

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

Title:

Decompression-Calculations for Trimix Dives with PC-Software;
Gradient-Factors: do they repair defective algorithms or do they repair defective implementations?

Abstract:

If there is more than one inertgas in the breathing mixture, the calculation of the decompression time has to be done numerically. We analyzed 480 square dive-profiles in the TEC/REC range with one freeware, two commercially available software-packages and via numerical methods. (Depth Range: 30 - 80 m, Bottom Times: 20 - 60 min, Helium Percentage: 5 - 80 %, only normoxic mixes i.e.: no travel- or enriched deco gases, only ZH-L model, no adaptations with gradient factors.) There are significant differences in the calculation of the decompression-times t_d with trimix gases, obviously dependant on the helium percentage. In the present analysis, these differences do not come from variations in the decompression algorithms.

Keywords:

decompression, mixed gas, simulation, technical diving, trimix

Zusammenfassung:

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, Heliumanteile: 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 Helium-Anteils. Die Unterschiede sind bei diesem Vergleich nicht durch Variationen über den zugrundeliegenden Dekompressionsalgorithmus bedingt.

Grundlagen:

Mit „Algorithmus“ ist einfach 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 im Info-Kasten am Schluß dieses Dokuments.

Bei klassischen, perfusions-limitierten Dekompressionsalgorithmen nach Haldane et al. wird die Inertgasaufnahme pro Kompartiment durch eine mono-exponentielle Funktion beschrieben. Als Bezeichnung hat sich hierbei 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 wg. der Randbedingung
K	eine Konstante, abhängig vom Kompartiment [min^{-1}], mit $k = \ln 2 / T$
T	Zeit [min]

Der Exponent k ist im Wesentlichen die Perfusionsrate, d.h. der Kehrwert der Halbwertszeit T eines Modellgewebes. Diese Modellgewebe werden als „Kompartimente“ bezeichnet. Die Anpassung des Algorithmus an physiologische Gegebenheiten erfolgt über eine Schar dieser Kompartimente, typischerweise 6, 9 oder 12, 16 oder auch 20 an der Zahl. Die Variabilität wird mittels den Halbwertszeiten T erreicht. Diese sind üblicherweise aus dem Spektrum von 1,25 bis 900 Minuten; 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 darüberhinaus die bereits erwähnten Standardwerke über Tauchmedizin (siehe auch: CAISSON 01 2010, S. 9). Wir wollen hier aber etwas Neues riskieren und eine relativ selten zitierte Quelle beanspruchen, nämlich:

[102] Hills, Brian Andrew (1977), Decompression Sickness, Volume 1, The Biophysical Basis of Prevention and Treatment

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 den 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 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 O_2 , CO_2 und H_2O
- „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 der Gleichung (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, ...

Eine Auswahl an Quellen zu einigen Punkten sind u.a.:

Thalmann, ED; Parker, EC; Survanshi, SS; Weathersby, PK. Improved probabilistic decompression model risk predictions using linear-exponential kinetics. Undersea Hyper. Med. 1997; 24(4): 255 – 274; <http://archive.rubicon-foundation.org/2276>

Tikusis, P; Nishi, RY. Role of oxygen in a bubble model for predicting decompression illness. Defence R&D Canada, 1994; DCIEM-94-04; <http://archive.rubicon-foundation.org/8029>

Doolette DJ, Gerth WA, Gault KA. Probabilistic Decompression Models With Work-Induced Changes In Compartment Gas Kinetic Time Constants. Navy Experimental Diving Unit, Panama City, FL, USA; in: UHMS Annual Scientific Meeting, St. Pete Beach, Florida, June 3-5, 2010, Session A6.

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. <http://archive.rubicon-foundation.org/7998>

Trimixtabellen:

Im Gegensatz zu Heliox gibt es kaum „validierte“ Trimixtabellen. Sicherlich sind anekdotenhaft und mit einer sehr begrenzten Zahl an Probanden 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.

