beispiel ein Set mit 2.383 Tauchgängen und 139 beobachteten Fällen von DCS für das benötigte „0-model“. Dieses 0-Modell sagt diese 139 Fälle voraus, allerdings noch ungleichmäßig verteilt. Auf S. 50 (Table 7) werden die Data-Sets beschrieben, welche nicht zur Modellierung herangezogen wurden. Diese Sets umfassten 1.985 Tauchgänge mit einer DCS-Häufigkeit zwischen 1,0 bis 21.3 %.

Im Artikel verwendete Abkürzungen

- ABN: aseptic bone necrosis; aseptische Knochenzersetzung
- AMV: Atem-Minuten-Volumen
- DCS: decompressions sickness; Dekompressionskrankheit
- DON: dysbaric osteonecrosis; drucklose Knochenzersetzung
- CAC: circulating angiogenic cells
- EPC: endothelial progenitor cells; endotheliale Vorläuferzellen
- EUBS: European Underwater and Baromedical Society
- NEDU: Navy Experimental Diving Unit
- NMRI: Naval Medical Research Institute
- REC: recreational diving; Sport-/Erholungstauchen
- TEC: technical diving; technisches Tauchen
- USN: United States Navy

Yet Another Benchmark

Der etwas andere Vergleich - Teil II



AUTOR

Albrecht Salm •
Physiker •

PADI Master Scuba-Diver Trainer •
SSI Extended Range Instructor •
TL für Tauchsportcenter •
Esslingen •
(www.tauchturm.com) •
Berater bei SubMarineCon- •
sulting (www.SMC-de.com). •
Email: director@SMC-de.com •

Motivation

In "Yet another Benchmark, Der etwas andere Vergleich - Teil I" (caisson 30.Jg/2015/Nr.1,S.14-22), haben wir (SubMarine Consulting, www.SMC-de.com) versucht, ein paar Tauchcomputer, Tauchtabellen und Desktop Deco-Softwareprodukte zu vergleichen. Als Beispiel griffen wir uns unseren berühmt-berüchtigten "Test-Tauchgang" (Tauchtiefe: 42 m, Grundzeit: 25 min, Pressluft als Atemgas) heraus. Ein, auch für einen geübten Taucher, durchaus anspruchsvoller Tauchgang, vor allem, wenn in kaltem Süßwasser absolviert. Darüberhinaus wollten wir die Grundlagen erarbeiten, die wir zum Verständnis des Teil II benötigen.

Teil II wird den gleichen Tauchgang (gleiches Profi) behandeln. Lediglich das benutzte Atemgas wird geändert um etwas mehr die technischen oder auch professionellen Bedürfnisse abzudecken: wir benutzen Heliox20 (20% Sauerstoff, Rest Helium).

Wir wollen in diesen Artikeln nicht nur die grundsätzlichen Schwächen der Dekompressions-Algorithmen herausarbeiten, sondern auch die Probleme und Schwächen bei der praktischen Umsetzung, der Implementierung. Es gibt eben durchaus Unterschiede zwischen a) einem Dekompressions-Algorithmus auf dem Papier (der „Spezifikation“ oder sozusagen der „Beschreibung“) und b) was dann ein Programmierer oder Computer-Ingenieur daraus macht.

Die Probleme oder Schwächen bei der Umsetzung werden sich als universell erweisen: d.h sie treffen für alle Arten der Dekompressions-Modelle oder -Algorithmen zu. Die üblichen „Gold-Standards“ perfusions-dominiertes Modelle wie



Abbildung 1
Das dicke Ende? Drei Tauchcomputer am Taucher

Tabelle 1

Time-to-surface(TTS)-Vergleich verschiedener Tauchcomputer und Dekompressions-Software für folgenden Tauchgang: max. Tiefe 42 m, Grundzeit 25 min, Atemgas Heliox20 (mit 20% O₂). Die Legende zu dieser Tabelle finden Sie in caisson 30.Jg/2015/Nr.1,S.19-20.

Type / Model / Version	time-to-surface (TTS) [min.]
NHeO3 (11/2011)	528 (Konservativismus-Faktor = 50)
VR3 3.03 aC	295 (Konservativismus-Faktor = 0)
Proplanner	206 (Konservativismus-Faktor = 0)
NHeO3 (11/2011)	196 (Konservativismus-Faktor = 0)
Suunto Dive Planner 1.0.0.3	177
Professional Analyst 4.01.j Cochran EMC-20H	159; Konservativismus-Faktor = 50.0 (184 mit Version t; 181 mit Version u; 190 mit Version V)
Zplan v1.03	113
Deco Planner 3.1.4	107 (VPM = 2)
Trust Trimix 2.2.17	102
M-Plan V 1.03	95; mit "Pyle" Stopps
HLPlanner V 1.x	90 (VPM = 0 %)
Professional Analyst 4.01.j Cochran EMC-20H	87; Konservativismus-Faktor = 0.0 (93 mit Version t; 91 mit Version u; 98 mit Version v)
GAP 3.0.425.6	83; RGBM Recreational
OSTC Planner v 434	82; TDT: 107
DIVE V 3_0	81; ZH-L 16 C (vollständige numerische Lösung)
GAP 3.0.425.6	80; ZH-L 16 C
Decotrainer V 3.01	77; ZH-L 16 C mit p _{H2O} (ohne: TST = 67)
M-Plan V 1.03	72
Ultimate Planner 1.2	70, TDT: 95
Deco Planner 2.0.40 & 3.1.4	70
OSTC Planner v 470 Beta	66; TDT: 91
VGM ProPlanner Beta	66 (default)
Multilevel 1.6	65
GAP 2.1	63; ZH-L 16 C
GAP 2.1	53; RGBM aggressive (GAP 3.0.425.6: 30)
GAP 3.0.425.6	50; RGBM nominal
OSTC 3, V 0.9 from 05/2013	41; 12/2', 9/5', 6/10', 3/19'

Bühlmann-Hahn (ZH-L) und Workman (USN) oder diffusions-dominierte Modelle wie DCIEM (s. weiter unten) trifft es genauso wie Blasenmodelle wie VPM und deren Abwandlungen wie RGBM [Anm.: Blasenmodelle werden auch als „2 Phasen-Modelle“ bezeichnet, da zwei Phasen berücksichtigt werden: die gelöste Gasphase und die freie Gasphase - also die echten Gasblasen].

Lediglich die ganz, ganz modernen „Hybrid-Modelle“ (s. weiter unten) und die statistisch basierten Tauchtabellen nehmen eine etwas andere Stellung ein: die statistisch basierten Tauchtabellen betrachten wir dann im Teil III (in einem der nächsten Caissons) etwas genauer.

Der Heliox-Testtauchgang

Wiederholen wir ganz kurz den Lufttauchgang aus Teil I, Tabelle 1. Das arithmetische Mittel aller TTS-Werte (time-to-surface) betrug ca. 40 min, die Standardabweichung ca. 18 min. Im einfachen Klartext: die meisten TTS-Werte befanden sich im Bereich zwischen 22 bis 58 min.

Hier nun, im Teil II, Tabelle 1, haben wir folgende Bedingungen:

- Tauchtiefe 42 m (Süßwasser, kompensiert für 25 °C)
- sofortiger Abstieg
- Aufstieg mit 9 m/min
- Grundzeit: 25 min
- 20% O₂, der Rest: Helium, trockenes, komprimiertes Atemgas
- Respiratorischer Quotient R_q = 1,0 (**)
- keine körperliche Belastung
- Umgebungsdruck auf Meereshöhe: 1013 mbar
- alle üblichen Gradienten-Faktoren = 1,00 (i.e. 100%)
- Konservatismusfaktoren, i.e. prozentual erhöhte Inertgassättigung, sind angegeben; aber: keine Jesus-Faktoren
- keine Temperaturadaptionen der Perfusion
- keine Travel- oder Dekompressions-Gase, d.h. der Tauchgang wird komplett mit dem „Back Gas“, dem Gasvorrat auf des Taucher's Rücken, absolviert
- bei den als „ZH-L“ dokumentierten Implementierungen wurde, wenn möglich, der ZH-L 16C Koeffizientensatz ohne das „1b“ Kompartiment benutzt ([1], S. 158).

Tabelle 2

Dekompressions-Tabellen aus dem militärischen Bereich für folgenden Tauchgang: max. Tiefe 42 m, Tauchzeit 30 min, Atemgas Heliox16/84 (mit 16% O₂)

Stopp-Tiefe / Methode:	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	TTS	Bem.: (*) 100% O ₂
[min.]							[min.]	
USN alt		10 (*)	45 (*)	-	-	-	58	140 feet
USN 2008		Heliox50: 10	Heliox50: 10	18 (*)	30 (*)	-	72 (+ 10)	140 feet + 2 * "air breaks" à 5 min
DCIEM	2	4	4	37 (*)	-	-	55	in-water decompression
DCIEM SurDO ₂	2	4	4	7 (*)	-	-	72 (40 min*)	40 min Druckkammer- Dekompression mit 5 min "air break"

Um eine Vergleichbarkeit der Tabelleneinträge zu erhalten, mußte an der Inertgasdosis gedreht werden, da die aufgenommene Inertgasmenge bei allen Simulationen identisch sein sollte.

Bei den weiter unten bemühten Standard-Tauchtabellen gibt es ein interessantes Phänomen: sogenannte „undocumented features“, undokumentierte Merkmale. So sind z.B. für die USN 1983 Tabelle einfache Schreibfehler nachgewiesen. Für die Version 2008 der USN Tabelle wurde dies von Ed Thalmann „executive editing“ getauft, sinngemäß „Zwangsänderung durch den Herausgeber“ ([2], S.1 & 5). Um nun die Ergebnisse der Tabelle 1 in Beziehung zu den ziemlich geprüften und belastbaren Prozeduren der amerikanischen und kanadischen Militärs zu bringen, blicken wir in die Tabelle 2.

Man beachte die Unterschiede in den Aufstiegs-Prozeduren (+ 5 min Grundzeit, Dekompression in der Druckkammer bzw. „SurDO₂“, die Dekompression an der Oberfläche mit Sauerstoff) und den 4% höheren Inertgas-Anteil, die verschiedenen Dekompressions-Gase und den hohen pO₂ für die Dekompressions-Stopps. Zum Nachmachen im Freiwasser ist das für den Hobbytaucher oder Tekkie [technical diver] nicht zu empfehlen!

Diese Prozeduren wurden i.d.R. anhand einiger tausend nasser und trockener Kammertauchgänge geprüft und glänzen mit einem relativ niedrigen DCS-Risiko. Bei den Kammertauchgängen war die Wassertemperatur und die Arbeitslast, z.B. auf einem Ergometer, ein kontrollierter und nachprüfbarer Parameter.

Das bei der United States Navy (USN)-Tabelle zugrundegelegte Dekompressionsmodell ist ein ziemlich weitverbreitetes Perfusionsmodell nach dem Strickmuster „J.S. Haldane“ [5]. Die Kompartimente werden als parallelgeschaltet betrachtet. Für die kanadische Tabelle (DCIEM) wurde das sogen. „Kidd-Stubbs“- Modell benutzt: ein Diffusionsmodell mit 4 Kompartimenten in Serienschaltung (s. Abbildung 2 mit den beiden Typen der Modelle). Trotz des prinzipiellen Unterschiedes dieser beiden Dekompressionsmodelle sind die TTS-Werte der Tabelle 2 sehr viel näher beieinander als diejenigen der Tabelle 1.

USN alt ist die Vorgängertabelle der aktuellen USN Tabelle, welche 2008 grundlegend überarbeitet wurde. Die TTS für fast alle tabellierten Tauchgänge

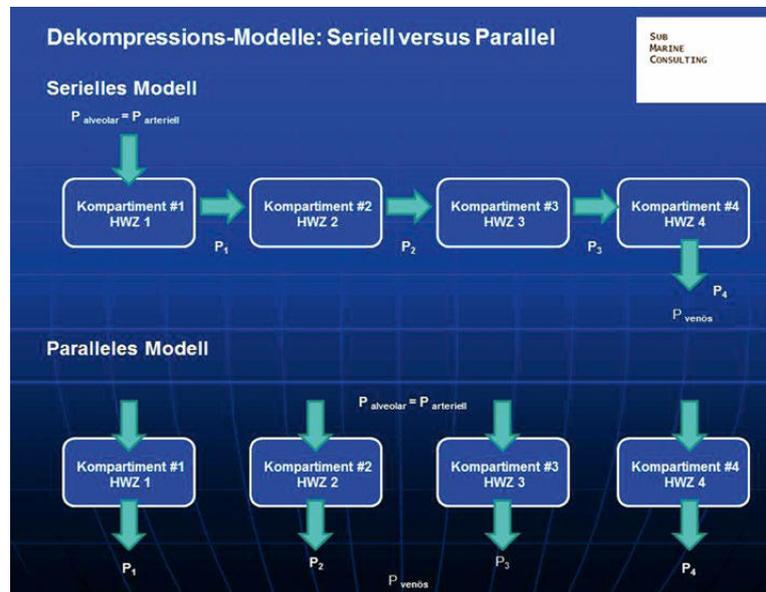


Abbildung 2
Dekompressions-Methode: Seriell versus Parallel

wurden verlängert und der letzte Dekompressions-Stopp vor Erreichen der Oberfläche wurde von 3 m/10 feet auf 6 m/20 feet verlegt. Der Eintrag bei **DCIEM** „SurDO₂“ (letzte Zeile in Tabelle 2) bedeutet Oberflächen-Dekompression in der Kammer bei 100% O₂ ab ca. 9 m äquivalenter Wassertiefe.

User/e Test-Taucher/in wird nun viel Spaß haben, wenn Er/Sie die rechte Spalte von Tabelle 1 statistisch analysiert und alle TTS-Werte berücksichtigt. Das arithmetische Mittel liegt bei ca. 120 min, die Standardabweichung bei ca. 98. Diese Standardabweichung ist damit wesentlich größer als die Standardabweichung der entsprechenden Tabelle 1 in Teil I (Luft-Tauchgang). **Und genau dies ist auch der Grund, warum wir uns dieses für Sporttaucher relativ exotische Atemgas ausgesucht haben!** Darüber hinaus würden sich die angeführten Dekompressions-Prozeduren als etwas mühselig erweisen, da keine sauerstoffangereicherten Gase benutzt werden. Die gegenseitigen Abweichungen und/oder Fehler der diversen Tabellen/Tauchcomputer/Deko-Software werden aber so noch wesentlich deutlicher zu Tage treten! In der Kurzfassung: **je mehr Helium, desto deutlicher!** (s. auch caisson 26.Jg/2011/Nr.3,S.4-12: Dekompressionsberechnungen für Trimix-Tauchgänge mit PC-Software: Reparieren Gradientenfaktoren defekte Algorithmen oder defekte Software-Implementierungen?).

Unsere Test-Taucher stellen nun fest, dass in Tabelle 1 die längste TTS von 528 min ca. 13 Mal so groß ist wie die kürzeste TTS von 41 min. Zum Vergleich: beim Luft-Tauchgang in Teil I war die längste TTS nur ca. 6 Mal so groß wie die kürzeste TTS! Um die gewaltige Spreizung der TTS in Tabelle 1 etwas einzudämmen, werden alle TTS < 60 min und > 180 min aus der Liste gestrichen! Warum? Nun, offenbar hatten unsere Test-Taucher während ihrer gründlichen Ausbildung zum Berufstaucher/in ein paar gute Instrukturen und bereits soviel Erfahrung gesammelt, daß sie eine TTS < 60 min als ziemlich gefährlich und diejenige TTS > 180 min als etwas experimentell betrachten. Oder, um es höflich auszudrücken, vom logistischen Aufwand als zumindest etwas unpraktisch, um nicht zu sagen, voll vorbei an der beruflich bewährten Praxis ...

Sicherlich wiesen die Probanden, welche die Testtauchgänge für die militärischen Tabellen absolviert hatten, andere körperliche Voraussetzungen vor als unsere Test-Taucher (Alter, BMI, VO₂ max, ...). Daneben zeigt unsere etwas unorthodoxe Gasmischung sehr deutlich, ob eine Dekompressions-Prozedur mit veränderten ZH-L-Koeffizienten gerechnet wurde. Dies wird bei Heliox20 viel deutlicher als bei Luft!

Bei den originalen ZH-L-Werten sind die erlaubten/tolerierten Kompartimentsübersättigungen direkt mit den Halbwertszeiten, den Kehrwerten der Gewebsdurchblutung verheiratet (wenn wir vereinfachend die Blut- und Gewebs-Löslichkeiten vernachlässigen). Abweichungen von den originalen ZH-L a- & b-Koeffizienten werden durch die langen Stopps im Flachwasser deutlich gemacht, vor allem bei den mittelschnellen und langsamen Kompartimenten. Man könnte dies ebenfalls als „undokumentiertes Leistungsmerkmal“ betrachten. Die Hersteller reden üblicherweise sehr blumig von „konservativen Anpassungen durch neuere physiologische Entwicklungen“. Aber sehr wahrscheinlich handelt es sich lediglich um Rechenfehler (d.h. Unachtsamkeiten bei der Behandlung von Gleitkomma-(floating point) Arithmetik, [3] und [4]) bzw. Schlampereien bei der Software-Entwicklung!

Nota Bene: niemand ist vor solchen Schlampereien geschützt! NIEMAND! Aber immerhin ist z.B. die USN so gewissenhaft und auch so ehrlich, dies zu dokumentieren und zugänglich zu machen (loc.cit. [2], S. 4, Kapitel 3.1).

Für den beruflichen/kommerziellen Einsatz, d.h. für Bau- & Reparaturtauchgänge ab ca. 30 m Tiefe oder auch Sättigungstauchgänge ist das gewählte Heliox20 ein mehr oder weniger übliches Standardgemisch. Es ist relativ unwahrscheinlich, dass sich jemand aus dem beruflichen Umfeld auf die in Tabelle 1 geschilderten Prozeduren, Deko-Software oder Tauchcomputer verläßt! Man kann auch mit dem gesunden Menschenverstand die Weisheit eines 3- bis 8-stündigen Dekompressions-Stopps für diesen relativ kurzen „Bounce-/ Jump-/ Sprint-Dive“ in Frage stellen (die ersten vier Einträge in Tabelle 1).

Und die P(DCS)?

(P(DCS) = statistische Wahrscheinlichkeit (P wie Probability), eine Dekompressionskrankheit zu erleiden)

Die einfache Frage, die sich aufdrängt: gibt es eine irgendwie „objektive“ Methode, die „guten“ von den „schlechten“ TTS zu trennen? Vielleicht so etwas wie Ockhams Rasiermesser [Die einfachste Erklärung für eine Sache ist die wahrscheinlichste]? Abgesehen von einigen marginalen Betrachtungen zur operativen Abwicklung, nämlich die Taucher für den 3 bis 8-stündigen Deko-Stopp mit Atemgas zu versorgen, die Körpertemperatur aufrecht zu erhalten oder für Nahrung und Hydratation (Getränke) und Miktion zu sorgen.

Na ja: so etwas ähnliches gibt es, zumindest teilweise. Im Teil I dieser Serie (s. caisson 30.Jg/2015/ Nr.1,S.14-22) haben wir gezeigt, daß es neben Tiefe, Zeit und fO₂ eine ganze Anzahl anderer wichtiger Faktoren gibt, die das Ergebnis der Dekompression beeinflussen können. Diese Faktoren sind z.B. Alter und körperliche Fitness, oder (im Moment noch) undefinierte, wie Blutfett-Status, Hauttemperatur und körperliche Belastung. Wenn also der neue Tauchcomputers oder die Desktop Deko-Software diese Faktoren berücksichtigt: umso besser!

Und: wenn ihr das tut, was zur Zeit jede Menge Tekies auch tun, nämlich nach jedem anspruchsvollen (Trimix-)Tauchgang nach ultraschall-detektierbaren Inertgasbläschen suchen, dann sammelt ihr im Laufe der Zeit jede Menge wertvoller Daten, wie ihr eure Gradientenfaktoren für eine individuelle und erfolgreiche Dekompression einstellen könnt (Abbildung 3).



Abbildung 3
präcordiale Ultraschall Dopplermessung am 3. ICR links

Zu den Details der Berechnung der P(DCS) verweisen wir auf Teil III dieser Serie: er wird voraussichtlich gegen Ende des Jahres im caisson erscheinen. Die intuitiv erfaßbaren Grenzwerte der P(DCS) sind $P(DCS) = 1,0$ (oder 100%) oder $0,0$ (= 0%). 1,0 bedeutet, daß wir uns auf jeden Fall eine DCS einfangen, während 0,0 das genaue Gegenteil bedeuten würde, also ein ziemlich sicheres Tauchgangsprofil.

Das Bild, welches uns Ockhams Messer liefert, ähnelt dann aber eher dem eines Skalpells für Mikro-Chirurgie... Um überhaupt an eine statistisch belastbare Zahl für die P(DCS) zu kommen, benötigen wir **hunderte von penibel kontrollierten, identischen Tauchprofilen**, bei denen die medizinischen Ergeb-

nisse sorgfältigst dokumentiert wurden. Ist die Datenbasis nicht so gigantisch, haben wir ein Grundproblem jedweder tauchmedizinischen Veröffentlichung: nämlich das der „kleinen Zahl“. Die Veröffentlichung mag intellektuell brilliant und medizinisch interessant sein: eines ist sie dann mit Sicherheit nicht: streng wissenschaftlich, und auch nicht statistisch belastbar. Auch dieses Thema wurde im caisson schon behandelt (caisson 2009;24(2),9-15: Tauchmedizin: von einer Kunst zu einer Pseudo-Wissenschaft).

Am Ende eines anstrengenden Forschungstages haben wir dann eine riesige Daten-Basis, die wir zum Vergleich mit unserem geplanten Tauchgang heranziehen können. Entspricht unsere gewählte Dekompressions-Prozedur denjenigen mit geringer P(DCS): na, dann ist ja gut. Ist dies aber nicht der Fall, müssen wir unser geplantes Profil ändern. Entweder nicht so tief tauchen, nicht so lange oder länger dekomprimieren (oder, im Zweifel, alles genannte ...). Um die Qualität der TTS aus Tabelle 1 zu diskutieren gibt es eine Reihe von Methoden, die auf der **Dauer der TTS** als solches beruhen. Eine dieser Methoden ist von der USN entwickelt worden. Wenn wir die beiden Bildschirmkopien weiter unten kontrollieren, bekommen wir zumindest ein Gefühl, das es sich in diesem Fall bei Ockhams Messer um eine ganz, ganz dünne Rasierklinge handelt. Eine dieser Methoden wurde in 2004 veröffentlicht unter dem Namen: „NEDU Report 12/2004“ (als Methode IV in den Bildschirmkopien bezeichnet). Denn für unseren Heliox-Testtauchgang sind die Ergebnisse:

TTS = 40 min, → P(DCS): 0.11254 (1. Bildschirmkopie)
TTS = 400 min, → P(DCS): 0.10463 (2. Bildschirmkopie)

Bildschirmkopie 1

```
was jetzt?pdcs
Eingabe der TTS (fuer Methode IV) in min:
40
Methode I: Southerland 1992, P(DCS) = .19506
Methode II: PME enhanced 6 Compartments P(DCS) = .14138
Methode III: Stat. Tables Part VI, Model 4 P(DCS) = .20849
Methode III: obere Fehlergrenze, P(DCS) = .36221
Methode III: untere Fehlergrenze, P(DCS) = .16917
Methode IV: NEDU Report 12/2004, P(DCS) = .11254
Methode IV: untere Fehlergrenze, P(DCS) = .00643
Methode IV: obere Fehlergrenze, P(DCS) = .99988
Methode V: NEDU Report 03/2009, P(DCS) = .18064
SDEV = .03973 MEAN = .16762
```

Bildschirmkopie 2

```

was jetzt?pdcs

Eingabe der TTS (fuer Methode IV) in min:
400
Methode I: Southerland 1992, P(DCS) = .19506
Methode II: PME enhanced 6 Compartments P(DCS) = .14138
Methode III: Stat. Tables Part VI, Model 4 P(DCS) = .20849
Methode III: obere Fehlergrenze, P(DCS) = .36221
Methode III: untere Fehlergrenze, P(DCS) = .16917
Methode IV: NEDU Report 12/2004, P(DCS) = .10463
Methode IV: untere Fehlergrenze, P(DCS) = .00627
Methode IV: obere Fehlergrenze, P(DCS) = .99982
Methode V: NEDU Report 03/2009, P(DCS) = .18064
SDEV = .06293 MEAN = .20753
    
```



Die Bildschirmkopien der Berechnungen wurden mittels der Freeware DIVE, Version 2_99 erstellt, erhältlich als kostenloser Download unter dem QR-Code oder unter dem folgenden Link: <http://www.divetable.info/dive/kap3.htm>

Die anderen Methoden und die Ergebnisse sowie die zugehörigen Quellen werden wir im Teil III ausführlicher beleuchten.

Mit der TTS von 40 min erreichen wir eine P(DCS) von ca. 0,11, i.e.: 11%. Das heißt, bei ca. 11 Tauchgängen von 100 werden wir voraussichtlich DCS-Probleme bekommen. Dies ist ziemlich viel und sogar für militärische Bedürfnisse als zu riskant eingestuft: die Standard Navy-Prozeduren versuchen hier bei ca. 3 bis 5% zu landen, der PADI RDP (Recreational Dive Planner, die Tabelle für Sporttauchgänge mit Luft) möchte im Bereich von ca. 2 bis 3% bleiben. Die oben zitierte Berufserfahrung unserer Taucher, bei einer TTS von ca. 60 min zu verweilen, wird so bestätigt. Wenn wir nun also zusätzlich weitere 6 Std. (400 - 40 = 360 min = 6 h) im Wasser mit Dekompression verbringen, so wird uns dies einen statistischen Vorteil von gerade einmal einem halben Prozentpunkt einbringen.

Bei dieser ganzen P(DCS) Diskussion dürfen wir eines nicht vergessen: das Tauchgangsprofil unseres Testkandidaten muß den Datenbasen der gesammelten und ausgewerteten Profilen ziemlich ähnlich

sein, sonst klappt der Vergleich eben nicht! Extrapolationen jenseits der geprüften Datenbasis, also das, was der Tekkie mit seiner Deko-Software eben sehr gerne macht, stehen auf statistisch ganz, ganz dünnen und wackeligen Beinchen.

Und die Blasen-Modelle?

Die weiter oben im Text bemühten Perfusions-Modelle der Kollegen *Workman, Schreiner, Müller, Ruf, Hahn, Bühlmann* et al. beruhen ausschließlich auf im Blut gelösten Inertgasen. Im Gegensatz dazu betrachten die Blasen-Modelle auch die freie Gasphase. Haldane hat bereits vor über 105 Jahren darauf hingewiesen, daß sein Modell dann nicht mehr funktioniert: die Gasblasen behindern mechanisch die Perfusion und somit auch die Entsättigung ([5], S. 351 & 424).

Zwischenzeitlich wurde aber ebenso klar, daß es für die Auslösung einer DCS etwas mehr braucht, als nur eine Gasblase, die ein Blutgefäß blockiert. Die aktuelle DCS-Forschung beobachtet ein ganzes Arsenal von bio-physikalischen und bio-chemischen

Effekten, primärer und sekundärer Natur, schwer zu reproduzieren und noch schwerer zu verstehen! Sogar die kleinsten Mikro-Blasen, die nicht mal dazu taugen, auch nur die dünnste Kapillare zu blockieren, und bisher als "silent", als pathologisch nicht auffällig oder nicht messbar bezeichnet wurden, finden sich in diesem Arsenal. Bereits das bloße Vorhandensein einer Gasblasen-Oberfläche, das sogenannte "gas-blood interface" gehört nun zum Kreis der üblichen Verdächtigen.

Aus diesem Grunde denken die Verfechter der Blasen-Modelle, daß diese den Perfusions-Modellen überlegen sind. Dies verhält sich in etwa so wie Einsteins Relativitätstheorie zur Newton'schen Mechanik. Es ist sicherlich richtig, allerdings nur in einigen ausgewählten Aspekten. Für tag-tägliche Aktivitäten wie spazierengehen oder im Auto fahren ist die Überlegenheit der Relativitätstheorie für uns Otto-Normal-Gas-Atmer völlig bedeutungslos.

Deshalb werfen wir einen kurzen und oberflächlichen Blick auf das bekannteste der Blasen-Modelle, das VPM (*Varying Permeability Model*). Für unsere Betrachtungen hier im Teil II vernachlässigen wir das RGBM (*Reduced Gradient Bubble Model*): es gibt hierfür keine vollständige und nachprüfbare Dokumentation.

Das VPM berechnet die Inertgaspartialdrücke in den Kompartimenten mit den gleichen Methoden wie die Perfusionsmodelle und benutzt in etwa auch die gleichen Halbwertszeiten. Zur Bestimmung der "sicheren Tiefe des Aufstiegs", also des tiefsten Dekompressions-Stopps, werden allerdings noch ein paar weitere Parameter benötigt. Diese Parameter werden nun aber nicht aus Naturgesetzen oder aus ersten Prinzipien abgeleitet, sondern über einen "best fit": einer Anpassung der Parameter an traditionelle Tauchtabellen. Die verwendeten Tabellen sind die alte USN und die RNPL-Lufttabelle. Weiterhin wurden für den best fit die Ergebnisse der TEKTITE-Sättigungstauchgänge herangezogen. Die TEKTITE-Experimente fanden um 1971 in der Karibik, nahe der Insel St. Johns, statt. Die für das VPM ausgewerteten Tauchgänge wurden mit Nitrox10 auf einer Tiefe von 100 feet und der Dauer von 60 Tagen durchgeführt.

