



# Berechnungen rund um die Bühlmann-, Workman-, & Gradienten-Faktoren

V5 / 30.09.2024  
von **Beat Müller**  
MSc. Mech. Eng. ETH  
Director of Standards SCD

E-Mail: [btmueller \(at\) bluewin.ch](mailto:btmueller@bluewin.ch)

# Inhaltsverzeichnis

## Nomenklatur

### **Teil I: Die Gradient Factors (GF) des Erik Baker \*)**

**Einführung**

**Die Gradienten Faktoren**

**Der maximale Inertgas-Druckgradient**

**Deep Stops**

**Die Variabilität der GF**

**Anwendung der GF**

**Schreibweise der GF**

**Retrospektive Ermittlung des GF**

**Auswirkungen der GF auf das Dekompressionsprofil**

### **Teil II: Bühlmann-Koeffizienten in Verbindung mit GF**

**Die Fundamentalgleichung von Bühlmann**

**Experimentelle Bestimmung der Koeffizienten**

**Zusammenhang zw. Koeffizient a und  $a_{GF}$**

**Zusammenhang zw. Koeffizient b und  $b_{GF}$**

**Neuberechnung des tolerierten Umgebungsdruckes**

**$p_{amb.tol.GF}$**

**Plausibilitätsprüfung**

**Parametrische Untersuchung zu  $b_{GF} = f(b, GF)$  für GF von 0 bis 1**

**Praxistests von Deep Stops**

**Zur Frage der Sicherheit der Original-Bühlmann**

**Koeffizienten**

**Entgleisungen in Sachen «Deep Stops»**

**Zusammenfassung und gängige Grundeinstellungen für Taucher**

---

\*) Erik Baker: Erik C. Baker is an electrical engineer with an architecture/engineering firm in Pennsylvania who has developed several computer programs to improve the safety of his cave and trimix diving

## **Inhaltsverzeichnis (Forts.)**

### **Teil III: Der resultierende Gradient als Fkt. der mit GF geänderten Bühlmann Koeffizienten**

**Beweis der Nicht-Linearität**

**Numerisches Beispiel**

**Nachweis Linearität bei  $GF = GF_{const}$**

**Zusätzliche Verzerrung bei Trimix**

### **Teil IV: Workman vs. Bühlmann**

**Die Fundamentalgleichung von Workman**

**Umrechnungen W->B und B->W**

**Workman mit GF**

### **Teil V: Andere Konservatismus-Faktoren und ihr Zusammenhang mit den GF**

## **Anhang**

**A1: Quellen, Literatur**

**A2: Übersicht über verschiedene Dekompressionsmodelle**

**A3: Grundlagen des Kompartimentsmodelles**

**A4: Koeffizientensätze ZHL-16 A/B/C**

**A5: Unterschiede zw. den ZHL-16 Versionen: Auszug für 1 HWZ ( $t_H$ )**

**A6: Vergleich Austauschprofil ohne und mit GF**

**A7: M-Values von Workman**

**A8: EUROPÄISCHE NORM EN 13319**

**A9: Über den Autor / about the author**

# Nomenklatur

Eine Abhandlung über physisch-physiologische Zusammenhänge kommt nicht ohne Mathematik und eine Anzahl definierter Berechnungsgrößen (Parameter) aus.

Nachfolgend die Liste der hier verwendeten Größen und ihre Bedeutung.

ZHL-16 A/B/C	<p>Das Bühlmann-Berechnungssystem ist ein deterministisches, perfusionsgesteuertes Ein-Phasen Neo-Haldane Modell mit 16 parallel geschalteten Kompartimenten (s. <b>Anhang A3, Abb. 24a</b>), deren Übersättigungsfaktoren experimental bestimmt worden sind;</p> <p><b>Validierungsgrenzen</b> : TT 575m, Höhe 3800m ü.M.; Gase: Luft, EANx, HeOx, Tmx; TZ: mehrere Tage. Dabei steht:</p> <p><b>ZH</b> für Zürich (wo Bühlmann das Druckkammerlabor führte)</p> <p><b>L</b> steht für «linear» (da der Zusammenhang zw. dem Umgebungsdruck und dem maximal tolerierten Inertgas-Kompartimentsdruck linear ist)</p> <p><b>16</b> steht für die 16 Koeffizientenpaar a, b welche dem linearen (also mit einer Geraden darstellbaren) Zusammenhang zw. Umgebungsdruck und maximal tolerierten Inertgas-Kompartimentsdruck festlegen.</p> <p><b>A,B,C</b> stehen für die verschiedenen Variation der Koeffizientenpaare (A: theoret., Experiment; B: Tabellen; C: Tauchcomputer)</p>
VGM	<p>Variable Gradient Model; Neo-Haldane Modell, analog Bühlmann, basiert auf Bühlmann-Koeffizienten, bei dem aber für jedes Kompartiment ein anderer GF definiert ist, der zudem erst noch von der Tiefe und der Tauchdauer abhängt. Führt zu einer enormen Anzahl Freiheitsgrade, was eine saubere retrospektive Analyse von TG-Profilen fast unmöglich macht. Zudem werden die Berechnungs-Algorithmen sehr aufwendig.</p>
<i>Weitere Perfusionsmodelle:</i>	
DCAP	<p>Decompression Computation and Analysis Program; benutzt die M11F6 M-Werte, die Bill Hamilton für die Schwedische Navy entwickelt hatte. Diese werden oft für Mischgase eingesetzt. Die 11 HWZ für Stickstoff reichen von 5 - 670 min., damit diejenigen für Helium: 5 - 240 min.</p>
PADI RDP	<p>Koeffizienten Satz benutzt die 14 M-Werte, die von Raymond E. Rogers &amp; Michael R. Powell, Diving Science and Technology Corp (DSAT), entwickelt worden sind.</p> <p>Mit diesem Modell können allerdings nur NDLS berechnet werden, keine Validierung für Deko-TGs und für Bergsee-TG!</p> <p><i>Also bestenfalls für den Malediven-NZ-Ferientaucher geeignet.</i></p>
VVal-18/VVal-18M	<p>Der U.S. Navy Exponential-Linear (Thalmann) Algorithmus für die 2008 US Navy air decompression tables. Es ist ein Einphasen Modell mit den Gasen in Lösung, analog zum Modell von Haldane und verfeinert von Workman und Bühlmann, mit neun Gewebe-Kompartimenten (HWZ= 5-240min) in der Originalversion. Einsatz für konstante pO<sub>2</sub> für die Mk15/Mk16 UBA.</p>
EL-DCM	<p>Exponential Linear Decompression Model, auch von Thalmann, 1984: exponentielle Aufsättigung, lineare Entsättigung bis zu einem Cross-over Punkt. Von dort wieder exponentiell weiter.</p>

# Nomenklatur (Forts.)

GPM Gradient Perfusion Model; Strauss et al.

## *Dekompressionsmodelle mit Berücksichtigung gemischter Gasphase bei der Gas-Elimination:*

MT92	Das arterielle Blasen-Dekompressionsmodell der franz. <i>Tables du Ministère du Travail</i> 1992
BSAC'88 tables	Hennessy's kombiniertes Perfusions/Diffusions-Modell für die BSAC Tabellen
VPM	Das Varying Permeability Model (VPM) von D.E. Yount et al. an der University of Hawaii
RGBM	Das Reduced Gradient Bubble Model (RGBM) von Bruce Wienke vom Los Alamos National Laboratory; z.T. basierend auf VPM; <b>praktisch eine Black-Box, da die meisten Parameter unbekannt !!</b>
BVM	Bubble Volume Model (-> USN, Gerth et al.); USN Probabilistic Model, 3 Kompartimente mit HWZ = 1, 26, 315min
GFM	Gas Formation Model
Copernicus	Dekompressions-Algorithmus, basierend auf einem dynamischen Zwei-Phasen Modell, welches die VGE (Venous Gas Emboli) als Stress-Indikator und Voraussage-Parameter verwendet. <i>The methodology is based on nonlinear model predictive control (NMPC) to provide the fastest possible ascent schedule subject to the constraint of a model-predicted VGE peak.</i> <i>Gutvik, C, Doctoral Thesis; A Physiological Approach to a New Decompression Algorithm Using Nonlinear Model Predictive Control</i>

## Exotische Modelle und seltsame Implementierungen:

### Exotic Models & strange Implementations:

- ONE compartment (1-tissue model)
- CMD (Complex Mathematical Decompression)
- ABM (Articular Bends Model)
- COMEX (AB-Model, Compagnie Maritime d'Expertises)
- RGBM (Reduced Gradient Bubble Model, B.R. Wienke)
- TBDM (Tissue Bubble Diffusion Model, M. L. Gernhardt)
- Srinivasan & Gerth: plethora of bubble models ...
- Saul Goldman's models (Safe Advanced Underwater Algorithm, or S.A.U.L.); (3CM)
- PADUA (Pennsylvania Analysis of Decompression for Undersea and Aerospace)
- GFM (Gas Formation Model)
- PBPK („physiologically based pharmacokinetic“ models); often combinations of parallel and serial compartments
- Contractors Tables (deep secret ... ☺)
- EXPOSER (DRF, HT 1 s → 2760 min)

SUB  
MARINE  
CONSULTING

*Eine detailliertere Übersicht ist in Anhang A2 präsentiert.*

### Benutzte Termini:

$p_{surf}$	[bar]	Oberflächen-Totaldruck (surface); = f(Höhenlage)
$p_{surf}(H_0)$	[bar]	Oberflächen-Totaldruck auf Meereshöhe ( $H_0$ )
$dp/dT$	[bar/m]	hydrostatischer Druckgradient für Wasser (bar/m); Werte von 0.098 bis 0.102 bar/m (s. dazu <b>Anhang A8</b> )
$p_{amb}$	[bar]	totaler Umgebungsdruck (ambient pressure)
$p_{amb.tol.}$	[bar]	(symptomlos) tolerierter Umgebungsdruck
$p_{alvIG}$	[bar]	alveolärer Inertgas-Partialdruck (allgemein)
$p_{alvIG.init}$	[bar]	initialer, alveolärer Inertgas-Partialdruck
$p_{alvIG.final}$	[bar]	finaler, alveolärer Inertgas-Partialdruck
$p_{TIG}$	[bar]	Inertgas-Kompartimentsdruck
$p_{TIG.tol.}$	[bar]	(symptomlos) tolerierter Inertgas-Kompartimentsdruck
$p_{TIG.tol.GF}$	[bar]	(symptomlos) tolerierter UND mit GF reduzierter Inertgas-Kompartimentsdruck
$p_{TIG}(t_{init}) = p_{TIG.init}$	[bar]	initialer Inertgas-Kompartimentsdruck
$p_{TIG}(t_{final}) = p_{TIG.final}$	[bar]	finaler Inertgas-Kompartimentsdruck
$\ln(2)$	[---]	natürlicher Logarithmus von 2
$e$	[---]	Euler'sche Zahl; Basis der natürlichen Logarithmen; = 2.718 281..
$t_H$ oder HWZ	[min]	Halbwertszeit (eines Kompartimentes)
$k$	[1/min]	Zeitkonstante für jedes Kompartiment; $k = \ln(2) / t_H$
$R$	[bar/min]	zeitliche Änderung des alveolären Inertgasdruckes im Atemgas; $R = dp_{alvIG}/dt = const.$ ; wird verwendet in der Schreiner-Gleichung
$\delta_{p_{TIG}}$	[bar]	Differenz (Gradient) des Inertgas-Kompartimentsdruckes zum Umgebungsdruck (Ambient Pressure Line)
$\delta_{p_{TIG.tol.}}$	[bar]	maximal (symptomlos) tolerierte Differenz (Gradient) des Inertgas-Kompartimentsdruckes zum Umgebungsdruck (Ambient Pressure Line)
$\delta_{p_{TIG.0}}$	[bar]	Inertgas-Partialdruck-Differenz (Gradient) OHNE GF
$\delta_{p_{TIG.GF}}$	[bar]	Inertgas-Partialdruck-Differenz (Gradient) MIT GF
$a$	[bar]	Original Bühlmann Koeffizient; Nullpunkt-Versatz
$b$	[---]	Original Bühlmann Koeffizient; Steigung der Geraden (bar/bar); konstanter Wert pro Kompartiment (Gerade)
$a_{GF}$	[bar]	mit GF modifizierter Bühlmann Koeffizient a; Nullpunkt-Versatz
$b_{GF}$	[---]	mit GF modifizierter Bühlmann Koeffizient b; variable Steigung der Verlaufskurve für $p_{TIG.tol.}$ (keine Gerade mehr); $b_{GF} = Fkt. (GF(T))$ .
$GF$	[---]	Gradienten Faktor (Reduktionsfaktor); = f(T)
$T$		Tauchtiefe
$GF_{low}$	[---]	Gradienten (Reduktions-) Faktor für die erste/tiefste Dekostufe

GF <sub>high</sub>	[---]	Gradienten (Reduktions-) Faktor für das Auftauchen (Oberfläche)
T <sub>low</sub>	[m]	tiefste Deko-Stufe; berechnet mit GF <sub>low</sub>
T <sub>high</sub>	[m]	oberste Deko-Stufe = Oberfläche (0m); berechnet mit GF <sub>high</sub>
k <sub>GF</sub>	[1/m]	(konstante) Steigungsrate zw. GF <sub>low</sub> und GF <sub>high</sub> in Fkt. der Tiefe; $k_{GF} = dGF/dT$
<b>Zum Teil IV (Workman:</b>		
M (T); auch M-value	[fsw]	maximal tolerierter Inertgasdruck in einem Kompartiment (entspricht $p_{TIG.tol.}$ bei Bühlmann; wird in fsw (feet seawater) angegeben)
M <sub>0</sub>	[fsw]	maximal tolerierter Inertgasdruck in einem Kompartiment bei einem Umgebungsdruck von 1.013bar/33fsw (Meereshöhe); entspricht dem «Nullpunktversatz» an der Oberfläche; wird ebenfalls in fsw angegeben
M <sub>0GF</sub>	[fsw]	mit GF reduzierter «Nullpunktversatz» (hier bei $p_{surf}=1.013bar$ ); Ausgangspunkt für die durch GF veränderte Steigung des linearen Zusammenhangs zw. maximal tolerierter Inertgasdruck in einem Kompartiment und der Ambient Pressure Line.
M <sub>GF</sub> (D)	[fsw]	durch den GF veränderter maximal tolerierter Inertgasdruck in einem Kompartiment
delta_M	[fsw/ft]	Steigung (slope) der M-Value Geraden; = $dp_{TIG}/dD$ ; entspricht dem Bühlmann Koeffizient 1/b; Einheit: dimensionslos (fsw (Kompartiments-Druck) / ft (Wassertiefe))
delta_M <sub>GF</sub>	[fsw/ft]	durch GF verursachte, reduzierte Steigung
D (für depth)	[ft]	Tiefe (im Englischen: depth); entspricht der Wassertiefe, wird in ft (feet) angegeben
D <sub>tol.</sub> oder D <sub>tol.GF</sub>	[ft]	die beim auftauchen minimal tolerierte Tief nach Anwendung von GF
ft	[ft]	feet; 1 ft = 12in. = 30.48cm = 0.3048m; ausschliesslich als Längeneinheit verwendet
fsw	[fsw]	feet sea water (wird als Druckeinheit verwendet); 33fsw = 1.013bar
KF	[---]	«Konservatismus-Faktor»; reduziert direkt den maximal tolerierten Inertgasdruck in einem Kompartiment. Ist wertemässig aber sehr eingeschränkt, da $p_{TIG.tol.}$ nie kleiner werden darf als $p_{amb}$ (bei GF ist das implizit garantiert, da er sich nur auf die Differenz (=Gradient) beschränkt)
KF <sub>min</sub>	[---]	minimal zulässiger Konservatismus-Faktor bei dem $p_{TIG.tol.KF}$ gerade = $p_{amb}$ ist (entspr. GF = 0)
$p_{TIG.tol.KF}$	[bar]	(symptomlos) tolerierter UND mit KF reduzierter Inertgas-Kompartimentsdruck

*Umrechnungen:*

fp [fsw/bar] Umrechnungsfaktor fsw in bar:  $33\text{fsw}$  entsprechen  $1\text{atm} = 1.013\text{bar}$ ;  $f_p = 1.013\text{bar}/33\text{fsw}$   
ft [ft]  $1\text{ft} = 12\text{in.} = 30.48\text{cm} = 0.3048\text{m}$

Zur Tiefen-Eichung von Tiefenmessern und Tauchcomputer: s. **Anhang A8** (EN13319).