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 (Graphiken(1a) & (1b)):

title & keyword:	1948 – 2010	1976 - 2010
(air	13.466	10.845)
oxygen window	14	
decompression	709	572
ean / nitrox	128	
helium	1313	
trimix		41

Graphik 1a

Die Papiere 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 war 1976; die untere Darstellung der letzten 20 Jahre zeigt einen Peak im Jahre 2007; dieser resultiert lediglich aus kurzen Diskussionen zur (Un-)Gültigkeit des Henry'schen Gesetzes, insbesondere bei binären Gasmischungen:

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			

Graphik 1b

Das singuläre Papier aus 2010 ist von Ljubkovic et al. (siehe Referenzen), spiegelt unsere Thematik hier wieder (allerdings mit einem VPM/Blasenmodell) und ist für Tauchmediziner besonders 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.

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 $t = t_d$:

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

Das Kriterium für „sichere“ Dekompression wird in den Perfusionsmodellen als eine einfache lineare (Geraden-)Gleichung dargestellt ([65], S. 117, bzw.: [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 [65] auf 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, d.h. zu länger werdenden Dekompressions-Stopps, wieder (u.a. in Egi et al.).

Die analytische Form (2) ist aber nur bei einem Inertgas, in diesem Falle hier N₂, gegeben. Wird mehr als nur 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 zwei: nämlich N₂ 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 auf zwei Inertgase angepaßt werden, aus (3) wird damit ganz einfach (3*):

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

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 (siehe auch dazu die Bemerkung in [54] auf S. 86). Es gilt somit für jede Kombination von a- & b-Werten für jedes Kompartiment zu jedem Zeitpunkt t:

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

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- & b-Koeffizienten sind jetzt über die Gewichtung (5) mit den Exponentialtermen der Sättigung verheiratet und keine Konstanten mehr wie im Falle von Pressluft/Nitrox.

Die Skalierung der Kompartiment-Halbwertszeiten von N₂ 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 an (D' Aoust et al, S. 119 & 121; sowie Lightfoot et al, S. 453 und Voitsekhovich, S. 210): experimentell stellen sich die Perfusionsraten eben unterschiedlich dar! Dies ist besonders bei ganz aktuellen Experimenten akribisch dokumentiert (Doolette, 2005). 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 ganz oberflächlich skizziert werden, da dies ebenfalls andernorts schon genau beschrieben ist:

(Quelle: http://www.divetable.de/workshop/Formel_V3.htm)

- A) „Versuch-und-Irrtum“: für kleine Zeitschritte, z.B. 1 Sekunde oder 0,1 Minuten, werden alle Terme berechnet und kontrolliert, ob das Aufstiegskriterium erfüllt ist. Dies wird als klassische „numerische Lösung“ bezeichnet.
- 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, dies ist als „Taylor-Entwicklung“ bekannt. (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, im Übrigen, „glänzen“ auch durch einen vergleichsweise hohen Energieverbrauch ...

Die numerische Lösung A) benötigt im Vergleich zu B) mehr Rechenzeit und auch 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 ein Rolle spielen und das Ergebnis sofort zur Verfügung stehen muß.

Wie wird nun die Umsetzung für t_d bei handelsüblichen Produkten bewerkstelligt? Die Crux an der Thematik ist ganz einfach die, daß Hersteller, egal ob von Tauchcomputer-Hardware oder Desktop-Deco-Software, dementsprechende Nachfragen zur Implementierung entweder garnicht oder aber mit Hinweis auf Firmengeheimnisse nur sybillinisch beantworten. Dies 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 Heliumanteilen: 5 - 80 % (16 Profile im 5% Abstand), nur mit einem normoxischen Mix (d.h.: keine Reise- oder sauerstoffangereicherten Dekompressionsgase) wurden jeweils mit 4 Softwareprodukten berechnet und miteinander verglichen:

- zwei kommerziell erwerbbar Produkte,
- eine Freeware/Shareware Version von DIVE (Quelle: 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 mit den TTS-Werten für einen 40 m Tauchgang darstellen:

40 m, Nitrox/EAN 32 Grundzeiten [min]:	20'	30'	40'	50'	60'
TTS DIVE 2_900	8	16	28	42	55
TTS 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

(Tauchgang 40 m mit Nitrox/EAN32, Grundzeiten 20 bis 60 min, TTS = time-to-surface, i.e. die Summe aller Dekompressionsstoppzeiten + 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 Minuten 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” .