Andererseits bedeutet es bei Perfusions-Modellen mit Kompartimenten, deren Halbwertszeiten > 600 min betragen, daß bereits implizit Blasen mathema-

tisch simuliert werden. Derart große Halbwertszeiten sind äquivalent zu sehr, sehr geringen Perfusionsraten. Diese sind dann aber so gering, daß von erfolgreicher Perfusion, d.h. Sauerstoff-Versorgung zur Aufrechterhaltung einer sinnvollen Organ-Funktion, eigentlich keine Rede mehr sein kann. Ergo ähnelt dies der Situation in einer Kapillare, die mittels einer Gasblase verstopft ist.

Mein Modell ist besser als Deins!

Hmmmmmm; prinzipiell: NEIN! Alle Modelle sind falsch: ALLE! Grundsätzlich! Und einige sind sogar "falscher" als andere. Aber immerhin kann man eine Handvoll davon gebrauchen, um wenigstens ein bisschen was Sinnvolles auszurechnen. Hier nur ein paar der prominentesten Schwächen, die jedem Dekompressionsmodell innewohnen, egal ob Perfusions- oder Blasenmodell:

- keine Berücksichtigung der seriell geschalteten Organe (z.B.: Milz-Leber und Darm-Leber)
- keine Berücksichtigung von Bradycardie und Vasokonstriktion bei hohem pO_2
- keine Berücksichtigung der Zuschaltung von Ruhekapillaren bei Arbeitslast
- beim Einsatz von Helium wird traditioneller Weise der Faktor 2,65 zur Skalierung der Kompartiments-Halbwertszeiten von Stickstoff benutzt. Auch dies scheint fraglich zu sein [6]
- keine Berücksichtigung von: Hydratation, Hauttemperatur, etc. etc. ...

Das alle diese Modelle auch noch „altersblind“ sind, sei nur am Rande vermerkt. Das tatsächliche Problem beim praktischen Tauchen ist dann dies: sobald eine Zahl, egal ob auf der Deko-Software des PCs oder dem digitalen Display eines Tauchcomputers erscheint, manifestiert sich eine Art „Taucher-Alzheimer“. Diese Zahlen werden für bare Münze genommen und es wird vergessen, das es sich um modellhafte Berechnungen handelt. Alle Dekompressions-Modelle haben mit der physiologischen Realität in etwa so viel zu tun wie eure Modell-Eisenbahn im Hobby-Keller mit Stuttgart 21. Der digitale Output gehört somit in das Reich der Schätzwerte!

Kein Ausweg in Sicht?

Die oben beschriebene Methode, d.h. die Berechnung der P(DCS) aus einer „a posteriori“-Analyse der beobachteten Dekompressionen und der Oberflächenpausen ist ein Weg, den einige Marinen dieser Welt von geraumer Zeit schon erfolgreich beschritten haben: eine detaillierte Liste dazu im Teil III. Dieser Weg wäre auch eine Lösung für Sporttaucher und Tekkies, wenn sie denn gewillt sind, ihre Tauchgangsprofile beizutragen. Es gibt seit 1999 ein großes Projekt von DAN USA sowie eines von DAN Europe, diese Daten einzusammeln. Caisson berich-

von Perfusions- und/oder Blasenalgorithmien, kombiniert mit den Ergebnissen von Ultraschall-Doppleruntersuchungen. Einer dieser Hybride ist das „COPERNICUS“-Modell. Es basiert auf einem Blasenmodell, gestützt von einer breiten Skala biometrischer Einflußgrößen wie: Geschlecht, Alter, aerobe Kapazität, BMI und Arbeitslast. Die Kombination mit den Dopplermessungen ergibt eine neue Kenngröße, den sogenannten „deco stress“. Diesen kann man sich als Hyperfläche, aufgespannt über alle Kenngrößen, vorstellen. Mathematisch wird nun versucht, den deco stress über eine Evolutionsstrategie zu minimieren, d.h. es wird ein Tief- oder Sattelpunkt



Nähere Informationen über das PDE-Projekt (Project Dive Exploration) von DAN USA finden Sie unter dem QR-Code und unter dem folgenden Link: http://www.diversalernetnetwork.org/research/studies/project_dive_exploration



Nähere Informationen über das europäische DSL (Diving Safety Laboratory, das Tauchsicherheitslabor) von DAN Europe finden Sie unter dem QR-Code und unter dem folgenden Link: <http://www.daneurope.org/send-your-dive-profile>

tete darüber: caisson 26.Jg/2011/Nr.2, S.6: Mach' mit: mach' Tauchen noch sicherer!

Im Rahmen des PDE und des DSL Projektes werden die digitalisierten Tauchgangsprofile, die Beobachtungen während der Oberflächenpause und einige biometrische Daten eingesammelt und anonymisiert ausgewertet. Beim DSL wurden bis 2013 ca. 40.000 Profile ausgewertet, davon waren weniger als 200 mit DCS behaftet ([7], Kapitel 1 und 4.)

Allerdings ist ein grundsätzliches Problem des bereits bestehenden riesigen Datengrabes bei DAN das zu wenig biometrische Daten und insbesondere die Arbeitslast und die Hauttemperatur nicht vorliegen. Nichtsdestotrotz ist es aus unserer Sicht ein wichtiger, erster Schritt in die richtige Richtung!

Und, noch was?

Ja! Denn seit kurz vor der Jahrtausendwende gibt es sogenannte „Hybrid-Modelle“. Dies sind Mischungen

der Hyperfläche gesucht. Da dies etwas aufwendiger zu programmieren ist, wird das nicht so einfach für einen Tauchcomputer zu kaufen sein.

Wenn wir nun in der Zusammenfassung die Teile I und II betrachten, können wir folgenden einfachen Schluß ziehen: **„It doesn't matter which model you use, provided it has a sound implementation!“** (A. Salm, Tech Austria, 2008). Sinngemäß: „Es ist eigentlich völlig egal, welchen Tauchcomputer (Deko-Software oder Tauchtabelle) man benutzt. Hauptsache, die Implementierung ist korrekt (d.h. das Ding macht keine Fehler)! Und damit sind wir beim „dicken Ende“ des Teils II angelangt und auch bei der Abbildung 1! Da diese Dinge ja üblicherweise nicht nur Meß- sondern auch Rechenfehler machen, stellt sich die Frage, ob die bei Tekkies bereits übliche Redundanz, nämlich die Benutzung zweier unterschiedlicher Mischgas-Tauchcomputer, zielführend ist. Wenn einer der beiden Computer was Falsches anzeigt: wie wird entschieden, welcher daneben liegt? Es muß also ein Dritter her, der unabhängige Schiedsrichter. Dieses

Ergebnis der Spieltheorie wird auch gerne in einem anderen Gebiet des technischen Tauchens angewandt: die Anzahl der Sauerstoffsensoren in einem Kreislauftauchgerät beträgt oft drei.

Albrecht Salm

Quellen zur vertieften Information

Zu VPM

- D.E. Yount, D.C. Hoffman, On the Use of a Bubble Formation Model to Calculate Diving Tables. Aviation, Space, and Environmental Medicine, February, 1986; 57: 149 - 156
- Dies ist die ursprüngliche Quelle; die vielen, vielen anderen "Quellen" aus dem Internet sind in der Regeln Wiederholungen und Zitate. Das eigentliche Konzept sowie die Grundzüge des Algorithmus werden in der Dissertation von Hoffman beschrieben:
- Donald Clinton Hoffman, Dissertation August 1985: On the Use of a Gas-Cavitation Model to generate prototypal Air and Helium Decompression Schedules for Divers. Sea Grant HAWAU-Y-84-003 C3

Zu COPERNICUS

- UHMS ASM (Undersea and Hyperbaric Medical Society, Annual Scientific Meeting) 2008 Session T134
- UHMS ASM 2010, Session F10: Copernicus Decompression Procedures: NTNU, Brubakk et al.
- A Dynamic Two-Phase Model for Vascular Bubble Formation During Decompression of Divers, Christian R. Gutvik and Alf O. Brubakk. In: IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, VOL. 56, NO. 3, MARCH 2009.
- Christian R. Gutvik, Richard G. Dunford, Zeljko Djuric, Alf O. Brubakk: Parameter estimation of the copernicus decompression model with venous gas emboli in human divers, Med Biol Eng Comput (2010) 48:625-636 DOI 10.1007/s11517-010-0601-6)

Zu U.S.N.

- U.S. Navy Department. U.S. Navy Diving Manual. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1970; NAVSHIPS 0994-001-9010.
- U.S. Navy Diving Manual, REVISION 6, SS521-AG-PRO-0100910-LP-106-0957, 15 APRIL 2008, Change A 5 October 2011

Zu DCIEM

- Defence and Civil Institute of Environmental Medicine: Diving Manual, Part 1 & 2, March 1992, DCIEM No. 86-R-35, published by UDT, Inc.

Zu Tektite

- Beckman EL, Smith EM. Tektite II: Medical supervision of the scientists in the sea. Tex. Rep. Biol. Med. 1972; 30:155-69.

Zu RNPL

- Air diving tables. Alverstoke, Hants; Royal Naval Physiological Laboratory, 1968. (London, HMSO, 1968).

Begriffs-Erklärungen

- **Bounce-/ Jump-/ Sprint-Dive:** engl. Bezeichnungen für relativ kurze & flache, oft nicht oberflächenversorgte Tauchgänge
- **Respiratorischer Quotient R_q:** Volumenverhältnis von Kohlendioxidproduktion zu Sauerstoffverbrauch, Durchschnittswerte sind: 200 ml Kohlendioxidproduktion / 250 ml Sauerstoffverbrauch pro Minute, d.h. ca. $R_q = 200 / 250 = 0,8$.
- **Air Break:** Luftpause während einer Dekompression mit Sauerstoff
- **SurDO₂:** surface decompression using O₂
- **Jesus Faktor:** empirische Verlängerungen von tabellierten Dekompressionszeiten
- **P(DCS):** statistical probability for decompression sickness
- **Ockhams Rasiermesser:** wissenschaftliche Methode, benannt nach dem englischen Philosophen William of Occam, 1288 - 134

Literatur

1. Tauchmedizin, Albert A. Bühlmann, Ernst B. Völlm (Mitarbeiter), P. Nussberger; 5. Auflage in 2002, Springer, ISBN 3-540-42979-4
2. NEDU (Navy Experimental Diving Unit) TR 09-05 / TA 8-20: Schedules in the Integrated Air Decompression Table of U.S. Navy Diving Manual, Revision 6: Computation and Estimated Risks of Decompression Sickness
3. Sterbenz, Pat H. 1974. Floating-Point Computation, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
4. Goldberg, I. Bennett 1967. 27 Bits Are Not Enough for 8-Digit Accuracy, Comm. of the ACM. 10(2), pp 105-106.
5. Boycott, A.E., Damant, G.C.C., & Haldane, J.S.: The Prevention of Compressed Air Illness, Journal of Hygiene, Volume 8, (1908), pp. 342-443.
6. Altering blood flow does not reveal differences between nitrogen and helium kinetics in brain or in skeletal muscle in sheep; David J. Doolette , Richard N. Upton , Cliff Grant Journal of Applied Physiology Published 1 March 2015 Vol. 118 no. 5, 586-594 DOI: 10.1152/jappphysiol.00944.2014
7. Balestra, Costantino; Germonpre, Peter (ed.) The Science of Diving: Things your instructor never told you (2015) Lambert Academic Publishing, ISBN: 978-3-659-66233-1

Zitierte Caisson-Ausgaben

- Caisson 30.Jg/2015/Nr.1,S.14-22: Yet another benchmark - Der etwas andere Vergleich - Teil I
- Caisson 26.Jg/2011/Nr.3,S.4-12: Dekompressionsberechnungen für Trimix-Tauchgänge mit PC-Software: Reparieren Gradientenfaktoren defekte Algorithmen oder defekte Software-Implementierungen?
- Caisson 26.Jg/2011/Nr.2,S.6: Mach' mit: mach' Tauchen noch sicherer!
- Caisson 2009; 24(2),S.9-15: Tauchmedizin: von einer Kunst zu einer Pseudo-Wissenschaft



Deko-Computer, -Tabellen & -Programme S.14
Tauchroboter als Dive Buddy S.6
PRO & CONTRA Langsamer Aufstieg S.23

UNOSSTEAC

Yet Another Benchmark

Der etwas andere Vergleich - Teil I



AUTOR

Albrecht Salm •
 Physiker •
 PADI Master Scuba-Diver Trainer •
 SSI Extended Range Instructor •
 TL für Tauchsportcenter •
 Esslingen •
 (www.tauchturm.com) •
 Berater bei SubMarineConsulting •
 (www.SMC-de.com). •
 Email: director@SMC-de.com •

Mit diesem Vergleich im Teil I wollten wir (SubmarineConsulting) ein paar aktuelle Tauchcomputer, (gedruckte) Tauchtabellen sowie Desktop/PC Dekompressions-Software durch unseren berühmtesten Test-Luft-Tauchgang auf 42 m, 25 min Grundzeit, herausfordern. Für anspruchsvolle Sporttaucher ist das mit einer Standardausrüstung durchaus machbar: es gibt ja auch genügend attraktive Ziele in deutschen Gewässern. Das Wrack des Schaufelraddampfers "Jura" im Konstanzer Trichter des Bodensees ist nur eines dieser Ziele (s. Abbildung 2). Darüberhinaus wollen wir auch die Grundlagen zum Verständnis des Teils II schaffen. Der Teil II wird das gleiche Tauchprofil behandeln, jedoch mit einer etwas exotischeren Atemgasmischung, nämlich ein Heliox20 (20% Sauerstoff, 80% Helium). Den Sinn mit dieser Mischung zu arbeiten werden wir ebenfalls im Teil II erläutern. Teil II wird im nächsten caisson erscheinen.

Aber unsere Taucherin wird relativ zügig ein gutes Gespür für die starke Variabilität der Ergebnisse aus Tabelle 2 entwickeln: die Extrem-Werte der sogenannten "TTS" (time-to-surface, üblicherweise die Summe aller Stoppzeiten + Aufstiegszeit) aus dieser Tabelle sind für ihren Luft-Tauchgang:

- ca. 16 min mittels einer RGBM-Tabelle, über:
- 85 min (eine konservative Spezial-Tabelle für Sporttaucher von meinem Freund Dr. Max Hahn; mittels einem Perfusionsmodell berechnet: der maximal erlaubte Inertgasüberdruck wurde hierbei auf 0,4 bar festgelegt [1, 4]) bis hin zu
- 102 min mit einem anderen Blasenmodell (VPM) gerechnet.



Abb.1: Drei Tauchcomputer gegen Ende eines durchschnittlichen Tauchganges. Die Computer befinden sich auf exakt der gleichen Tiefe, aber mit bereits 3 verschiedenen Tiefenangaben ... und mit 3 völlig unterschiedlichen Angaben zu den berechneten Rest-„Null-Zeiten“ (Foto: A. Salm, näheres zum Foto im Text).



Abbildung 2: Typischer Bodenseebewohner auf der Reeling des Jura-Wracks (Foto: Tauchsportcenter Esslingen, mit freundlicher Genehmigung)

Übersicht über gängige Dekompressionsmodelle

A) Perfusionsmodelle

Die Perfusion dominiert den Sättigungs-/Entsättigungsvorgang, in zeitlicher Reihenfolge:

John Scott Haldane: 1907, Robert Dean Workman: 1965, Siegfried Ruff und Karl Gerhard Müller: 1966, Heinz R. Schreiner: 1971, Albert Alois Bühlmann: 1978 sowie Max Hahn

B) Blasenmodelle

Der Entsättigungsvorgang wird durch Inertgasblasen dominiert, in zeitlicher Reihenfolge:

VPM (Varying Permeability Model) Yount, Hoffman: 1986, RGBM (Reduced Gradient Bubble Model) Wienke: 1990

C) Hybrid-Modelle

Perfusions- und/oder Blasenmodelle kalibriert mit Doppler-Messungen, z.B.: Copernicus; Brubakk et al. 2009

Graphik 1: Inertgasdosis

Bevor wir uns in einige Details der Tabelle 2 vertiefen, müssen wir zur Kenntnis nehmen, daß es für die oben erwähnte TTS keinen allgemeingültigen Standard gibt, an den sich alle halten würden ... Wir fanden mehrere Wege zur Berechnung der TTS:

TTS (time-to-surface)

A) $TTS = BT + TST + AT$

B) $TTS = TST + AT$

C) $TTS = TST = TDT$

Legende

TTS = time-to-surface

BT = Bottom Time (effektive Grundzeit, auch hier üblicherweise die Abstiegszeit bereits eingeschlossen)

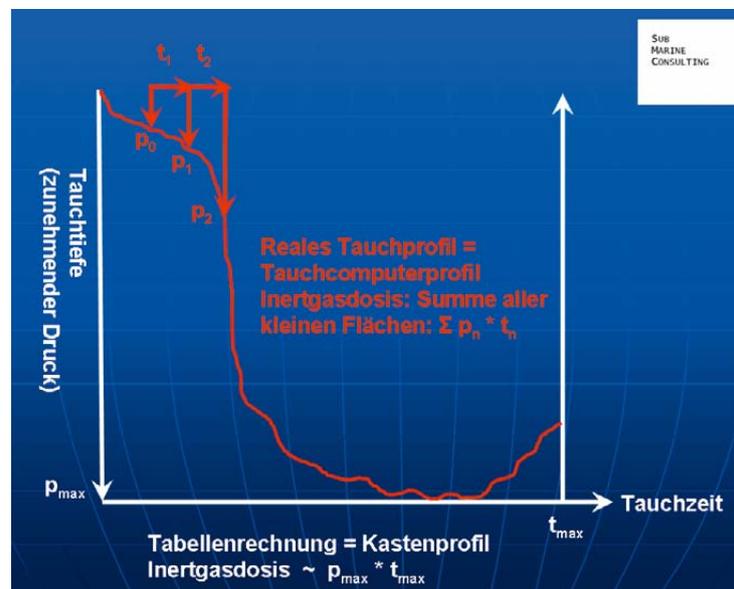
AT = Ascent Time (normalerweise die maximale geometrische Tauchtiefe dividiert durch die Aufstiegs-geschwindigkeit)

TST = Total Stop Time, die Summe aller Stopp-Zeiten

TDT = Total Decompression Time, eigentlich: $TDT = TST + AT$, aber manchmal halt auch:

$TDT = Total\ Dive\ Time = BT + TST + AT$

Die meisten der Tabellen und Softwareprodukte benutzen die Definition B) für die TTS. Na ja, aber eben nicht alle und nicht immer ... Schlimmer wurde es nur noch, daß wir bei verschiedenen Tauchcomputern und den PC Softwareprodukten mit jeder Menge Parameter zu kämpfen hatten, um eine prinzipielle Vergleichbarkeit überhaupt erst herzustellen! Unser Ziel war es, hierbei die sogenannte „absorbierte



Inertgasdosis“ zugrundezulegen: diese Dosis sollte für alle identisch sein.

Unsere Definition der “absorbierten Inertgasdosis” ist einfach: es ist das Zeit-Integral (die Fläche über der roten Linie aufwärts in Graphik 1 unter dem Tauchprofil, also die Tiefe über der Zeit.

Für ein rechteckiges Kasten- (Topf-, Box-)Profil, das ja üblicherweise für Tauchtabellen als Basis dient, gilt geradewegs die Fläche für ein Rechteck:

Inertgasdosis ~ Tiefe * Zeit

Deshalb mußten wir an den folgenden Parametern `rumschrauben um genau diese Dosis über den ganzen Vergleich konstant zu halten:

- Abstiegs- und Aufstiegsgeschwindigkeiten
- dem barometrischen Luftdruck zu Beginn des Tauchganges
- Wassertemperatur, da die Wasserdichte temperaturabhängig ist
- Wasserdichte (also ob mit Süß- oder Salzwasser gerechnet wird)
- den voreingestellten Gradientenfaktoren (zu den Gradientenfaktoren siehe entsprechender Infokasten)
- den Datensätzen der Koeffizienten zur Berechnung der erlaubten / tolerierten Inertgasübersättigungen.

Schwieriger noch wurde es mit intrinsischen, den versteckten Gradientenfaktoren einiger RGBM-Implementationen. Diese rechnen üblicherweise intern, sozusagen versteckt, mit einem traditionellen ZH-L Algorithmus. “RGBM folded over ZH-L”, wie Bruce Wienke es sagen würde ([5], S: 195, 297, 347-354, 371-376, 335-339) . Dies bedeutet, daß bei diesen RGBM-Varianten die a- und b-Koeffizienten des ursprünglichen ZH-L Algorithmus “gefaltet”, also angepaßt wurden, so daß „RGBM-ähnliche“ Ergebnisse erzeugt werden. Der Sinn liegt in einer deutlichen Vereinfachung des relativ komplizierten RGBM-Algorithmus, nur dann kann er mit der beschränkten Rechenkapazität eines Tauchcomputers bewältigt werden.

Produkte für den professionellen Einsatz (z.B. “C&R” construction & repair diving oder Sättigungstau- chen) erlauben i.d.R. Änderungen in den Parametern der Kompartimente bei:

- Arbeitslast (workload, oxygen consumption)

- Hauttemperatur, und dem
- respiratorischen Koeffizienten (Volumenverhältnis von CO₂-Produktion zum O₂-Verbrauch), so wie bei
- Vasokonstriktion und Bradykardie durch hohen pO₂.

Nur ein Produkt aus der Tabelle 2 kann alle 4 Parameter bedienen (DIVE: [12], S. 5). Benutzten die Produkte das übliche ZH-L16-System von Bühlmann [2], so versuchten wir den “ZH-L16C” Koeffizientensatz zwingend einzusetzen. Dieser ZH-L16C-Satz soll etwas konservativer sein als der ZH-L16A-Satz der für die ZH86-Tauchtafel benutzt wurde (Zürich, 1986). Auch soll der C-Satz die Besonderheiten einer online Berechnung durch Tauchcomputer berücksichtigen ([2], s.S. 158).

Wenn wir diesen Kampf verloren hatten, nämlich bei fixierten resp. gedruckten Tabellen, so ist dies mit einer Bemerkung in der äußerst rechten Spalte hinterlegt. Und, schließlich: wir reden hier nicht über marginale Variationen der TTS, sozusagen im “Sub-5 Minuten-Bereich” sondern über Phänomene im Bereich Faktor 2 und größer! Ganz viel Spaß wird unser/e Test-Taucher/in dann haben, wenn er/sie das arithmetische Mittel und die Standard-Abweichung aus allen TTS berechnet!

Eine der grundlegenden Ursachen in der TTS-Variation, speziell in der Gruppe der durchaus vergleichbaren Tauchcomputer, resultiert einfach aus dem statistischen, dem zufälligen Meßfehler. Dieser zufällige Meßfehler tritt bei jeder Messung auf! Und Tauchcomputer sind nun mal simple Meßgeräte, die eben die notwendigen Meßgrößen (Druck, Zeit, Wassertemperatur und auch fO₂ via Gas-Analyzer) die in die Dekompressionsberechnung einfließen, erfassen. Nach dem, für uns Taucher ziemlich üblen, Fehlerfortpflanzungsgesetz kann sich die Summe dieser Meßfehler recht schnell auf ca. 10 bis 20 oder auch 30% ansammeln. Da mit diesem Fehler dann auch sämtliche Berechnungen geschlagen sind, wollen wir hier keine Haarspaltereien über ein paar Minuten treiben: diese kommen schon durch die Statistik, d.h. das zickige Verhalten von Mutter Natur zustande!

Um der trockenen Tabelle 2 ein bisschen mehr Taucher-Leben einzuhauchen, betrachten wir Abbildung 1: wir sehen 3 Tauchcomputer gegen Ende eines durchschnittlichen Tauchganges. Diese befinden sich auf exakt der gleichen Tiefe, aber mit bereits 3

verschiedenen Tiefenangaben. Und, natürlich, auch mit 3 völlig unterschiedlichen Angaben zu den berechneten Rest-„Null-Zeiten“, den verbleibenden „NDL“s (sogenannte „no decompression limits“, die wir deshalb in Gänsefüßchen schreiben, weil, sowas wie ein „no decompression dive“ ist nicht von dieser Welt ..., siehe hierzu auch [9]). Alle 3 Tauchcomputer behaupten von sich, mit einem mehr oder weniger modifizierten Perfusionmodell zu rechnen. Cochran benutzt ein modifiziertes Workman Modell, allerdings mit 20 Kompartimenten. Der Aladin soll ein ZH-L benutzen, reduziert von 16 auf 8 Kompartimente. NHeO3 hat ebenfalls ein ZH-L Modell: dieses mit den ursprünglichen 16 Kompartimenten, aber modifiziert, um „deep stops“ oder auch Stopps zur Vermeidung von Mikrogasbläschen, zu erzielen. Zur leichteren Übersicht finden sich alle diese Informationen aus den Tauchcomputerdisplays von Abbildung 1 in Tabelle 1.

Tabelle 1: 3 Tauchcomputeranzeigen

Tauchcomputer: Hersteller & Typ	aktuelle Tiefenangabe [m]	„NDL“ bzw. Stoppzeit [min.] (*)
COCHRAN: EMC-20 H	16,4	+ 5
VR Technology: NHeO3	16,8	- 3 (1'/3m + 2'/17m)
UWATEC: Aladin TEC 2G	16,9	+ 10

(*) 1. Tauchgang des Tages, d.h. kein Wiederholungstauchgang, max. Tiefe ca. 31 m, aktuelle Laufzeit ca. 42 min für alle Tauchcomputer, keine speziellen Leistungsmerkmale aktiviert wie z.B.: Konservatismusfaktoren, „Level Stops“ etc.

Der EMC-20 H von Cochran, Texas (ganz links im Bild) zeigt die kleinste Tiefe und die kürzeste verbleibende Restnullzeit/NDL. Dies Gerät glänzt nicht nur durch eine sehr hohe Zuverlässigkeit, sondern auch durch eine automatische Adaption der Tiefenangabe an die Wasserdichte (via einer Leitfähigkeitsmessung). Die längste NDL zeigt das Gerät TEC 2G von Uwatec / Scubapro (oben im Bild), programmiert für Süßwasser und damit auch mit der größten Tiefenangabe. Unser kleiner Freund und Mischgasrechner NHeO3 aus Großbritannien (ganz rechts im Bild, damals noch von der Firma VR Technology. Diese so-

wie deren Produkte sind mittlerweile vom Markt verschwunden.) zwang mich allerdings bereits auf 17 m für 2 min zu einem „micro bubble avoidance stop“, einem „deep stop“, dem Stopp zur Vermeidung von Mikrogasbläschen. Zusätzlich lautete die Dekoproggnose auf einen 1minütigen Stopp in 3 m Tiefe (1'/3m). Dies ist auch der Grund, warum sich der rechte Teil seines Displays rot eingefärbt hat: die 2 min Pause nutzte ich, um das Photo für die Abbildung 1 anzufertigen. Abbildung 1 zeigt nun alle bereits erwähnten Problemchen auf einen Blick:

- Abweichungen in den Meßgrößen
- Abweichungen in den daraus berechneten Dekompressionsangaben

Aber die dahinterlauernde richtig schlechte Nachricht ist die: je länger und tiefer der Tauchgang ist, desto größer häufen sich die Abweichungen auf! Sicherlich ist dies für einen durchschnittlichen Sporttauchgang nicht so wahnsinning interessant: für ambitionierte Sport- oder gar TEC-Taucher allerdings schon! Darüberhinaus dürfte sich das auch bei Tauch-Safaris auswirken: die meisten Tauchtabellen beenden die Oberflächenpause nach 6 oder 12 h. Beim Non-Limit-Tauchen von Live-Aboards wird dies mit Sicherheit nicht eingehalten. Einzig die Tauchcomputer rechnen bis zum bitteren Ende...

Und dann gibt es noch eine ganz andere, sehr schlechte Nachricht, über die bereits vor 4 Jahren hier in caisson informiert wurde: je mehr Helium das Atemgemisch enthält, desto deutlicher treten die Abweichungen hervor [11]. Insbesondere bei schlechten oder auch nur schlampigen Implementierungen, sei es in einem Mischgastauchcomputer oder in einer Dekompressionssoftware für den PC.