**Anmerkung:**

Nach Möglichkeit sprechen wir immer von Kompartimenten, NICHT von Geweben! Der Grund liegt darin, dass die im mathematischen Modell verwendeten Kompartimente NICHT mit tatsächlichen biologischen Geweben identisch sind.

Dies ist alleine schon dadurch ersichtlich, dass ein Kompartiment durch eine einzige Halbwertszeit charakterisiert ist, während biologische Gewebe laufend – entsprechend der aktuellen Perfusion- und Diffusionsraten – ihre Halbwertszeit (HWZ,  $t_H$ ) ändern.

# Teil I: Die Gradient Factors (GF) des Erik Baker

(mit Anleihen aus Originaltext von Oliver Maus/[www.checkdive.eu](http://www.checkdive.eu))

## Einführung

Der Elektronik-Ingenieur und Taucher Erik C. Baker stellte über die Anpassung der Koeffizienten a, b (beim Bühlmann-Modell) hinaus Überlegungen an, wie die **Entsättigung selektiv konservativer** und zudem **Taucher-individuell** durchgeführt und gleichzeitig an **bestimmte Tauchgangsprofile angepasst** werden könnte. Dies, ohne am Basismodell etwas grundlegend zu verändern.

Hintergrund der Überlegung war, dass kurze, tiefe Tauchgänge eher zu einer Sättigung der schnellen Kompartimente führen, während lange, weniger tiefe Tauchgänge auch zu einer stärkeren Sättigung der mittleren und langsameren Kompartimente führen. Baker wollte daher die Möglichkeit schaffen, auf solch unterschiedliche Tauchgangsprofile angepasster zu reagieren. Dies ohne auf sehr komplexe Blasen-, resp. Diffusionsmodelle ausweichen zu müssen, welche *zudem bisher auch nicht bessere Resultate brachten!*

Das Ganze sollte zudem mathematisch einfach und gut programmierbar sein.

## Die Gradienten Faktoren

Dazu führte er die sog. Gradienten Faktoren (gradient factors) ein, die **in der Regel zwischen 0 und 1** (resp. 0% und 100%) liegen und ausdrücken, **welcher Anteil des „Entsättigungsbereichs“** («decompression zone») **ausgenutzt** wird (s. **Abb. 1**).

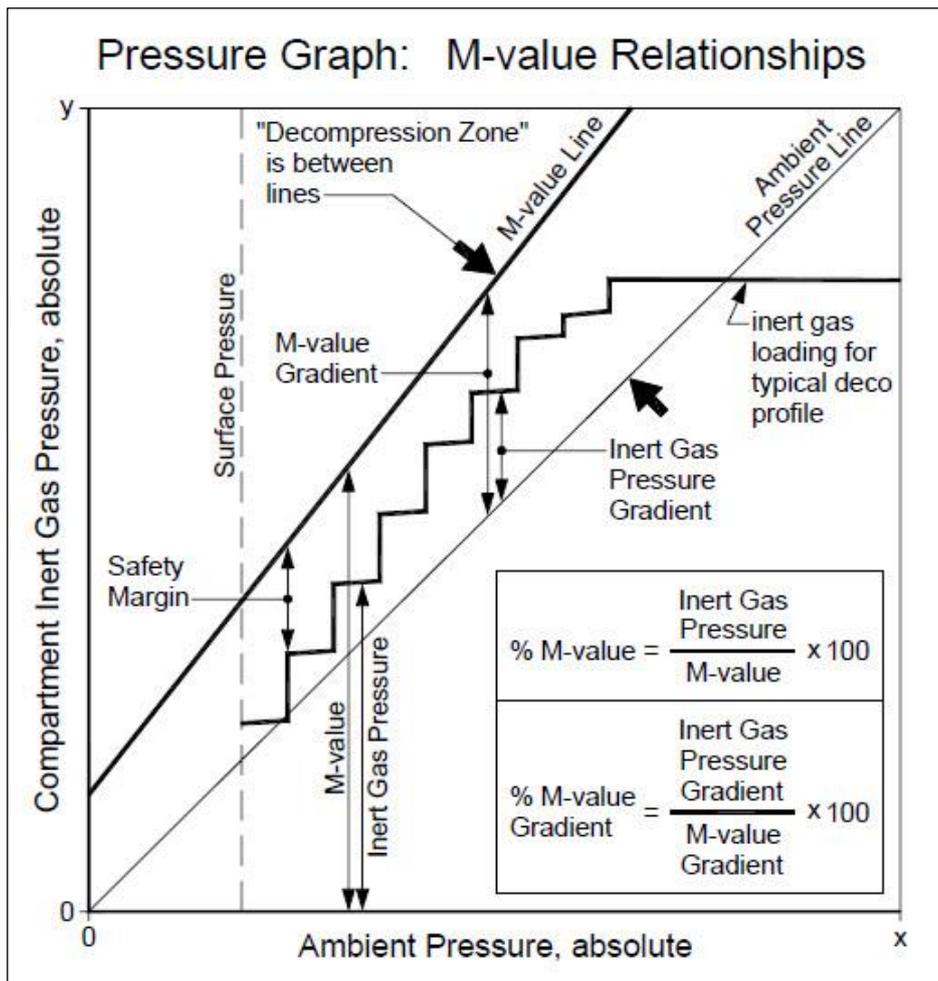


Abbildung 1: Entsättigungsbereich, aus "[Understanding M-values](#)", von Erik C. Baker

Die schräge durch den Nullpunkt gehende Gerade stellt die sog. Ambient Pressure Line dar, die Orte also wo  $p_{TIG}=p_{amb}$ .

Über die Einführung von **Gradienten Faktoren (GF)** kann die Berechnung konservativer ( $0 < GF \leq 1$ ) oder weniger konservativ ( $GF > 1$ ) durchgeführt werden, als dies z.B. das Bühlmann Modell zulässt. Gradienten Faktoren steuern, wie nahe im Rahmen der Entsättigung der tatsächliche Kompartiments-Inertgasdruck  $p_{TIG}$  (Tissue Inert Gas Pressure) an den maximalen, symptomlos tolerierten Kompartiments-Inertgasdruck ( $p_{TIG_{tol}}$ , dies entspricht bei Workman dem M-value) herangeführt werden darf.

Die Koeffizienten a und b bei Bühlmann definieren die Kompartiments-spezifische, gerade noch symptomlos ertragene Obergrenze  $p_{amb_{tol}}$  des Entsättigungsbereichs. Durch den, dadurch erreichten maximalen Druckgradienten resultiert auch eine maximale Entsättigung.

Diese Grenzen wurden empirisch, d.h. durch Hunderte **Kammerversuche** in Tiefen bis **575m** und in ebenso zahlreichen **Freiwasserversuchen** in Tiefen bis **70m** und Höhenlagen bis **4800m** ü.M. sowie bei tagelangen Tunnelarbeiten unter Überdruck gefunden. **Es sind also KEINE theoretischen Modelle, wie oft fälschlicherweise und unsubstantiiert behauptet wird (s. dazu Teil II, Pkt. A), Abb. 8a-8i und Pkt. D), Abb. 13-20).**

Durch die Einführung von Gradienten Faktoren lässt sich also erreichen, dass nur ein **bestimmter Anteil des tolerierten Kompartiments-Inertgasdrucks** ausgenutzt wird, resp. begrenzen wie weit beim Auftauchen in den "Entsättigungszone" («decompression zone») eingedrungen wird.

Die Überlegung beim Bühlmann'schen Modell (wie bei allen Haldane'schen Einphasen-Perfusions-Modellen) besteht ja darin, über die **Maximierung des Druckgradienten** (innerhalb experimentell gefundener Grenzen !) zu einer maximalen Entsättigung zu gelangen.

Der Lösungsansatz basiert auf einer Mengenbilanz (s. dazu **Anhang A3, Abb. 21b**).

Dies führt zur bekannten Differentialgleichung:  $dp_{TIG} / dt = k * (p_{TIG}(t) - p_{amb})$  **Gl. 1**

Deren Lösung für ein  $p_{alvIG}$ -Rechteckprofil lautet:

$$p_{TIG}(t) = p_{TIG_{init}} + (p_{alvIG_{init}} - p_{TIG_{init}}) * (1 - e^{(-k * \Delta t)}) \quad \text{Gl. 1'}$$

mit der Zeitkonstanten  $k = \ln(2) / t_H$

### Der maximale Inertgas-Druckgradient

Unter maximalem Druckgradienten verstehen wir hier den maximal grossen (tolerierten) Druckunterschied zwischen dem Inertgasdruck in den Kompartimenten und dem Umgebungsdruck (resp. dem alveolär «angebotenen» Partialdruck des betreffenden Inertgases!). Dieses Druckgefälle wird beim Auftauchen durch die Verringerung des Umgebungsdruckes (also auftauchen) erreicht ODER durch (isobaren) Gaswechsel (s. O<sub>2</sub>-Deko).

Maximaler Druckgradient bedeutet physiologisch, dass in den Lungenkapillaren ein höherer Inertgasdruck besteht (nämlich der maximal mögliche, symptomlos ertragene), als auf der alveolären Seite («Inertgas-Angebot»). Damit diffundiert mehr Inertgas aus dem Blut in die Lungenbläschen und wird abgeatmet als umgekehrt.

Das Problem besteht bei der Maximierung des Druckgradienten nun darin, **die (unscharfe) Grenze nicht zu überschreiten**, ab der es zu einer unkontrollierten Blasenbildung kommen kann (s. **Abb. 2**).

Unschärf in dem Sinne, weil das Ausmass der (messbaren) Blasenbildung nicht notwendigerweise fix korrelierbar ist mit dem Auftreten von DCS-Symptomen und ihren Schweregraden, was Dutzenden von Forschern weltweit immer wieder schmerzlich in Erinnerung gerufen wird.

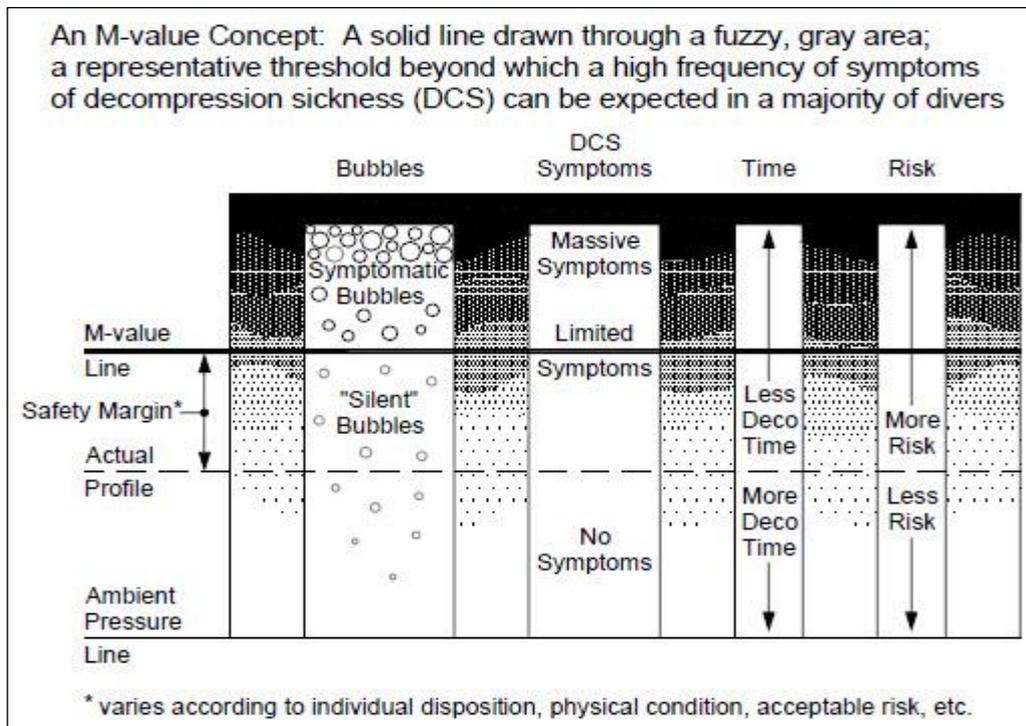


Abbildung 2: M-value Konzept aus ["Understanding M-values", von Erik C. Baker](#)

Wird andererseits der **Druckgradient nicht ausreichend** erhöht, in dem z. B. nur geringfügig aufgestiegen wird (z.B. bei exzessiven Deep Stops !), führt das je nach Tauchgangprofil zu **in-akzeptabel langen Entsättigungszeiten im flacheren Wasser**, die mehrere Probleme nach sich ziehen können, wie z. B. Unterkühlung oder solche der Gaslogistik (s. dazu die Arbeiten von Prof. S. Mitchell, **Anhang A1**).

Wie auch immer der Aufstieg letztlich aussieht, klar ist, dass eine Entsättigung nur bei Kompartimenten stattfinden kann, bei denen der Kompartiments-Inertgasdruck grösser ist als der alveoläre Inertgas-Partialdruck.

## Deep Stops

Bei tieferen Tauchgängen durch Sporttaucher (meist sog. «bounce dives») handelt es sich vorwiegend um die schnellen Kompartimente, also diejenigen mit kurzen Halbwertszeiten (HWZ), welche bestimmend sind. Bei diesen Sporttauchern weisen die langsamen Kompartimente i.A. einen Kompartiments-Inertgasdruck auf, der deutlich unter dem alveolären Inertgas-Partialdruck liegt.

Je grösser nun dieses umgekehrte Druckgefälle ist, desto schneller sättigen sich die langsamen Kompartimente. Dies macht sich vor allem im technischen Tauchen bemerkbar. Die logische Konsequenz daraus ist eine anschliessende längere Entsättigungsphase auf den niedrigeren Austauschstufen. Das wird von den Anhängern der «deep stops» oft vergessen.

Die längere Zeit *ohne jeglichen wissenschaftlichen Beweis* propagierten Deep Stops à la Pyle (übrigens ein Fischkundler, kein Physiologe!) verursachen genau diesen erhöhten Dekompressionsstress für mittlere und langsamere Kompartimente. Es brauchte Studien der NEDU (US Navy Experimental Diving Unit), der französischen Marine Nationale, der Comex und weiterer renommierten Wissenschaftlern (Blatteau, Spisni, Mitchell et al.) bei denen die Schädlichkeit dieser exzessiven Deep Stops nachgewiesen worden ist (s. **Literatur im Anhang A1**).

## Die Variabilität der GF

Erik C. Baker wollte es nicht bei einem einzelnen Gradienten Faktor belassen. Dies hätte nämlich bedeutet, dass über die gesamte Entsättigungsphase derselbe Reduktionsfaktor angewandt wird (was man aber durchaus tun kann):  $GF = GF_{const}$

Ziel von Baker war es vielmehr, den **Druckgradienten zu Beginn der Austauschphase (also auf den tieferen Stufen) niedriger** zu halten und erst mit **abnehmender Austauschiefe zu steigern**. Das Resultat sind ähnliche Austauschprofile wie bei sog. Blasen-Modellen. Dieser grössere Konservatismus bei tieferen Stufen wurde angestrebt, weil auf diesen Stufen zuerst die Kompartimente mit kürzeren HWZ ausreichend entsättigt werden sollen, den genau diese Kompartimente (Gehirn, Rückenmark,...) verursachen ggf. DCS II Symptome. Man wollte unter allen Umständen irgendwelche Blasenbildungen in diesen biologischen Geweben verhindern. *Ein Konzept, welches nach den heutigen Erkenntnissen nicht zielführend ist.*

Dazu führte er zwei verschiedene Gradienten Faktoren ein,  $GF_{low}$  und  $GF_{high}$ . Mit jeweils einem Wert  $\ll 1.0$  kann man so einen tieferen ersten Dekostop erzwingen. Während den tieferen Dekostops werden sich die langsameren Kompartimente allerdings weiter aufsättigen und benötigen dann anschliessend entsprechend mehr Dekozeit in den flacheren Bereichen (there is NO free lunch, folks!).