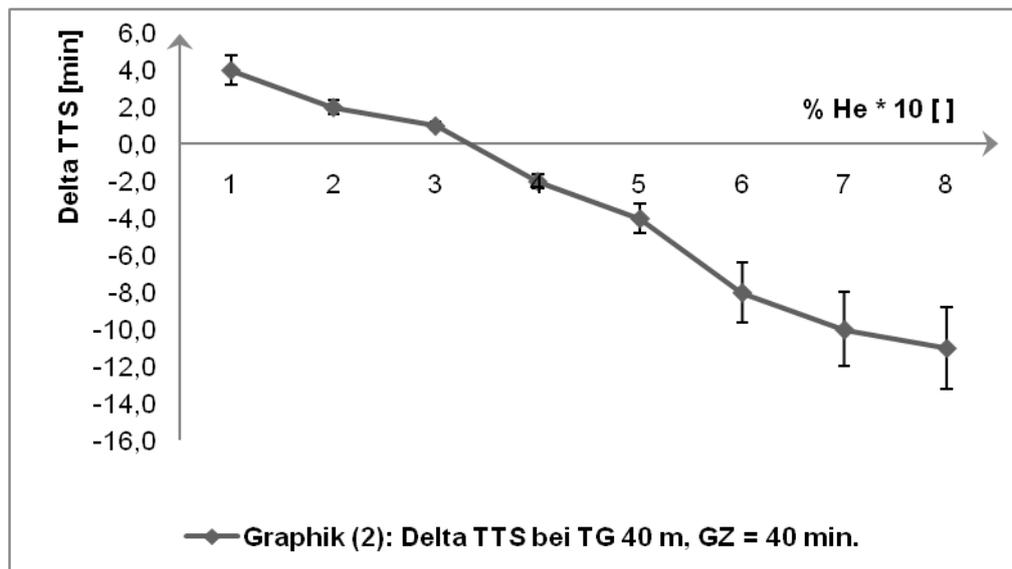
Ähnliche Dinge sind wohl auch bei Tabellen für Caisson-/Tunnelarbeit, den OSHA Tabellen (bis 1979) ebenfalls passiert und wurden dort aber als „typographical errors“ bezeichnet (Quelle: Kindwall, S. 342).

Weitere Randbemerkung: der geneigte Leser mag spaßeshalber mit der Sharewareversion von DIVE einen Test gegen einen weiteren Gold-Standard durchführen: die DECO 2000 von Max Hahn, Erläuterungen im Handbuch unter: http://www.divetable.de/skripte/DOXV2_9.pdf

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, je nach 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 Helium-Anteils und der Größe der Dekompressionsverpflichtung, sprich der Inertgasdosis, siehe Graphik (2). Diese Unterschiede sind nicht durch Variationen im Algorithmus sondern ausschließlich durch unterschiedliche Rechenweisen bedingt.