Tabelle 2: Testtauchgang mit Luft, 42 m, 25 min. Grundzeit (Quelle [8])

Stoppzeiten/Methode	24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	TTS min	Bemerkungen
FwDV 8									0	Nicht erlaubt!
OSTC 3							6	9	15	
RGBM				1	2	3	3	7	16	Tabelle (s.u.)
GAP				1	3	3	3	7	17	RGBM -2
EMC					2	2	3	8	19	Konservativ = 0
U.S.N. alt							2	14	20	
MDv 450/1							5	15	20	+ ca. 4,2 !
Decotrainer						1	5	13	24	V 3.01
OSTC V 470							6	14	25	TDT = 50
Ultimate Planner 1.2							6	15	25	TDT = 50
IANTD Air					1	4	3	18	26	Tabelle (s.u.)
MN 90							3	22	29	
BGV C23						3	7	17	30	Nur Austauschzeit
DIVE 3_0						1	6	16	27	TDT = 52 (*)
F.F.E.S.S.M							3	22	28	
OSTC V 434						1	6	16	28	TDT = 53
DIVE 2_905						2	6	16	29	TDT = 54
MNT 92						3	7	20	30	42 m / 27 min
U.S.N. 2008							26		31	140 feet
USN 09-03							28		33	140 feet
ZH-86						4	7	19	33	42 m / 27 min
DECO 2000					1	4	8	16	33	
Trust 2.2.17						4	7	19	34	TDT = 59
DCIEM						7	8	17	36	
NHeO3	26/2		2			1	8	21	36	Version 11/2011
TEC						3	k.A.	k.A.	36	L0 (Level Stop)
DP			1	1	3	4	9	19	37	GF: 45 / 90
GAP		1	1	1	2	4	9	19	37	GF: 45 / 90
VPM		2	2	3	4	6	8	14	39	138 feet
VR3	2	-	2	-	-	2	8	22	40	3 m -> 4,5 m
TEC					1	k.A.	k.A.	k.A.	40	L1
GAP		2	2	4	4	6	10	12	40	RGBM recreational
HLP 1.x			2	3	4	6	9	16	40	Default
EMC			2	1	3	4	8	19	41	Konservativ = 50

Stoppzeiten/Methode	24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	TTS min	Bemerkungen
VPM	1	2	3	3	5	6	9	14	43	Bühlmann Sicherheitsfaktor = 145,4 feet
TEC					3	k.A.	k.A.	k.A.	45	L2
DP (**)		1	2	2	4	6	11	19	46	VPM: Rel 3.1.4
Hahn DC-12					5	5	9	25	47	24 min GZ
TEC				1	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	50	L3
TEC				3	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	57	L4
HLP		2	3	4	6	8	13	24	60	VPM 10% Safety factor
TEC			2	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	65	L5
NHeO3	27/2	20/2			1	8	13	39	69	Cons.: 50
SDP	1			1					73	P2 / A0
Hahn									85 +	Tabelle (s.u.)
HLP 1.x	2	3	4	6	8	13	22	44	102	VPM 30% Safety factor

Legende (alphabetisch)

BGV C23 = Berufsgenossenschaftliche Vorschrift; ersetzte die alte VBG 39, vom 01.04.2001

DC-12 = UWATEC / Scubapro Tauchcomputer mit dem P-6 Koeffizientensatz von Dr. Max Hahn; vgl.: <http://www.divetable.info/kap4.htm>

DCIEM = Defence & Civil Institute of Environmental Medicine) seit 01.04.2002: Defence R & D Canada - Toronto, DRDC Toronto, Lufttabelle aus dem "Diving Manual" DCIEM No. 86-R-35 March 1992, S. 1B-14

DECO 2000 = Luft-Tabelle von Dr. Max Hahn für Sporttaucher, 2000; erhältlich bei: www.vdst-shop.de/

Decotrainer: www.decotrainer.de

DIVE: kostenloser download, erhältlich unter: <http://www.divetable.info/dive/kap3.htm>

DP = DecoPlanner Version 2.0.40 resp.:
DP (**)= DecoPlanner Version 3.1.4, <http://www.globalunderwaterexplorers.org/>

EMC = Cochran EMC-20 H, Version j, www.divecochran.com

F.F.E.S.S.M. = Commission Technique Regionale Bretagne & Pays de la Loire (auf M.N. 90 basierend; Auftauchgeschwindigkeit mit 15 - 17 m/min

FwDV 8 = Feuerwehr-Dienstvorschrift 8, Stand 03/2014 (geht nur bis 36 m)

GAP = GasAbsorptionProgram Version 2.3.1665

Hahn = Spezialtabelle mit erlaubtem Inertgasüberdruck = 0,4 Bar, [4]
Hahn DC-12 = Uwatec Tauchcomputer, Nachfolger des legendären MicroBrain

HLP 1.x = HL Planner Version 1.0.2314, <http://www.hlplanner.com/>

IANTD = Intl. Assoc. of Nitrox & Tec Divers; Technical Diver Encyclopedia, May 1998, S. 233; www.iantd.com

MdV = Marine Dienstvorschrift 450/1 Anlage 6; für Lufttauchgänge entspricht dies der veralteten DRÄGER Tabelle 210, letzte Version von 1970 und 1984 (Information nur zum internen Dienstgebrauch).

MN 90 & MNT 92 = Ministère du Travail, vom 15.05.1992, 0 - 300 m Höhe, Auftauchgeschwindigkeit mit 12 m/min

NHeO3 = Nachfolger des VR3 Mischgascomputers von DeltaP Technologies, dieser wurde vom Markt genommen nach einer Vielzahl von Problemen. Die Nachfolgefirma, <http://www.techsupport.technologyindepth.com/>, existiert nun auch nicht mehr; es war ein ziemlich kryptisch modifiziertes ZH-L (****)

OSTC = Open Source Tauchcomputer / Planner (Software); <http://ostc-planner.net/>; V kennzeichnet die verschiedenen Softwareversionen

OSTC 3: Testgerät mit Softwareversion V 0.9 von 05/2013

RGBM = Reduced Gradient Bubble Model, Tabelle gekauft in 2003 bei: rgbmdiving.com (***)

SDP = Suunto Dive Planner 1.0.0.3, www.suunto.com

TEC = Uwaterc / Scubapro Aladin TEC 2G Tauchcomputer, erlaubt vom Benutzer frei einstellbare "level stops" (L0 → L5)

Trust : <http://www.keimes.de/> dies ist eine freeware, aber benötigt Java (☺), das ebenso freeware ist

TTS = time-to-surface (nach Ablauf der Grundzeit (GZ))

Ultimate Planner: <http://techdivingmag.com/ultimateplanner.html>

U.S.N. = the United States Navy; the NEDU (Naval Experimental Diving Unit) kümmert sich um diese Dinge; das aktuelle Taucherhandbuch, die Rev. 6 von 2008 mit allen Tabellen ist da erhältlich: NAVSEA, www.supsalv.org ; resp.: <http://www.supsalv.org/pdf/Dive%20Manual%20Rev%206%20with%20Chg%20A.pdf>

VPM = Varying Permeability Model, hier eine Excel Version von Eric Baker (für XP oder ältere MS-Windows Betriebssysteme, d.h.: nicht mehr erhältlich)

VR3 = Mischgascomputer von DeltaP mit bis zu 10 Gemischen, ZH-L basierend; war einst der Star unter diesen Geräten; vgl. oben beim NHeO3

ZH-86 = Zürich Lufttabelle1986, [2],s. S. 225

(*) DIVE 3_0 mit einer vollständigen numerischen Lösung

des Mischgasproblems, d.h. ohne Rundungen, im Gegensatz zu DIVE 2_905, das wie fast alle PC-Programmchen rechnet ...

(***) Auch diese Firma ging bankrott; ca. 2004; darüberhinaus gab es etwas Unruhe nach den Rekompensationsbehandlungen von Mark Elyatt nach ein paar von seinen Rekordtauchgängen, die mittels RGBM geplant waren ... [6]; ein Belegexemplar gibt es da zum kostenlosen 'runterladen: <http://www.divetable.info/skripte/ntable.pdf>

(****) bitte vergleichen: <http://www.divetable.info/kap8.htm>

Was uns nun so richtig den Tag verdorben hatte, war das folgende:

- Die Variation der TTS mit einem Faktor von ca. 6 (102 / 16 = 6,3).
- Die Variationen nur bei der gleichen Software oder dem gleichen Tauchcomputer, aber durch verschiedene Versionen. Dieses Phänomen tritt bei unserem Heliox20 Tauchgang (im Teil II im nächsten caisson) besonders deutlich hervor.

Nota Bene: die Differenzen von den verschiedenen Einträgen aus den United States Navy Tabellen sind eben nicht „halt eine andere Version“! Diese Unterschiede rühren von einem kompletten Umdenken bei der Dekompression her. Das Umdenken änderte das alte „Bob Workman-Arbeitspferd“ von 1965 [7] zum sogenannten „VVAL18 LEM“ Modell von Ed Thalmann. Das Workman-Modell seinerseits war eine modifizierte Version des guten alten Haldane-Modells. Es hatte ein paar mehr Kompartimente, nämlich 8 statt 5 ([7], s.S. 10) und berechnete die erlaubten Inertgasüberdrücke mit der berühmten linearen „M-Wert“-Gleichung. Haldane selber zeigte die Grenzen seiner Tabelle #1 ganz klar auf: Tiefe < 50 m, TTS < 30 min, keine Wiederholungstauchgänge (nur mit besonderen Vorsichtsmaßnahmen), nicht für „alte“ (> 40 Jahre) Taucher und auch nicht für „fette“ Taucher („inclined to obesity“) [3]! Darüber hinaus betonte Haldane deutlich, daß dieses Modell nur für eine ungestörte Dekompression („uneventful decompression“) gilt, d.h. keine Störungen durch Inertgasblasen! Haldanes Argument war, daß Gasblasen die Perfusion mechanisch behindern, d.h. die Durchblutung stören. Aber eine ungestörte Durchblutung ist essentiell für eine erfolgreiche Inertgas-Entsättigung.

Aus diesem Grunde sagte Ed Thalmann: „... at NEDU our exponential uptake on off-gassing led us into a brick wall. I injected the V-VAL 18 into it, the exponential uptake and linear off-gassing model“. Captain Dr. Edward D. Thalmann, *Naval Forces under the Sea: The Rest of the Story*, S. 293. Sinngemäß: „...die NEDU-Modelle mit der exponentiellen Gasaufnahme und -abgabe führten uns in eine Sackgasse. Deshalb brachte ich das V-VAL18 ins Spiel: mit exponentieller Gasaufnahme, aber mit einer linearen Gasabgabe“.

Die Idee der linearen Gasabgabe bedeutet einfach eine Verlangsamung gegenüber den bisher üblichen exponentiellen Entsättigungsrechnungen. Die neue

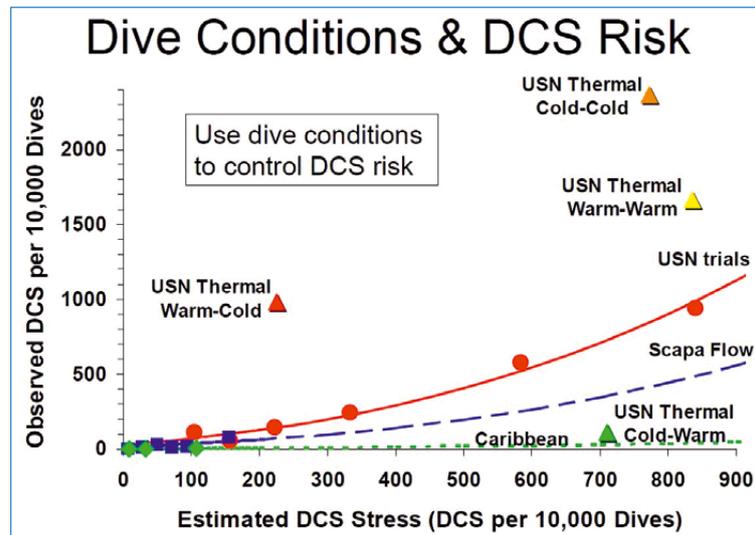
USN Tabelle (Revision 6, 2008) verlängerte aus diesem Grunde sogar wie alle Dekompressionsstopps und verlegte darüberhinaus von 10 auf 20 feet (ca. 6 m). Es gibt in dieser Tabelle also den guten, alten „3 m Stopp“ nichtmehr! Das die USN diese Tabelle schon nach ca. einem Jahr wieder revidierte und die Stoppzeiten erneut um ca. 2 min erhöht hatte (Zeile darunter in Tabelle 2: USN 09-03), spricht eigentlich nur für die hohe Qualität der Tauchgangsdokumentation und der verantwortlichen Tauchmediziner. Noch während der Veröffentlichung der Rev. 6 traten 19 Fälle von DCS Type II (ZNS) bei 1629 Tauchgängen auf, dies hauptsächlich bei den Profilen 130 bis 190 feet (im Tiefenbereich von 40 bis 60 m; Quelle [9]). In dem Bereich, der uns hier besonders interessiert, 130 bis 150 feet (40 bis 46 m; Grundzeiten 10 bis 30 min.) traten die meisten DCS-Probleme auf: nämlich 13 der bisher 19 beobachteten Fälle ([9], s.S. 9). Die recht naheliegende Frage beim Betrachten der Tabelle 2 ist doch:

Ist die längere TTS auch sicherer?

D.h.: ist die TTS von 100 min+ wirklich „6-mal“ sicherer als die kürzeste aus dem RGBM Modell? Hm... sehr wahrscheinlich nicht. Eine Dekompressionskrankheit ist ein ziemlich seltenes Ereignis. Es passiert so ca. 1-2 Mal bei 100.000 wissenschaftlichen Tauchgängen oder bei ca. 10.000 Sporttauchgängen, ca. 3 Mal bei ungefähr 10.000 militärischen Tauchgängen („normal operation“), 1-2 Mal bei 1.000 bis 2.000 kommerziellen („C&R“) Tauchgängen und war exakt 338 Mal bei 7.755 experimentellen Tauchgängen der USN NEDU (Navy Experimental Diving Unit) zu beobachten. Es gibt auch ein anderes hübsches Ergebnis von Dick Vann (UHMS, Annual Scientific Meeting 2008, S. 251), das dies bestätigt (s. Graphik 2).

Im Klartext: es handelt sich hier nicht nur um Tiefe, Zeit und fO₂! Sondern auch und ganz besonders um: die körperliche Belastung und die Hauttemperatur! Dieses sehr schöne Ergebnis hat die USN NEDU wie folgt als Empfehlung zusammengefaßt; Zitat: „Divers should be kept cool during dive BT and warm during subsequent decompression.“ (Sinngemäß: Die Taucher kühl halten während der Grundphase und „warm halten“ während den Deko-Stopps; Quelle [10], S. 36). Dies entspricht in der Graphik den grünen Markierungen mit „USN Thermal Cold-Warm“: dort sind die DCS Risiken dramatisch verringert, z.B. gegenüber anderen Experimenten bzw. den TEC-Dives in Scapa Flow. Sicherlich gibt es

Graphik 2:
DCS Risiko, abhängig von den Tauchbedingungen



auch statistisch bisher unbewertet Parameter wie: individuelle Empfänglichkeit für DCS inklusive der Blutchemie und den Mikro-Partikeln, Dehydration, Fitness und das Alter ... ☺.

Schließlich und endlich sollten wir nicht vergessen, was Michael Powell ziemlich launig im TechDiving Magazine zum Besten gab: „No tables have been tested with subjects hauling tanks on the surface.“ [TDM, Ausgabe 10, 2013], S. 26 (Sinngemäß: „Keine Tabelle wurde mit Tauchern getestet, die ihre Flaschen durch die Gegend schleifen.“).

Anlässlich des 15jährigen Jubiläums der Druckkammerzentren RMT am 02. Februar 2013 hielt ich einen kleinen Vortrag über diese Themen. Im Anschluß daran haben dann noch die Doktores Arne Sieber (www.seabear-diving.com) und Adel Taher (der die Deko-Kammer in Sharm el Sheikh betreibt) mit mir disputiert: eines der Argumente war, daß trotz der 600% Spreizung der TTS die sogenannte P(DCS), die statistische Wahrscheinlichkeit, sich eine Dekompressionskrankheit zu kontrahieren, mehr oder weniger gleich groß wäre für alle betrachteten Tauchprofile. Rein mathematisch betrachtet ist das sicherlich richtig, allerdings hilft dies beim Tauchen im echten Leben auch nicht viel weiter. Eine klare Trennung mit mindestens 1% P(DCS)-Unterschied von einer TTS zu einer anderen mit 0, einem oder zwei DCS-„Hits“ mit einer vernünftigen statistischen Genauigkeit würde ca. 300 weitere kontrollierte Tauchgänge erfordern. Oder, um dies für uns ins

richtige Tauchen zu übersetzen: habt ihr am letzten Wochenende einen DCS-freien Mischgas-Tauchgang gemacht und wollt nun wissen, ob der absolut identische Tauchgang am nächsten Wochenende ebenso DCS-frei bleibt, so bewegt sich euer statistisches Vertrauensintervall hierfür von ca. nahezu 0% (d.h. so gut wie unbekannt) bis ca. 90% (d.h. fast sicher!). Darum: die ganz einfache Botschaft von Teil I ist:

Keiner dieser Inertgas-Buchhalter (Dekompressionsmodelle, Tabellen, Tauchcomputer) hat die absolute Wahrheit gepachtet: KEINER!

...wird fortgesetzt im Teil II mit einem Heliox-Tauchgang und im Teil III mit Blasenmodellen und den statistisch basierten Tauchtabellen.

Details zu den Perfusionsmodellen

Alle Dekompressionsmodelle teilen den menschlichen Körper gedanklich in sogenannte „Kompartimente“. Diese sind Gruppen von Modellgeweben, die identisch durchblutet werden. Die Kennzahl eines Kompartimentes ist die „Halbsättigungszeit“, im wesentlichen der Kehrwert der Perfusionsrate. Der Sättigungs- oder der Entsättigungsvorgang mit einem Inertgas ist damit eine Exponentialfunktion für jedes dieser Kompartimente. Es gibt schnelle und langsame Kompartimente. Ein schnelles Kompartiment hat eine hohe Perfusion und somit eine kleine Halbsättigungszeit im Bereich von Minuten. Langsame Kompartimente, d.h. geringere Perfusion, können Halbsättigungszeiten im Bereich von $n \cdot 10$ min bis hinzu mehreren Stunden aufweisen.

Perfusionsmodelle (s. obiger Infokasten) berechnen die erlaubten / tolerierten Inertgasübersättigungen pro Kompartiment mit einer einfachen linearen Beziehung, einer Geradengleichung. Bei Haldane war diese Beziehung ca. „2 : 1“, d.h. die Gerade hatte eine konstante Steigung die für alle 5 Kompartimente galt. Das USN Modell von Bob Workman führte für seine Geradengleichung eine Steigung ein (ΔM) und einen Achsenabschnitt (M_0): diese beiden Werte waren unterschiedlich für alle 8 Kompartimente. Das sogen. ZH-L 16 (wie ZH für Zürich, L für lineare Gleichung) besitzt 16 Kompartimente. Die beiden Parameter für die 16 Geradengleichung werden dort a- & b-Koeffizienten genannt.

Da die klinische Grenze zwischen „DCS“ und „keine DCS“ sich nicht unbedingt an diese scharfe Geraden

anschmiegt, werden in der Rechen-Praxis sogenannte „Gradientenfaktoren“ (GF) eingefügt: hiermit werden die erlaubten / tolerierten Inertgasüberdücke empirisch nach unten korrigiert. Alle o.g. Forscher haben diese Faktoren benutzt, jedoch unterschiedlich bezeichnet und auch argumentiert.

Albrecht Salm

Literatur

1. Hahn MH. 1995. Workman-Bühlmann algorithm for dive computers: A critical analysis. In: Hamilton RW, ed. The effectiveness of dive computers in repetitive diving. UHMS workshop 81(DC)6-1-94. Kensington, MD: Undersea and Hyperbaric Medical Soc.
2. Tauchmedizin, Albert A. Bühlmann, Ernst B. Völlm (Mitarbeiter), P. Nussberger; 5. Auflage in 2002, Springer, ISBN 3-540-42979-4
3. Boycott, A.E., Damant, G.C.C., & Haldane, J.S.: The Prevention of Compressed Air Illness, Journal of Hygiene, Volume 8, (1908), pp. 342-443.
4. Hahn M, Wendling J: No-Bubbles Decompression Tables. In: Safety Limits of Dive Computers, UHMS workshop 1992, pp. 68 - 72
5. Wienke, Bruce R. (2008) Diving Physics with Bubble Mechanics and Decompression Theory in depth, Best Publishing Company, ISBN 978-1-930536-33-3
6. Ellyatt, Mark: Ocean Gladiator, Battles beneath the Ocean, 2005, Emily Eight Publications Ltd., ISBN 978-0-9551544-0-9
7. Workman, Robert D. „Calculation of Decompression Tables for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives,“ Research Report 6-65, U.S. Navy Experimental Diving Unit, Washington, D.C. (26 May 1965)
8. Salm, Albrecht (2001) „Dekompression“ Manual zum deco workshop des Tauchsportcenters Esslingen, Version 2015, S. 211
9. Navy Experimental Diving Unit, TA 04-12, NEDU TR 09-03, January 2009: RISK OF CENTRAL NERVOUS SYSTEM DECOMPRESSION SICKNESS IN AIR DIVING TO NO-STOP LIMITS
10. Navy Experimental Diving Unit TA 03-09, NEDU TR 06-07, November 2007: The Influence of Thermal Exposure on Diver Susceptibility to Decompression Sickness
11. CAISSON 26. Jg./2011/Nr. 3, S. 4 - 12: Dekompressionsberechnungen für Trimix-Tauchgänge mit PC-Software: Reparieren Gradientenfaktoren defekte Algorithmen oder defekte Software-Implementierungen?
12. TechDivingMag, Issue 17, December 2014, Between Bounce & Saturation: Diving the Tarbela Dam, by Ben Reymenants

Tauchen

Dekompressionsberechnungen für Trimix-Tauchgänge mit PC-Software: Reparieren Gradientenfaktoren defekte Algorithmen oder defekte Software-Implementierungen?

A Salm

Hier finden Sie die ungekürzte Version dieses Artikels:
http://www.divetable.de/skripte/CAISSON/Extended_2011_03.pdf
Teile dieses Beitrages wurden bei der 12. Wissenschaftlichen Tagung der GTÜM in Regensburg
(20.03.2011) vorgetragen. Das Abstract zum Vortrag: CAISSON 2011;26(1):61



A Salm

Wird mehr als nur ein Inertgas im Atemgas benutzt, muss die Berechnung der Dekompressionszeit numerisch erfolgen. Hierfür wurden 480 Rechteckprofile aus dem Tec- und Recreational-Bereich anhand analytischer Methoden sowie mit zwei kommerziell erwerbbaaren Desktop-Deco-Programmen und einer kostenlosen Freeware berechnet und verglichen (Tiefen: 30 - 80 m, Grundzeiten: 20 - 60 min, He-Anteile: 5 - 80 %, nur normoxischer Mix (keine Reise- oder angereicherten Dekompressionsgase), nur ZH-L Modell, keine Anpassungen mittels Gradientenfaktoren). Offenbar gibt es signifikante Unterschiede bei der Berechnung von Dekompressionszeiten (t_d) mit Mischgasen in Abhängigkeit des He-Anteiles. Die Unterschiede hängen bei diesem Vergleich nicht von Variationen des zugrunde liegenden Dekompressions-Algorithmus' ab.

Grundlagen

Mit 'Algorithmus' ist die Rechenvorschrift für eine Inertgas-Buchhaltung bei einer Überdruck-Exposition subsummiert, mit 'Implementierung' die praktische Umsetzung dieses Algorithmus in eine Desktop-Deco-Software für den PC oder auch in eine Hardware, den Tauchcomputer. Mit 'Gradientenfaktoren' sind Faktoren < 1 gemeint, mit denen erlaubte/tolerierte Kompartiment-Überdrücke multipliziert werden, um eine konservativere Dekompression rechentechnisch zu erzwingen; Details hierzu auf S. 11.

Bei klassischen, Perfusions-limitierten Dekompressions-Algorithmen nach Haldane et al. wird die Inertgasaufnahme pro Kompartiment durch eine mono-exponentielle Funktion beschrieben. Es hat sich hierfür der Begriff 'Haldane Gleichung' eingebürgert:

$$P_t(t) = P_{alv0} + [P_{t0} - P_{alv0}] e^{-kt} \quad (1)$$

Variable	Definition
$P_t(t)$	Partialdruck eines Inertgases im Kompartiment mit der Konstanten k [Bar] zum Zeitpunkt t nach einer sprungartigen Druckänderung
P_{t0}	Initialer Partialdruck des Inertgases im Kompartiment zum Zeitpunkt $t = 0$ [Bar]
P_{alv0}	der konstante Partialdruck des Inertgases in den Alveoli [Bar], für $t = 0$ und damit für alle Zeiten wegen der Randbedingung
k	eine Konstante, abhängig vom Kompartiment [min^{-1}], mit $k = \ln 2 / \tau$
t	Zeit [min]

Der Exponent k ist im Wesentlichen die Perfusionsrate, d.h. der Kehrwert der Halbwertszeit τ eines Modellgewebes. Modellgewebe werden als 'Kompartimente' bezeichnet. Die Anpassung des Algorithmus an physiologische Gegebenheiten erfolgt über eine Schar von Kompartimenten, typischerweise 6, 9 oder 12, 16 oder auch 20 an der Zahl. Die Variabilität wird mittels der Halbwertszeiten τ erreicht. Diese liegen üblicherweise im Spektrum von 1,25 bis 900 min; so zu finden in einem Tauchcomputer für den professionellen Einsatz, dem EMC-20H von Cochran und der dazugehörigen Deco-Software Analyst 4 (www.divecochran.com).

Die Quellen zu den Perfusions-Algorithmen sind im Anhang gelistet und darüber hinaus die bereits erwähnten Standardwerke über Tauchmedizin (s. auch: CAISSON 2010;25(1):9). Wir wollen hier aber etwas Neues riskieren und eine relativ selten zitierte Quelle beanspruchen, nämlich: [102], Hills, Brian Andrew. Decompression Sickness, 1977; Volume 1, The Biophysical Basis of Prevention and Treatment.

A Salm

CAISSON 2011;26(3):4-11

Die oben benutzte Formel (1) finden wir dort auf S. 111, den Zusammenhang zwischen der Halbwertszeit und der Perfusionsrate auf S. 113.



Grenzen der Perfusionsmodelle: Perfusionsmodelle stützen sich für Luft/Nitrox sowie Heliox als Atemgase weltweit auf eine sehr große Datenbasis an protokollierten Tauchgängen, sind mathematisch überschaubar und haben seit den Veröffentlichungen von Bühlmann ([4,5,65]) eine große Verbreitung in Tauchcomputern und PC-Programmen (Desktop-Deco-Software) erfahren. Der technische Taucher neigt jedoch dazu, da er eben etwas tiefer/länger taucht, jenseits der gesicherten Einhüllenden zu planen und vergisst gerne die Grenzen der Modelle. Diese sind bereits ausführlich dargestellt (z.B. in [63], S. 449 sowie S. 463) und betreffen u.a. die folgenden Punkte, hier nur im Überblick und keineswegs erschöpfend:

- lediglich 'Inertgas-Buchhaltung', jeweils mono-exponentiell für ein Kompartiment,
- die Kompartimente sind alle parallel-geschaltet, keine Berücksichtigung der Serienschaltungen wie Milz → Leber & Darm → Leber,
- uneinheitliche Berücksichtigung der metabolischen Gase O₂, CO₂ und von H₂O,
- 'ereignislose' Dekompression, nur die gelöste Gasphase wird berücksichtigt, keine freie Gasphase (Gasblasen),
- fehlende Berücksichtigung von Druckänderungen, die kurz gegen die schnellsten Halbwertszeiten sind,
- die Berechnung der Gasaufnahme und -abgabe erfolgt symmetrisch, d.h. mit den identischen Koeffizienten in den Exponentialtermen von Gl. (1),
- Klientel/Biometrie und Adaptation finden keinen Niederschlag im Algorithmus,
- ebensowenig die Faktoren, die technische Taucher besonders tangieren: körperliche Belastung, Temperatur und hohe Sauerstoffpartialdrücke...
- und: das zweite Inertgas; der zweite (n-te) Wiederholungs-Tauchgang; und, und, und ...

Trimixtabellen: Im Gegensatz zu Heliox gibt es kaum 'validierte' Trimixtabellen. Sicherlich sind anekdotenhaft und mit einer sehr begrenzten Probanden-Zahl Trimix-Dekompressionen für vereinzelte Tiefen/Zeit-Kombinationen für ein paar wenige, gebräuchliche Gasmischungen ausprobiert und tabelliert worden. Mit 'validiert' ist hier aber ein Druckkammerverfahren zu verstehen, bei welchem für eine große Schar von Tiefen/Zeit-Kombinationen mehrere protokollierte Tauchgänge durchgeführt werden. Protokolliert und nachvollziehbar bezüglich den Parametern: Biometrie der Probanden, Tageszeit, Tiefe, Zeit, Auf- und Abtauchgeschwindigkeiten, Atemgaszusammensetzung, Kammer- und Wassertemperatur, Immersion und Belastung. Wenn sich dann die Probandenzahl im mittleren 3-stelligen Bereich, die Zahl der Überdruckexpositionen im gut 4- oder gar 5-stelligen Bereich (wie bei NEDU, DCIEM und COMEX) bewegt, mag man durchaus eine gewisse Verlässlichkeit unterstellen. Keine der bekannten Trimixtabellen genügt jedoch diesem Anspruch! Eine rühmliche Ausnahme ist wohl die NOAA Trimix 18/50 Tabelle von Hamilton Research Ltd., 1993, 1998.

Tab. 1: Spaßeshalber wurde aus dem 'Journal of Applied Physiology' die Anzahl und zeitliche Verteilung von Forschungspapieren zum Thema 'Trimix' (title & keyword) im Zeitraum von 1948 bis 2010 aufgezeichnet und mit anderen Themen verglichen.

Die Publikationen zum Thema 'Air' sind in Klammern und nur zum Vergleich der absoluten Zahlen gedacht: der Zusammenhang zur Überdruckexposition ist nicht immer gegeben. Die erste Veröffentlichung zum Thema 'Trimix' geschah im Jahre 1976.

Title & keyword:	1948-2010	1976-2010
(Air)	(13.466)	(10.845)
Oxygen window	14	
Decompression	709	572
EAN / nitrox	128	
Helium	1313	
Trimix		41

Tab. 2: Publikationen in den letzten 20 Jahren. Es gibt ein Maximum im Jahre 2007, welches lediglich aus kurzen Diskussionen zur (Un-) Gültigkeit des Henry'schen Gesetzes, insbesondere bei binären Gasmischungen, resultiert.

Die singuläre Publikation aus 2010 stammt von Ljubkovic et al. (s. Referenzen) und spiegelt unsere Thematik wider (allerdings mit einem VPM/Blasenmodell) und ist besonders für Tauchmediziner interessant; aber ansonsten gilt die Tendenz, dass Trimix in der ernstzunehmenden Forschung nur eine relativ untergeordnete Rolle spielt. Fazit: der exponierte Trimix-Taucher ist sein eigenes Versuchskarnikel.