Dieser obere, flachere Bereich kann mit  $GF_{high}$  separat gesteuert werden.  $GF_{high}$  sollte in aller Regel höher gesetzt werden als  $GF_{low}$ . Eine häufig verwendete Paarung ist z. B.  $GF_{low} = 0.4-0.6$  (40% - 60%) und  $GF_{high} = 0.8-0.9$  (80%-90%), ja nach Vertrauen oder Misstrauen bezüglich des verwendeten Dekompressionsmodells.

**Aus  $GF_{low}$  und  $GF_{high}$  wird ein einzelner Gradienten Faktor berechnet, wobei eine einfache lineare Funktion für einen graduellen Übergang von  $GF_{low}$  zu  $GF_{high}$  in Abhängigkeit von der aktuellen Tiefe sorgt (s. Abb. 3).**

***Wichtig zu wissen: dieser lineare Zusammenhang zw. GF und der Tiefe hat nichts mit Physiologie zu tun, sondern ist eine einfache, gut programmierbare Rechenvorschrift!***

Die Steigung dieser Geraden wird wie folgt berechnet:

$$k_{GF} = dGF/dT = (GF_{high} - GF_{low}) / (T_{high} \text{ (letzte Stoptiefe)} - T_{low} \text{ (erste Stoptiefe)}) \quad \text{Gl. 2}$$

Zu beachten: die letzte Stoptiefe ( $T_{high}$ ) ist 0m, also die Wasseroberfläche!

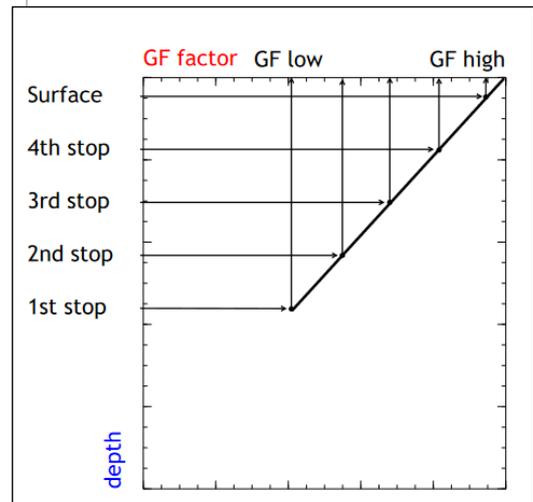
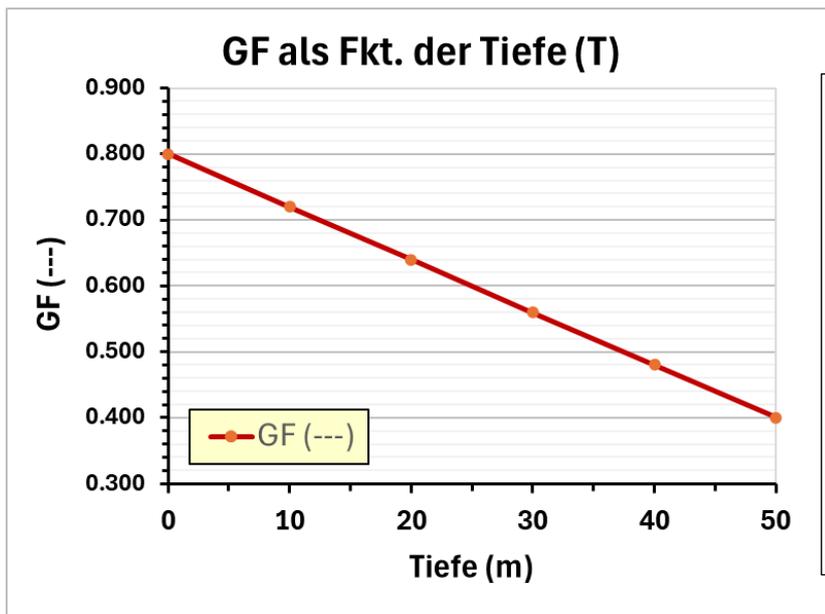
Diese Steigung  $k_{GF}$  wird nun benötigt, um den aktuellen Gradienten Faktor in Abhängigkeit von der aktuellen Dekostop-Tiefe zu ermitteln:

$$GF(T,t) = GF_{high} + k_{GF} * \text{aktuelle Dekotiefe (t)} \quad dGF/dT = k_{GF}; \text{ s. oben} \quad \text{Gl. 3}$$

**Dieser tiefenabhängige GF wird nun *einheitlich* für sämtliche Kompartimente, resp. auf deren Koeffizientenpaare a, b, angewendet.**

Es gibt Ansätze, *Kompartiments-individuelle GF-Werte* zu benutzen (z.B. das **VGM-Modell**), um so dem individuellen Gewebeverhalten besser Rechnung zu tragen. Damit steigt aber die Anzahl Freiheitsgrade des Systems enorm, was saubere retrospektive Analysen äusserst erschwert.

**Graphische Darstellung: s. Abb. 3, nächste Seite**



Quelle: OSTC-Manual, h.weikamp

Abbildung 3: GF als Fkt. der Tiefe, resp. von  $p_{amb}$

### Anwendung der GF

Mit  $GF_{low}$  kann auf Wunsch eine tiefere erste Dekostufe erzwungen werden. Zunächst muss aber  $k_{GF}$  (die Steigung) ermittelt werden und dies benötigt die Angabe der ersten Dekostufe (die wir wiederum aber erst berechnen wollen, resp. müssen).

In die Implementierung des Dekompressionsmodelles finden die Gradienten Faktoren so Eingang, dass der Tauchgang zunächst laufend mit  $GF=1.0$  berechnet wird. Ab dem Moment, ab dem der Aufstieg eingeleitet wird, wird der verwendete Gradienten Faktor auf  $GF_{low}$  gesetzt und der erste (tiefste) Dekostop damit berechnet.

Dies geschieht durch Umstellung der bekannten Schreiner Gleichung (s. unten) für die Inertgas-Aufnahme, resp. -Abgabe **für eine Rampe** von  $p_{alvIG}$  nach dem Term  $p_{alvIG}(t_{final})$ .

Falls sich also der  $p_{alvIG}$  linear, d.h. mit einer konstanten Rate  $R (=dp_{alvIG}/dt=const.)$  ändert, so erhalten wir für die Lösung der Differentialgleichung (Gl. 1):

$$p_{TIG}(t_{final}) = p_{alvIG.init} + R * (\text{delta}_t - 1/k) - [ p_{alvIG.init} - p_{TIG.init} - (R/k) ] * e^{-k * \text{delta}_t} \quad \text{Gl. 3'}$$

$$\text{mit } \text{delta}_t = t_{final} - t_{init} \quad \text{und} \quad R = (p_{alvIG}(t_{final}) - p_{alvIG}(t_{init})) / (\text{delta}_t)$$

Schreiner Gleichung für  $p_{TIG}(t_{final})$  bei linear veränderlichen  $p_{alvIG}$

**Beachte:** wenn  $R=0$  (d.h. wenn keine Veränderung des inspiratorischen Inertgasdruckes stattfindet), dann reduziert sich die obige Gleichung zur bekannten Gleichung für ein Rechteckprofil (s. Gl. 1'):

$$p_{TIG}(t_{final}) = p_{TIG.init} + ( p_{alvIG.init} - p_{TIG.init} ) * ( 1 - e^{(-k * \text{delta}_t)} )$$

Nun haben wir alle Informationen zur Verfügung, um die GF-Steigung zwischen  $GF_{low}$  und  $GF_{high}$  berechnen zu können.

## Schreibweise der GF

Die Notation lautet  $GF_{low}/GF_{high}$ , im Allgemeinen als Prozentwerte ohne das %-Zeichen, also z.B. GF50/85.

## Retrospektive Ermittlung des GF

Bisher haben wir die rechnerische Ermittlung der Gradienten Faktoren betrachtet und wie sie für die Berechnung der Dekostufen herangezogen werden.

Durch die nachträgliche Ermittlung der Gradienten Faktoren kann man aber auch berechnen, welcher Anteil vom Gradienten tatsächlich für die Entsättigung ausgenutzt wurde.

Die Gleichung dazu lautet:

$$GF = (p_{TIG} - p_{amb}) / (p_{TIG.tol} - p_{amb})$$

Gl. 4

Im Zähler wird vom Inertgasdruck im Kompartiment ( $p_{TIG}$ ) der Umgebungsdruck ( $p_{amb}$ ) abgezogen, wobei gelten MUSS:  $p_{TIG} > p_{amb}$ .

Im Nenner hingegen steht die Differenz zw. dem maximal tolerierten  $p_{TIG}$  ( $p_{TIG.tol.}$ ) nach Bühlmann und dem Umgebungsdruck ( $p_{amb}$ ).

Nach Bühlmann sollte der tolerierte Inertgas-Überdruck im Kompartiment ( $p_{TIG.tol.}$ ) während des Aufstieges immer ausgenutzt werden, d. h. ohne den Sicherheitszuschlag durch einen Gradienten-Faktor  $< 1.0$ . Der Gradienten Faktor wäre bei «Bühlmann-Original» also genau 1.0

Das bedeutet in Gl. 4 also  $p_{TIG} = p_{TIG.tol.}$

Gl. 4'

Wird  $p_{TIG.tol.}$  substituiert mit dem Ausdruck nach Gl. 5' (Teil II) ergibt sich für die Ermittlung des Gradienten Faktors folgende Gleichung:

$$GF = (p_{TIG} - p_{amb}) / (p_{amb} / b + a - p_{amb})$$

Gl. 4''

## Auswirkungen der GF auf das Dekompressionsprofil

Quelle: Kevin Gurr, *Variable Gradient Model: An Approach To Create More Efficient Decompressions, InDepth. July 2, 2019; aus dem Englischen übersetzt und ergänzt.*

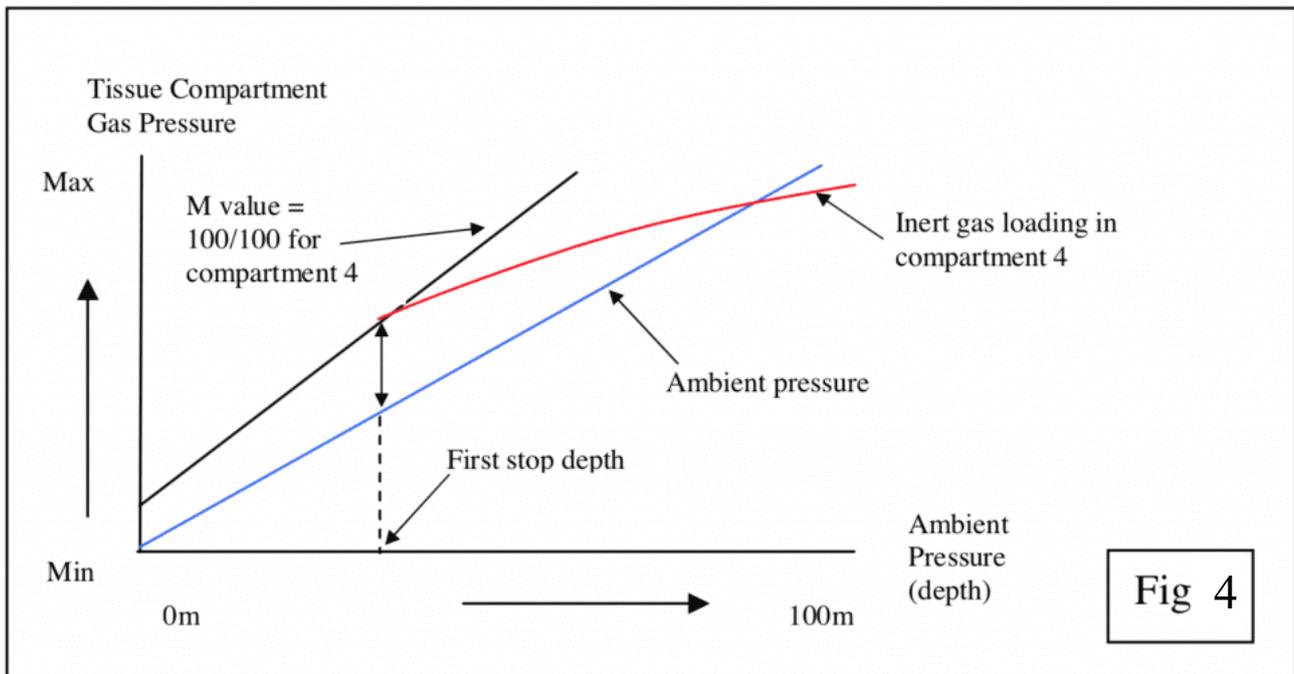
### a) Grundsätzlich

Betrachten wir das Bühlmannsche Dekompressionssystem: Es wird davon ausgegangen, dass jedes der hypothetischen Gewebekompartimente bei einer Druckreduzierung (Aufstieg) nach einer Druckexposition (Zeit in der Tiefe), die es ihnen ermöglicht hat, Gas zu absorbieren, sicher einen bestimmten Inertgas-Überdruck erfahren kann.

Das anschließende Dekompressionsprofil, das beim Aufstieg erzeugt wird, sollte den tolerierten Überdruck oder M-Wert - ein theoretisches Konstrukt für das theoretisch kontrollierende Gewebekompartiment im Körper - nicht überschreiten, um eine Dekompressionskrankheit (DCS) zu vermeiden. Aus der Gesamtheit aller betrachteten Kompartimente und dem Erreichen (aber nicht überschreiten) der entsprechenden M-Werte, wird ein Dekompressionsstops-Profil erstellt.

**Abbildung 4** stellt ein sehr vereinfachtes Beispiel dar, das nur eines der schnellen Gewebe umfasst, welche die primäre Aufstiegsphase steuern. Der M-Wert für dieses Kompartiment ist als gerade Linie dargestellt. Wenn der Taucher den Aufstieg regelkonform kontrolliert, bleibt die

Inertgas-Belastung in dem Kompartiment auf oder unter der M-Wert-Linie. Wenn der Taucher dies tut, nehmen wir an, dass er 100 % des verfügbaren M-Werts nutzt, was bedeutet, dass es für diesen Tauchgang keinen zusätzlichen Sicherheitsspielraum gibt; er taucht theoretisch direkt an den experimentell gefundenen Grenzen des Modells.



*Decompressions, InDepth. July 2, 2019*

Bei einem typischen Bounce-Tauchgang ist es nach Bühlmann-Standard üblich, einen schnellen Aufstieg bis zum ersten Stop zu ermöglichen, um ein hohes Mass an Ausgasung zu erzeugen. Auf diese Weise ist die Gasbelastung im schnellsten Kompartiment auf oder nahe der Sättigung in der unteren Tiefe (die langsamen Gewebe sind nur teilweise gesättigt). Dies bedeutet, dass die schnellsten Kompartimente den anfänglichen Aufstieg kontrollieren, da ihre Gasbelastung nahe oder auf dem tolerierten Überdruckwert (M-Wert) liegt. Die erste Stoptiefe wird festgelegt, wenn das steuernde (schnelle) Kompartiment dem M-Wert am nächsten ist. Das Beispiel fokussiert nur den Punkt, an dem der erste Stop beginnt, und enthält keine Angaben zu den anderen Kompartimenten oder zu der restlichen Dekompression.

In der Terminologie der Gradienten Faktoren ist die M-Wert-Linie die 100/100-Referenz. Die erste 100 beschreibt, wie nahe (in Prozent) dieser erste Stop an der M-Wert-Linie liegt, und die zweite 100 beschreibt, wie nahe der letzte Stop liegt. 100/100 hat also keine zusätzliche Sicherheitsspanne im Vergleich zum M-Wert. Im Gesamtbild würden der M-Wert und der Innendruck jedes Kompartiments bis zum Ende des Tauchgangs (und nicht nur bis zum eingezeichneten Stop) mit demselben 100/100-Gefälle auf dem Diagramm dargestellt werden. Die langsameren Kompartimente würden ihren M-Wert während der letzten Dekompressionsphasen erreichen, während die schnelleren Kompartimente die tiefere Dekompression steuern.

Das Gradienten Faktoren System verändert den M-Wert, indem es einen Prozentsatz der Differenz zwischen dem M-Wert und dem Umgebungsdruck nimmt. Ein einfaches Beispiel zur Veranschaulichung der Funktionsweise des Gradienten Faktors ist die Verwendung von 80 % des M-Werts als Kontrollwert (80/80-Linie), was zu einer Linie im Diagramm (**Abbildung 5**) unterhalb der 100/100-Linie führt, wodurch der zulässige Überdruck des Kompartiments reduziert und damit ein tieferer Dekompressionsstops erzeugt wird.