Die Graphik (2) zeigt die Abweichungen der TTS in Abhängigkeit des Helium-Anteils, hier beispielhaft an einem Tauchgang auf 40 m mit der Grundzeit von 40 min.:

x-Achse: Prozentsatz Helium im Atemgas: von 10 bis 80 %

y-Achse: Delta TTS jeweils als arithmetischer Mittelwert aus den 3 Austauschzeiten gemäß

$\Sigma (t_{d,1} + t_{d,2} + t_{d,3}) / 3$; wobei die $t_{d,i}$ die ermittelten Austauschzeiten der Produkte $i = 1 - 3$ sind (DIVE 2_900, Produkt 3, Produkt 4). Die x-Achse ist als die 0-Linie der Austauschzeit der numerischen Lösung definiert. Als „Fehler“ in [Minuten] wird die Abweichung (Delta TTS) dieses Mittelwerts gegenüber der Austauschzeit aus der numerischen Lösung bezeichnet. Diese Mittelwertberechnung bot sich deshalb an, weil die ermittelten t_d aller 3 Produkte tatsächlich relativ nahe beieinander lagen: die absoluten Fehler nehmen mit der Größe der Inertgasdosis sowie des He-Anteils zu. Der dargestellte Kurvenverlauf läßt sich durchgängig bei allen 480 Rechteckprofilen verfolgen und grob qualitativ wie folgt skizzieren:

- im Bereich der Heliumanteile 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 – ca. 40 % Helium-Anteil, verschwindet der Fehler glücklicherweise um bei
- größer werdendem Helium-Anteil rasch wieder zuzunehmen. In diesem Bereich ist die Dekompression als zu liberal, d.h. als zu kurz, angegeben.

Diskussion:

Da die Ergebnisse für alle getesteten 480 Mischgas-Profilen der beiden gekauften Produkte und von DIVE 2_900 ziemlich nahe beieinander lagen, ist es durchaus nicht abwegig, hier eine gemeinsame Methode zu unterstellen. Diese gemeinsame „Methode“ bedeutet aber 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 lassen 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 sogenannten „1b“ Kompartiments anstatt oder auch zusätzlich zum Kompartiment „1“ ([65], S. 158);
- von der Tiefe abhängig variable Aufstiegsgeschwindigkeiten;
- 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 mittels gespeicherten Tabellenwerten interpolierten. Auch aktuell gibt es Implementierungen,

welche, statt ein komplettes RGBM-Modell zu rechnen, im Kern auf ein modifiziertes ZH-L zurückgreifen.

Es scheint aber auch Implementierungen zu geben, die dieses Thema ernst nehmen und auch konsequent umsetzen. Hierzu zählt eine Shareware, allerdings mit VPM, siehe unter: http://www.decompression.org/maiken/VPM/VPM_Algorithm.htm,

Zitat: „The analytic, logarithmic expression for stop times ... was replaced with a numerical solution of the restriction on the sum of He and N₂ partial pressures.“

Weiterhin kann dies auch im offengelegten C-Sourcecode des OSTC, dem „Open Source TauchComputer“ nachvollzogen werden (Quelle: https://bitbucket.org/heinrichsweikamp/ostc2_code/src/04535df08575/code_part1/OSTC_code_c_part2/p2_deco.c)

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.

(Schließlich muß auch das Wettbewerbs-Gesetz, die §§ 4, 5 & 6 UWG berücksichtigt werden!)

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-Anteils, auch mal schnell im deutlich zweistelligen Prozentbereich enden kann ...

Zur abschliessenden Beantwortung der im Titel gestellten Frage:

- 1) Ja, mit Gradientenfakoren kann man defekte Perfusionsalgorithmen teilweise reparieren. Aber die Perfusionsmodelle funktionieren weitaus zufriedenstellender, als es der zur Zeit landläufige Medienrummel um die Blasenmodelle vermuten läßt. Und es mit einem historischen Bon-Mot 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, siehe Graphik (3). Es handelt sich um eine beispielhafte Bildschirmkopie von DIVE Version 3_0:

```

maximale Ceiling: 12.56
Vorschlag Haldane 2:1 [m] = 15
Vorschlag Hills, B. A.: DEEP STOP [m] = 27
PDIS fuer TAU = 15.98 min: 27.76 [m]
PDIS fuer TAU = 23.44 min: 21.89 [m]
PDIS fuer TAU = 34.67 min: 16.44 [m]
Eingabe der Austauschstufe in Metern & cm:(m.cm):
      Austauschstufe ist zu hoch:
      niedriger wie Ceiling waehlen!
Deko Prognose:
15m Stopp Prognose Dekozeit: 1.00 Komp. #: 10
12m Stopp Prognose Dekozeit: 3.00 Komp. #: 10
9m Stopp Prognose Dekozeit: 8.00 Komp. #: 7
6m Stopp Prognose Dekozeit: 15.00 Komp. #: 8
3m Stopp Prognose Dekozeit: 33.00 Komp. #: 10
TTS = 64.00
Deko Prognose numerisch:
15m Stopp APPROXIMATION : .25 Steps N= 1.
12m Stopp APPROXIMATION : 3.25 Steps N= 13.
9m Stopp APPROXIMATION : 7.75 Steps N= 31.
6m Stopp APPROXIMATION : 14.75 Steps N= 59.
3m Stopp APPROXIMATION : 48.00 Steps N= 192.
TTS = 78.20
Deko Prognose mit Gradientenfaktoren: GFHI = .9
18m Stopp Prognose Dekozeit: 3.00 GF = .65 Ko
15m Stopp Prognose Dekozeit: 3.00 GF = .70 Ko
12m Stopp Prognose Dekozeit: 6.00 GF = .75 Ko
9m Stopp Prognose Dekozeit: 10.00 GF = .80 Ko
6m Stopp Prognose Dekozeit: 20.00 GF = .85 Ko
3m Stopp Prognose Dekozeit: 47.00 GF = .90 Ko
TTS = 93.00
was jetzt? * * * 42 m, 25 min, 20 % O2, 80 % He *

```

Graphik 3:

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 TTS (time-to-surface: 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 numerische Lösung, nicht gerundet. 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 = 0,9 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.

downloaded from:
www.divetable.info

Die betrachteten Abweichungen sind in einer Größenordnung bei der sogar die Unterschiede zwischen den meisten Algorithmen/Modellen verschwimmen, siehe Tabelle A in: <http://www.divetable.de/workshop/Vergleich2.pdf>. Die stellenweise überhitzt geführten Diskussionen, welches Modell denn nun besser sei, könnten eigentlich relativiert werden. Um auch dies für Tekkies griffig zu formulieren:

„It doesn't matter which model you use, provided it has a sound implementation!“ (© Albi, CE 2009)

Abschliessend noch ein zusätzlicher interessanter, aber mehr historischer, Aspekt der durchaus auch als weiterer Beleg für die obigen Betrachtungen gelten mag: wird in dem Koordinatensystem der Graphik (2) der He-Anteil der x-Achse durch eine „Gesamt-Inertgas Dosis“ für einen Lufttauchgang ersetzt, also z.B. durch das Produkt aus Grundzeit und maximaler Tiefe, oder der Quadratwurzel der Grundzeit mal Tiefe oder auch, ganz einfach gesprochen: der Gesamt-Fläche unter dem Tauchprofil; und weiterhin in y-Richtung die Dekompressionszeiten der ersten Haldane-Tabelle, der Mutter aller Tauchtabellen sozusagen, eingetragen, ergibt sich der fast identische Kurvenverlauf, wenn wir diese Zeiten mit unseren heutigen, modernen Dekompressionszeiten, egal welches Modell oder welche Tabelle, vergleichen. Wir wählen als neue Nulllinie die TTS eines aktuellen Modells und tragen zur gleichen Inertgasdosis die Summe der Haldane'schen Austauschzeiten in die y-Richtung ein: im Bereich kleiner Inertgasdosen (kurze und/oder flache Tauchgänge) war die Haldane-Tabelle nachweislich zu konservativ, die modernen Werte also unterhalb der Haldane-Linie (linker Teil des Graphen). Im Bereich der langen und/oder tieferen Tauchgänge mit den höheren Inertgasdosen (rechter Teil des Graphen) waren die Haldane-Werte weitaus zu liberal, d.h. die Dekompressionszeiten zu kurz im Vergleich zu unseren heutigen Werten: die Haldane-Linie würde unterhalb den aktuellen Werten verlaufen. In einem Bereich der mittleren Inertgas-Dosen, einem Bereich geringerer Abweichungen, müssen sich dann die Kurven zwangsläufig schneiden, genauso wie es die Graphik (2) eben nahelegt ...