Jahr	#	Jahr	#
1990	-	2001	1
1991	1	2002	-
1992	-	2003	3
1993	-	2004	-
1994	1	2005	1
1995	2	2006	-
1996	-	2007	8
1997	1	2008	-
1998	-	2009	2
1999	-	2010	1
2000	1		

Die Dekompressionszeit t_d kann direkt aus der Haldane-Gleichung (1) berechnet werden. Der mathematische Weg hierfür ist andernorts genau beschrieben (Quelle: http://www.divetable.de/workshop/Formel_V1.htm). Hier die Formel zur Berechnung der Dekompressionszeit $t = t_d$:

$$t = -\tau / \ln 2 \cdot \ln [(P_t(t) - P_{alv0}) / (P_{t0} - P_{alv0})] \quad (2)$$

Das Kriterium für 'sichere' Dekompression wird in den Perfusionsmodellen als eine einfache lineare (Geraden-) Gleichung dargestellt ([65], S. 117, und [102], S. 119 ff):

$$P_{t,tol,ig} = P_{amb} / b + a \quad (3)$$

Variable	Definition
$P_{t,tol,ig}$	tolerierter Inertgasdruck, für jedes Kompartiment, (analog M) [Bar], Summe aller Partialdrücke der inerten Atemgase
a	Grenzwert bei einem theoretischen Umgebungsdruck von 0 Bar, d.h. der Achsenabschnitt [Bar]
P_{amb}	Umgebungsdruck, absoluter Druck der Atemgase [Bar]
b	1/b Druckgradient: Wert der Zunahme pro Druckeinheit Tiefe (dimensionslos), d.h. die Steigung der Geraden

Die a-/b-Koeffizienten sind Konstanten, die in Tabellen nachgeschlagen werden können; z.B. in [4], S. 27, in [5], S. 108 & 109, sowie in [65], S. 158.

Die direkte Abbildung der Gleichung (3) auf andere Perfusionsmodelle, z.B. das 'M-Value' Modell von Workman oder Schreiner, geschieht durch einen Vergleich der Parameter und Umrechnung der SI-Einheiten in imperiale; es ist u.a. dort beschrieben: http://www.divetable.de/workshop/Formel_V1.htm.

Dass die Anzahl der Kompartimente sowie die Absolutwerte der Koeffizienten sich im Laufe des letzten Jahrhunderts und auch von Autor zu Autor ändern, muss man mit Gelassenheit zur Kenntnis nehmen: hier spiegelt sich allenfalls der Trend zu einer zunehmend konservativer durchgeführten Dekompression wider, d.h. zu länger werdenden Dekompressions-Stopps (u.a. in Egi et al.).

Die analytische Form (2) ist aber nur bei einem Inertgas, in diesem Falle N_2 , gegeben. Wird mehr als ein Inertgas benutzt, muss die Berechnung numerisch, d.h. über ein geeignetes Näherungsverfahren oder über Versuch-und-Irrtum, erfolgen. Bei Tri-Mix sind es deren zweie: nämlich N_2 und He. Die Inertgasaufnahme ist nun für beide Gase separat zu berechnen. Für Mischgase beschreibt Bühlmann dieses Standardverfahren in [65] S. 119:

$$P_t(t) = P_{t,He}(t) + P_{t,N_2}(t) \quad (4)$$

Die Gase unterscheiden sich im Molekulargewicht, den Löslichkeitskoeffizienten und auch in den Diffusionskonstanten (Quellen: Rostain JC, Balon N. Nitrogen Narcosis, the High Pressure Nervous Syndrome and Trimix. In: Moon RE, Piantadosi CA, Camporesi EM (eds.). Dr. Peter Bennett Symposium Proceedings. Held May 1, 2004. Durham, N.C.: Divers Alert Network, 2007; sowie: [102], S. 118)

Allerdings muss nun auch das Aufstiegskriterium an zwei Inertgase angepasst werden, aus (3) wird damit einfach (3*):

$$P_{t,tol,ig} = P_{amb} / b^* + a^* \quad (3^*)$$

Es hat sich ein einfaches Gewichtungsverfahren bewährt, um die neuen a^* - und b^* -Koeffizienten zu bestimmen. Hierbei werden die ursprünglichen a- und b-Koeffizienten (aus den Tabellen) für beide Gassorten gemäß dem jeweiligen Partialdruck im Kompartiment normalisiert (s. auch dazu die Bemerkung in [54] auf S. 86). Es gilt somit für jede Kombination von a- und b-Werten für jedes Kompartiment zu jedem Zeitpunkt t:

$$\begin{aligned} a^* &= a (He + N_2) = [(P_{t,He} \cdot a_{He}) + (P_{t,N_2} \cdot a_{N_2})] / (P_{t,He} + P_{t,N_2}) \\ b^* &= b (He + N_2) = [(P_{t,He} \cdot b_{He}) + (P_{t,N_2} \cdot b_{N_2})] / (P_{t,He} + P_{t,N_2}) \quad (5) \end{aligned}$$

Siehe dazu auch die Beispiele in [4], S. 27 sowie [5], S. 80 und Rodchenkov et al, S. 474.

Das Aufstiegskriterium ist nun selber zeitabhängig geworden: die a- und b-Koeffizienten sind jetzt über die Gewichtung (5) mit den Exponentialtermen der Sättigung verheiratet und keine Konstanten mehr wie im Falle von Druckluft/Nitrox. Die Skalierung der Kompartiment-Halbwertszeiten von N_2 zu He wird gemäß dem Graham'schen Gesetz mit der Quadratwurzel aus dem Verhältnis der Atomgewichte bestimmt (ca. 2,65). Dieses konstante Verhältnis wird nun bei allen 16 Kompartimenten unterschiedslos angesetzt. Und genau hier greift ebenfalls die Kritik durch ernsthafte Forscher (D'Aoust et al, S. 119 & 121; Lightfoot et al, S. 453 und Voitsekovich, S. 210): experimentell stellen sich die Perfusionsraten eben unterschiedlich dar!



Insbesondere scheint sich das Verhältnis von 2,65 nur für die Sättigung wirklich zu bestätigen (Berghage et al, S.6); ein Zustand von dem i.d.R. auch Tec-Taucher weit entfernt sind ...

Methoden

Vereinfacht dargestellt ist nun die Dekompressionszeit links und rechts des Gleichheitszeichens in Formel (2) zu finden; eine analytische Auflösung nach t_d ist wegen den Summen der Exponentialterme nicht möglich. Wie kann t_d trotzdem berechnet werden?

Grundsätzlich gibt es drei unterschiedliche Verfahren, die hier nur oberflächlich skizziert werden, da dies andernorts genau beschrieben ist: http://www.divetable.de/workshop/Formel_V3.htm.

- A) 'Versuch-und-Irrtum': für kleine Zeitschritte, z.B. 1 s oder 0,1 min, werden alle Terme berechnet und es wird kontrolliert, ob das Aufstiegskriterium erfüllt ist. Dieses ist die klassische 'numerische Lösung'.
- B) 'Quasi-analytisch': es wird ein Fehler in Kauf genommen und so getan, als ob (2) unverändert benutzt werden dürfe: die a -/ b -Koeffizienten werden somit als Konstante für jede Austausch-Phase betrachtet.
- C) Eine Approximations-Methode, bei der die Exponential-Terme durch ein Polynom näherungsweise berechnet werden (= 'Taylor-Entwicklung') (Bronstein, Abschnitt: Die Entwicklung von Funktionen in Potenzreihen).

Für eine handelsübliche Desktop-Deco-Software sollte die Methode A) der Weg der Wahl sein, zumal die Rechengeschwindigkeit heutiger PCs so gewaltig ist, dass dem Benutzer keine langen Wartezeiten mehr zugemutet werden müssen. Ganz im Gegensatz zu handelsüblichen (Mischgas)-Tauchcomputern. Bedingt durch relativ hohe Entwicklungskosten für die wasserdichte Hardware und die, im Vergleich z.B. zu anderen mobilen Endgeräten wie Handys oder SmartPhones, geradezu marginalen Stückzahlen, werden dort regelmäßig keine full-custom ASICs sondern sehr einfach gehaltene und preiswerte Chips verwendet. Diese 'rechnen' etwas langsamer und 'glänzen' durch einen vergleichsweise hohen Energieverbrauch...

Die numerische Lösung A) benötigt im Vergleich zu B) mehr Rechenzeit und mehr Speicherplatz und Variablen: alles drei steht unter Wasser nicht unbegrenzt zur Verfügung! Es liegt deshalb nahe, die Methode B) überall da zu unterstellen, wo Kosten eine Rolle spielen, und das Ergebnis sofort zur Verfügung stehen muss.

Wie wird nun die Umsetzung für t_d bei handelsüblichen Produkten bewerkstelligt? Es ist die Crux dieser Thematik, dass Hersteller, egal ob von Tauchcomputer-Hardware oder Desktop-Deco-Software, entsprechende Nachfragen zur Implementierung entweder gar nicht oder aber mit dem Hinweis auf Firmengeheimnisse nur sybillinisch beantworten. Das bietet Raum für Vermutungen!

Um diese Frage trotzdem wenigstens halbwegs zufriedenstellend beantworten zu können, wurde folgende experimentelle Methode entwickelt: 480 Rechteckprofile aus dem Tec- und Recreational-Bereich mit den Tiefen 30 - 80 m (6 Profile im 10 m Abstand), und Grundzeiten 20 - 60 min (5 Profile im 10-min Abstand), in den He-Anteilen 5 - 80 % (16 Profile im 5 % Abstand), nur mit einem normoxischen Mix (d.h. keine Reise- oder Sauerstoff-angereicherten Dekompressionsgase) wurden jeweils mit 4 Softwareprodukten berechnet und miteinander verglichen: zwei kommerziell erwerbbar Produkte, eine Freeware/Shareware Version von DIVE (http://www.divetable.de/dwnld_g.htm, Version 2_900) sowie eine private Version 3_0 von DIVE.

Die Version 3_0 realisiert genau die Methode A), die öffentliche Version 2_900 ist mit dem 'Fehler' der Methode B) behaftet. Für die beiden kommerziellen Produkte konnte gemäß den obigen Ausführungen, trotz mehrfachem Nachfragen, leider keine verlässliche Aussage erhalten werden.

Die 4 Produkte wurden zunächst mit 40 verschiedenen Luft- und 40 verschiedenen EAN32-Rechteckprofilen gegenübergestellt, um die Konvergenz der numerischen Lösung gegenüber den handelsüblichen Programmen zu prüfen. Dies mag beispielhaft die folgende Tabelle (Tab. 3) mit den time-to-surface (TTS)-Werten für einen 40 m Tauchgang darstellen.

Nitrox/EAN 32 / 40 m	Grundzeiten [min]				
	20	30	40	50	60
TTS DIVE 2_900	8	16	28	42	55
TTTS DIVE 3_0: numerisch	7	17	28	40	57
TTS Produkt 3	5	15	28	41	53
TTS Produkt 4	7	16	28	41	54

Tab. 3: Vergleich von vier verschiedenen Produkten für einen Muster-Tauchgang auf 40 m mit Nitrox/EAN32, Grundzeiten 20 bis 60 min; TTS = time-to-surface, i.e. die Summe aller Dekompressionsstopp-Zeiten + Aufstiegszeit.

Weiterhin wurde die numerische Lösung einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, um sicherzustellen, dass nicht geringe Variationen in den Startparametern zu mathematischen Artefakten führen. Schlussendlich wurden alle 4 Produkte noch gegen den Gold-Standard geprüft: die 'Zürich 1986 Tabelle für Lufttauchgänge' (ZH-86) von A.A. Bühlmann ([65], S. 228). Hier sind Abweichungen im Bereich von ± 2 min pro Austauschstufe zu beobachten; stellenweise beginnen die Stopps auch 3 m tiefer gegenüber der Tabelle. Dies ist aber schon allein den unterschiedlichen Koeffizientensätzen geschuldet und auch so gewollt: die ZH-86 Tabelle benutzt den ZH-L 16B Koeffizientensatz ([65], S. 158), dem gegenüber benutzen Softwareprodukte und Tauchcomputer üblicherweise den ZH-L 16C Koeffizientensatz ([65], a.a.O.). Weiterhin behandelt eine schriftlich fixierte Tabelle Rundungen prinzipiell anders als ein Tauchcomputer. Dass eine veröffentlichte Tabelle nicht unbedingt mit den vom Computer gerechneten Werten harmonisieren muss, hat selbst der Altmeister der NEDU, Edward Thalmann, erkennen müssen (Zitat): 'I think some (Anm.: einige Einträge in der USN Tabelle) were just manually adjusted. They just went in and empirically added five minutes here and five minutes there, yeah.' Edward Thalmann, [113], Naval Forces under the Sea: The Rest of the Story, S. 63 – 70, 197, 274, 361 und die CD 'Individual Interviews'.

Um eine Vergleichbarkeit zu erzwingen, wurden alle Profile nur mit dem Koeffizientensatz gemäß ZH-L 16 C ([65], S. 158) gerechnet und keinerlei Anpassungen mittels Gradientenfaktoren vorgenommen. Des Weiteren mussten abhängig vom Produkt die Profile leicht modifiziert werden, um über unterschiedliche Auf- und Abstiegsgeschwindigkeiten die Grundzeiten und insbesondere die totale Inertgas-Dosis vergleichbar zu halten.

Ergebnisse

Offenbar gibt es signifikante Unterschiede bei der Berechnung von Dekompressionszeiten mit Mischgasen in Abhängigkeit des He-Anteils und der Größe der Dekompressionsverpflichtung, sprich der Inertgasdosis (Abb. 1). Diese Unterschiede sind nicht durch Variationen im Algorithmus sondern ausschließlich durch unterschiedliche Rechenweisen bedingt.

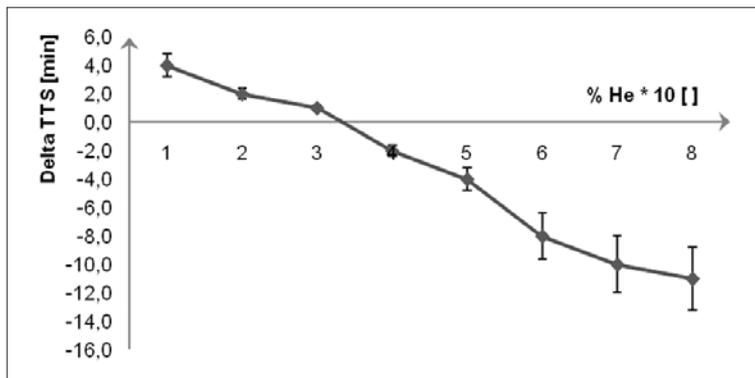


Abb. 1: Abweichungen der time-to-surface (TTS) in Abhängigkeit des He-Anteiles, beispielhaft an einem Tauchgang auf 40 m mit der Grundzeit von 40 min.

x-Achse: He-Anteil im Atemgas (10 bis 80 %)
y-Achse: delta TTS als arithmetischer Mittelwert aus den 3 Austauschzeiten gemäß:

$$\sum (t_{d,1} + t_{d,2} + t_{d,3}) / 3;$$

die $t_{d,i}$ sind die ermittelten Austauschzeiten der Produkte $i = 1 - 3$ (DIVE 2_900, Produkt 3, Produkt 4).

Die x-Achse ist als die 0-Linie der Austauschzeit der numerischen Lösung definiert. Als 'Fehler' [min] wird die Abweichung (delta TTS) dieses

Mittelwertes gegenüber der Austauschzeit aus der numerischen Lösung bezeichnet. Diese Mittelwertberechnung bot sich an, weil die ermittelten $t_{d,i}$ aller 3 Produkte relativ nahe beieinander lagen: die absoluten Fehler nehmen mit der Größe der Inertgasdosis sowie des He-Anteiles zu. Der Kurvenverlauf lässt sich durchgängig bei allen 480 Rechteckprofilen verfolgen. Er lässt sich grob qualitativ wie folgt skizzieren: im Bereich der He-Anteile 5 bis ca. 25 % wird die TTS überschätzt, d.h. die TTS ist zu groß, die Dekompression als zu konservativ angegeben. Im Bereich der für viele TEC-Taucher relevant ist, nämlich zwischen ca. 30 bis ca. 40 % He-Anteil, verschwindet der Fehler glücklicherweise, um bei größer werdendem He-Anteil rasch wieder zuzunehmen. In diesem Bereich ist die Dekompression als zu liberal, d.h. zu kurz, angegeben.

Diskussion

Da die Ergebnisse für alle getesteten 480 Mischgas-Profile der beiden gekauften Produkte und von DIVE 2_900 ziemlich nahe beieinander lagen, ist es nicht abwegig, eine gemeinsame Methode zu unterstellen. Diese gemeinsame 'Methode' bedeutet im Klartext, dass der 'Fehler' von DIVE 2_900 sich bei den anderen Produkten ebenfalls in der Implementierung widerspiegelt. Um es noch deutlicher zu sagen: die relative Gleichheit der Zahlenwerte lässt vermuten, dass bei den beiden gekauften Produkten die Methode B) angewendet wurde. Natürlich könnten auch Abweichungen bei ganz anderen Faktoren hierfür verantwortlich sein. Denkbar sind u.a.:

- undokumentierte Gradientenfaktoren,
- ein respiratorischer Koeffizient ungleich 1,
- andere Bewertung weiterer Inertgasanteile,
- andere Bewertung der Wasserdichte,
- 'empirisch' angepasste a-/b-Koeffizienten, dies insbesondere bei Helium, und damit auch



- leichte Abweichungen vom originären Helium ZH-L Halbwertszeitenspektrum,
- Benutzung des sog. '1b'-Kompartmentes anstatt oder zusätzlich zum Kompartiment '1' ([65], S. 158),
- von der Tiefe abhängig variable Aufstiegspeedigkeiten,
- unterschiedlich gehandhabte Rundungen.

Krückstock-Lösungen als Software-Implementierungen, beruhend auf zu geringer Leistungsfähigkeit der eingesetzten Hardware sind speziell im Bereich Tauchcomputer bekannt: in den Anfängen der europäischen Tauchcomputerentwicklung gab es Produkte, die, statt eine vollständige Sättigung- & Entsättigung zu rechnen, lediglich gespeicherte Tabellenwerte interpolierten. Auch aktuell gibt es Implementierungen, welche, statt ein komplettes RGBM-Modell zu rechnen, im Kern auf ein modifiziertes ZH-L zurückgreifen.

Schlussfolgerungen

Was soll mit diesen, zugegebenermaßen theoretischen Betrachtungen erreicht werden? Keinesfalls soll irgendein Hersteller angeprangert werden, allein schon auf Grund der unsicheren Aktenlage, wie oben angedeutet, und den doch etwas kühnen Vermutungen. Deshalb werden auch keine Namen von Produkten genannt. Unbefriedigend ist aber die intransparente Situation bei den Implementierungen und die recht schleierhafte und mangelhafte Dokumentation von 'defaults', den Standardwerten und Konstanten in den Handbüchern dieser Software-Produkte und der Mischgascomputer. Um dies im Jargon der Tekkies zu formulieren: ist, wo ZH-L 'draufsteht, auch wirklich ZH-L drinne???

Die klare Botschaft soll aber sein, dass Dekompressionszeiten in einem digitalen Display, egal ob Tauchcomputer oder PC, durchaus interpretationsfähig sind. Und zwar nicht nur auf Grund statistischer Erwägungen und Messfehlern, sondern allein schon durch die Realisierung einer Berechnungsmethode; eben den Software-technischen 'Implementierungen'. Und das diese Interpretationsfähigkeit sich nicht nur im Promillebereich tummeln muss, sondern, in Abhängigkeit einer Inertgasdosis (z.B. Tauchtiefe • Tauchzeit) und des He-Anteiles, auch mal schnell im deutlich zweistelligen Prozentbereich enden kann...

Abb. 2: Zunächst werden automatisiert verschiedene sogenannte 'deep stop' Strategien gegeneinander kontrastiert und dann die Austauschprognosen detailliert: der erste Block (nach Methode B) der Dekompressionsstufen mit der time-to-surface (TTS; Summe aller Stoppzeiten + Aufstiegszeit) im Bereich von ca. 64 min kann durchaus bei handelsüblichen Deko-Programmen gefunden werden, der zweite Block (Methode A) ist die nicht gerundete numerische Lösung. Würde auf jeder Stufe gerundet, wie bei Tabellen und anderen Softwareprodukten üblich, landen wir bei ca. 81 min TTS. Bei Anwendung eines Gradientenfaktorenpaars im Block 3 mit beispielsweise GF High = 0,90 und GF Low = 0,65 wird mit ca. 93 min TTS ein Sicherheitspolster von 93 – 64 = ca. 30 min vorgegaukelt, welches sich so nicht darstellen lässt, da ja die 'echte' numerische Lösung erst bei ca. 81 min konvergiert.

maximale Ceiling:	12,56						
Vorschlag Haldane	2:1 =	15,00 m					
Vorschlag Hills, B.A.: DEEP STOP =		27,00 m					
PDIS für TAU =	15,98 min:	27,76 m					
PDIS für TAU =	23,44 min:	21,89 m					
PDIS für TAU =	34,67 min:	16,44 m					
Deko Prognose:							
15 m Stopp Prognose Dekozeit:	1,0		Komp. #:	5			
12 m Stopp Prognose Dekozeit:	3,0		Komp. #:	5			
9 m Stopp Prognose Dekozeit:	8,0		Komp. #:	7			
6 m Stopp Prognose Dekozeit:	15,0		Komp. #:	8			
3 m Stopp Prognose Dekozeit:	33,0		Komp. #:	10	TTS	= 64,0	
Deko Prognose numerisch:							
15 m Stopp APPROXIMATION :	0,25 Steps	N = 1,0	Komp. #:	5			
12 m Stopp APPROXIMATION :	3,25 Steps	N = 13,0	Komp. #:	6			
9 m Stopp APPROXIMATION :	8,00 Steps	N = 32,0	Komp. #:	7			
6 m Stopp APPROXIMATION :	16,75 Steps	N = 67,0	Komp. #:	8	TTS	= 78,2	
3 m Stopp APPROXIMATION :	45,25 Steps	N = 181,0	Komp. #:	11	TTS gerundet	= 81,0	
Deko Prognose mit Gradientenfaktoren: GFHI = 0,90 GFLO= 0,65							
18 m Stopp Prognose Dekozeit:	3,0	GF = 0,65	Komp. #:	5			
15 m Stopp Prognose Dekozeit:	3,0	GF = 0,69	Komp. #:	5			
12 m Stopp Prognose Dekozeit:	6,0	GF = 0,73	Komp. #:	7			
9 m Stopp Prognose Dekozeit:	10,0	GF = 0,78	Komp. #:	8			
6 m Stopp Prognose Dekozeit:	20,0	GF = 0,82	Komp. #:	9			
3 m Stopp Prognose Dekozeit:	47,0	GF = 0,86	Komp. #:	11	TTS	= 93,0	

Um die im Titel gestellte Frage abschließend zu beantworten:

- 1) Ja, mit Gradientenfaktoren kann man defekte Perfusions-Algorithmen teilweise reparieren. Aber die Perfusionsmodelle funktionieren weitaus zufriedenstellender, als es der zurzeit landläufige Medienrummel um die Blasenmodelle vermuten lässt. Um es mit einem historischen Bonmot zu unterstreichen: 'Haldane works if you use it properly!', R.W. Hamilton, Decompression Theory: 17th UHMS workshop, p. 135; 1978
- 2) Ja, es werden Gradientenfaktoren benötigt, um schlechte oder auch nur schlampige Implementierungen für Mischgase auf die 'sichere Seite' zu hieven.

Zusammenfassend lässt sich dies an dem Test-Tauchgang (Tauchtiefe 42 m, Grundzeit 25 min, Atemgemisch: 20 % O₂, 80 % He) demonstrieren (Abb. 2).

Dank

geht an die GTÜM-Crew für die Möglichkeit, dieses Thema im Rahmen eines Vortrages bei der (hervorragend organisierten) 12. Wissenschaftlichen Tagung der GTÜM am 20.03.2011 vorzustellen sowie für das nachhaltige Interesse an dieser 'trockenen' Materie: insbesondere an Willi W. für ein konstantes peer review, an Jochen D. für redaktionelle Arbeit und die Geduld mit meiner oft unorthodoxen Vorgehensweise sowie an einige meiner TEC-Tauchschüler bei PADI Israel für die mühsame Tipparbeit mit den Deko-Programmen.

Referenzen

Die Nummern [] beziehen sich auf den entsprechenden Eintrag der Bücherliste unter: <http://www.divetable.de/books/index.htm>. Die Quellen zu den Perfusions-Algorithmen sind hauptsächlich die Folgenden, allseits bekannt und respektiert, sowie die bereits erwähnten Standardwerke über Tauchmedizin (s. auch CAISSON 2010;25(1):9):

- Boycott, AE, Damant, GCC & Haldane, JS. The Prevention of Compressed Air Illness, Journal of Hygiene, 1908;Volume 8:342-443
- Workman, RD. Calculation of Decompression Tables for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives, Research Report 6-65, U.S. Navy Experimental Diving Unit, Washington, D.C. (26 May 1965)
- Schreiner, HR & Kelley, PL. A Pragmatic View of Decompression, Underwater Physiology Proceedings of the Fourth Symposium on Underwater Physiology, edited by C.J. Lambertsen. Academic Press, New York, 1971: 205-219
- Müller, KG & Ruff, S. Experimentelle und Theoretische Untersuchungen des Druck-Fall Problems, DLR, Forschungsbericht 71-48, Juli, 1971; sowie - Theorie der Druckfallbeschwerden und ihre Anwendung auf Tauchtabellen, DVL / Bericht – 623/ 1966
- [4] Dekompression - Dekompressionskrankheit, AA Bühlmann, Springer 1983; ISBN 3-540-12514-0
- [5] Tauchmedizin (Barotrauma, Gasembolie, Dekompression, Dekompressionskrankheit) AA Bühlmann, Springer, 1993, ISBN 3-540-55581-1
- [54] Enzyklopädie des Technischen Tauchens, Bernd Aspacher
- [62] Diving & Subaquatic Medicine, Carl Edmonds, Lowry, Pennefather, Walker, 4 th. Ed., Arnold, ISBN 0-340-80630-3
- [63] Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving Alf Brubakk, Neuman et al., 5 th Ed. Saunders, ISBN 0-7020-2571-2
- [64] Textbook of Hyperbaric Medicine, Kewal K. Jain; 3rd. Revised Ed., Hogrefe & Huber, ISBN 0-88937-203-9
- [65] Tauchmedizin, AA Bühlmann, EB Völlm (Mitarbeiter), P Nussberger; 5. Auflage in 2002, Springer, ISBN 3-540-42979-4
- [75] Bove and Davis' DIVING MEDICINE, AA. Bove, 4 th. edition, Saunders 2004, ISBN 0-7216-9424-1
- [102] Hills, BA. Decompression Sickness, 1977; Volume 1, The Biophysical Basis of Prevention and Treatment, John Wiley & Sons, Ltd.. ISBN 0 471 99457 X
- [113] Naval Forces Under the Sea: The Rest of the Story; 2007, Best Publishing Company, ISBN-13: 978-1-930536-30-2, ISBN-10: 1-930536-30-5
- Berghage TE (ed). Decompression Theory. 17th Undersea and Hyperbaric Medical Society Workshop. UHMS Publication Number 29WS(DT)6-25-80. Bethesda: Undersea and Hyperbaric Medical Society, 1978; 180 pages
- Berghage, TE, TD David and CV Dyson. Species differences in decompression. Undersea Biomed Res 1979;6(1): 1-13
- Bronstein – Semendjajew: Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch
- D'Aoust, BG, KH Smith, HT Swanson, R White, L Stayton, and J Moore. Prolonged bubble production by transient isobaric counter-equilibration of helium against nitrogen. Undersea Biomed. Res. 1979;6(2):109-125
- Egi SM, Gürmen NM. Computation of decompression tables using continuous compartment half-lives. Undersea Hyper Med 2000;27(3):143-153
- Lightfoot EN, Baz A, Lanphier EH, Kindwall EP, Seireg A. Role of bubble growth kinetics in decompression. In: Shilling CW, Beckett MW, eds. Underwater physiology VI. Proceedings of the sixth symposium on underwater physiology. Bethesda, MD, 1978 44-457
- Ljubkovic M, Marinovic J, Obad A, Breskovic T, Gaustad SE, Dujic Z. High incidence of venous and arterial gas emboli at rest after trimix diving without protocol violations. J Appl Physiol 2010;109:1670-1674
- Moon RE, Piantadosi CA, Camporesi EM (eds.). Dr. Peter Bennett Symposium Proceedings. Held May 1, 2004. Durham, N.C.: Divers Alert Network, 2007
- Rodchenkov SV, Skudin VK. Saturation decompression schedules based on a critical tissue supersaturation criterion.



Undersea Biomed Res 1992;19(6) 472-481

Voitsekhovich, I. A mathematical decompression model based on biophysical and physiologic laws. Undersea Hyperb. Med 1994;21(2):209-213

COCHRAN; www.divecochran.com

COMEX: www.comex.fr

DAN: Divers Alert Network; www.dan.org

DCIEM (alte Bezeichnung, jetzt): Defence Research and Development Canada; www.drdd-rddc.gc.ca

Journal of Applied Physiology: http://jap.physiology.org/

NEDU: Navy Experimental Diving Unit; www.supsalv.org/nedu/nedu.htm

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration www.noaa.gov und

NOAA Tauchsparte: http://www.ndc.noaa.gov/

UHMS: Undersea & Hyperbaric Medical Society; www.uhms.org

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. A. Salm

Obertorstr. 19

73728 Esslingen

director@divetable.de

Gradientenfaktoren bei Perfusions-Modellen vom Typ: ZH-L (Bühlmann, Hahn et al.) und 'M-Value' (Haldane, Workman, Schreiner et al.)

A Salm

Das Kriterium für 'sichere' Dekompression wird bei der Gruppe der Perfusions-Modelle durch eine einfache Gerade dargestellt; s. Gl. (3). Diese Gerade ist zwar mathematisch und auch in der Darstellung eine scharfe Trennlinie und trennt erlaubte/tolerierte Inertgaspartialdrücke in den Kompartimenten (unterhalb der M-Wertlinie) von denjenigen, bei denen das Risiko von DCS erhöht ist. In der Praxis ist das aber eine diffuse Grauzone.