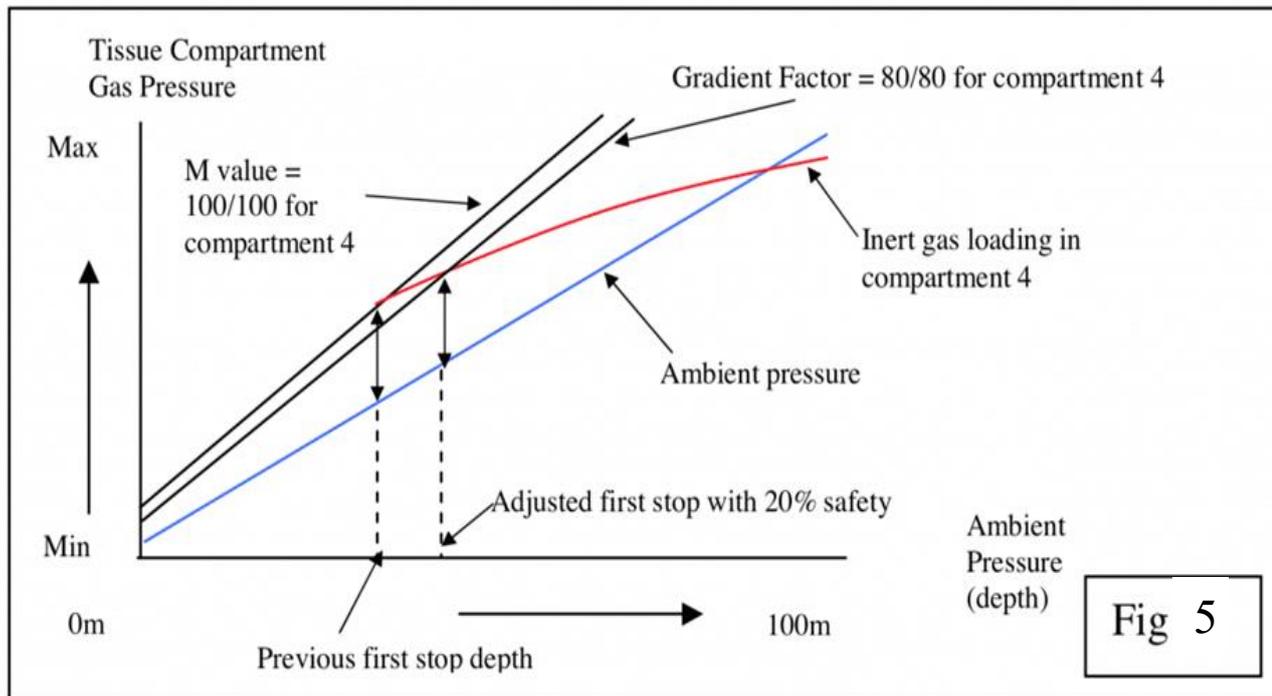


Abbildung 5: Quelle: Kevin Gurr, *Variable Gradient Model: An Approach To Create More Efficient Decompressions*, InDepth. July 2, 2019

In Realität müssten hier natürlich alle angepassten M-Werte und Kompartiments-Drücke in das Gesamtbild eingezeichnet, was dem gesamten Dekompressionsprofil mehr Sicherheit verleiht. Da die meisten dieser frühen, auf gelösten Gasen basierenden Tabellen für Tauchgänge in relativ flachen Gewässern formuliert wurden, eignen sie sich nicht für Tiefseetauchgänge, obwohl sie in der Vergangenheit oft für die Verwendung in tiefen Gewässern extrapoliert wurden. Obwohl diese Tabellen für verschiedene Tiefen eine unterschiedliche Lösung bieten, waren sie auf eine bestimmte Tiefe beschränkt.

Und was ist mit Pyle-Stops? Der Ichthyologe (Fischkundler) Richard Pyle entwickelte eine praktische, für Taucher verständliche Lösung zur Änderung des Dekompressionsprofils, um den übermäßigen Überdruck im Kontrollraum bei den Tiefen-Stops zu verringern. Er hatte den persönlichen Eindruck, dass er sich nach «Vorschalten» von zusätzlichen Tiefen-Stops am Ende der Dekompression «einfach besser fühlte». Dies ist natürlich keine wissenschaftliche Aussage! Er liess damit den Druck in den schnelleren Kompartimenten abfallen, bevor er zum ersten Tabellenstop aufstieg, und erreichte nicht den Höchstwert des M-Werts!

Der Nachteil dabei war, dass in anderen Kompartimenten noch Gas weiter aufgenommen wurde, was in flachen Gewässern zu einer zusätzlichen Dekompressionspflicht führen konnte. Er wandte einen Sicherheitsfaktor (welchen?, wo?, wie?) an, der sich nur auf die tieferen Stationen auswirkte. Dies führte zwingend dazu, dass sich die langsameren Kompartimente während der Dekompressionsphase im flachen Wasser ihrem M-Wert annäherten, sofern keine zusätzlichen Sicherheitsfaktoren angewendet wurden. Aber eben: welche denn ???

Nun kommen wir zu den Blasenmodellen (VPM usw.). Vereinfacht ausgedrückt versuchen Blasenmodelle, die Wachstumsphasen von Inertgas-Blasen und ihre nachfolgenden Auswirkungen zu erklären. Diese Modelle konzentrieren sich auf den ersten Teil des Aufstiegs, in dem die Blasen wachsen, und behaupten zudem, dass sie zu einer vorhergesagten Reduzierung der Dekompressionspflicht in flachem Wasser führen können.

Aufgrund dieser Dekompressionsverringering kam es jedoch bei einigen Tauchgängen zu Symptomen von DCS, die nicht anders erklärt werden konnten. In den letzten Jahren wurden diese Blasenwachstumsmodelle mehrfach überarbeitet, und neue Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die von den Blasenmodellen berechneten „Tiefenstops“ möglicherweise nicht effizienter sind als die Dekompression in flacheren Stop-Tiefen.

Eine gängige (aber komplizierte) Lösung zur Verringerung des Problems bestand darin, das, was über Dekompressionen im *flachen* Wasser bekannt war (Bühlmann), mit dem Tiefwasserblasenmodell zu kombinieren.

**[Anmerkung des Autors: die Kammertests von Bühlmann im Bereich 200m bis 320m als «Flachwasser» zu bezeichnen, ist schon sehr gewagt!! Es war damals immerhin Weltrekord: «the first 1000ft OW-dive ever», Catalina Islands, 1962, Hannes Keller.]**

Wir wissen, dass dies immer noch eine unvollständige Lösung ist, da Phänomene wie arterielle Blasen und andere Effekte nicht berücksichtigt werden. Blasenmodelle bieten eine Erklärung und ein funktionierendes Modell für das, was Pyle vom Standpunkt eines technischen Tauchers aus ziemlich unwissenschaftlich praktisch umzusetzen versuchte.

Ein neueres Instrument, das eine einfachere Lösung zwischen Bühlmann- und Blasenmodellen bietet, ist die Verwendung von Gradienten Faktoren mit einem Modell für gelöste Gase, das wiederum die M-Werte der kontrollierenden Kompartimente verändert (Baker).

Dies hat den Effekt, dass ein Dekompressionsprofil im Stil eines Blasenmodells mit einem Modell für gelöste Gase kombiniert wird. Gradienten Faktoren können Blasenmodelle weiter nachahmen, indem zwei verschiedene Gradienten Faktoren zur Steuerung der Dekompression verwendet werden: einer, der sich in erster Linie auf die tiefen Stufen bezieht, und einer für die flachen.

So würde ein Gradienten Faktor von 20/80, der üblicherweise bei tieferen Tauchgängen verwendet wird, einen Überdruckwert von 20 % (statt 100 %) der Differenz zwischen dem Umgebungsdruck und dem zulässigen M-Wert für das kontrollierende Kompartiment des ersten oder „tiefen Stops“ und 80 % (statt 100 %) des M-Werts für die Druckdifferenz der kontrollierenden Kompartimente am „niedrigsten Stop“ erlauben. Die dazwischen liegenden Stops werden berechnet, indem eine Überdruckwert-Linie zwischen den beiden Punkten gezogen und die neuen angepassten M-Werte für jedes dazwischen liegende Kompartiment aufgetragen werden. Es wird eine lineare Berechnung zwischen dem ersten und dem letzten eingestellten M-Wert angenommen.

In **Abbildung 6** nehmen wir an, dass Kompartiment 4 den Tiefst-Stop und Kompartiment 16 den Last-Stop steuert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die laufenden Reduzierungen der Inertgas-Belastung der Kompartimente nicht über den M-Wert hinaus dargestellt, ebenso wenig wie alle anderen M-Werte der übrigen Kompartimente.

**Abb. 6 s. nächste Seite.**

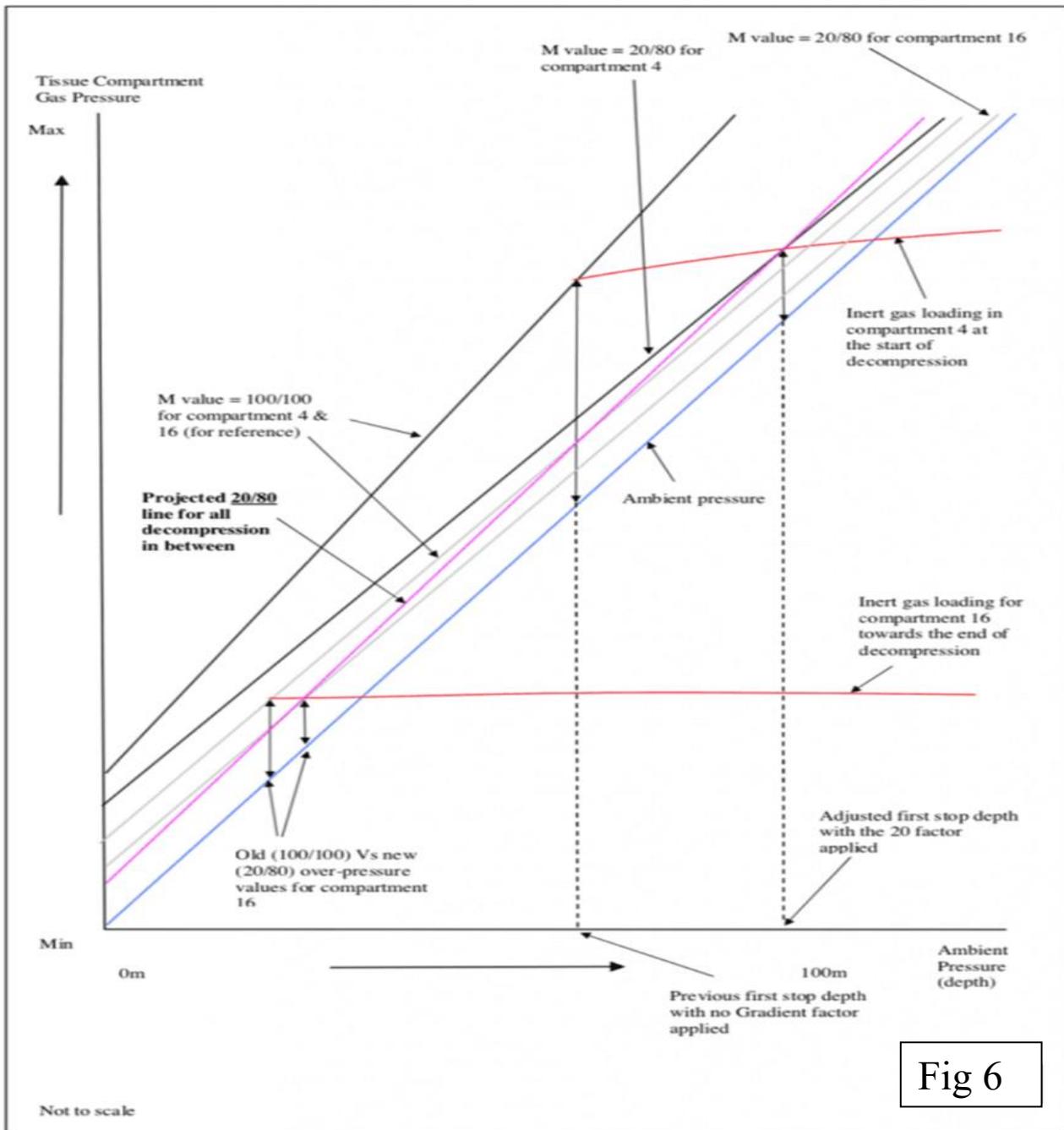


Abbildung 6: Quelle: Kevin Gurr, *Variable Gradient Model: An Approach To Create More Efficient Decompressions*, *InDepth*. July 2, 2019

Der grösste Nachteil der Gradienten Faktoren besteht darin, dass die angewandten Faktoren eigentlich für jede Tiefe/Zeit-Exposition angepasst werden müssen. Wird z. B. das gleiche Gradienten Faktorenpaar 20/80 für einen 80-Meter-Tauchgang verwenden, kann es bei einem 30-Meter-Tauchgang zu einer übermässigen Dekompression im Flachwasser kommen, da wir aus Erfahrung wissen, dass ein Gradienten Faktor von nahezu 100/100 für diesen Flachwassertauchgang durchaus zuverlässig ist.

Was bedeutet das? Erstens ist es nicht unbedingt sinnvoll, einen einzigen Gradienten Faktor auf eine ganze Reihe von Tauchtiefen anzuwenden. Was in der einen Tiefe funktioniert, muss nicht unbedingt in einer völlig anderen Tiefe funktionieren. Zweitens bedeutet dies, dass die Anwendung von Gradienten Faktoren in erster Linie eine etwas zu grobe Lösung sein kann.

Einfach eine gerade Linie zwischen den M-Werten zu ziehen und anzunehmen, dass die Dekompression dazwischen diesem simplen linearen Ansatz folgt, kann – aber muss nicht - funktionieren. Wie kann man also eine Verfeinerung erzeugen?

Die *stochastische* Modellierung gibt es im Tauchsport schon seit einiger Zeit. Dekompressionstabellen werden u.a. auch auf der Grundlage statistischer Tauchgangdaten von Vorfällen erstellt; im Grunde werden die Punkte auf einem Diagramm aufgetragen und ein Algorithmus generiert.

Wie könnten wir dies nun nutzen, um die Modellierung des Gradienten Faktors zu verbessern? Angenommen, der Faktor 100/100 ist für einen bestimmten flachen Tauchgang in Ordnung und der Faktor 20/80 für einen bestimmten tiefen Tauchgang, wäre es dann nicht am besten, einen variablen Gradienten Faktor in Abhängigkeit von der Tiefe/Zeit der Exposition und anderen Faktoren zu haben? Wenn wir mit ziemlicher Sicherheit die wichtigsten Dekompressionszeiten für eine Reihe von Tiefen/Zeiten bestimmen können, die „sicher“ sind und zu vernünftigen Dekompressionen führen, könnten wir diese verwenden, um einen Gradienten Faktor zu erzeugen, der entsprechend variiert. Dieser Ansatz wird als das **Variable Gradient Model (VGM)** bezeichnet.

### b) Muster-Tieftauchgang

Ein weiteres augenfälliges Beispiel ist aus dem Paper von Erik C. Baker: „*Clearing Up The Confusion about "Deep Stops"*“ in **Anhang A6, Abb. 26/27** ersichtlich. Es geht um einen 90m / 20min Tmx-TG;  $GF_{low} = 0.20$ ,  $GF_{high} = 0.75$ .

Gegenüber dem «Pyle-Stop-System» (s. **Abb. 11**) werden exzessive Druckänderungen vermieden.

Trotzdem verursachen die tieferen Stops eine weitere Aufsättigung der mittleren und langsameren Kompartimenten. Allerdings – bedingt durch die relativ kurzen Stopzeiten – halten sich die Unterschiede zur Version ohne GF in noch erträglichen Grenzen.

Die Gesamt-Tauchzeit verlängert sich immerhin um 20min (=+20%); s. dazu **Abb. 26** (ohne GF), resp. **Abb. 27** (mit GF). Das ist im Übrigen 10min länger als die Deko nach Pyle.