Dank:

geht an die Crew von GTUEM für die Möglichkeit, dieses Thema im Rahmen eines Vortrages bei der (hervorragend organisierten) 12. Wissenschaftlichen Tagung der GTUEM am 20.03.2011 vorzustellen sowie für deren nachhaltiges Interesse an dieser „trockenen“ Materie: insbesondere an Willi W. (Prof. Dr. Willi Welslau, Präsident GTUEM, Wien) für ein konstantes peer review, an Jochen D. (Prof. Dr. Jochen D. Schipke, Universitätsklinikum Düsseldorf, Experimentelle Chirurgie) 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 Internet-Links verweisen auf die abstract page im Rubicon Forschungsarchiv:

<http://archive.rubicon-foundation.org/>

Dort können die kompletten Dokumente kostenlos heruntergeladen werden.

Die Quellen zu den Perfusions-Algorithmen sind hauptsächlich die Folgenden, allseits bekannt und respektiert, sowie die bereits erwähnten Standardwerke über Tauchmedizin (siehe auch CAISSON 2010; 25(1): 9):

- 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
<http://archive.rubicon-foundation.org/7489>
- 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)
<http://archive.rubicon-foundation.org/3367>
- Schreiner, H.R., and Kelley, P.L. "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) pp. 205-219
- Müller, K. G.; 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, A. A. Bühlmann, Springer, 1983, ISBN 3-540-12514-0

[5] Tauchmedizin (Barotrauma, Gasembolie, Dekompression, Dekompressionskrankheit) A. A. 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] "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

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

[75] "Bove and Davis' DIVING MEDICINE", Alfred A. Bove, 4 th. edition, Saunders 2004, ISBN 0-7216-9424-1

[102] Hills, Brian Andrew (1977), Decompression Sickness, 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. <http://archive.rubicon-foundation.org/7986>

Berghage, T.E., T.D. David and C.V. Dyson. 1979, Species differences in decompression. Undersea Biomed. Res. 6(1): 1 – 13 <http://archive.rubicon-foundation.org/2837>

Bronstein – Semendjajew: Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch

D'Aoust, B.G., K. H. Smith, H.T. Swanson, R. White, L. Stayton, and J. Moore. 1979, Prolonged bubble production by transient isobaric counter-equilibration of helium against nitrogen. Undersea Biomed. Res. 6(2): 109 -125 <http://archive.rubicon-foundation.org/2840>

Doolette DJ, Upton RN, Grant C. Perfusion-diffusion compartmental models describe cerebral helium kinetics at high and low cerebral blood flows in sheep. J Physiol. (2005) 563(Pt 2) : 529 - 539

Egi SM, Gürmen NM. Computation of decompression tables using continuous compartment half-lives. Undersea Hyper Med 2000; 27(3): 143 – 153. <http://archive.rubicon-foundation.org/2341>

Kindwall, EP. Compressed air tunneling and caisson work decompression procedures: development, problems, and solutions. Undersea Hyperb. Med. 1997 Winter; 24(4): 337 – 345, <http://archive.rubicon-foundation.org/2267>

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: 449 – 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 109: 1670 - 1674, 2010

Moon RE, Piantadosi CA, Camporesi EM (eds.). Dr. Peter Bennett Symposium Proceedings. Held May 1, 2004. Durham, N.C.: Divers Alert Network, 2007 <http://archive.rubicon-foundation.org/9053>