Schon seit Beginn der Dekompressions-Forschung gab es viele Hinweise darauf, dass bereits vor Erreichen dieser 'theoretischen' Grenzlinie DCS auftreten könne, insbesondere:

- bei Wiederholungs-Tauchgängen ([65], S. 147, sowie: Haldane, S. 369/370: '...to add together the two periods of exposure...'),
- bei kalten und/oder anstrengenden Tauchbedingungen (NOAA Standard Procedure, Diving Manual, 4th. ed, p. 4-30; Haldane, S. 425),
- oder auch bei älteren und/oder übergewichtigen Tauchern (Haldane, S. 368; Fußnote auf S. 375; sowie S. 410: '...inclined to obesity... over 45 years...'),
- als auch bei Hautabkühlung und R/L-Shunt Phänomenen ([65], S. 159),
- sowie ab einem $pO_2 > 1$ Bar (Workman, S. 21).

Das Mittel der Wahl ist folglich die Reduktion dieser Grenzwerte: die traditionelle Quelle ([65], S. 147) spricht von 3 - 10 %. Haldane selber lässt die Stoppzeiten um bis zu 30 % anwachsen (ebd., S. 368). Als weiteres Beispiel hat Max Hahn 1985 die Koeffizienten des ZH-L 16 Systems für den Tauchcomputer 'Deco-Brain' bei der Software-Release P2-3 als Nachfolge-Release der P2-2 ebenfalls konservativer gestaltet als die veröffentlichten theoretischen Werte (Quelle: private Kommunikation). Dies bedeutet aber auch, dass Gradientenfaktoren (GF) schon seit Haldane benutzt wurden, nur war der terminus technicus jeweils ein anderer...

Gl. (3) ist als eine lineare Gleichung durch zwei Parameter definiert. Genau diese beiden können verändert werden. Die zwei Parameter einer linearen Gleichung sind:

- die Geradensteigung, hier $1/b$,
- der Achsenabschnitt, hier a .

Als GF bezeichnet man einen Faktor mit dem $1/b$ oder a (oder auch beide) multipliziert werden: Sind die $GF < 1$, ergeben sich reduzierte Grenzwerte, die Dekompression wird somit konservativer berechnet. Dies ist eine übliche Verfahrensweise bei der Planung technischer Tauchgänge: der GF gilt hierbei für die komplette Schar aller betrachteten Kompartimente.

Sind die $GF > 1$, wird die Dekompression aggressiver gestaltet, da die Stoppszeiten verkürzt werden. Die Methode, die als 'VGM' (Variable Gradient Method) bezeichnet wird, ordnet jedem Kompartiment seinen spezifischen GF oder ein spezifisches GF-Paar zu.

Haldane lässt als GF eine leichte Überschreitung seines '2:1' Grenzwertes zu (a.a.O., S. 367: 'slightly exceeded ...') Die traditionelle Quelle

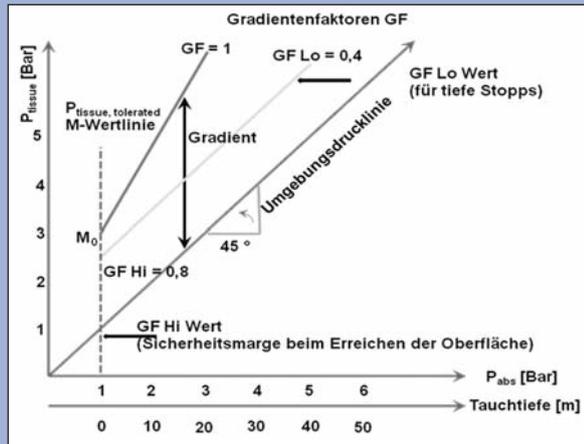


Abb. 1: Die M-Wertlinie ('M-Value') ist dabei identisch zu $P_{\text{tissue, tolerated}}$ zu sehen und wird analog zur Gl. (3) so berechnet: $M = M_0 + \Delta M \cdot D$, hierbei ist M_0 der maximale Wert bei Erreichen der Oberfläche (Tauchtiefe = 0), und ΔM ist die Steigung. Die Einheit der Tauchtiefe D ist feet, da die Matrix der M-Werte üblicherweise in fswa angegeben wird (s. Workman, S. 5). Somit entspricht M dem $P_{\text{tissue, tolerated}}$, dem maximal tolerierten Inertgaspartialdruck im Kompartiment.

([65], S. 157) hat sich damit begnügt, nur den Achsenabschnitt zu verändern, d.h. nur der Parameter a wurde verkleinert. Geometrisch entspricht dies einer Rechtsverschiebung der Geraden. Wird zusätzlich die Steigung $1/b$ verkleinert, wird die Dekompression noch konservativer gerechnet. Weiterhin können tiefere Stopps rechentechnisch erzwungen werden, indem statt mit einem GF mit einem Paar von GF gerechnet wird: einem GF High und einem GF Low. Tiefere Stopps werden mit dem GF Low erzwungen, der GF High repräsentiert die Sicherheitsmarge beim Erreichen der Oberfläche. Über eine lineare Skalierung wird der GF Low dem GF High Faktor stufenweise angenähert, da sonst die flachen Stopps überproportional länger ausfallen: dies wird üblicherweise in den Desktop-Deco-Programmen und auch bereits in einigen Mischgascomputern genauso implementiert:

Allerdings sollte auch hier Vorsicht die Mutter der Porzellan-Kiste sein: die in diesem Kasten und in den üblichen TEC-Publikationen und -Schulungsunterlagen dargestellte Graphik ist korrekt, aber auch durchaus suggestiv; um nicht zu sagen: eindimensional, nämlich nur für ein Kompartiment. In der durch GF generierten zusätzlichen Stoppszeit werden sich sicherlich die schnellsten sowie das jeweilige Leitkompartiment weiter entsättigen können; jedoch wird in allen langsameren Kompartimenten fröhlich weiter gesättigt. Dies galt aber schon immer, auch für den berühmten 'Sicherheits-Stopp'.

$$GF_m = (GF_{Hi} - GF_{Lo}) / \text{erste Stopptiefe}$$

$$GF = GF_{Hi} - GF_m \cdot \text{aktuelle Stopptiefe}$$

mit : $GF_{Hi} > GF_{Lo}$

Im ZH-L Modell werden die a - & b -Koeffizienten mit den GF so verziert:

$$a \rightarrow a \cdot GF \text{ sowie: } b \rightarrow b / (GF - GF \cdot b + b)$$

Mach' mit: mach' Tauchen noch sicherer!

Kurz-Information zum DAN Projekt PDE (Project Dive Exploration)

A Salm

Unter dem Titel PDE sammelt DAN die Tauchgangsdaten von Tauchcomputern. Weltweit können interessierte Taucher die elektronischen Tauchgangsprofile, die ihr Tauchcomputer gespeichert hat, via PC zu DAN schicken. Ziel ist eine bessere Datenbasis für die Berechnung von DCS-Phänomenen. Voraussetzungen: so gut wie keine; JEDER interessierte Taucher kann mitmachen! Nur ist vorher zu prüfen, inwieweit Euer Tauchcomputer und die dazugehörige Logbuchsoftware auf Eurem PC hierfür tauglich ist.

Project Dive Exploration (PDE) is the most extensive study of recreational diving ever conducted. With affiliate programs in Europe and Southeast Asia, DAN's goal is to record more than one million dive profiles to produce statistically accurate analyses of dive profiles, diver characteristics, and diver behavior.

Project Dive Exploration is a prospective observational study of the demographics, medical history,

depth-time exposure, and medical outcome of a sample of the recreational diving population. PDE seeks to estimate the incidence of decompression sickness (DCS) in population subgroups and to investigate the relationship of DCS probability to depth-time profile and dive and diver characteristics. PDE also provides an injury-free control population for comparison with DAN's injury and fatality populations to identify possible risk factors associated with injury and death.



A Salm

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. Albrecht Salm

Obertorstrasse 19, 73728 Esslingen

director@divetable.de



Join the Effort: STATE OF PDE 197,778 Dives Collected (April 2011)

Link zu DAN International und zum PDE: <http://www.dan.org/research/projects/pde/index.asp>

Die Navigation sieht so aus: Medical Research → Current Projects → PDE.



Desktop Deco-Software und Mischgascomputer: mögliche Fehlerquellen beim technischen Tauchen?

Albrecht Salm

SubMarineConsulting und Tauchsportcenter Esslingen, director@divetable.de

Fragestellung: Benötigen wir Gradientenfaktoren zur Reparatur eines defekten Algorithmus oder zur Reparatur einer defekten Implementierung?

Methodik: Wir wollen uns an Hand von ein paar einfachen Beispielen von den Schwächen einiger kommerziell erwerbbarer Desktop-Deco-Programmen überraschen lassen, schauen uns einige Tauchcomputer mit Hardware-Problemchen an und werfen einen Blick hinter die Kulissen der Fehlerrechnung sowie des Gesetzes der Fehlerfortpflanzung. Abschließend diskutieren wir ein paar simple Verfahren und Tests, wie wir mit Software-Produkten umgehen können, und wie wir unsere Planung für Tec-Tauchgänge entsprechend anpassen können. Wir unternehmen einen kleinen Rückblick in die Entwicklung einiger Deco-Modelle und lernen die Grenzen der Algorithmen kennen.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen: Insbesondere haben wir 480 Rechteckprofile aus dem Tec- und Recreational-Bereich anhand analytischer Methoden sowie mit drei kommerziell erwerbbarer Desktop-Deco-Programmen berechnet und verglichen. (Tiefe: 30-80 m, Grundzeit: 20-60 min, Heliumanteil: 5-80 %, nur normoxischer Mix (keine Reise- oder angereicherte Dekompressionsgase), nur ZH-L Modell, keine Anpassungen mittels Gradientenfaktoren). Offenbar gibt es signifikante Unterschiede bei der Berechnung von Dekompressionszeiten mit Mischgasen in Abhängigkeit des Helium-Anteils. Diese Unterschiede sind bei unserer Methode nicht durch Variationen über den zugrundeliegenden Dekompressionsalgorithmus bedingt.

Tauchen

Technisches Tauchen – Innenansicht einer Freizeitbeschäftigung

A Salm

Es wird versucht, einigen Begleiterscheinungen des Phänomens 'technisches Tauchen' etwas näher zu kommen und für Nicht-Tech-Taucher darzustellen. Hierfür wird die vorhandene tauchmedizinische Standardliteratur [62,63,64,75] benutzt, die außer [62], kein explizites Kapitel zum Thema enthält, wohl aber ausführlich den Bereich 'Mischgastauchen' beleuchtet. Weiterhin sind interessante Bemerkungen von Dr. Simon J. Mitchell (Dept. of Anesthesiology, Auckland City Hospital) aus dem aktuellen Dokument der Undersea & Hyperbaric Medical Society (UHMS) von 2008 ([109], S. 63 ff) zu entnehmen, sowie Beobachtungen aus eigener Erfahrung*.

1. Was ist technisches Tauchen?

(**technical diving, TECH-, TEK-, TEC- ...**)

Es gibt eigentlich keine allgemein anerkannte Definition. Wohl gibt es aber mindestens vier Parameter, die technisches Tauchen deutlich vom Sport-/Erholungstauchen unterscheiden:

- Tauchtiefe und Tauchgangsdauer,
- Verwendung von Gasgemischen,
- virtual ceiling und
- Aufwand an Planung und Ausrüstung.

En detail sind diese vier Parameter so zu umschreiben:

Tauchtiefe und Tauchgangsdauer. Die Tauchgänge sind tiefer und dauern länger als reguläre Tauchgänge aus dem Sporttaucher-Bereich; tiefer als 40 m, länger als 1 h.

Verwendung von Gasgemischen. Es werden andere Gemische als Druckluft verwendet. Oft mit Helium, dann Trimix genannt (von Tri = 3; O₂, He, N₂). Die Dekompression wird üblicherweise mit Nitrox (EANx = Enriched Air Nitrox, also mit O₂-angereicherte hyperoxische N₂-Mischung) bis hin zu EAN98 (~ reiner O₂), durchgeführt.

Virtual ceiling und overhead environment. Beides hat mit Decken zu tun. Virtual ceiling bedeutet eine gedachte, nicht-vorhandene Decke durch eine Dekompressionsverpflichtung. Overhead environment meint eine reale Decke bei Höhlen-, Wrack- oder Eistauchgängen. Ein direktes Auftauchen zur

Oberfläche ist in beiden Fällen nicht möglich.

Aufwand an Planung und Ausrüstung.

Nehmen wir an, wir wollen einen 50 m-Tauchgang mit 20 min Grundzeit durchführen. Bei einem Oberflächen-Atemminutenvolumen von 25 l/min ist allein durch die Grundphase (6 bar • 20 min • 25 l/bar • min • 1,5) mit einem Atemgasbedarf von 4.500 l zu rechnen; ein Sicherheitsfaktor von 1,5 ist berücksichtigt. Schon bei diesem Atemgasvolumen wird klar, dass die Parameter 'Tiefe und Zeit' alle anderen Parameter triggern. Hinzu kommt die dazugehörige Dekompressionsphase. Mit Druckluft würde die Dekompression ca. 30 min (im Bereich ab 12 bis 3 m) dauern, durch geschicktes Wechseln auf Nitrox kann diese Zeit verkürzt werden, ohne dabei die Gesundheit zu gefährden. Die hierdurch erhöhte O₂-Exposition wird durch die Bewertungsverfahren (NOAA/R.W Hamilton) vor Beginn des Tauchganges berechnet und kontrolliert. Dieses und die komplette Gasbedarfs-Planung in der Grund- und Auftauchphase geschehen üblicherweise mit Unterstützung eines PC-Programmes. Somit ist die Ausstattung mit z. B. einem Doppelgerät (2 • 12 l) für Trimix, mehrere Zusatz-(Stage-)Tanks mit EAN kein Selbstzweck (Abb. 1). Ganz augenscheinlich, und auch unterstützt von entsprechenden Berichten in den unzähligen Taucher-Magazinen, sind die Redundanzen. Die Philosophie: 'Alles, was Dich am Leben hält, solltest Du zweimal haben' ist im Sporttauchen unbekannt aber bei TEC-Tauchgängen unumgänglich, wenn die persönliche Sicherheit nicht kompromittiert werden soll.



A Salm

2. Abgrenzung

Im Fokus der hier beschriebenen Innenansichten sind ausschließlich diejenigen Taucher, die eine entsprechende Ausbildung und die hierzu passende Ausrüstung haben. Technisches Tauchen hat nichts damit zu tun, dass sich Menschen, egal ob mangels Ausbildung oder mangels Ausrüstung, mit latent oder manifester, suizidaler Absicht in die Tiefe stürzen, um Ähnliches wie die Tekkies auszuprobieren. Es sind aber genau diese Adepten, die technisches Tauchen in Verruf brachten.

A Salm

CAISSON 2010;25(1):5-9



Abb. 1:

TEC Taucher
mit Grundaus-
rüstung

© Global Underwater
Explorers,
www.gue.com

Foto: A. Rue

http://www.gue.com/files/page_images/equipment/Config/true_wkp_diver-back.jp

3. Motive und Zielgruppe

Beweggründe, die Strapazen und Kosten auf sich zu nehmen, sind sicherlich Forscherdrang, Experimentierfreude und ein gewisser Pioniergeist, um zu tiefen Wracks, unberührten Riffen oder Höhlen vorzudringen. All diesen Tauchgängen, die außerhalb der Reichweite des üblichen Sporttauchens liegen, ist der technische und planerische Aufwand gemeinsam, um diese sicher zu Ende zu bringen.

Persönlichkeitsprofile von technischen Tauchern:

- große taucherische Erfahrung; oft > 500 Tauchgänge,
- zahlreiche Zusatzausbildungen, insbesondere von verschiedenen Ausbildungsorganisationen,
- technisch orientiert, handwerklich versiert,
- Risikobewusstsein,
- Zeit und Geld: pro Kurs-Modul, das ja auch etwas kostet, gehen leicht mehrere Wochen ins Land. Eine Trimix-Füllung eines Doppel-12er-Gerätes kann mit 120,- € zu Buche schlagen. Und dann die Grundausrüstung mit ca. vier Flaschen, vier Atemreglern, zwei Lampen, zwei Mischgascomputern, etc. Ganz zu schweigen von Scooter, Gasanalyzer oder gar einem Ultraschall-Dopplermessgerät
- körperliche Fitness leicht überdurchschnittlich: ein gefülltes Doppel-12er-Paket wiegt ab 40 kg aufwärts, mit zwei Zusatz-Flaschen (Stage Tanks) werden leicht 100 kg erreicht und
- oft auch überdurchschnittliches Englisch: die meisten aktuellen Materialien sind aus dem angloamerikanischen Sprachraum und nicht sofort als Übersetzungen erhältlich.

Edmonds z.B. schreibt bei Charakteristika von technischen Tauchern weiterhin so nett von 'toy oriented, high IQ, obsessional, studiosus, ...' ([62], S. 619ff).

4. Ausbildungsorganisationen

Cum grano salis kann man eher pragmatische oder eher dogmatische Ausbildungssysteme unterscheiden:

Pragmatiker. Die jeweilige Organisation stammt aus der traditionellen Sporttaucherei. Das technische Tauchen ist nur ein 'Zusatzprodukt' im breiten Portfolio. Die Curricula sind oft in Anlehnung an Vorgaben durch das Recreational Scuba Training Council (RSTC) geregelt oder werden nach den amerikanischen Haftungsrichtlinien beurteilt.

Dogmatiker. Eine Fixierung erfolgt auf nur wenige Aspekte, wie z.B. tiefe Wracks, Höhlen oder elektronisch geregelte Mischgas-Kreislaufgeräte ('closed circuit rebreather'; CCR). Curricula werden ad-hoc entwickelt, Ausbildungsmaterialien sind meist nur spärlich oder gar nicht vorhanden oder nur in der jeweiligen Landessprache. Oft kann ein kontrolliertes 'peer review', mangels personeller Basis, nicht stattfinden. Probleme können durchaus dann entstehen, wenn beispielsweise Ausrüstungsrichtlinien, entwickelt für Warmwasserhöhlen, blindlings auf europäische Schlammhöhlen angewendet werden.

5. Ausbildungssysteme

Normal sind modulare Systeme, bestehend aus drei, vier oder noch mehr aufeinander folgenden Kursen. Sie sind hierarchisch organisiert. Der Gedanke ist, vom Einfachen (Grundlagen, Advanced Nitrox) zum Komplexen mit steigendem Aufwand (Dekompressions-Prozeduren, normoxisches Trimix) und mehrfachen Gaswechseln mit hypoxischem Trimix beim Ab- und Auftauchen, Benutzung von Habitats, Einbindung von Oberflächen-Personal und Unterstützung-Tauchern zu gelangen. Entsprechend ist für Theorie-Lektionen als Präsenzveranstaltungen sehr viel Zeit erforderlich. Das gilt auch für die zahlreichen Hausaufgaben und Materialien zum Selbststudium und die dazugehörigen zahlreichen Freiwassertauchgänge, je nach Modul ca. 6 - 10.

In Erweiterung der herkömmlichen Ausbildung zum Sporttaucher wird in den Kursen verstärkt geschult:

- Tauchgangsplanung bezüglich O₂-ZNS und Oxygen Tolerance Units (OTU) sowie Gasmanagement,
- Umgang mit den hierzu erhältlichen PC-Programmen,
- Risikomanagement (Was-wäre-wenn-Analysen) und Strategien zur Gefahrenvermeidung,
- Dekompressionstheorien und Physiologie,
- komplexe Spezialthemen wie: isobare Gegendiffusion; Notwendigkeit von Luftpausen bei der Dekompression mit EAN98 oder auch die dazugehörigen Korrekturfaktoren durch Sauerstoff-Effekte wie Bradykardie und/oder Vaso-



konstriktion; Durchführung von Ultraschall-Dopplermessungen,

- Aufgabenteilung und Teambildung, Vermeidung von Gruppendruck und
- Ernährung und sowohl körperliche als auch geistige Fitness, um die Komplexität und Aufgabenvielfalt zu bewältigen.

Ein weiterer Unterschied zum traditionellen 'mind set' des Sporttauchers ist die grundlegende Sicherheits Maxime: 'Jeder Taucher kann jeden Tauchgang zu jedem Zeitpunkt aus jedem Grund abbrechen!'. (Anm. der Redaktion: Der VDST sagt seit Jahren: 'Der schwächste Taucher gibt Zeit und Tiefe vor'.)

6. Medizinische Risiken

Es handelt sich im Wesentlichen um vier Risiken, die auch in der traditionellen Sporttaucherei gut bekannt sind:

- Inertgas-Narkose,
- Sauerstoff-Intoxikation des Zentralnervensystems,
- Hypothermie und
- Dekompressionsunfälle.

Diese Hauptrisiken werden durch die größeren Tauchtiefen und, bedingt durch Helium, die erhöhten Dekompressionsverpflichtungen verstärkt. Das 'High Pressure Nervous Syndrome (HPNS; Helium-Tremor) spielt auf Grund der relativ langsamen Kompression beim Abstieg, den relativ geringen Tauchtiefen und des relativ geringen Helium-Anteils keine Rolle. 'Relativ' bedeutet hier 'in Relation zum Sättigungstauchen' oder zu oberflächenversorgten Bounce Dives. Ebenso sind wohl Episoden von dysbarischer Osteonekrose anekdotenhafter Natur.

Allerdings rücken Dinge wie Hyperkapnie und Hypoxie vermehrt in den Vordergrund. Beide Zustände können durch die größere Atemarbeit in der Tiefe, unproduktive Ventilation und raschere Verarmung der Atemkalkpatronen im Kreislaufgerät (CO₂-Scrubber) eintreten. Dem technischen Taucher wird in den Kursen nicht nur das entsprechende Wissen vermittelt, sondern die hiermit verbundenen Prozeduren werden in kontrollierter Umgebung auch geübt, um so die Hauptrisiken zu mildern.

Inertgas-Narkose. Der Tiefenrausch wird durch die Verringerung des N₂-Anteils gemildert. Richtwert ist ein pN_{2,max} von ca. 3 bar. Dies entspricht in etwa der Narkosetiefe, die man bei einem Tauchgang mit Druckluft in 30 m erreicht (4 bar • 0,8). Hierfür wird N₂ durch He ersetzt, das durch die geringere Fettlöslichkeit weniger narkotisch als N₂

wirkt. Ein angenehmer Nebeneffekt ist der verringerte Atemwiderstand. Wir sind somit zwanglos beim Trimix gelandet, dem Atemgemisch der Wahl mit 3 Komponenten.

Sauerstoff-Intoxikation des Zentralnervensystems. Dieses Risiko wird verringert, indem der O₂-Anteil vermindert wird. Es werden die bewährten NOAA Leitlinien angewendet: pO_{2,max} in der Grundphase < 1,4 bar, in der Dekompressionsphase < 1,6 bar. Beispielsweise kann man für einen Tauchgang auf 50 m ein Trimix20/30/50 einsetzen. Die Zahlen hinter der Gemischbenennung bedeuten: 20 % O₂, 30 % He, 50 % N₂; damit werden die Partialdrücke auf 50 m: pO₂ = 6 • 0,2; pHe = 6 • 0,3; pN₂ = 6 • 0,5. Der nicht zu unterschätzende Aufwand für Trimix-Herstellung und Trimix-Handhabung, auch während der Dekompressionsphase, wird letzten Endes durch die ausbleibende Narkose, d.h. eine ziemlich ungetrübte Wahrnehmung und Reaktionsfähigkeit gerechtfertigt. Da die Dekompressionsverpflichtungen sich bei Trimix anders darstellen als bei Druckluft oder Nitrox, ist der Einsatz von Nitrox-Gemischen Standard für die Dekompressionsphase. Mit Trimix wird vergleichsweise tiefer und auf den 9, 6 und 3 m-Dekompressionsstopps länger dekomprimiert. Diese Dekompressionszeiten werden durch einen Gaswechsel auf EAN50 (50 % O₂, 50 % N₂) ab 20 m und einen weiteren Wechsel auf EAN98 (reiner Sauerstoff) ab 6 m verkürzt.

Hypothermie. Sie wird durch die langen und tiefen Tauchgänge, lange Dekompressionsphasen sowie einen hohen He-Anteil begünstigt. Die bekannte und bewährte Vorgabe der United States Naval Experimental Diving Unit (NEDU): 'Keep cool during bottom phase, warm during subsequent decompression' (NEDU TR 06-07) ist nur mittels einer Oberflächenversorgung durch Warmwasser zu realisieren. Diese Möglichkeiten hat der TEC-Taucher üblicherweise nicht. Deshalb muss die herkömmliche Vermeidungsstrategie (Trockentauchanzug mit Unterzieher) um autarke Heizsysteme und die Trennung des Atemgases von der Versorgung des Trockentauchanzuges erweitert werden: Oft wird hierfür Argon in einer Pony-Flasche mitgeführt.

Dekompressionsunfälle. Folgt man den aktuellen Angaben eines Workshops in Salt Lake City [109], so sind DCS/DCI beim technischen Tauchen im Vergleich zum beruflichen oder militärischen Tauchen eher kein Problem. Ob dies mit dem o.g. Aufwand an Gasen und Ausrüstung, der Sorgfalt bei der Planung und Durchführung, dem Abweichen von der tradierten Dekompressionsphilosophie mittels 'deep stops' oder aber mit der sogenannten 'Selbstaulesse' zu tun hat, konnte von den

Experten, die auf einem Workshop anwesend waren [109], nicht schlüssig beantwortet werden.

Mit 'deep stops' sind solche Stopps auf dem Weg zur Oberfläche gemeint, die wesentlich tiefer beginnen, als die mit einer herkömmlichen Dekompressionstabelle berechneten. Werden diese Stopps, sie dauern ca. 1 bis 3 min, zur geplanten Grundzeit addiert, entsteht offenbar ein Sicherheitspolster.

7. Sicherheit und Wohlbefinden

Diese beiden Werte stehen in der Prioritätenliste ganz oben! Warum ist aber die Wahrnehmung in der Öffentlichkeit eine andere? Trotz den bemerkenswerten Aufwendungen für Planung und Sicherheit vermittelt der 'technische Taucher' als solcher oft den Nimbus eines Hasardeurs oder zumindest von jemandem, der nur auf dreistellige Tiefenangaben in einem Logbuch Wert legt.

Zunächst ist die Darstellung von technischem Tauchen, einzelner Extremtauchgänge oder gar Rekordtauchgänge interessant und spektakulär. Aber in Relation zu anderen Ereignissen der Tauchsportbranche ist sie überbewertet und von einer prä-stabilisierten Harmonie gekennzeichnet (BILD-Zeitungsphänomen). Egal, ob in den Print-Medien oder on-line: Die Darstellung entspricht in keinem Falle einer Proportionalität zur Zahl der Ausführenden oder gar der durchgeführten Tauchgänge!

Es gibt Stimmen, die behaupten, dass dies auch in gleichem Maße für die Unfallzahlen gelte. Als Vergleichsmaßstab mögen die 'Diving Incidents Reports' aus dem britischen Königreich dienen. Wenn wir die BSAC-Tauchunfallstatistiken der letzten 29 Jahre verfolgen, lässt sich nüchtern festhalten:

- die Zahl der Taucher und der Tauchgänge (generell) steigt,
- die Zahl der Tec-Taucher nimmt zu (steigende Brevetierungszahlen),
- die Zahl der jährlichen Tauchunfälle liegt seit ca. 2001 konstant auf einem Niveau von ca. 400,
- die Zahl der Todesopfer (Berichtszeitraum hier 1965 - 2009) bleibt in den letzten 15 Jahren in etwa konstant bei ca. 16 Fällen,
- für Tekkies gibt es keine speziell ausgewiesenen Statistiken, d.h.: diese fallen nicht besonders auf und
- lediglich die Zahl der verunglückten CCR-Benutzer eines bestimmten Herstellers ist separat ausgewiesen und markant von Null verschieden.

Ähnliches lässt sich auch aus den DAN-Unfallberichten ableiten: lediglich auf Grund der breiteren Berichtsbasis (USA und Canada) hat sich die Zahl der berichteten Todesfälle bei ca. 89 p.a. eingependelt.

Rein praktisch betrachtet, können auch Sporttaucher Vorgehensweisen der Tekkies für ihre Tauchpraxis übernehmen. Z.B. bei Themen wie:

- Trimmung und Tarierung, d.h.: Wasserlage, Wasserwiderstand sowie Luftverbrauch,
- umweltschonende Flossentechniken,
- Redundanzüberlegungen bei zentralen Ausrüstungsgegenständen und
- Beschäftigung mit Dekompressions-Thematiken, 'tiefe' Sicherheitsstopps.

Diesem Trend wird bereits, zumindest bei den Pragmatikern, Rechnung getragen. Es gibt Einsteiger-Kurs-Module wie 'TEC Apprentice' (Techaucher Lehrling), Advanced Nitrox o.ä., in denen zwar fast die komplette Theorie vermittelt und auch geprüft wird, aber die intensiven Investitionen vermieden werden können.



Abb. 2: EAN-Taucher mit Sportkonfiguration. Trimix wird eine ähnliche Entwicklung wie Nitrox erleben. Das wird mittelfristig zum 'TEC-lite' führen, also einer leichteren TEC-Version mit geringerem Aufwand an Planung und Ausrüstung

© Global Underwater Explorers, www.gue.com

Foto: D. Rhea

http://www.gue.com/files/page_images/equipment/Config/rhea-bimini098.jpg

8. Welche Entwicklungen lassen sich in den letzten 15 Jahren beobachten?

Die Entwicklungen könnten ganz analog zum Tauchen mit Nitrox verlaufen: Dieses wurde von der NOAA ca. 1977-79 entwickelt und als EAN32 und EAN36 standardisiert. Den D-A-CH Raum hat Nitrox ca. 1993/94 erreicht; damals galt Nitrox als gefährlich, kompliziert und nutzlos. Wir erinnern uns an die lustigen Sticker 'Ich tauche TEK: EAN21'. EAN war ein Gemisch nur für die 'echten Tekkies'.