Die Untersuchungen von Mitchell et al. zeigen, dass beim Pyle-System die anschließenden Stops im flacheren Wasser eben NICHT ausreichen um die weiter aufgesättigten mittleren und langsameren Kompartimente ausreichend zu dekomprimieren.

Auch das von Wienke verkaufsfördernd gepushte RGBM-Modell kann seine vollmundigen Behauptungen kaum einhalten, will man nicht DCS-Probleme kriegen:

«...*deep stops for decompression, extended range, and mixed gas diving with overall shorter decompression times, particularly in the shallow zone...*»

<https://www.advanceddiver magazine.com/articles/deeprgbm/deeprgbm.html>

Den ultimativen Beweis dazu haben sowohl die NEDU wie auch die französische Marine Nationale mittels entsprechender Tauchversuche erbracht.

## Teil II: Bühlmann Koeffizienten in Verbindung mit GF

### Die Fundamentalgleichung von Bühlmann

Es interessiert uns natürlich, wie sich die Gradient Faktoren auf die beiden Bühlmann'schen Koeffizienten  $a$ ,  $b$  auswirken.

Dazu benötigen wir die bekannte Gleichung von Bühlmann:

$$p_{amb.tol.} = (p_{TIG} - a_j) * b_j$$

(pro Kompartiment ein spezif. Koeffizienten-Paar;  
 $j=1,2,\dots,16$  (Kompartiments-#))

Gl. 5

Dies ist nichts anderes als eine Geradengleichung mit  $a$  = Nullpunktversatz und  $b$  = Tangens des Steigungswinkels; dies für jedes einzelne Kompartiment (s. dazu **Abb. 7**).

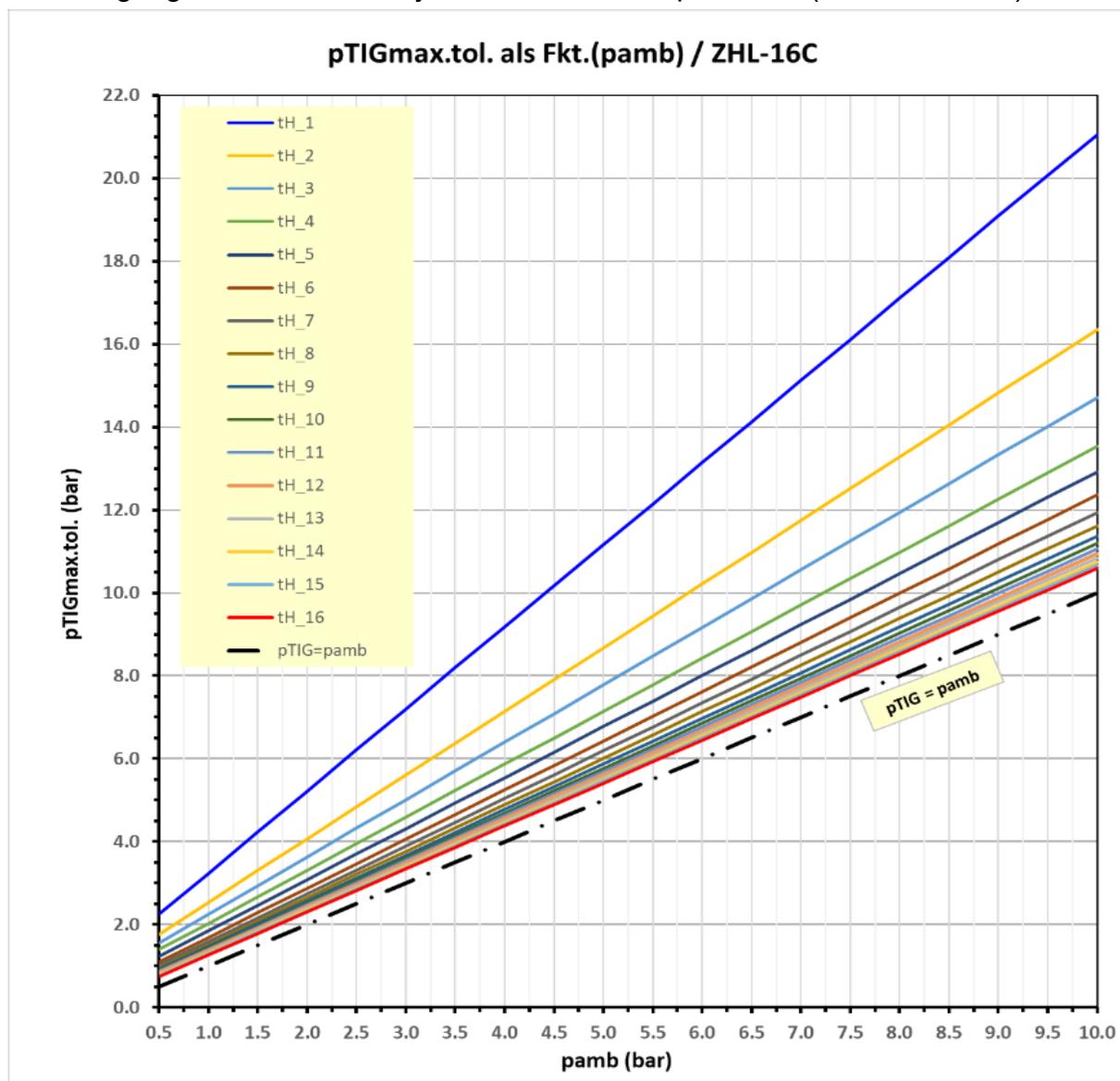


Abbildung 7: Zusammenhang  $p_{TIG.tol.} = f(p_{amb})$ ; ZHL-16C

Die schräge, durch den Nullpunkt gehende Gerade stellt die sog. Ambient Pressure Line dar, die Orte also wo  $p_{TIG} = p_{amb}$ .

Rechts dieser Linie ist  $p_{TIG}$  kleiner als der Umgebungsdruck  $p_{amb}$ , es findet also eine weitere Aufsättigung statt. Links davon passiert gerade das Umgekehrte, es bildet sich ein Inertgas-Überdruck im Kompartiment aus, ein sog. Gradient, das Kompartiment fängt an, sich zu entsättigen.

Gleichung 5 aufgelöst nach dem tolerierten Maximum von  $p_{TIG}$  ergibt:

$$P_{TIG.tol.} = p_{amb} / b + a$$

Gl. 5'

### A) Experimentelle Bestimmung der Koeffizienten

In einigen Laien-Taucherforen ist immer wieder die Rede davon, dass diese Bühlmann-Koeffizienten «im Labor» bestimmt worden seien.

Wenn damit das Druckkammerlabor (DKL) des Universitätsspitals Zürich gemeint ist, dann stimmt diese Aussage wenigstens teilweise.

Wenn aber damit gemeint ist, die Koeffizienten seien einfach durch ein paar mathematische Mauscheleien an Bühlmann's Schreibtisch entstanden, so ist dies blanker Unsinn und höchstens ein Beweis für deren Mangel an erforderlichlichem Fachwissen!

Tatsächlich wurden im DKL im Wassertank *Hunderte* von Tauchgängen mit Luft, Nitrox, HeOx und Tmx in Tiefen von 100m – über 300m gemacht, darunter zwei Extrem TG über mehrere Tage auf 500m, resp. 575m, was Weltrekord darstellte.

Die restlichen experimentellen Versuche fanden alle im Freiwasser statt, dies in Tiefen bis 300m (Catalina Islands, 1962), sowie hauptsächlich in der Schweiz (hier bis 2500m ü.M.) und in den Anden (Lake Titicaca, 3800m ü.M.). Versuchstaucher stammten aus Polizei-, Militärkreisen und aus dem Privatbereich («normale») Sporttaucher. Die Versuchsreihen umfassten sowohl Einzel- wie Repetiv-TG (s. dazu **Abb. 8a-8i**).

Aus den Versuchen zur Bestimmung der Koeffizienten:

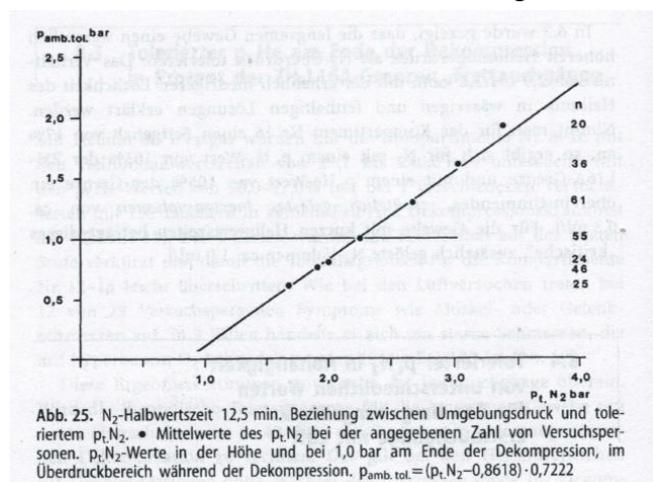
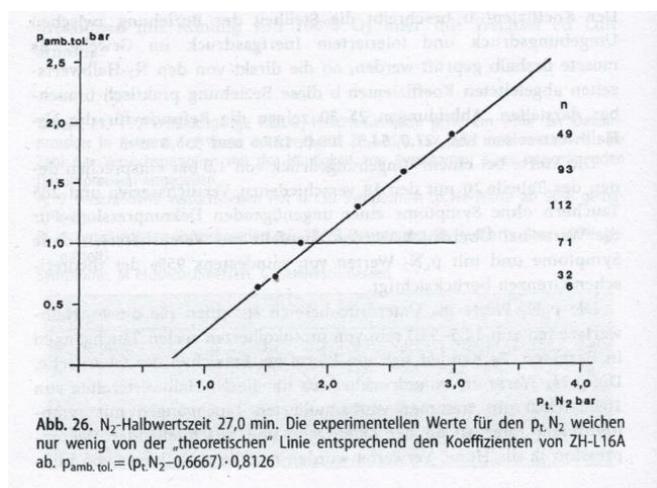


Abbildung 8a, 8b:  $p_{amb.tol} = Fkt.(p_{TIG})$

Quelle: A.A.Bühlmann, «Tauchmedizin», 5. Aufl., Springer, Berlin



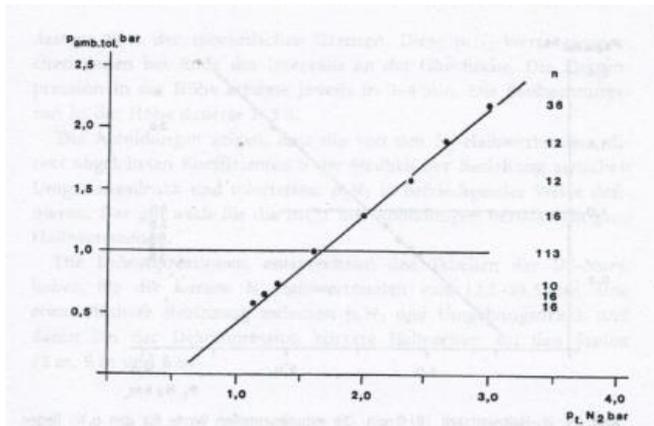


Abb. 27. N<sub>2</sub>-Halbwertszeit 54,3 min. Die experimentellen Werte für den p<sub>T,N<sub>2</sub></sub> stimmen mit der „theoretischen“ Toleranzlinie entsprechend ZH-L16A gut überein.  $p_{amb.tol} = (p_{T,N_2} - 0,5282) \cdot 0,8693$

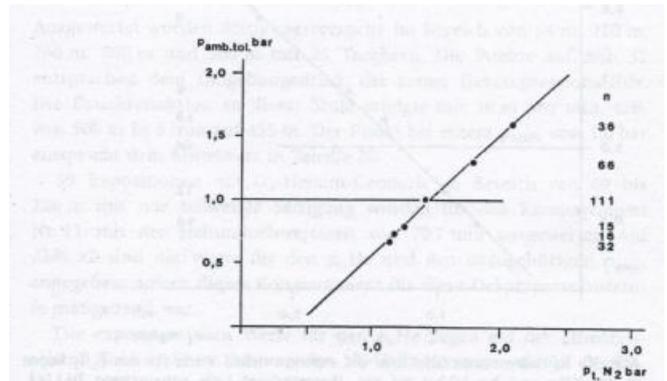


Abb. 28. N<sub>2</sub>-Halbwertszeit 109,0 min. Gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen Werten des p<sub>T,N<sub>2</sub></sub> mit der „theoretischen“ Linie.  $p_{amb.tol} = (p_{T,N_2} - 0,4187) \cdot 0,9092$

Abbildung 8c, 8d:  $p_{amb.tol} = Fkt.(p_{TIG})$   
 Quelle: A.A.Bühlmann, «Tauchmedizin»,  
 5. Aufl., Springer, Berlin

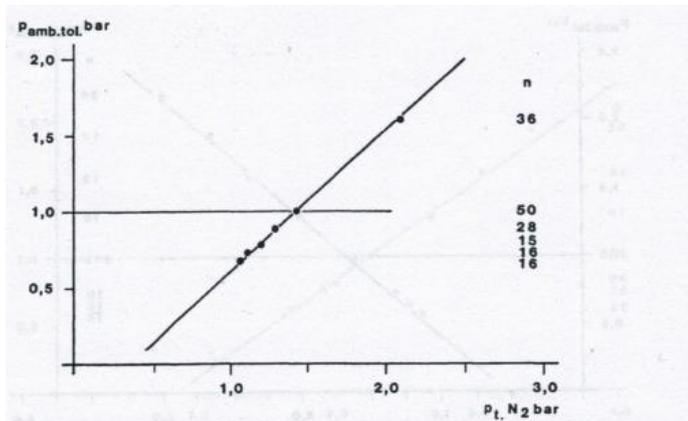


Abb. 29. N<sub>2</sub>-Halbwertszeit 187,0 min. Die experimentellen Werte für den p<sub>T,N<sub>2</sub></sub> liegen auf der „theoretischen“ Linie.  $p_{amb.tol} = (p_{T,N_2} - 0,3497) \cdot 0,9319$

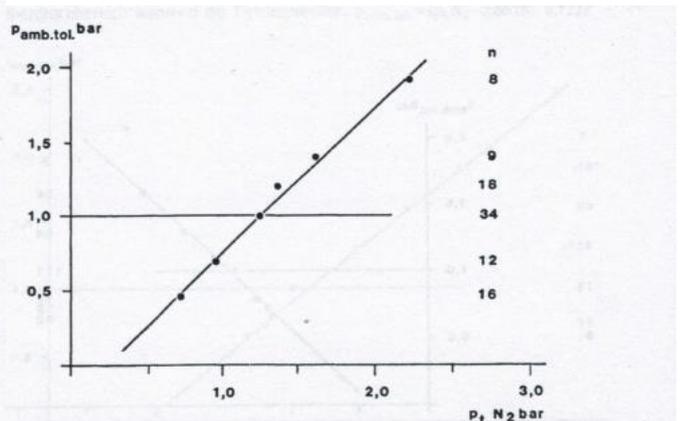
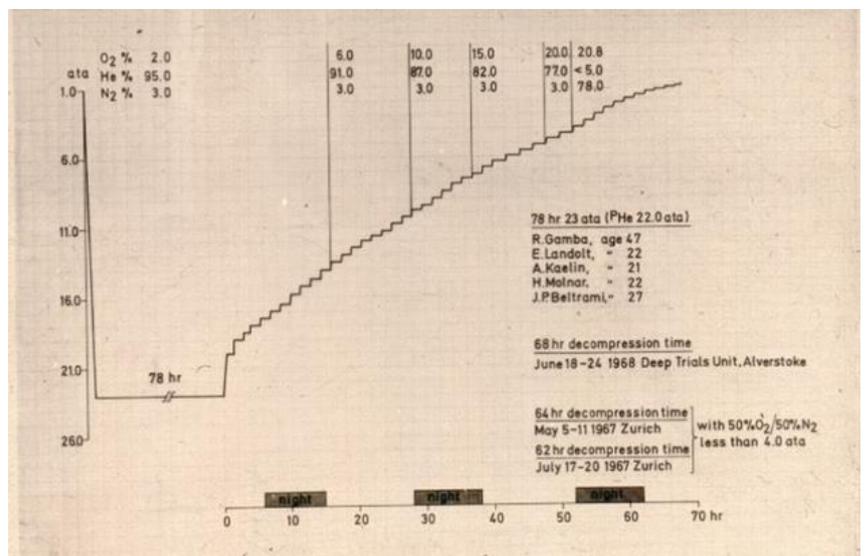