Rodchenkov SV, Skudin VK. Saturation decompression schedules based on a critical tissue supersaturation criterion. Undersea Biomed. Res. 1992; 19(6): 472 – 481 <http://archive.rubicon-foundation.org/2736>

Voitsekhovich, I. A mathematical decompression model based on biophysical and physiologic laws. Undersea Hyperb. Med. 1994 Jun; 21(2): 209 - 13.
<http://archive.rubicon-foundation.org/2400>

COCHRAN Consulting Inc.; www.divecochran.com

COMEX: Compagnie Maritime d'Expertises; www.comex.fr

DAN: Divers Alert Network; www.dan.org

DCIEM (alte Bezeichnung, jetzt): Defence Research and Development Canada;
www.drdc-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
bzw. die NOAA Tauchsparte: <http://www.ndc.noaa.gov/>

OSHA: Occupational Safety and Health Administration; <http://www.osha.gov/>
(Die aktuellen Tabellen für Caisson-Arbeiten sind zu finden unter: Part Number 1926.)

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

Dies ist die erweiterte Version des Artikels, erschienen in: CAISSON 2011, 26(3): 4 - 12.
Teile hiervon fanden Platz in einem Vortrag vom 20.03.2011 bei der 12. Wissenschaftlichen
Tagung der GTUEM in Regensburg, das dazugehörige Abstract ist zu finden in:
CAISSON 2011, 26(1): 61

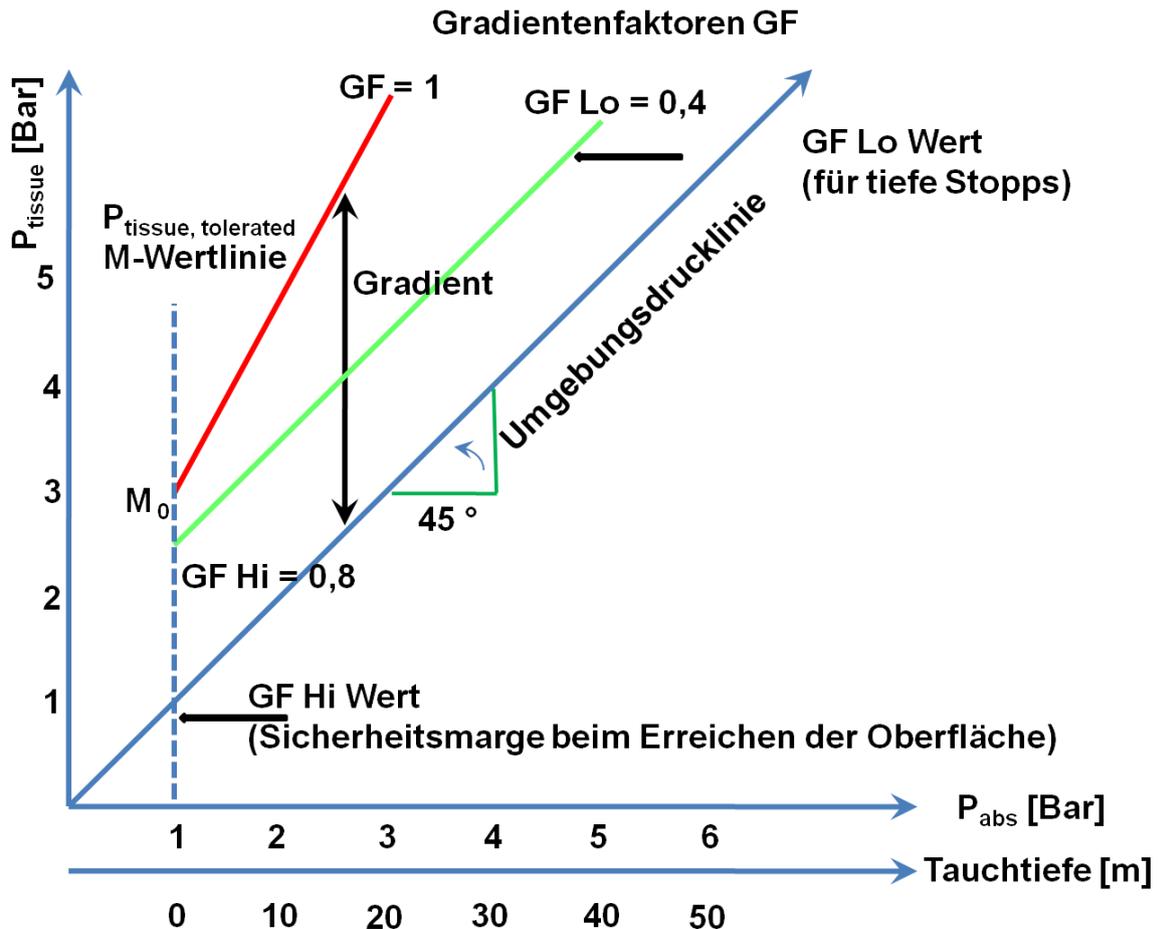
.....