Heute haben wir einen Standard erreicht, auch auf Safari-Booten problemlos EAN zu erhalten, seit ca. 5 Jahren gilt auf gut geführten Tauchbasen die Devise 'Nitrox for free ...' In der Projektion auf Trimix wird diese Entwicklung sowie der Druck auf den Markt und die Ausbildungssysteme durch die stetig zunehmende Verbreitung mittelfristig zum 'TEC-lite' (eine 'leichte' TEC Version mit geringerem Aufwand an Planung und Ausrüstung) führen: ein normoxisches Trimix mit einem Dekompressionsgas, berechnet anhand einer Standard-Mischgas-tabelle (Abb. 2). Na ja: nächstes Jahr noch nicht und übernächstes Jahr nicht gleich, dann aber ...

Literatur

Die Nummern [] beziehen sich auf den entsprechenden Eintrag unter: <http://www.divetable.de/books/index.htm>

- [62] 'Diving & Subaquatic Medicine', Carl Edmonds, Lowry, Pennefather, Walker, 4 th. Ed., Arnold, ISBN 0-340-80630-3
- [63] 'Benett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving' Alf Brubakk, Neuman et al., 5 th Ed. Saunders, ISBN 0-7020-2571-2
- [64] 'Textbook of Hyperbaric Medicine.', Kewal K. Jain; 3rd. Revised Ed., Hogrefe & Huber, ISBN 0-88937-203-9
- [75] 'Bove and Davis' DIVING MEDICINE', Alfred A. Bove, 4 th. edition, Saunders 2004, ISBN 0-7216-9424-1
- [109] Decompression and the Deep Stop, Workshop Proceedings, June 24 -25 2008, Salt Lake City, Utah; UHMS, ISBN 0-930404-24-9

NEDU Technical Report No. 06-07: 'The Influence of Thermal Exposure on Diver Susceptibility on Decompression Sickness', Navy Experimental Diving Unit, 321 Bullfinch Road, Panama City, FL 32407-7015, November 2007

Abkürzungsverzeichnis

- BSAC: British Sub Aqua Club; www.bsac.com, die Unfallberichte (Diving Incidents) von 1980 bis 2009 zu finden unter: <http://www.bsac.com/page.asp?section=1038§ionTitle=Annual+Diving+Incident+Report>
- DAN: Divers Alert Network; www.dan.org, die Unfallberichte (Annual Diving Reports) von 1988 - 2008 unter: <http://www.dan.org/medical/report/index.asp>
- NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration; www.noaa.gov bzw. die NOAA Tauchsparte: <http://www.ndc.noaa.gov/>
- RSTC: Recreational Scuba Training Council; www.wrsc.com
- UHMS: Undersea & Hyperbaric Medical Society; www.uhms.org

(*) Der Autor, Albrecht Salm, Jg. 57, taucht seit 1976, hat 1988 seine erste Tauchlehrer-Prüfung absolviert und bildet seitdem für mehrere Ausbildungsorganisationen Taucher im Erholungs- und TEC-Tauchen aus. Er ist Physiker und arbeitet für die SubMarineConsulting Group (www.SMC-de.com).

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. Albrecht Salm
Obertorstrasse 19
73728 Esslingen
director@divetable.de

Anzeige

**Tauchreiseführer
Nördliche Adria
Kroatien**

Barbara Pölzer

empfohlen von
tauchen
Europas größtes Taucherverband

KOSMOS

Leserbriefe

An die CAISSON-Redaktion,

ich weiß, ich weiß, ich bin zu spät (wie der Pathologe eben auch), aber ich bin nun mal erst jetzt über den CAISSON 3/2007, S. 47: *Lehrgänge für Nitrox-Tauchen: ein Muss? gestolpert.*

Auch ein schlecht ausgebildeter Hobbytaucher darf durchaus wissen können, dass der gute Mann James Lorrain Smith hieß (ohne 'e': sic!).

Für die, die es nicht glauben/wissen: genauso wie der Blick in den Beipackzettel oft hilft: ein Blick in die Originalpapiere hilft meistens auch weiter.

(Auf jeden Fall viel weiter als 'cut-&-paste' von Wikipedia oder schlechten Nitrox-Manuals ...) In diesem Sinne viel Spaß mit dem Anhang (Abb. 1):

Dipl. Phys. Albrecht Salm
Esslingen



A Salm

**THE PATHOLOGICAL EFFECTS DUE TO INCREASE
OF OXYGEN TENSION IN THE AIR BREATHED.
BY J. LORRAIN SMITH, M.A., M.D.**

(From the Pathological Laboratory, Queen's College, Belfast.)

THE investigation which forms the subject of the present paper arose out of a series of experiments on the attenuation of microbes by oxygen at high pressure. Part of this series was carried out with the view of ascertaining the effect of the oxygen on animals which had been infected. It soon became apparent, however, that the oxygen at a tension of over 100% of an atmosphere produced pneumonia in the normal animal. It was therefore necessary to carry out a preliminary research in regard to this.

Abb. 1: Auf Kongressen und in Handbüchern wird häufig auf die toxischen Auswirkungen des Sauerstoffes auf die Lunge verwiesen. Die chronischen Sauerstoff-Schädigungen werden dort als Lorraine-Smith-Effekt bezeichnet. Die Abbildung zeigt, dass Lorrain der richtige Vorname von Herrn Smith ist.

Is DCS a „CUSP“ Catastrophe?

Contents

1) Contents	1
2) List of Figures	1
3) Abstract & Preamble.....	1
4) Rationale	2
5) Background: What is a „cusp catastrophe“, anyway???	3
6) Literature Search	4
7) The Bifurcation Set and DCS-data	9
8) The 5 catastrophe flags	11
9) Take-home Messages	12
10) Literature: references with comments & further reading.....	13

List of Figures

Figure 1: Example of one substantial hit	5
Figure 2: Result with regular search expressions	5
Figure 3: ... more hits!	5
Figure 4: the cusp catastrophe; source: Wolfram Notebook on: http://mathworld.wolfram.com/CuspCatastrophe.html	6
Figure 5: DCS as a cusp, generic	9
Figure 6: PrT = 25 (Source: HSE OTO 89 029)	10
Figure 7: Hysteresis cycle for a cusp catastrophe.....	11
Figure 8: Qualitative properties of a cusp: the 5 flags (Source: Zeeman 1995).....	12

Abstract & Preamble

Decompression Sickness (DCS) is the collective name of the pathogenic adverse health effects of excess inert gas load in a human body due to a reduction in ambient pressure. The severity of these effects depends mainly on the gradient and the speed of the pressure reduction. This does not only affect divers or tunnel-/caisson workers but as well aviators and astronauts.

Catastrophe Theory is a part of the mathematical fields of non-linear dynamics and differential topology for the study of bifurcations and singularities of polynomial, non-linear, so-called „potential functions“.

So the following is an **essay** on some aspects of DCS and the relation to just one of the 7 so-called elementary catastrophes, the cusp. Thus it is not a strict scientific paper, neither in form nor in contents but delineates a couple of preliminary thoughts on the topic, intended to raise awareness or as a basis for further discussions.

As well this should help to unearth again the purely mathematical and useful tools for the qualitative study of catastrophic behavior: these have been buried now for the 2nd. time for ca. 40 years. I want to put it together with a pragmatic, physiologic approach to create an innovative and fresh (and, maybe, a completely unsubstantiated ...) new look at dcs-related phenomena.

Rationale

Yet there is no question that Nature fails to be locally linear.

(Source: Mandelbrot, B. B.(1989) Fractal geometry: what is it, and what does it do?, p.4, IBM Yorktown Heights)

With this in mind, we will have a first superficial glance at dcs, non-linear systems and catastrophe theory; or, as Poston & Stewart would have it ([1], p. 1): „The back of a camel is stable, we are told, under a load of N straws, but breaks suddenly under a load of N + 1.“

So a small change in a „control variable“ from N to N+1 results in a sudden jump of a state or „behaviorial variable“, the collapse of the camel’s backbone. We could call this rightly so a „catastrophe“, especially if you own this particular camel.

Catastrophe theory deals with the mathematical description of situations where a gradually increase in one stress factor leads, at first, to normally a linear increased response, followed by a sudden jump to a completely different response and different behavior. This is very familiar from a control sample of divers with exactly the same dive (say, from a test-dive in a decompression chamber): the majority has none at all or only sub-clinical symptoms and one is a candidate for a serious dcs treatment. And, as well because:

“ ... a linear system is precisely equal to the sum of its parts. But many things in nature don’t act this way. Whenever parts of a system interfere, or cooperate, or compete, there are nonlinear interactions going on. Most of our everyday life is nonlinear, the principle of superposition fails spectacularly ...”

(Source: Steven H. Strogatz (1994): Nonlinear Dynamics and Chaos, Perseus Book, ISBN 0-201-54344-3, p. 9)

Background: What is a „cusp catastrophe“, anyway???

This section is a short primer on catastrophe theory for the mathematically not-so-inclined reader, i.e.: we do not touch on the concepts of: unfolding, codimension, catastrophe germs, perturbations and Maxwell's convention, which are at the rigorous kernel of this theory. These are covered in-depth in [1], [2], [3], [5] & [10]. But for a first, tentative approach with a mapping of dcs to a cusp, these theorems should be clearly the next, but advanced step.

In the mid-1970s with the publication of R. Thom's book [2] and subsequent papers from Zeeman [3], [4] peaked the hype around catastrophe theories, probably due to this epic near-misnomer and the public response in popular journals, extending the topic to the question why a dog starts barking or the price actions at the stock exchange markets. As with Gilmore, who wants to have it in [5] (citation from the appendix: A Brief History on Catastrophe Theory, p. 116):

„This book (i.e.: [2]) was an enigma in both form and substance. It was largely inaccessible to the mathematics community because it was written in the language of biologists, and inaccessible to the biological community due to its presentation of mathematical concepts which seemed to be deep and mysterious.“

But it all really started already at the turn of the century, ca. 1880 with Poincaré and others like Lyapunov, with the consideration of 3-body problems, as an extension of the already by Isaac Newton solved 2-body problem: which turned out to be a mathematical nightmare ([6], p. 209 ff.). These approaches re-surfaced 100 years later and culminated in successful and new insights into many and very different fields, like:

- Ignition and coherent operation of lasers
- Collapsing of elastic structures, like bridges
- Dynamic stability of moving objects and nosediving of airplanes and U-boats
- Capsizing of naval architectures, like ships or oil-rigs
- Phase transitions in ferromagnetism and in not-so ideal gases (via the van-der-Waals equation. And that even, as again Poston & Stewart wanted to have it in [1] on p. 327: „The involvement of catastrophe theory with thermodynamics, like most thermodynamic processes, has produced more heat than light.“)
- Boiling of water; the triple-point (the temperature-/pressure point where a substance is solid, liquid, and gaseous)
- Breaking of waves
- the abrupt density changes in a wind tunnel and other, generic shock waves (all these examples in: [7], Chapter 4, p. 95 – 119, and, as well in [3] and [10])
- Cirrhosis (Ping, Kong (2011): Cusp Bifurcation in the Evolution Model of Cirrhosis, Procedia Environmental Sciences 8 (2011), p. 362 – 370)
- and, finally the famous heartbeat model by Zeeman ([4], pp. 8 – 67).

They all deal with polynomial. i.e. non-linear energy (potential) functions F . In our case, the candidate function F would be $F = F(x, u, v)$. So our F features one behavior or state variable (x ; i.e.: DCS) and 2 control parameters (u & v ; for eg.: bottom depth & bottom time).

To put it a little bit more mathematically: it is basically how to deal with bifurcations and singularities and their approximations through Taylor-Series in order to learn something about this particular function F in the vicinity of local minima, even if this F is not explicitly known. Or, as with Gilmore in his prologue of [10], on p. vi: „Specifically, Thom’s Elementary Catastrophe Theory is Poincaré’s program applied to the equilibria of dynamical systems which are derivable from a potential function.“

Literature Search

A Quick Search for titles & keywords (29.04.2019) at 7 portals / journals revealed ...:

Portal / Journal:	Keyword DCS / Decompression sickness	Keyword catastrophe theory	Keyword CUSP catastrophe	Keywords DCS & CUSP	keywords DCS & catastrophe theory
1) <i>Science direct</i> (1996 – 2019):					
# hits	3564	64490	193	0	0
2) <i>Journal of Applied Physiology</i> :					
# hits	864	40	0	0	0
3) <i>GoogleScholar</i> :					
# hits	5090	422.000	8610	1 (**)	7 (*)
4) <i>Semantic Scholar</i> :					
# hits	ca. 7500	ca. 186.000	ca. 6810	4 (*)	0
5) Federal Science Library, Canada				0	0
6) Cornell University: arXiv.org	5	90	31	0	0
7) JSTOR.ORG	19 / 29 (ti) 36 / 427 (ab)	105 (ti) 177 (ab)	5 (ti) 35 (ab)	0 (ti) 0 (ab)	1 (ti) (*) 1(ab) (*)

Table 1: Literature Search

(*) PDF with irrelevant contents to our topic here

... more or less: nothing! (ti: title, ab: abstract)

(**) There was only one substantial hit in the:

Handbook of Human Performance, D. M. Jones, A. R. Smith: The Physical Environment, on p. 191, but related to HPNS and not to DCS (excerpt, yellow display is mine):

design and its influence on the incidence of HPNS. Torok (1984) suggests that a diver's response is similar to that predicted by the catastrophe theory of behaviour (Zeeman, 1976). The HPNS may be seen as the body's

Figure 1: Example of one substantial hit

Regular search expressions, for example:

"decompression sickness" AND "cusp catastrophe" filetype:pdf gives:



Figure 2: Result with regular search expressions

In fact, simple search with the above basic search expressions via various *popular search engines* revealed just the PDFs from my own lectures and manuals:

[\[PDF\] DeCompression Models: DeMystified! Agenda ... - ResearchGate](#)

[https://www.researchgate.net/.../2_abstracts_ALBI.pdf?... ▾ Diese Seite übersetzen](https://www.researchgate.net/.../2_abstracts_ALBI.pdf?...)

DEEP STOPS INCREASES INCIDENCE OF DECOMPRESSION SICKNESS IN AIR ... [3] to „DCS as a CUSP catastrophe“ will be presented as my starting point.

[\[PDF\] Max Hahn - ResearchGate](#)

[https://www.researchgate.net/profile/.../Models_EN.pdf?... ▾ Diese Seite übersetzen](https://www.researchgate.net/profile/.../Models_EN.pdf?...)

DCS as a „CUSP“ catastrophe? History and Development of ... →[102] Hills, Brian Andrew (1977), Decompression Sickness, Volume 1, The Biophysical Basis ...

[\[PDF\] Dekompression: Manual zum - DIVE TABLES homepage: Tauch ...](#)

[https://www.divetable.info/skripte/Deko_Manual.pdf ▾ Diese Seite übersetzen](https://www.divetable.info/skripte/Deko_Manual.pdf)

12.12.2008 - 1) Development of an Operational Altitude Decompression Sickness Computer Model: Feasibility Abbildung 38-1: CUSP Catastrophe ..

Figure 3: ... more hits!

Basically, i picked the cusp for 4 reasons:

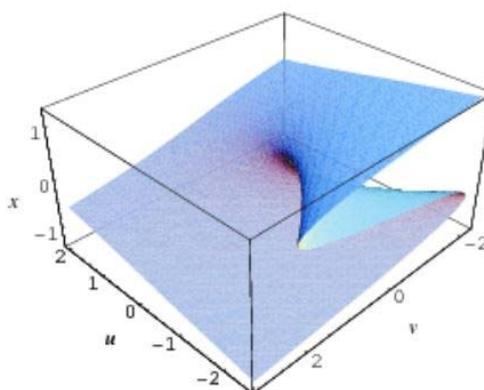
- 1) It is nicely depictable, especially the „catastrophic behavior“ like a „sudden jump“ („Path 2“ in Fig. 5 or the red arrows in Fig. 8) and the „inaccessible region“ via a simple 3-dimensional graph
- 2) It is a catastrophe type with 2 control variables which would fit nicely to DCS, say inert gas dose and dehydration, or inert gas dose and workload or workload and skin temperature
- 3) The cusp resembles very much a dose-response relationship (the classical Hill dose-response equation with the sigmoidal shape), well-known from pharmaco-dynamics
- 4) The bifurcation set of the equilibrium surface could be mapped to already available dcs data
- 5) (And yes: well, there is sort of statistical argument in favor of our approach; the majority of the real life examples from the references are just: the cusp).

Now let's examine the first 4 points in closer detail:

Ad 1) the simplest of the 7 catastrophe types, according to Thom's classification theorem for elementary catastrophes, is the „fold“ with one control variable. This is not enough for a multi-faceted and thus multi-dimensional phenomenon like DCS. The equilibrium surface (blue in Fig. 4) for the cusp is looking like that (thanks to Wolframs MathWorld):

Calculus and Analysis > Differential Geometry > Differential Geometry of Curves >
MathWorld Contributors > Sanns >

Cusp Catastrophe



A **catastrophe** which can occur for two control factors and one behavior axis. The cusp catastrophe is the universal unfolding of the singularity $f(x) = x^4$ and has the equation $F(x, u, v) = x^4 + ux^2 + vx$. The equation $y = x^{2/3}$ also has a cusp catastrophe.

Figure 4: the cusp catastrophe; source: Wolfram Notebook on: <http://mathworld.wolfram.com/CuspCatastrophe.html>

The behavior or state variable axis (in x-direction: $-1 \rightarrow x \rightarrow +1$ in Fig. 4) would be: „DCS: Yes or No“, or P(DCS), the statistical probability of contracting a decompression sickness; the u- and v- axes are the control variables.

The other elementary catastrophes with bloomy names like „swallow tail“ or „butterfly“ are featuring polynomials of x^5 or higher and 3 or more control variables ([2], p. 65 & p. 69).

Ad 2) the 2 control variables have illustrative names: u is called the normal factor whereas v is called the splitting factor, which will become obvious in Fig. 5. Our definitions could be, for example: u = bottom depth, v = bottom time, or much better:

bottom depth * bottom time (or, like Hempleman's famous PrT criterion for decompression stress, the product of bottom depth (P) with the squareroot of bottom time (rT)) collapsed into one control variable as an inert gas dose along one axis (say u), thus the 2nd axis (v) could be one of these: dehydration, workload, skin temperature or age/fitness, for eg.

Ad 3): if you look on the smooth, „un-cusped“ side (left, back of the box in Fig. 4) along, say the axis with $u = +1 = \text{const.}$ and you draw a cross-section along this axis, say from $v = 3$ to $v = -3$, this cross-section is a stretched and slightly distorted „s“. It is very much like the sigmoidal dose-response curve from a Hill equation, as well seen along „Path 1“ in Fig. 5.

But dose-response means, that *under* the dose-response curve lies hidden a gaussian normal-distribution from our dcs data. That is: the *derivative* of this particular cross-section we drew is basically a normal-distribution, a probability density: the integral of this normal-distribution gives back an accumulated probability density, which is just another word for the dose-response!

This nice result has already been proved with mathematical rigor: that a probability density function of multi-dimensional Gaussian form is a standard-4-parameter cusp and that the first derivative from this particular multivariate Gauss equated with 0 gives the equilibrium surface ([12], p.4 and [13], pp. 311 - 317) shown in Fig. 4.

Ad 4): the bifurcation set is the projection of the blue surface from Fig. 4 onto the u-v-plane along the x-axis, it looks like the dashed curves, the bifurcation lines in Fig. 5.

To accomodate the real DCS data with a standard polynomial cusp catastrophe, we have to scale the axis system because „DCS = No“ or $P(\text{DCS}) = 0$ has to coincide with $x = 0$. And there may be no negative probabilities.

$$\text{So if } F(x, u, v) = \frac{1}{4} * x^4 + \frac{1}{2} * u * x^2 + v * x \quad (1)$$

after Thom's original notation (p. 62 & 110 in the english translation, [2a]) for the cusp's potential equation, then the so-called „catastrophe manifold“ or equilibrium surface, i.e. the blue plane in Fig. 4 is defined as:

$\delta F / \delta x = 0$ (that is, we set the 1st. derivative of eq. (1) with respect to x equal to 0) and get:

$$0 = x^3 + u * x + v \quad (2)$$

This is a cubic equation in x, it may have 1 or 3 real solutions, depending on u & v.

The normal to this equilibrium-surface is vertical when $\delta^2 F / \delta x^2 = 0$. Thus, by eliminating x via $\delta^2 F / \delta x^2 = 0$; that is, we equate as well the 2nd. derivative to 0:

$$0 = 3 * x^2 + u \quad (3)$$

that is: $u = -3 * x^2$ (4)

putting (4) in (2): $v = -x^3 - u * x = -x^3 + 3 * x^2 * x = +2 * x^3$ (5)

and we receive:

$$0 = 4 * u^3 + 27 * v^2 \quad (6)$$

in parametric form of (4), (5): $x = t, u = -3 * t^2, v = 2 * t^3$ (7)

as the equation for the bifurcation sets, pls. cf. [1], pp. 78 – 83 & 174 - 176; [2a], p. 62; [3]; [5] & [10], p. 97 - 105.

This was already contemplated by Riemann and Hugoniot as an explanation for the behaviour of a gas-dynamical shock wave from an accelerated piston, that is, a sudden jump in temperature and gas density ([2a], p. 62 - 63).

The vertical re-scaling is done with a new parameter b on the equilibrium surface:

$$x \rightarrow x - b$$

$$0 = (x - b)^3 + u * (x - b) + v \quad (8)$$

As well the 2 control parameters u and v have to be shifted and/or multiplied according to the (dcs-)data: the potential F is dimensionless whereas our control variables are not! Gilmore demonstrates the reduction of physical parameters in [10], p. 204 ff.

There is one caveat to all this stretching & moving: the standard, orthodox catastrophe-polynoms for F insinuate an energy potential, be it kinetic, thermic, chemic or otherwise. The very moment we use bottom time explicitly as a control parameter or implicitly, as in the inertgas dose, the (up to now unknown) F has lost exactly this functionality. But this method is already best-practice in social sciences, pls. cf. Courtney Brown in [8].

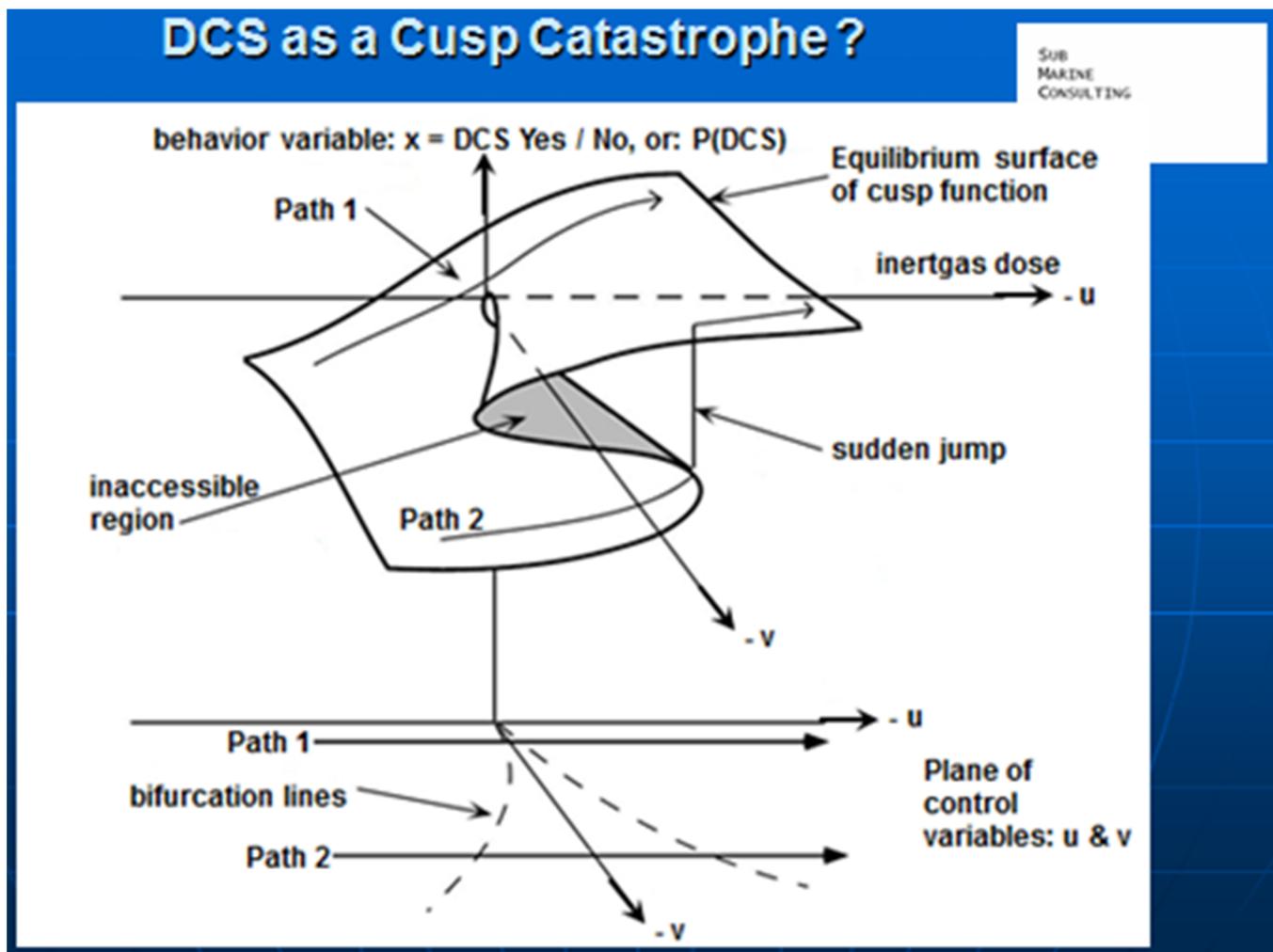


Figure 5: DCS as a cusp, generic

The Bifurcation Set and DCS-data

A *completely different* approach is created by relating the control variables directly with bottom pressure (P) and dive time (T), thus yielding a new „potential“ function F:

$$F(x, u, v) = \frac{1}{4} * x^4 + \frac{1}{2} * P * x^2 + T * x \tag{1'}$$

and by inverting the control plane: if we then could map the traces of dives with dcs, i.e.: the black or white boxes in the vicinity of the red line in Fig. 6, directly to the bifurcation sets is open to conjecture. But it should be determinable if there are more data available.

Fig. 6 is taken from: „Decompression sickness from Commercial Offshore Air-Diving Operations on the UK Continental shelf during 1987“ (HSE OTO 89 029), on p. 22 (the red display along the decompression-stress line of pressure-root time (PrT) of ca. 25 is mine):

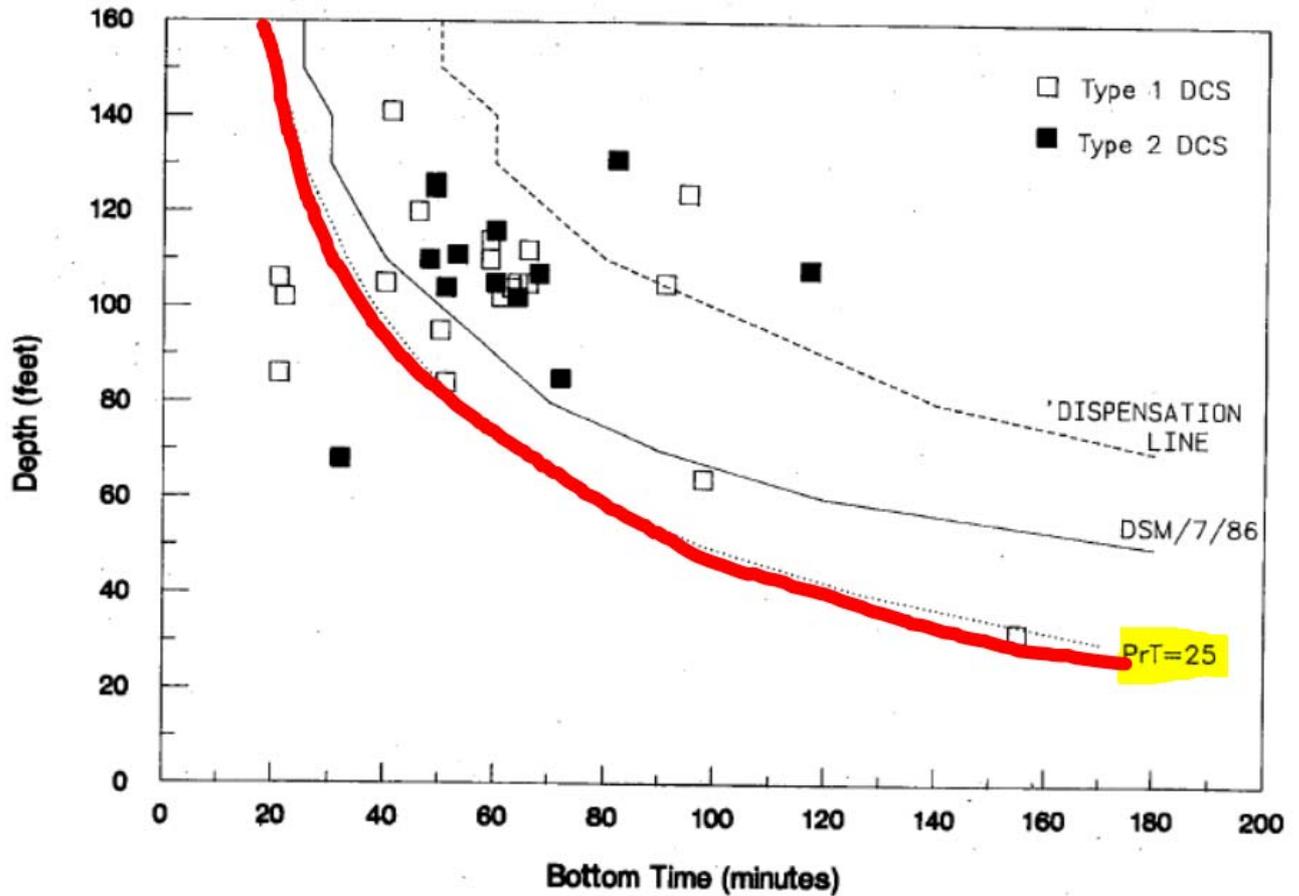


Figure 6: PrT = 25 (Source: HSE OTO 89 029)

Example for PrT: bottom depth = 40 m → P = 5 [Bar], dive time T = 36 [min], then

$$PrT = 5 * \text{square root}(36) = 5 * 6 = 30$$

If the decompression stress $PrT \geq 25$ then dcs is more probable, according to this particular data set. Again, the mapping of real dcs data to the generic cusp, which originates around (0,0,0) has to address the above cited 2 points: physical dimension & absolute value. This is done via 2 simple transformations around a desired data region, say a combination of the control variables which feature for eg. a LD_{50} (or $P(DCS) = 0.5$ or simply the median of our dive profiles) in terms of diving depth P and bottom time T:

Normalization: $P^\# = P / P_{50}$ and $T^\# = T / T_{50}$

The shifting is done then via analogous to eq. (8):

$$p = P^\# - b \text{ and } t = T^\# - b$$

(pls. cf. as well [1], p. 328 -330)

To get a grip on the magnitude of this shifting via b we exploit the PrT criterion (→ $P * T^{1/2} = \text{const.}$) and eliminate one control variable with:

$$P^2 * T = \text{const.}^2 = c^2 \rightarrow T = c^2 / P^2$$

and put that into the bifurcation set (eq. (6)), yielding:

$$0 = 4 * P^3 + 27 * c^4 * P^{-4} \quad (6')$$

thus preserving the canonical parametrized form (eq. (7)). The new constant $27 * c^4$ could be used to re-determine (or to confirm) the old threshold value of 25. In any case (6') gives us an ugly little root if we solve for P:

$$P = \sqrt[7]{\left(-\frac{27}{4}\right) c^4}$$

and we receive many ghastly complex solutions, but one nice real which we may exploit and identify with the direction and magnitude of the required shift: $P = -$ (ca.) 8.266 [Bar].

