



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 Perfusionmodell 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)

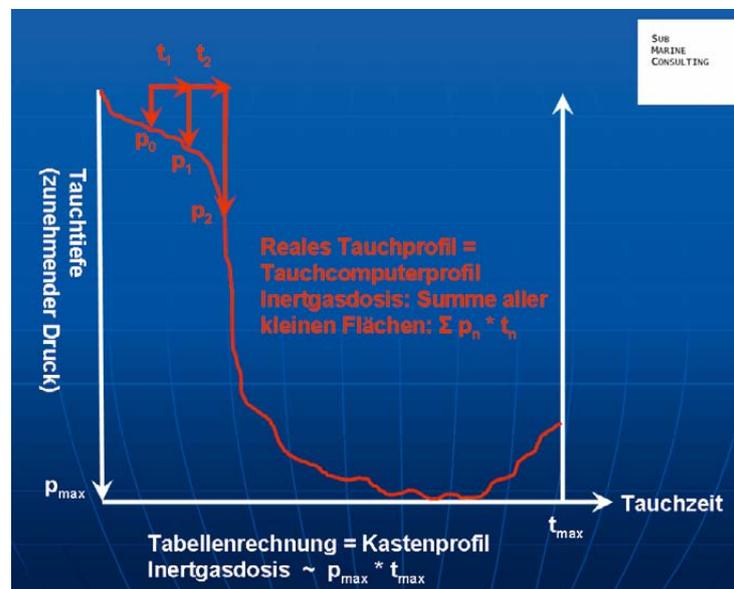
AT = Ascent Time (normalerweise die maximale geometrische Tauchtiefe dividiert durch die Aufstiegs-geschwindigkeit)

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.globa-lunderwaterexplorers.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.hl-planner.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 = Ministere 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-Programmmen rechnet ...

(***) Auch diese Firma ging bankrott; ca. 2004; darüber hinaus 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

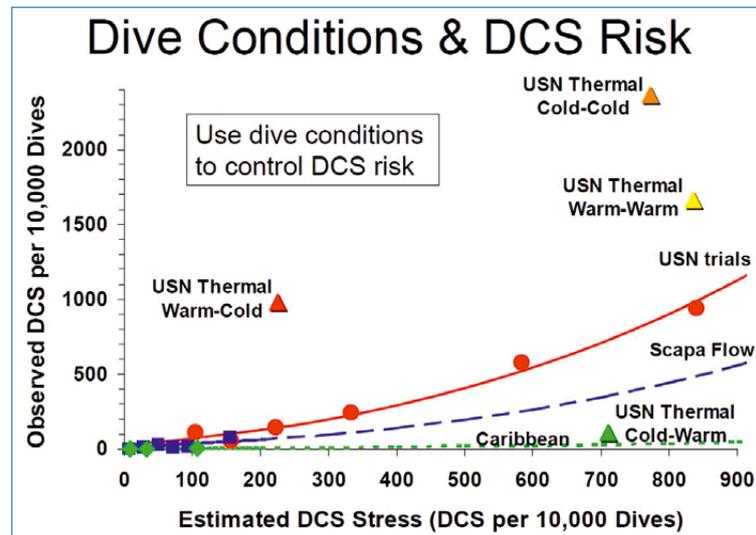
USN Tabelle (Revision 6, 2008) verlängerte aus diesem Grunde sogar wie alle Dekompressionsstopps und verlegte darüberhinaus von 10 auf 20 feet (ca. 6 m). Es gibt in dieser Tabelle also den guten, alten „3 m Stopp“ nichtmehr! Das die USN diese Tabelle schon nach ca. einem Jahr wieder revidierte und die 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