Abb. 30. N<sub>2</sub>-Halbwertszeit 635,0 min. Die experimentellen Werte für den p<sub>T,N<sub>2</sub></sub> liegen in der Höhe und bei 1,0 bar auf der „theoretischen“ Linie entsprechend ZH-L16A. Der p<sub>T,N<sub>2</sub></sub>-Wert bei einem Umgebungsdruck von 1,9 bar ergab sich bei 8 Sättigungstaugängen mit beschwerdefreier Dekompression von 30–9 m.  $p_{amb.tol} = (p_{T,N_2} - 0,2327) \cdot 0,9653$

Abbildung 8e, 8f:  $p_{amb.tol} = Fkt.(p_{TIG})$   
 Quelle: A.A.Bühlmann, «Tauchmedizin»,  
 5. Aufl., Springer, Berlin

Abbildung 8g: 230m Versuch-TG,  
 1967 (Sättigungs-TG, 78h);

Quelle: Prof. Bühlmann, pers.  
 Kommunikation





# Gasdrücke und -Dichten beim 575m Tauchversuch (DKL ZH)

## Gefahrene Partialdrücke und Gasdichten beim 575m Kammerversuch DKL Zürich (Nasskammer)

	psurf	<b>1.00000</b>	bar		Abstieg bis 500m	<b>50.0</b>	min	Dichte O2@1bar	<b>1.428</b>	g/NL
	dp/dt	<b>0.100</b>	bar/m H2O		Aufenthalt 500m	<b>8.0</b>	min	Dichte He@1bar	<b>0.179</b>	g/NL
	f_O2-Luft	<b>20.9%</b>	%		Aufenthalt 575m	<b>120.0</b>	min	Dichte N2@1bar	<b>1.251</b>	g/NL
	f_N2-Luft	<b>79.1%</b>	%					Dichte Luft@1bar	<b>1.293</b>	g/NL (mit Spurengasen)
								Spurengase	<b>0.005</b>	g/NL

Gas	f_O2	f_He	f_N2	Tiefe von		Druck von		pO2_von		pHe_von		pN2_von		Dichte von	
				m	m	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	g/NL	g/NL
Abstieg															
Luft 20.8/0/79.2 ohne SpurenG	20.9%	0.0%	79.1%	0.0	0.0	1.00	1.00	0.209	0.209	0.000	0.000	0.791	0.791	1.293	1.293
Füllgas O2--> Tmx	steigend	0.0%	sinkend	0.0	3.3	1.00	1.33								
Füllgas He --> Tmx	sinkend	steigend	sinkend	3.3	500.0	1.33	51.00								
Bottom-Gas TMX1/97.4/1.6	1.0%	97.4%	1.6%	500.0	500.0	51.00	51.00	0.510	0.510	49.674	49.674	0.816	0.816	10.641	10.641
Aufstieg															
TMX 1/97.4/1.6	1.0%	97.4%	1.6%	500.0	350.0	51.00	36.00	0.510	0.360	49.674	35.064	0.816	0.576	10.641	7.511
TMX 2/96.4/1.6	2.0%	96.4%	1.6%	350.0	260.0	36.00	27.00	0.720	0.540	34.704	26.028	0.576	0.432	7.961	5.971
TMX 3/95.4/1.6	3.0%	95.4%	1.6%	260.0	200.0	27.00	21.00	0.810	0.630	25.758	20.034	0.432	0.336	6.308	4.906
TMX 4/94/2.0	4.0%	94.0%	2.0%	200.0	100.0	21.00	11.00	0.840	0.440	19.740	10.340	0.420	0.220	5.258	2.754
TMX 8/89.5/2.5	8.0%	89.5%	2.5%	100.0	75.0	11.00	8.50	0.880	0.680	9.845	7.608	0.275	0.213	3.363	2.599
TMX 10/87/3.0	10.0%	87.0%	3.0%	75.0	50.0	8.50	6.00	0.850	0.600	7.395	5.220	0.255	0.180	2.857	2.016
TMX 15/82/3.0	15.0%	82.0%	3.0%	50.0	30.0	6.00	4.00	0.900	0.600	4.920	3.280	0.180	0.120	2.391	1.594
TMX 20/76/4.0	20.0%	76.0%	4.0%	30.0	20.0	4.00	3.00	0.800	0.600	3.040	2.280	0.160	0.120	1.887	1.415
Luft 20.8/0/79.2 ohne SpurenG	20.8%	0.0%	79.2%	20.0	0.0	3.00	1.00	0.624	0.208	0.000	0.000	2.376	0.792	3.863	1.293

Abbildung 8k: Gas-Daten zum 575m Kammer-Tauchgang 1981 in Zürich

## B) Zusammenhang zw. Bühlmann-Koeffizient a und a<sub>GF</sub>:

Als erstes möchten wir den mathematischen Zusammenhang zw. dem Original-Bühlmann-Koeffizient a (Nullpunkt-Versatz) und seinem korrigierten Gegenpart a<sub>GF</sub> herstellen.

Für p<sub>amb</sub> = 0 (Nullpunkt) können wir schreiben:

$$p_{\text{TIG.tol.}} = 0/b + a = a \quad (= \text{Definition des Nullpunkt-Versatzes}) \quad \text{Gl. 6}$$

Dies gilt auch nach der Korrektur mit GF:

$$p_{\text{TIG.tol.GF}} = 0 / b_{\text{GF}} + a_{\text{GF}} \quad \text{Gl. 6'}$$

Wir wissen aber auch, dass gilt:

$$GF = \text{delta\_}p_{\text{TIG.tol.GF}} / \text{delta\_}p_{\text{TIG.0}} \quad (\text{s. dazu Teil I; Definition des GF}) \quad \text{Gl. 7}$$

Daraus ergibt sich also für den Punkt p<sub>amb</sub> = 0:

Aus Gl. 7 folgt:  $GF = a_{\text{GF}} / a$  und damit

$$a_{\text{GF}} = a * GF$$

Gl. 8'

## C) Zusammenhang zw. Bühlmann-Koeffizient b und b<sub>GF</sub>

Als nächstes wollen wir den Zusammenhang zw. b und b<sub>GF</sub> herstellen:

Betrachten wir nun dazu die Gradienten, d.h. die Differenz zw. Inertgasdruck im Kompartiment und dem gerade herrschenden Umgebungsdruck.

Bekannterweise wird die Entsättigung genau durch diesen Gradienten getriggert.

### a) für den Zustand OHNE GF:

$$\text{delta\_}p_{\text{TIG.0}} = (p_{\text{TIG.tol.}} - p_{\text{amb}}) \quad \text{Gl. 9}$$

### b) für den Zustand MIT GF:

$$\text{delta\_}p_{\text{TIG.GF}} = \text{delta\_}p_{\text{TIG.0}} * GF \quad \text{Gl. 9'}$$

Da definitionsgemäss ist  $0 < GF \leq 1.0$ , verkleinern wir im Allgemeinen die maximal zulässige Übersättigung nach Bühlmann (delta\_p<sub>TIG.0</sub>). Bei GF=1.0 nutzen wir genau die Bühlmann'sche Grenze.

Ein GF>1.0 hingegen würde bedeuten, dass wir einen grösseren Inertgas-Gradienten zulassen wollen, als dies Bühlmann experimentell festgestellt hat. *Von solchen Vorhaben sei dringend abgeraten!*

Wie setzen Gl. 9 in Gl. 9' ein:

$$\text{delta\_}p_{\text{TIG.GF}} = (p_{\text{TIG.tol.}} - p_{\text{amb}}) * GF \quad \text{Gl. 9''}$$

damit:

$$\text{delta\_}p_{\text{TIG.GF}} = p_{\text{TIG.tol.}} * GF - p_{\text{amb}} * GF \quad \text{Gl. 9'''}$$

Nun ersetzen wir p<sub>TIG.tol.</sub> durch den Ausdruck aus Gl. 5':

$$\text{delta\_}p_{\text{TIG.GF}} = (p_{\text{amb}} / b + a) * GF - p_{\text{amb}} * GF \quad \text{Gl. 9''''}$$

Mit dem GF reduzieren wir bekanntlich den Wert von p<sub>TIG.tol.</sub>. Wir können delta\_p<sub>TIG.GF</sub> deshalb auch anders schreiben:

$$\text{delta\_}p_{\text{TIG.GF}} = p_{\text{TIG.tol.GF}} - p_{\text{amb}} \quad \text{Gl. 10}$$

$p_{TIG.tol.GF}$  wiederum (unter analoger Verwendung von Gl. 5‘):

$$p_{TIG.tol.GF} = p_{amb} / b_{GF} + a_{GF} \quad \text{Gl. 11}$$

alles eingesetzt in Gl. 9‘‘‘‘:

$$\begin{aligned} (p_{amb} / b_{GF} + a_{GF} - p_{amb}) &= (p_{amb} / b + a) * GF - p_{amb} * GF \\ &= p_{amb} * GF / b + a * GF - p_{amb} * GF \end{aligned} \quad \text{Gl. 12}$$

ausmultipliziert:

$$(p_{amb} / b_{GF} + a_{GF} - p_{amb}) = p_{amb} / b * GF + a * GF - p_{amb} * GF \quad \text{Gl. 12‘}$$

Die Termini  $a_{GF}$  und  $a * GF$  sind identisch (s. Pkt. a) und werden beidseitig herausgestrichen, ferner dividieren wir beide Seiten durch  $p_{amb}$ :

$$(1/ b_{GF} - 1) = (GF / b - GF) \quad \text{Gl. 12‘‘}$$

und damit:

$$1/b_{GF} = GF / b - GF + 1 \quad \text{Gl. 12‘‘‘}$$

oder:

$$\boxed{b_{GF} = 1 / (GF / b - GF + 1)} \quad \text{Gl. 13}$$

### Neuberechnung des tolerierten Umgebungsdruckes $p_{amb.tol.GF}$

Wir wissen natürlich (s. Teil I), dass GF nicht eine Konstante ist, sondern abhängig von der Tiefe (resp.  $p_{amb}(T, t)$ ). *Ausnahme: falls  $GF_{low} = GF_{high} = GF_{const.}$  (s. unten)*

Damit sind auch die Bühlmann-Koeffizienten eben auch keine Konstanten mehr, sondern ebenfalls abhängig von der Tiefe, resp.  $p_{amb}(T)$ !

Werden die Gradienten Faktoren derart in die Berechnung des tolerierten Umgebungsdruckes eingebunden, ergibt sich folgende Gleichung (t = laufende Tauchzeit):

$$\boxed{p_{amb.tol.GF}(HWZ, T, t) = p_{TIG}(HWZ, t) * (GF(T, t) / b(HWZ) - GF(T, t) + 1) - a(HWZ) * GF(T, t)} \quad \text{Gl. 14}$$

Weiter können wir für GF (T,t) schreiben:

$$GF(T, t) = GF_{high}(T_{high}) + k_{GF} * T(t) \quad k_{GF} \text{ s. Teil I} \quad \text{Gl. 15}$$

### **Es gibt EINE Ausnahme:**

Wenn  $GF_{low} = GF_{high} = GF_{const.}$ , also unabhängig von der Tiefe ist ( $k_{GF} = 0$ ), dann sind die mit den GF geänderten Bühlmann-Koeffizienten  $a_{GF}$  und  $b_{GF}$  ebenfalls konstant.

### Plausibilitätsprüfung

Wir möchten die Korrektheit anhand von 2 Kontrollpunkten nachprüfen.

Für GF = 1.0 muss  $b_{GF}$  ebenfalls unverändert bleiben:

$$b_{GF} = 1 / (1/b - 1 + 1) = 1 / (1/b) = b/1 = \mathbf{b} \quad \text{q.e.d.}$$

Für GF = 0 (Null), also KEIN Gradient, muss  $b_{GF}$  dieselbe Steigung haben wie die Ambient Pressure Line (=1); gleichzeitig ist ja der Koeffizient  $a_{GF}$  ebenfalls Null ( $a * GF = a * 0 = 0$ ). Wir haben also keinen Nullpunktversatz mehr, die Linie geht durch den Nullpunkt.

$$b_{GF} = 1 / (0/b - 0 + 1) = 1 / (0 - 0 + 1) = 1/1 = \mathbf{1} \quad \text{q.e.d.}$$

## Parametrische Untersuchung zu $b_{GF} = f(b, GF)$ für GF von 0 bis 1:

Es interessiert natürlich, wie sich die Original-Koeffizienten mit verändertem GF selbst auch verändern.

Beim Koeffizienten a (Nullpunktverschiebung) ist das, wie wir herausgefunden haben:

$$a_{GF} = a * GF$$

d.h. , der Koeffizient a verändert sich direkt proportional mit dem GF.

Beim Koeffizienten b ist es etwas komplizierter. Wir haben oben (Gl. 13) herausgefunden, dass:

$$b_{GF} = 1 / (GF/b - GF + 1)$$

Wir verändern also GF von 0 (Null) bis 1.0 und berechnen jeweils damit  $b_{GF}$ . Nachfolgend (**Abb. 9**) das Resultat graphisch dargestellt:

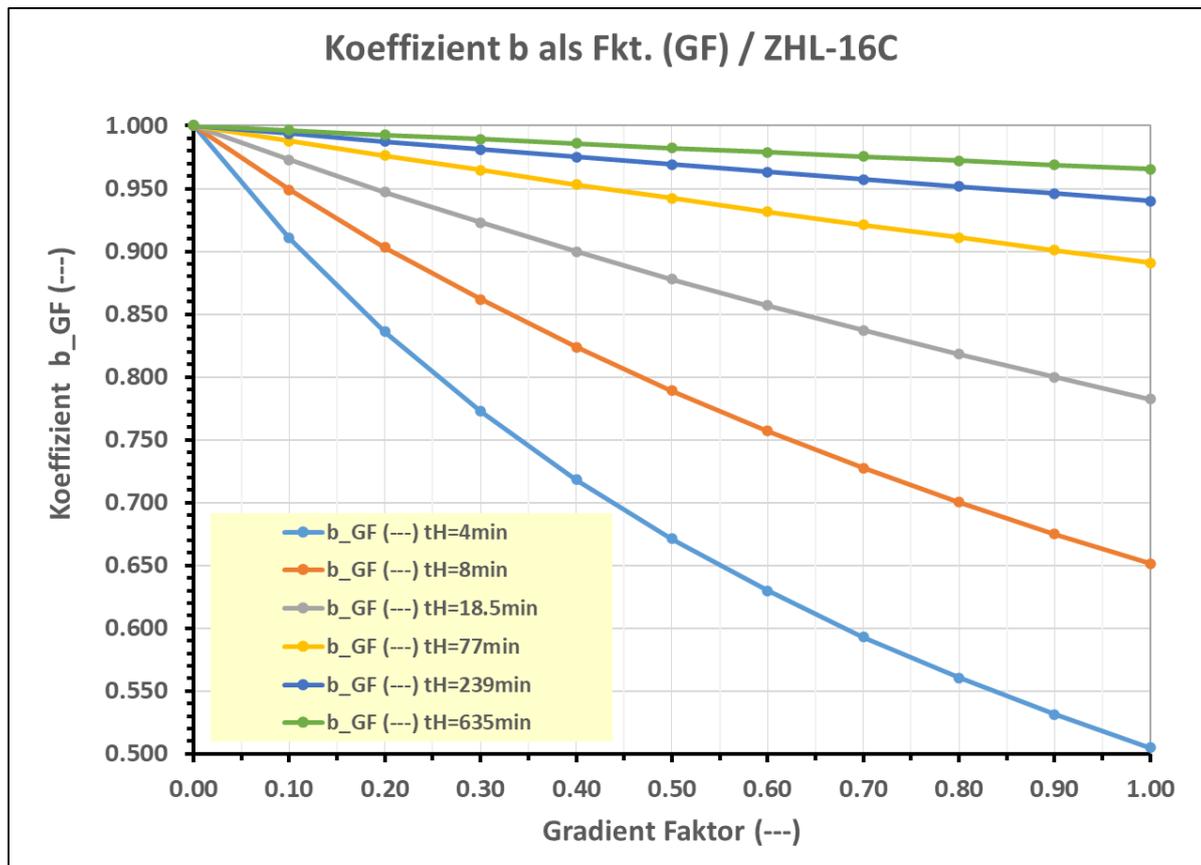


Abbildung 9: Verlauf des Bühlmann-Koeffizienten b als Fkt. des Gradienten Faktors (0...1); Modell ZHL-16C

Wir sehen, dass der Verlauf bei den kürzeren (HWZ) keine Gerade mehr ist, sondern eine leicht gebogene Kurve. Mit zunehmender HWZ nimmt die Krümmung ab (und nähert sich einer Geraden).