The 5 catastrophe flags

To decide if a certain behavior displays catastrophic modes, one uses the five, so-called „classical catastrophe flags“, the remaining three could be observed *before* a catastrophe happens ([5], p. 108).

Sudden jumps: the state variable may exhibit a sudden jump with a small variation of any control variable (Path 2 in Fig. 5; red arrows in Fig. 8). Say we get DCS with just a little bit more of dehydration or workload. It is exactly this behavior that makes the cusp attractive: from dives with regularly safe conditions, but already sub-clinical DCS, we get with minor variations a sudden display of full-blown symptoms.

Hysteresis: when the state variable jumps, say from the lower to the upper sheet of the cusp by a certain combination of control parameters, the reverse may not be true, i.e. the jump will happen at other values of the control parameters due to the memory of the system:

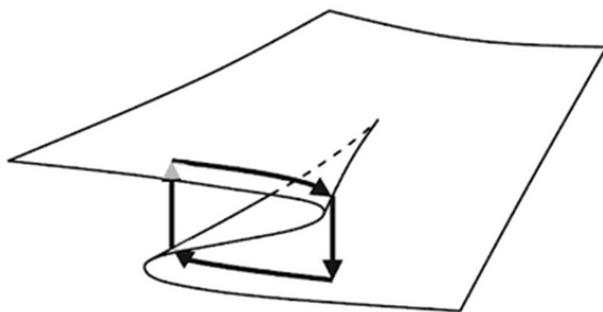


Figure 7: Hysteresis cycle for a cusp catastrophe

As far as a manifested DCS is diagnosed ($P(\text{DCS}) = +1$, the upper sheet of the cusp fold) there will be probably no jump back. So this catastrophe flag will remain relatively uncertain for DCS.

Sensitivity & Divergence: for elementary catastrophes there is sensitivity on some combinations of control variables, i.e.: how robust is the system against perturbations.

Bimodality: in the neighborhood of a catastrophe the system may exhibit 2 or more distinct types of behavior, i.e.: 2 or more values of a scuffproof state variable.

Inaccessibility: the „middle sheet“ of the cusp, pls. cf. the gray-shaded area in Fig.5 (or green in Fig. 8); that is: the state variable may not have observable values from this range. These could be the „marginal“ cases of DCS.

There is a nice graphical overview from Zeeman himself illustrating the 5 flags (Trinity Lecture, 1995):

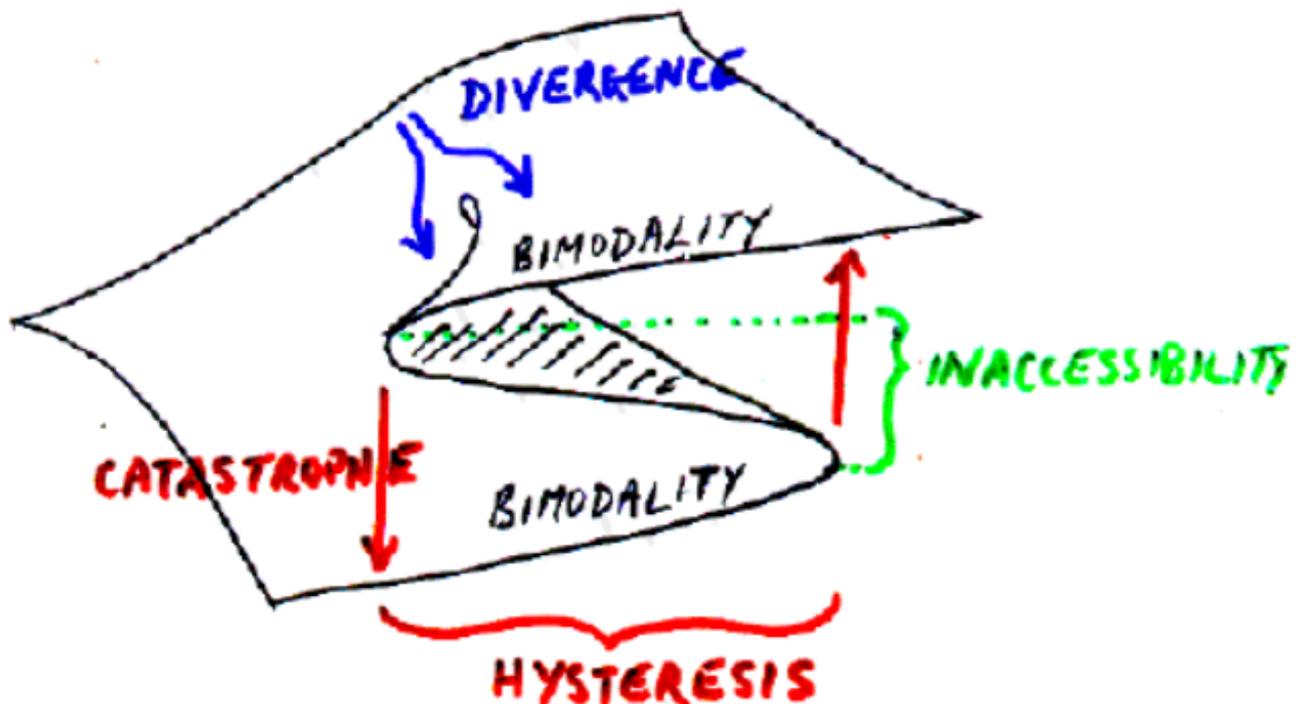


Figure 8: Qualitative properties of a cusp: the 5 flags (Source: Zeeman 1995)

There are as well more flags to a catastrophic behavior: these are the 3 so-called „diagnostic flags“: divergence of linear response, critical slowing down and anomalous variance ([5], p. 108 – 110; and [10], p. 158 - 183), which could be covered in a next step.

Take-home Messages

- There are quite interesting aspects which warrant further investigation, provided we could arrange dcs data from many thousands of dives along the 2 control axes of an inert gas dose and with the new parameters, for eg. de-hydration, workload or $VO_{2,max}$ etc.. So, basically:
- If we manage to map dcs data to the cusp bifurcation set: good for the data! If not, we drop the whole idea or:

- we try the next, more complex catastrophe type, i.e.: the swallow tail, which looks like that ([2a], p.64):

$$F(x, u, v, w) = \frac{1}{5} * x^5 + \frac{1}{3} * u * x^3 + \frac{1}{2} * v * x^2 + w * x \quad (9)$$

- If, then, DCS is no match, then, maybe oxygen toxicity of the central nervous system (CNS-OT). Thom pointed out the action of O₂ on organogenesis ([2a], p. 237 - 241): there as well is a clear cusp catastrophe. Regularly, the onset of CNS-OT and then the sudden development of the seizure could follow the cusp-path: one variable being an O₂ dose (for e.g.: timeⁿ * pO₂^c), the others CO₂ load, metabolic rate and the like.
- Be it how it may: Catastrophe Theory helps in understanding that for sudden and dramatic changes in a system no sudden and dramatic changes in the underlying control variables are needed, instead: already very minor, smooth changes could result in gigantic and unexpected systems-behavior, i.e. the sudden jump from silent bubbles to a well-deserved stay in the deco chamber.

In closing, Ilya Prigogine once wrote in his book: “Order out of Chaos”, on p.203:

„The term „counterintuitive“ was introduced at MIT to express our frustration:

„The damn thing just does not do what it should do!“

We are trained to think in terms of linear causality,

but we need new „tools of thought“:

one of the greatest benefits of models is precisely

to help us discover these tools and learn how to use them.“

Literature: references with comments & further reading

[1] Poston, T. & Stewart, I. N (1978) Catastrophe Theory and its Applications, London, Pitman, ISBN 978-0-486-69271-5

(with a „Bibliography of catastrophe theory“ on 19 pages, plus 227 references)

[2] Thom, René: Stabilité Structurelle et Morphogénèse, W. A. Benjamin, Reading, MA, 1972;

[2a] English translation: Structural Stability and Morphogenesis (by David Fowler), W. A. Benjamin, Reading, MA, 1975.

(There are a lot comments to it, for e.g. two of the most prominent in

- [9] on p. 89: „ ... Zeeman, an ardent admirer of this style, observes that the meaning of Thom's words becomes clear only after inserting 99 lines of your own between every two of Thom's.“
- Or, from Hermann Haken, my well-nigh doctoral adviser in his famous book „Synergetics“ (1977, Springer) on p. 313: „Thom's book requires a good deal of mathematical background. Our „pedestrian's“ approach ... entirely different from Thom's.“)
- And, finally, by C. H. Waddington in the foreword to the English Edition [2a], p. XV: „And it is difficult mathematics.“

[3] Zeeman, E. Christopher (1977) *Catastrophe Theory: Selected Papers*. Reading, MA: Addison-Wesley.

[4] Zeeman, E.C. (1972) Differential equations for the heartbeat and nerve impulse. In: C.H. Waddington (Ed.) *Towards a Theoretical Biology* (Vol. 4, pp. 8 – 67), Chicago: Edinburgh University Press

[5] Gilmore, Robert (1992) *Catastrophe Theory*, 34 pages in "Encyclopedia of Applied Physics, Vol. 3" VCH Publishers

(a pragmatic & concise program overview, brief history, short glossary)

[6] Arnol'd, Vladimir Igorevich (ed.) (1993) *Dynamical Systems V: Bifurcation Theory and Catastrophe Theory*, Springer, Part II, p. 207 – 271

(a historical overview and 125 further references)

[7] Lu, Yung-Chen (1976) *Singularity Theory and an Introduction to Catastrophe Theory*, Springer, ISBN 3-540-90221-X

[8] Brown, Courtney (1995) *Chaos and Catastrophe Theories*; Series: Quantitative Applications in the Social Sciences, Vol. 107, Sage, ISBN 0-8039-5847-1

(a nice little booklet, which covers both these ephemeral related topics with applications from the „soft“ type; and there is even more to it from Courtney:

[8a] Brown, C (1995) *Serpents in the Sand: Essays on the Nonlinear Nature of Politics and Human Destiny*, The University of Michigan Press

[9] Arnol'd, V. I. (1986) *Catastrophe Theory*, Springer, ISBN 3-540-16199-6

(108 pages with ca. 70 graphs, only a hand full of formulas, for the laymen in calculus)

[10] Gilmore, Robert (1981) *Catastrophe Theory for Scientists and Engineers*, Wiley, ISBN 0-471-05064-4

(in-depth, complete, with mathematical rigor, but with infinite many graphs and applications: a genuine treasure chest on 666 pages!)

[11] Saunders, Peter Timothy (1980) An Introduction to Catastrophe Theory, ISBN 0-521-23042-X

[11a] for my german readers: die leicht gekürzte deutsche Übersetzung: Saunders, P. T. (1986) Katastrophentheorie, Eine Einführung für Naturwissenschaftler, Vieweg, ISBN 978-3-528-08939-9

(mit einfachen Beispielen und auch philosophischen Bemerkungen)

[12] Cobb, Loren (April 1980) Estimation Theory for the Cusp Catastrophe Model, REVISED EDITION1, (Online at [https://mpr.ub.uni-muenchen.de/37548/MPRA Paper No. 37548](https://mpr.ub.uni-muenchen.de/37548/MPRA_Paper_No.37548)) resp. there, more elaborate:

[13] Cobb, Loren; Watson, Bill (1980) Statistical Catastrophe Theory: an Overview, Mathematical Modelling, Vol. 1

Interestingly enough, the book: „On Growth and Form“ by D’Arcy Wentworth Thompson (1917, a new edition 1945 by Macmillan) plays a prominent role in nearly all of the references. So for eg. in [2a] (chpts. 1, 7, 8) or [11] (chpt. 8).

Keywords: dcs, decompression sickness, cusp, catastrophe, catastrophe theory, bifurcation, Riemann-Hugoniot

(*): SubMarineConsulting: www.SMC-de.com, Version from: 2019-11-07, Filesize: 602 kB

Source: C:\DIVE\Papers\In_Vorbereitung\Cusp_Catastrophe\Essay_cusp_NEW.docx

Status: DRAFT, # pages: 15 , # words: 4187

post-publication comment on:

Dive Risk Factors, Gas Bubble Formation, and Decompression Illness in Recreational SCUBA Diving: Analysis of DAN Europe DSL Data Base

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01587>

This work of European DAN is not only intellectually stimulating but as well of paramount importance to the further development of safety for recreational divers. It may also help to mitigate the somewhat heated and superfluous debate in the (technical) diving community as to which decompression model (perfusion, diffusion, dual phase) or which dive computer might be the best.

Nevertheless there are a couple of boundary conditions which will probably evade the non-diving reader.

1a) The 83 : 17 relation of participants, which yields a ratio of ca. 4,9 of males over females is an imbalance which probably may not reflect properly the European recreational divers population. This might be a first indicator of a biased database.

1b) As well the „mean“ age seems to reflect a somewhat non-standard diver population; the majority of divers being usually younger. As per nearly all human activities, there is a drop-out rate: for ca. one instructor/TEC/advanced diver there are approx. 100 freshman. So here the beginner and intermediate diver population seems to miss.

1a & 1b could be checked against the statistics of the issued diver certifications of the major training agencies like PADI and/or SSI.

2) 320 cases of DCS would yield:

- an average rate of ca. 64 p.a.
- and an overall rate of 320 / 39.099 of ca. 0,81 % which, both, are substantially more than reported elsewhere (ca. 1: 10.000 in [1], p.544; and as well in [2], p. 151).

Certainly, the divisor is not known and the rates are taken as a surrogate. And, as well, other, more elaborate studies, would reveal, for eg.: **Decompression illness in divers treated in Auckland, New Zealand, 1996-2012**. (Ref.: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24687481>): that there are 520 DCI cases in 17 years, which would equate to ca. 31 p.a. and thus yield a factor of ca. 2 lower.

Similarly a recent study showed (Ref.: Svendsen Juhl C, Hedetoft M, Bidstrup D, Jansen EC, Hyldegaard O. Decompression illness treated in Denmark 1999–2013. *Diving and Hyperbaric Medicine*. 2016 June;46(2):87-91.) 205 DCI cases over 15 years; reduced to recreational cases, the rate is ca. 11 p.a. The factor male/female ca. 3.8. This study reveals that ca. 80 % of the DCI victims are up to an intermediate certification level, and ca. 50 % consider themselves as with relatively little experience.

Another example, albeit taken from the military diving community (**DJRS, the Dive Jump Reporting System of USN** (United States Navy); Ref.: <http://divingresearch.scripts.mit.edu/militarydivingdata/>) which sports with with 4 cases of DCS and 5 of missed decompression out of 768,851 dives, collected from 2008 to 2015.

This might be as well a 2nd. indicator of a biased database.

3) 39,099 dives per 2,629 divers would yield ca. 15 dives per diver. It might be somewhat speculative, but 15 dives out of an average diving career do probably not represent an average sample concerning both dive depth and dive time. Thus this could imply that the uploaded samples have been the most recent ones or the most spectacular ones (with a topical tendency from October 2017 of 63.248 from 5.326 divers, giving an average of 12, sinking). Especially when considering that approx. 15 to 20 individuals, each donating in the average ca. 500 dives, thus contributing a substantial amount of profiles and thus decreasing the average of the rest.

4) Studies with volunteer participants regularly imply often a self-selected group, the sample usually not reflecting the real population. This could imply another, i.e. the 3rd. bias: participants which like to deal with the technical peculiarities of transferring log-files from a dive computer to a PC, then converting the stored dive log-files to a DAN compatible format, then uploading these files from the PC to the DAN DSG portal and finally filling in the ca. 20 statements per uploaded dive.

5) The average dive depth / dive time given as mean \pm standard deviation, would imply, at least for a somewhat naive reader, sort of normal distributions for these variables, which would be, in my personal experience,

relatively improbable. Otherwise the study fails to reveal the statistical connection between diver B doing a dive in country X to depth z with a buddy-pair C, diving in country Y to depth to $0,5 * z$ with diver A (me) contributing in country DE a controlled dive in a decompression chamber to depth $2 * z$, the mean being clearly z, but obviously of only limited intellectual value (Ref.: https://www.divetable.info/skripte/50m_deco.pdf. The funny side of things is that these profiles normally earn a big yellow smiley in the DAN DSG portal, thus warning of an already medium DCS risk).

For eg. the above cited USN study reveals clearly skewness, with a slope (note the log scale!) from shallow to deep and more probably of a certain Poisson type than Gaussian. Thus, a frequency analysis in appropriate classes (depth bins with 5 or 10 m resp. for the dive time) would have given a clearer picture.

6) As well the mean of 27.1 m (range 5–104), where the .1 is clearly a statistical artefact, which could have been dropped happily: dive computers tend to give the first digit not precisely. Anecdotal reports [3], [4] and controlled laboratory experiments [5], [6] indicate this very clearly. Additionally, a lot of dive computer manufacturers fail to demonstrate a proper temperature drift compensation for their products.

The value of 27 could be as well an indicator of a certain bias: the suspected missing of beginner and intermediate dive-profiles, being in the 6 to 18 m range for beginners and in the 15 to 30 m range for intermediate divers. Even more so, when considering beginner and intermediate divers as relatively neutral to decompression-theories, -calculation and -tables; some of them not even owning a dive computer.

7) To exclude Trimix makes sense, probably there is another mechanism of bubble arterialisation and other inert gas kinetics due to Helium (for the non-diving reader: Trimix is a breathing gas, consisting in various fractions of the 3 gases Oxygen, Helium and Nitrogen (thus Tri-), whereas simple compressed Air or Nitrox are not.) As well the ZH-L framework from Buehlmann et al. [7], used in this study, has been, up to now, not really challenged with trimix for multi-level diving. (And b.t.w. this algorithm is diverging around a compartment half-time of 1,005 min, which, used unmodified, would render it useless for the intended analysis of breathhold diving).

8) Dives, for eg. to 104 m depth on air, will yield profiles of an extreme spike form which are probably not in line with common diver behaviour, be it recreational, military or commercial: the limitation of breathing gas supply makes bottom times very short, especially when dived with a single tank; which the study tacitly implies. If done otherwise, the study should reveal it.

9) Also, for the non-diving reader: a dive on Air in the 3-digit range is subjected to inert gas narcosis, which is likely to start beyond 40 m and oxygen toxicity, beyond 80 m, which makes these profiles, operationally wise, not only relatively dangerous, but, to put it mildly, somewhat „experimental“: the ascent and descent rates are not in line with standard procedures. Thus one could question the statistical wisdom of not excluding these experimental dives.

10) In conclusion, the study leaves open a couple of questions resp. room for improvement:

- ➔ Diver biometrics and dive circumstances are entered through the divers themselves. How is the quality of these inputs assessed?
- ➔ Screening for PFO or other individual susceptibilities?
- ➔ Blinding of operators, receiving the doppler signals? Control group?
- ➔ Table 3 reveals a conundrum of multi-collinearity: how is this addressed?

11) Nobody should be caught by surprise, that the mapping of a deterministic perfusion model (ZH-L) to a stochastic phenomenon (DCS) is of only limited success. Thus the relative failure of printed decompression tables or dive computers. Once again, as per remark # 7, the ZH-L (or, basically all perfusion models) was never really challenged with extended multi-level or reversed dive profiles, common in recreational diving. The described modifications ([7], p. 157, 196) to allow for real-time calculation being marginal: the clear message is that the M-values (or, in ZH-L parlance, the a- & b coefficients) derived from box-profiles, and, maybe, the spectrum of compartment half-times need repair.

This even more so, when considering that dive computers are „black boxes“ for the diver: leaving the user completely in the dark, how a decompression algorithm is implemented and which constants are used. Thus it is also of no surprise that for a given box-profile the calculated stop times for the decompression stops differ easily with a factor of 4 to 8; even if the manufacturers in question claim to have implemented a „real ZH-L“ (Ref.: <https://www.divetable.info/skripte/HBO-RMT.pdf> and [10]).

One of the really important findings is, that the dives seem to be basically in the „safe zone“: thus nobody should be caught by surprise, that the group of „medium“ compartments is involved. The mentioned slower ascent rate, although not specified in the study, and „deep“ or deeper and longer stops, give the fast compartments time to de-

saturate while the medium and slow ones still saturate. For real world recreational diving, the take home message seems to be:

„If you go slow, go even slower!“ (especially in the shallow 9 to 6 m zone).

12) Now, finally in taking points # 1) to 4) as a basis, chances are that there could be a bias of the actual database; one of the confounding factors being diver experience and another one the liking of handling purely technical problems. My private speculation and personal experience is, that this relatively special group of highly trained and motivated (mediterranean) divers, which dedicates a lot of their spare time for the DAN DSG portal tends to dive in a way that is, in some way or another, disjunct with the population of recreational divers, thus prone to a higher rate of DCS.

I would not go so far as with Altman, who states: „Misuse of statistics is unethical, as well it is shoddy science.“ [8]; but clearly a couple of tenthousand non-DCS dives with moderate time/depth profiles have to be added. As well a functional peer-review process, in-line with established statistical thinking would be a benefit.

References:

[1] Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving, Alf Brubakk, Neuman et al., 5 th Ed. Saunders,

ISBN 0-7020-2571-2

[2] Bove and Davis' DIVING MEDICINE, Alfred A. Bove, 4 th. edition, Saunders 2004,

ISBN 0-7216-9424-1

[3] https://www.divetable.info/skripte/Ox_Tox.pdf

[4] https://www.divetable.info/skripte/G2_OX_TOX.pdf

[5] UHMS: ASM 2012, Session F118; NOT ALL ARE CREATED EQUAL – OPERATIONAL VARIABILITY IN 49 MODELS OF DIVING COMPUTER. Azzopardi E, Sayer MDJ, UK National Facility for Scientific Diving, Scottish Association for Marine Science, Dunstaffnage Marine Laboratories, Dunbeg, Oban, Argyll, Scotland

[6] Elaine Azzopardi and Martin Sayer (2012) Estimation of depth and temperatures in 47 models of diving decompression computer. International Journal of the Society for Underwater Technology, Vol. 31, No. 1, pp 3 - 12

[7] Tauchmedizin, Albert A. Bühlmann, Ernst B. Völlm (Mitarbeiter), P. Nussberger; 5. Auflage in 2002, Springer, ISBN 3-540-42979-4

[8] Douglas G. Altman: Misuse of statistics is unethical, BMJ, 281, 1. Nov 1980, p. 1183

[9] Edmonds, Carl; Bennett, Michael et al.(2016) Diving and Subaquatic Medicine, Fifth Edition, CRC Press; ISBN 978-1-4822-6012-0

[10] Salm, A. (2012) Variations in the TTS: where do they come from? International Journal of the Society for Underwater Technology, November 2012. SUT, Vol. 31, No. 1, pp. 43 - 47, 2012

Pi mal Daumen

Ungenauigkeiten bei Tauchcomputern

Tauchcomputer sind heute Standard. Viele Sporttaucher verlassen sich blind auf ihre Angaben. Doch wie genau sind sie wirklich? Und warum ist die gute alte Dekotabelle in der VDST-Ausbildung noch immer fester Bestandteil? Computer-Spezialist Albrecht Salm erklärt die Hintergründe.

Vollelektronische Tauchcomputer gibt es seit den 1980er Jahren. Aus den Messwerten von Druck (Tiefe), Tauchzeit und Temperatur versuchen sie anhand eines einprogrammierten Dekompressionsmodells, Vorhersagen über eine halbwegs sichere Dekompressionsphase zu machen. Die Wogen über die damals vermutete mangelnde Verlässlichkeit der Geräte haben sich zwischenzeitlich geglättet: Der Tauchcomputer ist zum Standardausrüstungsteil des Sporttauchers geworden und ersetzt mittlerweile Taucheruhr und Tiefenmesser. Allerdings hat er auch die Benutzung der Dekompressionstabelle ersetzt. Dies wird auch in den Lehrinhalten der meisten großen Ausbildungsorganisationen reflektiert, Themen zur Dekompressionsphysiologie sind – wenn überhaupt – nur untergeordnet zu finden. Die so entstandenen Wissenslücken sind durchaus erkannt worden und werden nun von eben jenen Organisationen mit zahlreichen Zusatzkursen im Bereich des technischen

T a u c h e n s zwar vollständig und nachhaltig, aber eben auch kostenpflichtig gestopft. Eine Ausnahme bildet der VDST, hier werden

diese Themen vom Beginner bis zum Tauchlehrer nach wie vor in Theorie und Praxis gelehrt, die Dekotabelle ist fester Bestandteil der Ausbildung.

Bei einem Ausfall des Tauchcomputers sind sich viele Taucher im Unklaren über die aktuelle Tiefe, die Zeiten und den individuellen Dekompressionsstatus. Hier hilft nur ein vernünftiges Ausfallkonzept: Ein „Back Up-System“ in Form eines zweiten Computers, oder Bottom Timers, der Einsatz von Taucheruhr und Tiefenmesser oder eben die langsam in Vergessenheit geratene Deko-Tabelle. Der Tauchpartner kann hier nur eingeschränkt nützlich sein, da er, vor allem bei guter Sicht, nicht ständig auf gleicher Tiefe ist. Besonders bei Wiederholungstauchgängen stößt dieses Konzept an seine Grenzen.

Die Tauchcomputer-Hardware als solches ist im Laufe der letzten 30 Jahre immer zuverlässiger, leistungsfähiger und preiswerter geworden – sicherlich hat auch das zum Siegeszug über die Deko-Tabellen beigetragen. Allerdings haben sich andere Dinge so gut wie nicht geändert: Zum einen der Mensch, der die Geräte benutzt und programmiert und dabei Fehler machen kann, zum anderen die zugrunde gelegten Dekompressionsmodelle.

Perfusionsmodelle

Bis auf wenige Ausnahmen arbeiten die meisten Tauchcomputer nach dem sogenannten Perfusions-Modell. Perfusion bedeutet Durchblutung, die physiologischen Grundlagen dazu hat John Scott Haldane anhand von rund 1.000 trockenen Druckkammertauchgängen mit circa 80 Ziegen bereits 1907 formuliert. Hieraus hat sich die erste Dekompressionstabelle der Welt für oberflächenversorgte Lufttauchgänge abgeleitet. Das Format mit Tiefe, Zeit und den üblichen Stopps hat sich bis heute erhalten. Der Unterschied zur Berechnung in einem Tauchcomputer besteht eigentlich in nur zwei Punkten:

Dekotabellen gehen von einem Rechteck-Tauchprofil aus. Hieraus ergeben sich gegenüber dem wahren Tauchprofil Sicherheitspolster – diese hat der Tauchcomputer natürlich nicht.

Fotos: Gerald Nowak, Nina Zachiesche





Ein Tauchcomputer kann viel. Aber nicht wissen, was der Nutzer vor dem Tauchgang macht

Nur die Abtastrate des aktuellen Tauchprofils durch die circa alle drei Sekunden stattfindende Druckmessung ermöglicht die Berechnung der beim Sporttauchen üblichen Multi-Level-Profile.

Zusätzlich hat der Tauchcomputer den unschätzbaren Vorteil, den Tauchgang relativ genau in einer Logbuchdatei zu protokollieren – und das völlig ungetrückt, im Gegensatz zum Taucherhirn, das unter Umständen von der Inertgasnarkose betroffen ist.

von fünf bis 75 Minuten, in modernen Tauchcomputern kann man von acht bis 20 Kompartimenten und einem Halbwertszeitenspektrum von 2,5 bis circa 900 Minuten rechnen. Das Ergebnis bedeutete für den Taucher immer kürzer werdende Nullzeiten-Limits beziehungsweise länger werdende Dekompressions-Stopps.