Infokasten:

Gradientenfaktoren bei Perfusions-Modellen vom Typ:

ZH-L (Bühlmann, Hahn, et al ...) bzw. "M-Value" (Haldane, Workman, Schreiner and others ...)

Das Kriterium für „sichere“ Dekompression wird bei der Gruppe der Perfusionsmodelle durch eine einfache Gerade dargestellt; siehe Gleichung (3):



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

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 dies aber eine diffuse Grauzone.

Schon seit Beginn der Dekompressionsforschung 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 wie die veröffentlichten theoretischen Werte (Quelle: private Kommunikation). Dies bedeutet aber auch, dass Gradientenfaktoren (Abkürzung: GF) schon seit Haldane benutzt wurden, nur war der terminus technicus jeweils ein anderer ...

Da es sich bei (3) um eine lineare Gleichung handelt, die durch zwei Parameter definiert ist, können genau diese beiden 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 Stoppzeiten verkürzt werden. Die Methode, die als "VGM" (Variable Gradient Method) bezeichnet wird, ordnet jedem Kompartiment seinen spezifischen GF resp. 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 ([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:

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

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

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

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

a -> $a * GF$ sowie: b -> $b / (GF - GF * b + b)$

Allerdings sollte auch hier Vorsicht die Mutter der Porzellan-Kiste sein: die im Info-Kasten und auch in den üblichen TEC-Publikationen und -Schulungsunterlagen dargestellte Graphik ist korrekt, aber auch durchaus suggestiv; um nicht zu sagen: ein-dimensional, nämlich nur für ein Kompartiment. In der durch GF generierten zusätzlichen Stoppzeit 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".

update per 06 / 2012:

Irgendwann im Jahre 2012 bin ich hierüber gestolpert: <http://ostc-planner.net/wp/> . Eine kleine, schnuckelige Software; einfach zu installieren und bedienen (wenn man von ein paar kryptischen Parametern absieht ☺) und preiswert (ca. 20 €: nein, nein, ich bin nicht bei denen auf der Gehaltsliste ...). Und ganz besonders freut mich dieses: die Dekompressionspläne stimmen mit denen von DIVE zu fast 100 % überein. Um den Sachverhalt etwas weniger flapsig mit der Graphik (2) zu beschreiben: die Werte von OSTC-Planner schmiegen sich recht eng an die X-Achse. Dies bedeutet daß die Delta TTS vom OSTC-Planner zu DIVE V3.0 innerhalb einer verschwindend kleinen Fehlergrenze identisch 0 ist. Und das gilt für ziemlich viele der kontrollierten 480 Kasten-Profile! Die Chancen stehen recht gut, daß in dieser Software relativ präzise die Methode A) (siehe oben) implementiert ist!

Version vom: 04.10.2012 13:45 # words: 5727