**Dies gibt Anlass zur Annahme, dass der Gradient ( $p_{TIG.tol.} - p_{amb}$ ) sich ebenfalls nicht mehr linear über die Tiefe verändert. Dieser These wird in Teil III nachgegangen. In vielen Publikationen werden die mit GF korrigierten Kompartiments-spezifischen Beziehungen von  $p_{TIG}$  und  $p_{amb}$  weiterhin als Gerade dargestellt. Dies ist eindeutig FALSCH, zumindest wenn der GF tiefenabhängig, also NICHT konstant ist! Die nicht-Linearität beweisen wir im Teil III.**

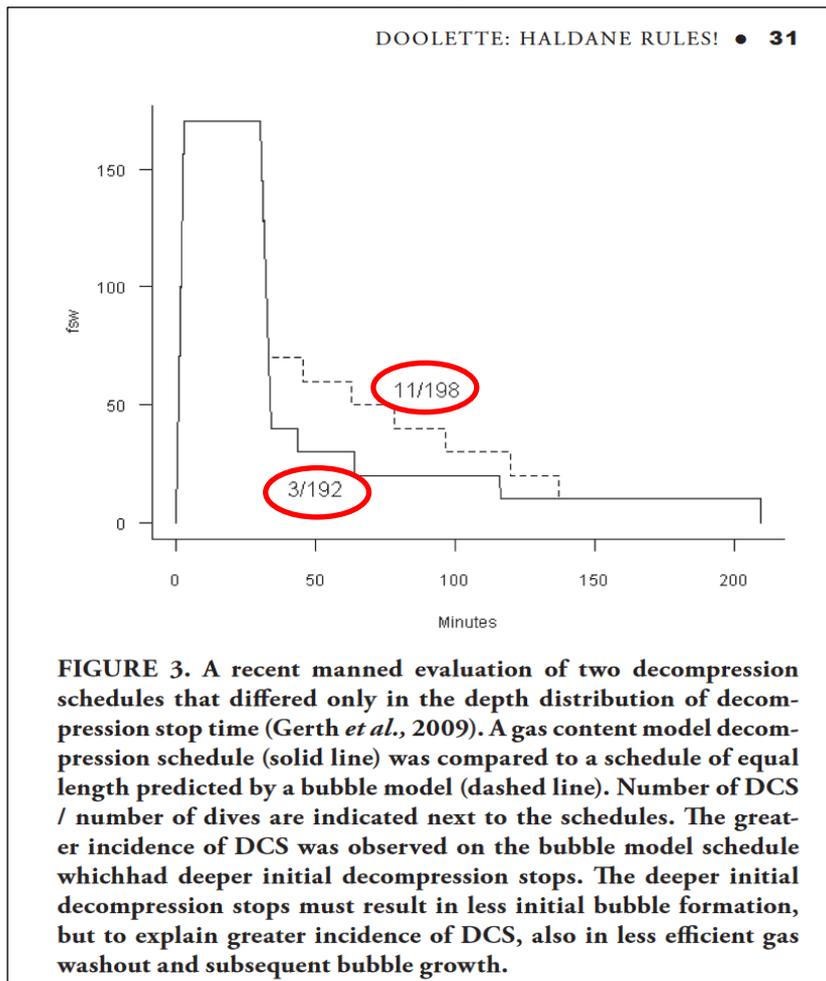
## Praxistests von Deep Stops

Was passieren kann, wenn unbedarfte und gutgläubige Taucher extrem tiefe GF-Werte einstellen, hat u.a. die NEDU (s. Literatur im **Anhang A1**) untersucht.

Gleichzeitig hat man auch untersucht, was die hochgelobten **Diffusions-Bubble-Modelle** gegenüber den **Neo-Haldane** wirklich bringen.

Mittels ca. 200 Tauchgängen hat man die Ergebnisse eines Bubble-Modells (welches automatisch wesentlich tiefere Dekostops bringt) einem konventionellen Perfusions-gesteuerten Neo-Haldane Modell gegenübergestellt (s. dazu **Abb. 10**).

Die wesentlich tieferen Dekostops haben denselben Effekt wie ein sehr tiefer  $GF_{low}$ .



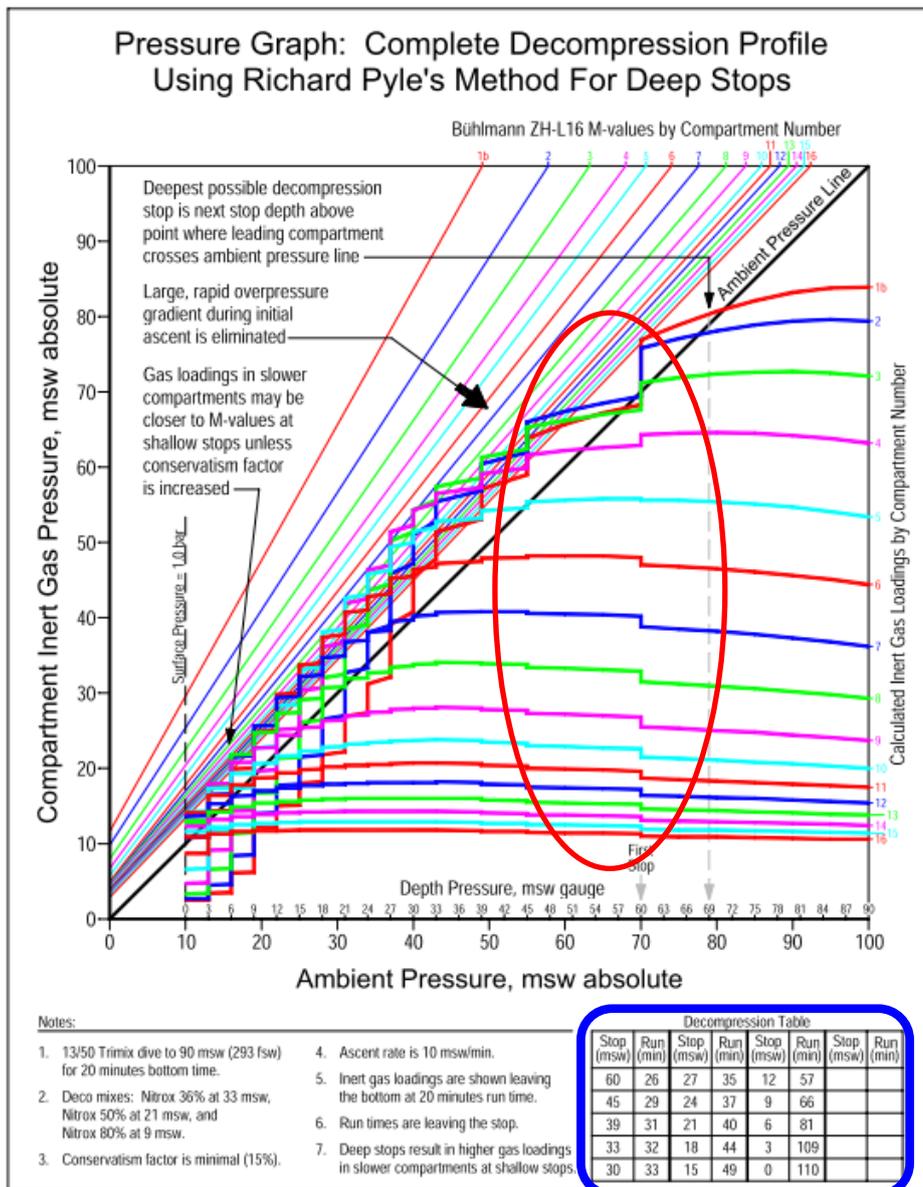
Die Ergebnisse waren ernüchternd: **11 DCS-Fälle auf 198 TG (bubble model) vs. „nur“ 3 DCS auf 192 TG (Neo-Haldane) !**

Abbildung 10: Quelle: Doolette DJ.; Haldane Rules!; in „The Future of Diving: 100 Years of Haldane and Beyond“; SMITHSONIAN INSTITUTION SCHOLARLY PRESS; Dec. 2008

Die französische Marine Nationale führte ähnliche Versuche durch, mit dem identischen Resultat (Blatteau JE, Hugon M, Gardette B.: *Deep stops during decompression from 50 to 100 msw didn't reduce bubble formation in man*).

**Kurz und gut: auch Bubble-Modelle und Deep Stops sind NICHT das Gelbe vom Ei!**

Ein Vergleich mit der Pyle-Methode zeigt, dass genau diese auf der Tiefe relativ grosse Drucksprünge (mittlere Kompartimente) hervorruft, eigentlich das, was man vermeiden wollte. Weiter ist deutlich ersichtlich, dass der Inertgas-Kompartimentsdruck gerade in den mittleren Kompartimenten doch noch erheblich ansteigt (s. dazu **Abb. 11**, nächste Seite).



(man beachte die Drucksprünge bei den Kompartiments-Inertgasdrücken und die weitere Aufsättigung der mittleren und langsameren HWZ)

Abbildung 11: Dekompressions-Profil nach der Pyle-Methode; Quelle: Erik C. Baker: *Clearing Up The Confusion About "Deep Stops"*

Dies Methoden ist zutiefst unwissenschaftlich, denn sie beruht einzig und alleine aus Pyles anekdotenhafte Erzählung: sinngemäss „er habe sich dabei einfach besser gefühlt“. Zu denken gibt, wie viele Tauchorganisationen und Taucher sich ohne vorliegende wissenschaftliche Grundlagen unbesehen darauf gestürzt haben.....

Bevor der Hype nach der NEDU-Studie stoppte, gab es Taucher, welche selbst für einen harmlosen Nullzeiten-TG auf 20-30m „Deep Stops“ einlegten. Nun ja: des Menschen Glaube ist sein Himmelsreich.....

Beim vorliegenden Muster-TG wurde die GF-Kombination so gewählt, dass sie dem Pyle Profil möglichst nahe kam. Das konnte z.T. mit dem *extrem tiefen* Wert für GF<sub>low</sub> von 0.20 recht gut erreicht werden.

Beim Vergleich der Stufenprofile (s. **Abb. 11** und **Anhang A6, Abb. 26/27**) fällt auf, dass die Stopzeiten ab 30m – 12m zw. Pyle und GF20/75 fast identisch sind.

Erst im Bereich ab ca. 9m weist das Pyle Profil kürzere Stopzeiten aus als die GF20/75 Version. Genau hier aber erfolgt die wesentliche Entsättigung mit EAN80.

Bei den *zusätzlich* «eingebauten» Pyle-Stops fällt auf, dass sich beim ersten, tiefsten Stop auf 60m nur gerade die ersten 4 Kompartimente entsättigen, alle anderen Kompartimente weisen einen markanten Inertgas-Anstieg auf (s. **Abb. 11**) ! Gerade dieser Umstand könnte dann zusammen mit den leicht kürzeren flacheren Stops ab 12m dazu führen, dass eben die mittleren und langsamen Kompartimente nicht mehr ausreichend entsättigt werden.

Pyle selber behauptet in Interviews ganz entschieden, «seine» Stops seien keine «Deep Stops», also Stops, welche sich system-inhärent aus einem Perfusions- oder Diffusions-Modell ergeben. *Sie sind quasi ein aufgepfropfter Zusatz, ohne physiologischen Link zum unterlegten Deko-Modell, der eben nur einen gewissen Profilvereich umfasst, OHNE* aber im flacheren Teil des Aufstiegs dann für diejenigen Adaptionen zu sorgen, welche sich aus dem «Eingriff» vorher ergeben.

Genau dies ist aber die zentrale Schwäche der Pyle-Stops: es mag zwar sein, dass sich die Anzahl Micro-Bubbles in den schnellen Kompartimenten ganz leicht reduzieren lässt, aber diese spielen ohnehin nur eine untergeordnete Rolle, da die *schnellen Kompartimente praktisch dem TG-Profil folgen, hohe Übersättigungen symptomlos zulassen und diese «Übersättigungsphase» damit für sie nur ein kurzzeitiger, transienter Vorgang ist.*

Vergleich der wichtigsten Parameter:

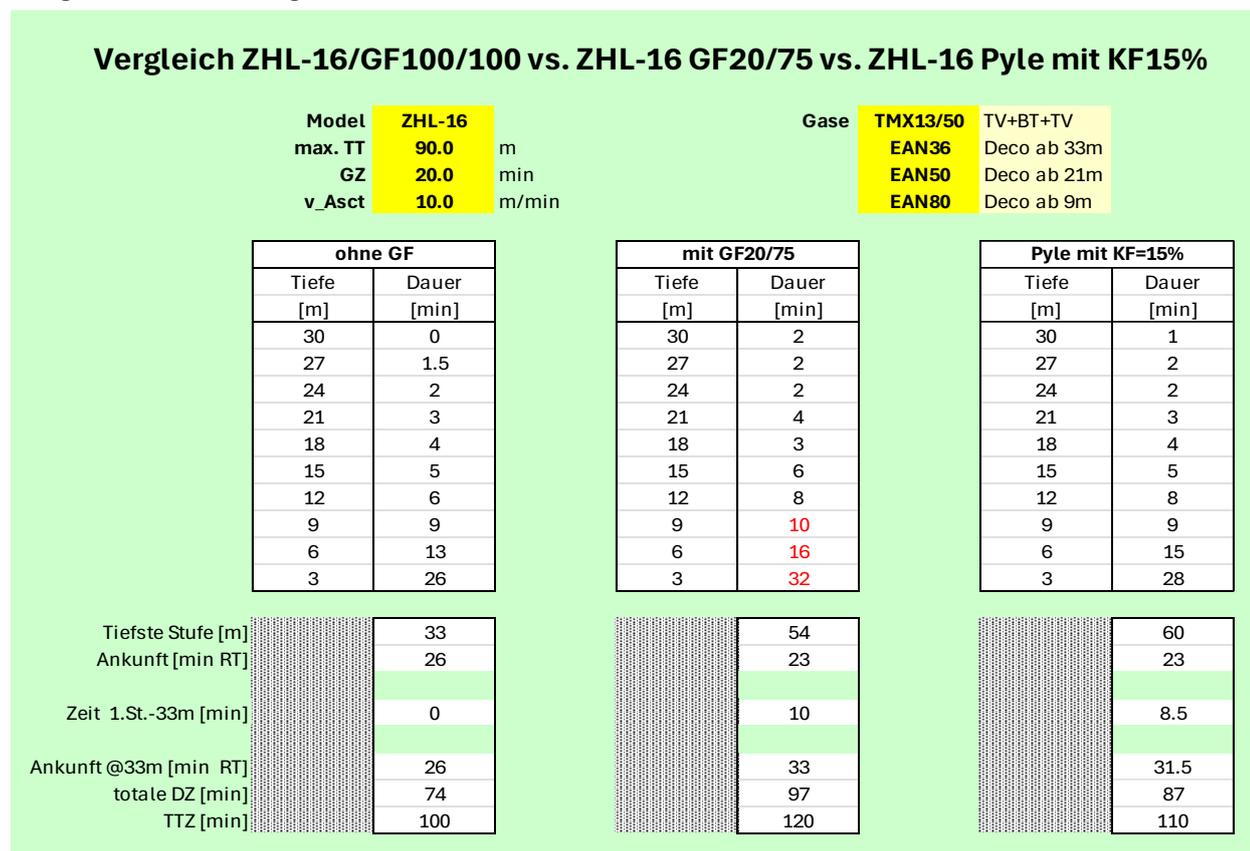


Abbildung 12: Vergleich der Deko-Profile für den Muster-TG 90m/20min

**D) Zur Frage der Sicherheit der Original-Bühlmann Koeffizienten**

Wenn man heutige sog. TEK-Diver fragt, mit welchen GF sie tauchen würden, so erhält man Werte für GF<sub>low</sub> von 20%-40% und für GF<sub>high</sub> solche von 70%-90%.