Einige Tauchcomputer lassen weitere Modifikationen zu. Ihre Rechenmodelle werden von der Umgebungstemperatur, dem Luftverbrauch oder der Herzfrequenz beeinflusst. Manche Computer haben auch sogenannte „Konservativismus“-Faktoren eingebaut, die zusätzliche Tiefen-Stopps, das Alter, die körperliche Fitness oder eine vorhandene Fettleibigkeit durch Eingabe des BMI (Body Mass Index) berücksichtigen.

Im Gegensatz zu den Perfusionsmodellen und ihren Spielarten (bezeichnet als ZH-L, ZH-L ADT, ZH-L mit Gradientenfaktoren, RDP, DSAT, modifizierter Haldane, Haldane „embedded“, U.S.N., ...) versuchen Blasenmodelle die bei der Dekompressionsphase entstehenden Inertgasblasen zu berechnen. Oft sind sie bei den technischen Tauchern sehr beliebt, wie zum Beispiel das

VPM (Varying Permeability Model), haben aber nur einen geringen Marktanteil und oftmals den Nachteil einer völlig ungeprüften Datenbasis und eines ziemlich kryptischen und unveröffentlichten Algorithmus' (RGBM, Reduced Gradient Bubble Model).

Anpassungen des Perfusionsmodells an aktuelle Erkenntnisse aus der Dekompressionsphysiologie erfolgten über die Erhöhung der Anzahl und der Inertgas-Empfindlichkeit der Kompartimente (rechnerische Modellgewebe). Bei Haldane waren es fünf Kompartimente mit Halbwertszeiten

InterDive TAUCHEN, SCHNORCHELN & REISEN
Besuchen Sie uns vom 19.09. - 22.09.13
Messe Friedrichshafen

INDONESIEN

Nabucco Island Resort
Oktober/November 2013
13 Nächte im Bungalow
(Doppelbelegung)
inkl. Flug mit Singapore Airlines,
Transfer, Halbpension
pro Person **ab € 2.069,-**

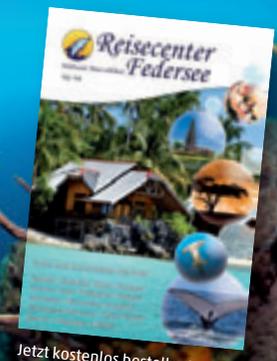
Nabucco's Nunukan Island Resort
Oktober/November 2013
13 Nächte im Bungalow
(Doppelbelegung)
inkl. Flug mit Singapore Airlines,
Transfer, Halbpension
pro Person **ab € 2.069,-**

GOZO

Grand Hotel
September/Oktober 2013
7 Nächte im Doppelzimmer inklusive
Flug mit Air Malta, Transfer, Frühstück
pro Person **ab € 499,-**

TOBAGO

Nabuccos Speyside Inn
Oktober 2013
14 Nächte im Superior Doppelzimmer
inklusive Flug mit Condor, Transfer,
Frühstück
pro Person **ab € 1.459,-**



Jetzt kostenlos bestellen!

Reisecenter Federsee
Hilfsamt "Wanderer"

Schussenriederstr. 54
D-88422 Bad Buchau
Tel.: +49 (0)7582/9320790
Fax: +49 (0)7582/93207990
E-mail: reisen@reisecenter-federsee.de
Internet: www.rcf-tauchreisen.de

Dekotabellen gehören fest zur VDST-Ausbildung

„Dieser Artikel macht klar, dass wir bei der Verwendung von Tauchcomputern unser Hirn nicht abschalten können, und vor allem Hintergrundwissen zur kritischen Beurteilung der Anzeigewerte von Nöten ist. Der VDST hält, trotz aller Kritik und „Modernisierungsbemühungen“ anderer Tauchausbildungsorganisationen nach wie vor daran fest, dass alle VDST-Taucher, vom Beginner bis zum Tauchlehrer, mit der Dekotabelle in Theorie und Praxis umgehen können.“



Theo Konken, Bundesausbildungsleiter

Individuelle Einstellmöglichkeiten

Die möglichen Modifikationen bei einigen modernen Tauchcomputern nach Alter oder Fitnessfaktor müssen vor dem Tauchgang eingestellt werden. Temperatur und Luftverbrauch oder auch die Herzfrequenz misst der Tauchcomputer selbstständig und auch relativ unbestechlich. Bei den vom Taucher zu tätigen Eingaben ist dann aber eine gewisse Ehrlichkeit gefordert: Bei Alter und BMI sind die Zahlen relativ klar, bei Angabe der Fitnessfaktoren gehört eine gewisse Portion selbstkritischer Einschätzung dazu. Die Auswirkung auf die Dekompressionsphase ist für alle diese Faktoren in etwa vergleichbar: Die „Nullzeiten“ werden verkürzt und Dekompressionsstopps verlängert oder um eine oder auch mehrere „Etagen“ tiefer gelegt. Darüberhinaus wird dann die Entsättigung während der Oberflächenpause verzögert berechnet. Damit startet der nächste Tauchgang bereits mit einer höheren Anfangssättigung.

Für das tatsächliche Tauchprofil in einer Gruppe ergibt sich damit automatisch ein oft diskussionswürdiges Auseinanderklaffen der Dekompressionsphase, welches mit jedem weiteren Wiederholungstauchgang



Man kann es auch übertreiben. Aber gerade für Deko-Tauchgänge ist ein Back-Up wichtig

noch zunimmt: Die einen könnten schon aus dem Wasser, während andere in der Gruppe noch Stopps einhalten müssen. Vorausgesetzt, es ist noch genügend Atemgas da und keiner friert, ist die Idee der etwas tieferen und verlängerten Stopps sicherlich der Gesundheit des Tauchers dienlich. Es kann ja auch Spaß machen, am Rifdach noch eine Weile die Tierwelt zu beobachten. Klare Absprachen sind nötig und natürlich wird der Tauchpartner nicht am Ankerseil im Stich gelassen. Fast alle Tauchcomputer reagieren nämlich ziemlich allergisch mit viel Gepeise und einer technischen Blockade von 12 bis 24 Stunden, wenn vorgeschriebene Stopps nicht eingehalten werden.

Üblicherweise sind ganz hinten im Handbuch des Tauchcomputers die Kompartimente, die benutzten Halbwertszeiten und die Konservativismus-Faktoren kurz beschrieben. Dort finden sich meist auch Hinweise, dass man bei häufigeren Wiederholungstauchgängen, typischerweise auf Tauch-Safaris, einen tauchfreien Tag einlegen um dem Körper Gelegenheit geben sollte, das angesammelte Inertgas loszuwerden. Oft sind auch nützliche Hinweise auf eine ausreichende Hydrierung zu finden, das heißt die Versorgung des Körpers mit genügend Flüssigkeit, wobei nicht das „Deko Bier“ gemeint ist. Trotz der vielfältigen neuen Einstellmöglichkeiten kann der Tauchcomputer aber nichts wissen von Einnahme von Medikamenten, Impfungen, Alkohol vom Vortag oder ob der Taucher noch kurz vor dem Abtauchen eine geraucht hat.

Diese vielen neuen Konservativismus-Faktoren haben einen gemeinsamen, aber entscheidenden Makel: Es gibt zu wenige bis gar keine dokumentierten Messungen an einer ausreichenden Zahl von Tauchern und Tauchgängen. Allerdings hindert dieser Makel die Hersteller nicht, trotzdem vollmundig für die vermeintlich erhöhte Sicherheit ihrer Produkte zu werben.

Mutter Natur ist zickig

Die vom Tauchcomputer gemessenen Werte (Druck, Zeit, Temperatur) unterliegen, wie alle Messwerte, einer gewissen statistischen Schwankung: dem zufälligen Messfehler. Das hat Mutter Natur so eingerichtet und dagegen ist kaum ein Kraut gewachsen. Weiterhin gilt das für uns Taucher ziemlich böse Gesetz der „Fehlerfortpflanzung“. Die gemessenen Fehler pflanzen sich höchst unangenehm in den darauffolgenden Berechnungen der



Ein Tauchgang, drei Computer: Die Messwerte und Berechnungen unterscheiden sich

Restnullzeiten oder der Länge der Dekompressionsstopps fort. Die Grenzen der Ingenieurskunst macht Bild 1 deutlich.

Wir sehen drei unterschiedliche Tauchcomputer, die alle behaupten, ein traditionelles Perfusionsmodell zu rechnen. Das Bild entstand während eines ersten Tauchganges am Tag, es war also kein Wiederholungstauchgang. Auch wurden keine Konservativismus-Faktoren benutzt. Die Daten dieses ziemlich harmlosen Tauchganges sind: maximale Tiefe circa 31 Meter, aktuelle Laufzeit circa 42 Minuten. Wir haben in diesem Bildchen alle Unwägbarkeiten auf einen Blick: die Schwankungen der Messwerte sowie die unterschiedlichen Ergebnisse der Berechnungen; hier zusammengefasst als Tabelle:

Computer: Hersteller / Typ	Angezeigte Tiefe [m]	(+) Rest-„Null“-Zeit / (-) Stopp-Zeit [min.] (*)
COCHRAN: EMC-20 H	16,4	+ 5
VR Technology: NHeO3	16,8	- 3 (1/ 3 + 2/ 17)
UWATEC: Aladin TEC 2G	16,9	+ 10

(*) NHeO3 forderte bereits einen tiefen Stopp auf 17 Meter für 2 Minuten sowie einen Deko-Stopp auf 3 Meter für 1 Minute.

Fazit: Das digitale Display des Tauchcomputers (insbesondere die Nachkommastellen) suggeriert dem unbedarften Taucher eine Genauigkeit, die so gar nicht gegeben ist. Daher sollten wir im Umgang mit Tauchcomputern vor allem zwei Dinge nicht vergessen:

- ◆ Tauchcomputer können ziemlich viel; sie können sogar Fehler machen.
- ◆ Die gemessenen Werte sind mit dem Messfehler geschlagen, die daraus berechneten Dekompressionsempfehlungen haben durchaus den Charakter eines Schätzwertes.

Albrecht Salm



Prof. Dr. Albrecht Salm ist Physiker und Computer-Spezialist. Er taucht seit 1976, ist Fachautor und Referent unter anderem für die GTÜM (Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin) und für den Bereich Technisches Tauchen in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Infos: www.divetable.info

Decompression calculations for trimix dives with PC software: variations in the time-to-surface: where do they come from?

Albrecht Salm

SubMarine Consulting Group, Obertorstrasse 19, DE-73728 Esslingen, Germany

Abstract

Dive computers for mixed gas diving and PC software for decompression calculations are often considered as ‘black boxes’ to the diver: they perform part of their function – the calculation of a decompression schedule – but leave the user in a somewhat nebulous state about the relative safety of this schedule. This is because, in reality, the technology, underlying algorithms and utilised constants are not clearly documented, especially if the so-called gradient factors come into play. Gradient factors are sometimes praised as safety knobs for the decompression schedules, or as a unique selling proposition for these black boxes. This paper discusses the impact of gradient factors on the calculation of decompression times, as well as how the different implementations of dive profile data can influence these calculations.

With one inert gas in the breathing mixture, the analytical expression for the decompression time is t_d . However, if there is more than one inert gas present, the decompression time must be calculated numerically. Therefore 480 square dive-profiles were analysed in the technical/recreational diving range using one freeware, two commercially available software packages and one private software with numerical methods. There are significant differences in the calculation of the decompression times with trimix gases, depending on the helium percentage. In the present analysis, these differences do not come from variations in the decompression algorithms but rather from different implementations of these numerical methods. Presently, a definitive answer cannot be given about the origin of these variations but the user should be aware that these exist.

Keywords: decompression, diving theory, mixed gas, models, simulation, technical diving, trimix

1. Introduction

Time to surface (TTS) is normally the sum of the stop times over all decompression stops, plus the ascent time. The algorithm accounting for inert gas loading during an exposure to overpressure is implemented using software for a dive computer or desktop-based decompression software. A gradient

factor is normally used to manipulate the tolerated inert gas partial pressures in the various theoretical body tissues. Therefore, a decompression method with prolonged stops can be forced using pure mathematics but is not directly related to any physiological issues. Perfusion decompression models exist where a theoretical blood perfusion element defines the boundary conditions. These deal mainly with the dissolved gas phase: inert gas bubbles are not considered within these models but are described in other literature (see Boycott et al., 1908; Workman, 1965; Müller and Ruf, 1966, 1971; Schreiner and Kelley, 1971; Bühlmann, 1983, 1993; Hahn, 1995; Bühlmann et al., 2002). Other terms used for this paper are REC for recreational diving (i.e. SCUBA-diving with air and normally within no-decompression limits), and TEC for technical diving with a lot of equipment and usually using mixed gases. The mixed gas employed usually contains helium (in a trimix: oxygen, nitrogen, helium) and decompression stops where oxygen enriched air (EAN, Nitrox) and/or pure oxygen can be used.

Classical, perfusion-limited decompression algorithms were first described by Boycott et al. (1908) but tend now to be termed Haldane models after one of the co-authors, JS Haldane. The Haldane models describe the absorption of one inert gas per compartment through a mono-exponential function; the classic Haldane equation is:

$$P_t(t) = P_{alv0} + [P_{t0} - P_{alv0}] e^{-kt} \quad (1)$$

where $P_t(t)$ is the arterial pressure of the gas in the tissue, P_{t0} is the initial partial pressure of the gas in the tissue at $t = 0$, P_{alv0} is the constant partial pressure of the gas in the breathing mix in the alveoli, k is a constant depending on the type of tissue, and t is time.

One mainstream source for these perfusion algorithms is in Hills (1977), which gives Equation 1 and discusses the relationship between the tissue half-times and the perfusion rate. The decompression time (t_d) for unary mixes (i.e. only one inert

E-mail address: director@divetable.de

gas, e.g. enriched air, nitrox, EAN or heliox) can be calculated directly with the Haldane equation. The analytic expression for the decompression time ($t = t_d$) is:

$$t = -\tau / \ln 2 * \ln[(P_t(t) - P_{av0}) / (P_{t0} - P_{av0})] \quad (2)$$

This is the analytic solution for Equation 1 and is only possible with one inert gas – in this case N_2 . With more than one inert gas, the calculation of t_d has to be done numerically, via an approximation procedure, that is by trial-and-error.

Perfusion models for air, nitrox, EAN and heliox as breathing gases are based on extensive records of well-documented dives, whereas those for trimix diving are not. For one inert gas perfusion models are mathematically straightforward and have enjoyed popular implementations in many dive computers and PC programs (Bühlmann, 1983, 1993; Bühlmann et al., 2002). Technical divers want to dive deeper and longer, and many of their dives are outside the trusted envelope. Nonetheless, studies on this envelope have been already published at length (e.g. Brubakk and Neuman, 2003) and, in summary, consider:

- only inert gas loading;
- mono-exponential relationships for one compartment – such compartments are all in a parallel circuit, while the linear connections (e.g. spleen to liver, or bowel to liver) are not considered; and
- mono-calculation of inert gas saturation and de-saturation in a symmetrical manner, i.e. with the identical coefficient in the exponential terms of the Haldane equation (equation 1).

However, some of the potential drawbacks when modifying these models for use for decompression modelling of trimix diving are:

- that user-dependent physiology and adaption are not reflected at all in the algorithms;
- inconsistent consideration of metabolic gases such as oxygen, carbon dioxide and water;
- the influence of ‘uneventful’ decompression exists where only the gas in solution may be considered and not the free gas phase (bubbles);
- that no allowance is made for short-term pressure changes and their relative influence against the fastest half-times;
- the effects of workload, temperature and excessive oxygen partial pressures; and
- consideration of the second inert gas and repetitive dives.

Another critical point is that the mapping of the compartment half-times from nitrogen to helium is normally done according to Graham’s law using

the square root of the proportion of the molecular weights (i.e. ca. 2.65); this factor is uniform to all compartments. This has been met with criticism from serious researchers in the field (Lightfoot et al., 1978; D’Aoust et al., 1979; Rodchenkov and Skudin, 1992). Especially in newer experiments, the perfusion rates are viewed quite differently (Doolette et al., 2005). The pivotal 2.65 seems to be valid only for saturation exposures (Berghage et al., 1979) which are not pertinent to technical diving.

With a so-called trimix there are two inert gases: N_2 (nitrogen) and He (helium) along with oxygen. This generates two exponential functions with different exponents for the same compartment, one for N_2 and one for He. The inert gas saturation (or the de-saturation) for these two has to be calculated separately, but the criteria for safe ascent are the same regarding length of time. This is where problems arise with the numerical calculation but for commercial applications in oilfield settings, the numerical approximation of a TTS is standard procedure. The present study presents a methodology for examining the performance of decompression models employed in the management of trimix diving.

2. Methods

There are at least three simple methods to evaluate decompression times (t_d):

1. Trial and error method: for small increments in time, e.g. 1sec or 0.1min, all relevant terms are calculated and checked to see if the ascent criteria are met. This is called a classical numerical solution.
2. Quasi-analytical method: an error is tacitly accepted by using Equation 2. Thus the two different tolerated overpressures are considered as independent constants for each phase of the decompression.
3. Approximation method: all the exponential terms are approximated via a polynomial expression, i.e. Taylor Expansion (Bronstein and Semendjajew, 1979).

For commercially available off-the-shelf (COTS) desktop decompression software, method 1 should be used because the computing power of topical PC hardware does not impose any waiting time for the users, unlike standard mix gas diving computers. The relatively high costs incurred during the development for waterproof hardware combined with low sale volumes means that the industry tends to use standard chips rather than full-custom microchips (ASIC) in diving computers. However, in comparison, standard chips are somewhat slower and have high energy consumption.

Method 1, in comparison to method 2, consumes more computing power, time and memory, and includes more variables. All of these factors can generate limitations in equipment that is being designed for use under water and so there is a tendency to employ method 2 where costs are at premium and the results from the calculations are needed rapidly. Unfortunately, the actual methods used in commercial products are rarely known because the manufacturers of dive computer hardware tend to cite commercial confidentiality in reply to any enquiries.

To assist in answering this question for the technical diver, the following experimental method was developed: 480 square-wave dive profiles were generated to be representative of those regularly observed in the TEC/REC domains, with depth ranging between 30–80m (6 profiles at 10m increments) and with a range of bottom times (20–60min; 5 profiles in 10min increments). The profiles used helium fractions of 5–80% (16 profiles in 5% increments), with only one normoxic mix (i.e. no travel gases and no EAN decompression mixes). The profiles were evaluated with four software products and compared to:

- two commercially available COTS decompression software products that have a very broad user basis in the TEC community;
- one freeware/shareware version of DIVE (www.divetable.info/dwnld_e.htm, version 2_900); and
- the commercial version 3_0 of DIVE.

All of these four products claim to have implemented the Bühlmann method for calculating decompression (Bühlmann, 1983, 1993; Bühlmann et al., 2002) called ZHL-*n* (where ‘ZH’ represents Bühlmann’s hometown of Zurich; ‘L’ is the linear equations of the criteria for safe ascent; and *n* is the number of compartments/half-times). In addition to the standard ZHL method, it was possible to set the above-mentioned gradient factors. During the analyses gradient factors were set to 1.0 for all of the products.

The version 3_0 of DIVE implemented method 1 exactly, while the freeware version 2_900 was flawed with a problematic implementation of method 2. For the two COTS products, the available technical

documentation was incomplete and no statements were available from the programmers to detail what methods were being used.

The first step, tested these four products against each other with 40 different air and Nitrox/EAN32 profiles. The test checked the actual convergence of the numerical method 1 with the COTS products. Table 1 shows one paradigm with the TTS values for a square dive to 40m, with the bottom times ranging from 20min to 60min.

A sensitivity analysis was performed for the numerical solution in order to ensure that minor variations in the starting parameters did not lead to mathematical artefacts. The four products were compared against the ‘gold standard’, which is the Zuerich 1986 (ZH-86) table for air dives (Bühlmann et al., 2002). This presented deviations of ± 2 min per decompression stage; sometimes the staging began 3m deeper in comparison to the table. This is mainly because of the different sets of coefficients used: the ZH-86 table uses the ZHL-16 B set, whereas decompression software or dive computers normally use the ZHL-16 C set (Bühlmann et al., 2002). In addition, the printed tables treat truncations in a completely different way to dive computers. There are many US Navy trials that confirm that decompression information generated from published diving tables rarely matches computer-generated output (Joiner et al., 2007).

To force comparability, all the calculations in the present study were based solely on the set ZHL-16 C and there was no manipulation via gradient factors (GF) – that is, GF high/GF low = 1.00 or 100% of the original published a- and b-coefficients. There were also slight adaptations of the dive profiles via ascent and descent rates, to make sure that the bottom times and the inert gas doses matched.

3. Results and discussion

Evidently there are significant differences in the calculation of decompression times depending on the helium-fraction and the amount of decompression obligation as determined by the inert gas dose (see Fig 1). These differences are not caused by variations in the decompression algorithm, but instead through different methods of calculation.

Table 1: TTS for EAN32 dive versus the four products (TTS, i.e. sum of all decompression stop times + time for ascent)

40m, Nitrox/EAN 32 bottom times [min]:	20'	30'	40'	50'	60'
TTS DIVE 2_900	8	16	28	42	55
TTS DIVE 3_0: numerical solution	7	17	28	40	57
TTS COTS product 3	5	15	28	41	53
TTS COTS product 4	7	16	28	41	54

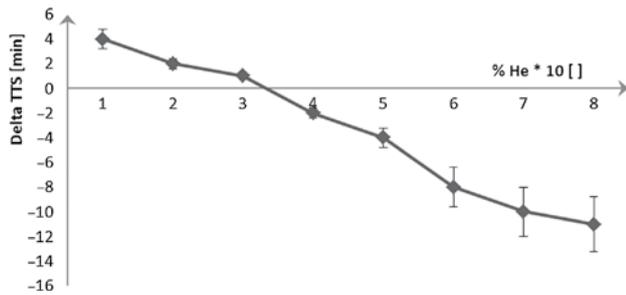


Fig 1: Delta TTS versus percentage of He in the breathing mix dive to 40m with a bottom time of 40min

Fig 1 shows the deviation of the TTS based on the percentage of helium in the breathing mix, using the example of a dive to 40m with a bottom time of 40min.

The x axis in Fig 1 is the percentage of helium in the breathing mix from 10% to 80%, while the y axis is the Delta TTS. This is a difference of the numerical solution to an arithmetic mean out from the three TTS according to: $\sum (t_{d,1} + t_{d,2} + t_{d,3})/3$, where $t_{d,i}$ is the calculated t_d of the products $i = 1 - 3$ (DIVE 2_900, COTS product 3, COTS product 4).

The x axis is defined as the zero baseline of the TTS of the numerical solution. An ‘error’ in minutes is the deviation (Delta TTS) of this mean value against the TTS of the numerical solution. The calculation of this arithmetic mean was superimposed by the strong closeness of the t_d from the three products. The absolute errors (see the vertical error margins) rise with the increase of the inert gas dose and with the increase of the percentage of He in the mix. The curve progression is more or less universal for all of the 480 square profiles. In relatively simplified and qualitative terms, the following can be determined:

- In the region of the helium fractions 0.05 up to ca. 0.25, the TTS is overrated with positive error (i.e. the TTS is too great, and the decompression is too conservative).
- In the region of helium fractions which is relevant to most technical divers, that is ca. 0.30 – ca. 0.40, the error vanishes – Delta TTS = 0.
- In the region of increasing helium fraction, the error is negative (i.e. the TTS is too small, and the decompression is too liberal).

The results of the two COTS products and DIVE 2_900 were very close to each other and so a similar calculation method is assumed. However, this ‘similar’ method means that the error of DIVE 2_900 could be repeated in the implementations of the two COTS products. In other words, the relative identity of the absolute values and the prefix leave room for speculation that the two COTS products

are using method 2, although there are also some other factors that could be responsible for these deviations. The following are a few possible factors, although this list is not exhaustive:

- undocumented gradient factors;
- a respiratory coefficient unequal to 1;
- another weighting of other inert gases;
- another weighting of the water density;
- empirically adapted a/b coefficients, especially for and as a consequence of the helium fraction;
- small deviations from the original helium ZHL spectrum of half-times (i.e. a mismatch of a and b coefficients with the half-time);
- utilisation of the so-called ‘1b’ compartment, instead or additive to compartment ‘1’;
- ascent rates varying with depth;
- de-saturation varying with depth and ascent rate; and
- different approach to truncations.

Restrictions in software operations caused by hardware limitations were quite common in the early days of dive computers. For example, there was a product in Europe which could only interpolate linearly between stored table values instead of calculating full-scale saturation/desaturation relationships. Even today, there are applications which rely on a modified ZHL instead of the promised and advertised bubble model.

4. Conclusions

There is a raft of constraints to be considered when attempting to expand the largely theoretical approach detailed in the present study into a wider determination of how models are being implemented in some dive computers. It is difficult to develop any solid conclusions and there may be additional legal considerations. This limits the ability to achieve some transparency in how some of the models are being implemented. The lack of open documentation of the ‘defaults’ and constants leads to numerous questions: for example, is there really a ZHL inside a computer when the label reads ‘ZHL’?

The clear message resulting from these tests is the following: a decompression time in a digital display, be it on a dive computer or a PC, is subject to interpretation. This is not so much because of errors in the measurements (e.g. pressure, time, temperature) and other statistical contemplations, but rather caused by the method of programming and the choice of a solution for a mathematical algorithm (i.e. the software technology and implementation). The range for these interpretations is not only in volumetric terms, but also is dependent on

the inert gas dose and the helium fraction, in the one- or two-digit percent range.

Therefore, the answer to the question in the title (where do variations in the time-to-surface come from?) is not straightforward. First, the wisdom of using perfusion algorithms could be questioned, but perfusion models work much better than the bubble models (see above); to quote Hamilton (1978): 'Haldane works if you use it properly'. Second, with the aforementioned gradient factors, the users could fix the Delta TTS variations shown in Fig 1. However, the question remains: do gradient factors then provide a safer decompression schedule or are they better employed for user-based software manipulation, as illustrated in the example of method 2?

This will need to be the subject of future research, as new technology and products are being introduced constantly.

Acknowledgments

This is an abbreviated and modified version of a paper that appeared in *CAISSON 2012* **26**: 4–12 (available at gtuem.praesentiert-ihnen.de/caisson_03-11.pdf accessed on 21 October 2012). Several parts of this paper were presented during a lecture at the 12th scientific meeting of the GTUEM on 20 March 2011 in Regensburg, Germany.

Thanks go to the entire crew of GTUEM for making it possible to give a lecture on this topic. Especially to Prof Willi Welslau (president of GTUEM, Vienna, for a constant peer review) and to Prof Jochen D Schipke (University Medical Center for experimental surgery, Duesseldorf) for editorial work and for patience with my oft unorthodox approach. Thanks go as well to a couple of my technical diving students in Elat/Israel for fiddling about the deco software.

References

Berghage TE, David TD and Dyson CV. (1979). Species differences in decompression. *Undersea Biomedical Research* **6**: 1–13.

Boycott AE, Damant GCC and Haldane JS. (1908). The Prevention of Compressed Air Illness. *Journal of Hygiene* **8**: 342–443.

Bronstein IN and Semendjajew KA. (1979). *Taschenbuch der Mathematik*. Frankfurt: Verlag Harri Deutsch.

Brubakk A and Neuman T.S. (2003). *Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving*, 5th edition. London: Saunders, 800pp.

Bühlmann AA. (1983). *Dekompression – Dekompressionskrankheit*. Berlin: Springer.

Bühlmann AA. (1993). *Tauchmedizin: Barotrauma, Gasembolie, Dekompression, Dekompressionskrankheit*. Berlin: Springer.

Bühlmann AA, Nussberger P and Voellm E. (2002). *Tauchmedizin*, 5th. edition. Berlin: Springer.

D'Aoust BG, Smith KH, Swanson HT, White R, Stayton L and Moore J. (1979). Prolonged bubble production by transient isobaric counter-equilibration of helium against nitrogen. *Undersea Biomedical Research* **6**: 109–125.

Doolette DJ, Upton RN and Grant C. (2005). Perfusion-diffusion compartmental models describe cerebral helium kinetics at high and low cerebral blood flows in sheep. *The Journal of Physiology* **563**: 529–539.

Hahn MH. (1995). Workman-Bühlmann algorithm for dive computers: A critical analysis. In: Hamilton RW. (ed.). *The effectiveness of dive computers in repetitive diving*. UHMS workshop 81 (DC)6-1-94. Kensington, MD: Undersea and Hyperbaric Medical Society.

Hills BA. (1977). *Decompression Sickness: The Biophysical Basis of Prevention and Treatment*, vol 1. New York: John Wiley & Sons.

Joiner J, Russell J and Lasky K. (eds.). (2007). *Naval Forces Under the Sea: The Rest of the Story*. Flagstaff, AZ: Best Publishing Company.

Lightfoot EN, Baz A, Lanphier EH, Kindwall EP, Seireg A. (1978). Role of bubble growth kinetics in decompression. In: Shilling CW and Beckett MW (eds.). *Underwater physiology VI: Proceedings of the sixth symposium on underwater physiology*. Bethesda, MD: Undersea Medical Society, 449–457.

Müller KG and Ruff S. (1966). Theorie der Druckfallbeschwerden und ihre Anwendung auf Tauchtabellen, DVL/Bericht – 623.

Müller KG and Ruff S. (1971). Experimentelle und Theoretische Untersuchungen des Druck-Fall Problems, DLR, Forschungsbericht 71–48.

Rodchenkov SV and Skudin VK. (1992). Saturation decompression schedules based on a critical tissue supersaturation criterion. *Undersea Biomedical Research* **19**: 472–481.

Schreiner HR and Kelley PL. (1971). A Pragmatic View of Decompression. In: Lambertsen CJ (ed.). *Underwater Physiology IV: Proceedings of the Fourth Symposium on Underwater Physiology*. New York: Academic Press, 205–219.

Workman RD. (1965). Calculation of Decompression Tables for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives. Research Report 6-65. Washington, DC: U.S. Navy Experimental Diving Unit.