Der Grund für diese Wahl hat nur in den allerseltensten Fällen mit konkreten Erfahrungen zu tun. Meist ist es der (oft ebenso laienhafte) Ratschlag eines Buddies, eines Tauchlehrers oder man hat irgendwo in einem Laien-Tauchforum etwas gelesen.

Aber welche Organisation unterrichtet schon wissenschaftlich fundiert über dieses Gebiet??

Diese z.T. extrem tiefen GF sind meist nichts anderes als ein Zeichen tiefer Unsicherheit und fachlicher Unwissenheit.

Deshalb einige Daten zu den experimentellen TG, an denen der Autor z.T. als Organisator, als derjenige, welcher die anzuwendenden Tabellen berechnet hatte und als Versuchstaucher selbst teilgenommen hat (s. dazu **Abb. 13-20**).

Die Freiwasser-TG wurden alle mit Luft (inkl. Deko) durchgeführt.

A) NULLZEITEN

Tabelle

Tiefe [m]	US-Navy	GERS	RNPL	Bue76	DCIEM	Bue86	PADI	BSAC
	1957	1965	1972	1973	1983	1987	1988	1988
	Meer	Meer	Meer	0-700	Meer	0-700	Meer	0-250 6m-St.
9	--	--	--	--	380	335	>205	243
12	200	--	137	200	175	125	140	122
15	100	>120		75	75	75	80	74
18	60	75	57	50	50	51	55	51
21	50				35	35	40	37
24	40	45	32		25	25	30	30
27	30				20	20	25	24
30	25	30	20	20	15	17	20	20
36	15	25	14		10	12	13	14
42	10	10	10		7	9	8	12

Abbildung 13: Vergleich der Nullzeiten zu anderen bekannten Tabellen (Stand 1991-92)

3.8 Selected Trials: High Altitude Tests Muttsee (1988)

altitude : 2500m above sea level  
 adaption time: 2 hrs  
 first dive

profile	method	decompression					total
		9m	6m	4m	2m		
39m / 18'	effective	--	--	2	3	5	
	acc. T86	--	2	3	7	12	
45m / 18'	effective	--	2	3	4	9	
	acc. T86	2	3	4	11	20	
60m / 15'	effective	4	3	4	8	19	
	acc. T86	5	5	8	18	36	

«effektiv»:  
 tatsächlich  
 getauchte  
 Dekozeiten!

T86: Tabellen '86

Abbildung 14: Vergleich Tabelle 86 u. effektives Deko-Profil; Höhentauchversuche 2500m ü.M.

### 3.1 retrospective studies

type of dive	number of test series	number of test persons
simulated air dives:		
- single dives, 30-44m	31	457
- repetitive dives	9	166
- altitude decompression after a dive	14	190
simulated dives on Heliox, O <sub>2</sub>		
- single dives, 30-35m	11	159
- deep diving, 80-575m	24	193
- altitude decompression after a dive	1	15

Abbildung 15: Übersicht über durchgeführte Kammerversuche

Anmerkung: in der Kammer konnten Oberflächen-Unterdrücke bis 0.5bar erreicht werden, was in etwa einer Höhenlage von 5000m ü.M. entspricht.

Subatmosphärische Höhenlagen wurden zuerst für die Luftwaffe, dann für Armee- und Polizeitaucher und last but not least für Sporttaucher genutzt.

### 3.2 prospective studies

During 1986 - 1988, 498 real open water dives at altitudes from 1400 - 3800m and depths from 12 - 60m have been carried out analysed.

### 3.3 repetitive-dive trials

- 127 divers, 127 second dives, 39 third dives  
depth range: 32-44m, bottom times: 13'-60',  
surface intervals: 10'-120'

Abbildung 16: Übersicht über die durchgeführten Freiwasser-TG, Repetiv-TG

### 3.4 open water high altitude tests

- Lake Titicaca, Peru, 1987 / 3800m  
17 divers, 3 weeks, 290 dives, 12-39m (no symp.)
- Muttsee, Switzerland, 1988 / 2500m  
15 divers, 2 days, 56 dives, 24 - 52m (2 mild skin bends)
- Mount Kenia Massiv, 1988, 4400-4780m  
18 dives (no symptoms)
- High altitude trials in the St.Gotthard region, 1984-1988, 2134m  
40-50 diver, approx. 60 dives (no symptoms)

Abbildung 17: Übersicht Höhen-Versuchstauchgänge

### 3.7 Selected Trials: High Altitude Tests St.Gotthard, 1986 (Lago di Lucendro)

altitude : 2134m above sea level  
 adaption time: 4 hrs  
 first dive

team # 3 div. each	depth [m]	bott. time [min]	deco accord. T86				effective deco-time 2m
			6m	4m	2m	tot.	
1	33	18	--	2	5	7	1
2	36	16	--	4	6	10	4
3	37	15	--	4	6	10	2
4	32	15	--	-	3	3	1

second dive; surface interval: 60 minutes

team # 3 div. each	depth [m]	bott. time [min]	deco accord. T86				effective deco-time 2m
			6m	4m	2m	tot.	
4	32	15	1	4	9	14	1

Abbildung 18: Auswertung Höhen-Versuchs-TG St. Gotthard

altitude: 400m above sea level  
 T86 : Buehlmann table '86, 0-700m

	depth [m]	bottom time [min]	decompression stages				total asct. time	Sympt./ dives
			19m	9m	6m	3m		
T86	30	17				1	4	
experiment	32	20				-	3	0/15
T86	33	14				1	4	
experiment	35	18				-	3	0/12
T86	39	10				1	5	
experiment	41	13				-	4	0/12
T86	39	20			3	7	13	
experiment	41	23			3	5	11	0/16
T86	39	30		3	7	18	31	
experiment	41	33		3	5	15	26	0/16
T86	39	40	2	6	15	29	55	
experiment	41	40	2	5	13	27	50	0/24
T86	42	36	2	7	15	32	59	
experiment	44	35	2	5	11	26	47	0/20
experiment	44	37	3	5	12	28	51	0/9

Abbildung 19: Versuchs-TG in Schweizer Seen, alle ca. 400m ü.M.

### 3.6 practical applications (ref. also to Part II / 7.)

- construction subway Muenich, 1983-85  
 1.6-2.1 bar, 6-8 hrs/day, 5days/week; bends rate  
 6/850 "dives" (down from 48/1377 while using  
 German Tables from the Ministry of Health&Labour)
- railway construction work near Bern by Swiss  
 Federal Railway Comp. 1988-91  
 1.2-1.6 bar for 4-6 hrs a day
- dive tables in use in England, Germany, Switzer-  
 land, Austria, Peruvian-and Bolivian Navy (appr.  
 40-50'000 divers overall since 1986)
- several dive computers (since 1984/85)

Abbildung 20: Langzeit-Expositionen im Tunnelbau; weltweite Anwendungen

## E) Entgleisungen in Sachen «Deep Stops»

Der Mangel an Fachwissen führt immer wieder zu geradezu absurden «Ratschlägen» von Seiten von Ausbildungsorganisationen, über die man nur noch den Kopf schütteln kann. Hier ein solches Beispiel:

### Dive planning

#### Bail out gas

- Always carry enough bail out gas to get yourself safely to the surface in case of a bail out situation.
- To calculate your bail out, you need to understand what we, [REDACTED] call "minimum deco".
- On ALL dives, you do "stops" on ascend: minimum 2 minutes at 9 meters and 4 minutes at 6 meters.
- If you are diving deeper than 18 meters, you also plan "deep stops"; In recreational diving we calculate our first deep stop from 50% of our maximum depth. (So, from 30 meters, your FIRST deep stop will be at 15meters).
- Every deep stop is for 1 minute every 3 meters until you reach 9 meters and starts your minimum deco.
- 1 minute stops means 40 seconds at the actual depth and 20 seconds to ascent to the next stop (3 meters above).
- Your ascend rate is 10 meters pr. minute. So it will take you 2 minutes (1,5 minutes rounded up to 2 minutes) to get from 30 meters to your first deep stop at 15 meters and the average depth between 30 meters and 15 meters is 23meters (30meters+15meters divided by 2 = 22,5meters) round this up to 23meters.

Die Verantwortlichen hier scheinen ganz einfach keine Ahnung von den in Gebrauch befindlichen Dekompressionsmodellen, den Grad ihrer Validierung, den zugrundeliegenden physikalischen und physiologischen Mechanismen und neueren Erkenntnissen der Deko-Forschung zu haben und haben sich wohl behelfsmässig irgendein «System» zusammengeschnitzelt, dass dann dem ahnungslosen Kursteilnehmer «mehr Sicherheit» vorgaukelt. *Sie haben anscheinend immer noch nicht begriffen, dass die alte Haldane 2:1 Regel schon seit Hundert Jahren wissenschaftlich widerlegt worden ist.*

Und sie scheinen auszublenden, dass MILLIONEN von TG weltweit in den letzten 40 Jahren OHNE DCS-Symptome und OHNE Deep Stops durchgeführt worden sind.

So werden z.B. folgende Fragen völlig offengelassen und auch nicht irgendwo sonst für den Leser/Kursteilnehmer nachvollziehbar erklärt:

- *wie ist man auf die 9m/2' und 6m/4' Stops gekommen? Gibt es dazu wissenschaftliche fundierte und publizierte Resultate ?*
- *warum gerade 18m als Grenze für die Anwendung von Deep Stops? Gibt es dazu wissenschaftliche fundierte und publizierte Resultate ?*
- *werden diese «deep stops» einfach den anderen (von TC / Tabelle abgelesenen) «ordentlichen» Stops vorangeschaltet, oder wie verhalten sich die beiden Regeln zueinander ?*
- *ist man sich bewusst, dass diese absolut kurzen Stops zwar nichts zur Entsättigung (nicht einmal der kurzen HWZ) beitragen, aber in ihrer SUMME im Wesentlichen eine weitere und eigentlich unerwünschte Aufsättigung der mittleren und langsameren HWZ zur Folge haben, ähnlich einer exzessiv kleinen Aufstiegs geschwindigkeit ?*
- *wie ist man gerade auf die 1min Stop-Dauer gekommen? Bitte wissenschaftliche Referenzen dazu !*
- *wie ist man auf die 2:1 Regel gekommen; etwa von Mr. Haldane, oder ist das ein verunglückter Versuch von «Pyle-Stops» ?*
- *wurden diese Regeln mit international anerkannten Experten der Dekompressionsforschung entwickelt (wenn ja, mit welchen), oder einfach an einer Biertischrunde ?*

## Zusammenfassung und gängige Grundeinstellungen für Taucher

1. Gradienten Faktoren sind ein mathematisches Hilfsmittel, um bei Neo-Haldane Berechnungssystemen die Inertgas-Übersättigungsgradienten taucherindividuell sowie Tiefen- und Gas-abhängig nach Wunsch zu reduzieren.
2. Skaliert mit den Gradienten Faktoren sind die Koeffizienten des Bühlmann'schen Modells (a, b) welche *experimental* bestimmt worden sind (!) nicht mehr nur Kompartiments-spezifisch, sondern verändern sich zusätzlich auch mit der Tiefe.
3. Die Verläufe der zulässigen  $p_{TIGtol}$  sind nicht mehr Geraden, sondern gekrümmte Bögen mit dem Funktionsparameter Tiefe im Quadrat (ausser bei  $GF=const.$ ).
4. Werden beide Gradienten Faktoren auf 1.0 gesetzt, nutzen wir damit die von Bühlmann experimentell ermittelten tolerierten Gradienten voll aus.
5.  $GF_{low}$  ist ausschlaggebend für den tiefsten Stop (resp. für dessen Tiefe)
6. Via Steigung  $k_{GF}$  beeinflusst  $GF_{low}$  natürlich auch die flacheren Stops, aber zunehmend weniger, je höher man geht
7.  $GF_{high}$  beeinflusst hauptsächlich die obersten, flachsten Deko-Stops.
8. Via Steigung  $k_{GF}$  beeinflusst  $GF_{high}$  natürlich auch die tieferen Stops, aber zunehmend weniger, je tiefer man geht
9. Es ist rational nicht nachvollziehbar, mit Gradienten Faktoren von 20% - 40% (oder kleiner) zu arbeiten, denn schliesslich wurden die Original Bühlmann Faktoren, resp. Übersättigungsgrenzen in Hunderten von Freiwasserversuchen (OHNE GF!) und mittlerweile mit Zehntausenden von Tabellen- aber auch Computer-Tauchgängen OHNE GF validiert.
10. Insbesondere mit unnötig tiefen  $GF_{low}$  und den daraus resultierenden tiefen Deko-Stops wird der Dekompressions-Stress bei mittleren und langsameren Kompartimenten stark erhöht, was in Versuchen der US Navy und der Franz. Marine zu einem Mehrfachen von DCS-Fällen geführt hat!
11. Man sollte – sofern dies überhaupt von den Tauchcomputer-Settings her möglich ist - nie mit  $GF > 1.0$  (also  $> 100\%$ ) arbeiten.
12. Eigentlich müsste *jeder Taucher für sich* und erst noch *TG-Profil- UND Gas-abhängig* seine GF auf Grund von konkreten *Erfahrungen* aus ein paar Hundert Tauchgängen festlegen. Falls man aber den Bühlmann'schen Grenzen nicht traut, oder ganz einfach «mehr Sicherheit» haben möchte, so kann als *sehr grobe Guidelines* angegeben werden:
  - *nicht zu kleine*  $GF_{low}$ , da schnelle Gewebe höhere Übersättigungstoleranzen haben und diesen Entsättigungs-Bereich auch schnell «hinter sich» lassen !
  - *nicht zu hohe*  $GF_{high}$ , um den mittleren u. langsamen Geweben ausreichend Zeit zur Entsättigung zu geben (etwas Buffer schaffen)
  - keine exzessiven Deep Stops → mehr Deko-Stress bei langsameren Geweben !
  - **Sobald dies zu einer Verlängerung der flacheren Stops führt, haben wir des «Guten» zu viel getan !**
13. Leider werden des Öfteren gerade von Tauchcomputer-Herstellern tiefe GF «empfohlen», weil sie damit schludrige Programmierung kaschieren können (s. Untersuchungen dazu) :  
A. Salm, M. Rosenblat: *Decompression Calculations for Trimix Dives with PC-Software; Gradient Factors: do they repair defective algorithms, or do they repair defective implementations? Conference: TEC 4.0: March 2021*  
A. Salm: *Decompression calculations for trimix dives with PC software: variations in the time-to-surface: where do they come from?; SubMarine Consulting Group, Germany; doi:10.3723/ut.31.001 International Journal of the Society for Underwater Technology, Vol 31, No 1, pp 1–5, 2012*

## Teil III: Der resultierende Gradient als Fkt. der mit GF geänderten Bühlmann Koeffizienten

Während sich die ursprüngliche Beziehung  $p_{amb.tol.} = f(p_{TIG}, a, b)$  nach Haldane, Bühlmann, Workmann et al. als linear präsentiert (s. **Abb. 1** / Teil I und **Abb. 7** / Teil II), stellt sich die Frage, ob dies auch mit den GF-korrigierten Koeffizienten  $a_{GF}$  und  $b_{GF}$  der Fall ist.

### a) Beweis der Nicht-Linearität für GF = Fkt. (T)

Im Folgenden wird bewiesen, dass dies nicht der Fall ist:  $p_{TIG.tol.GF}$  verändert sich NICHT linear mit dem  $p_{amb}$ , ist also nicht mehr eine exakte Gerade wie im Original von Workman und Bühlmann.

Aus Teil II wissen wir:

$$\Delta p_{TIG.GF} = (p_{TIG.tol.} - p_{amb}) * GF = (p_{amb} / b + a) * GF - p_{amb} * GF \quad \text{Gl. 16}$$

Andererseits ist (Gl. 15) :

$$GF(T) = GF_{high} (T_{high}) + k_{GF} * T \quad [ T_{low} = 1st/deepest stop ] \quad \text{Gl. 15'}$$

sowie

$$p_{amb}(T) = p_{surf} + dp/dT * T \quad \text{Gl. 17}$$

Alles eingesetzt in Gl. 16:

$$\Delta p_{TIG.GF} = ((p_{surf} + dp/dT * T) / b + a) * GF - (p_{surf} + dp/dT * T) * GF \quad \text{Gl. 18}$$

$$= ( (p_{surf} + dp/dT) / b + a - (p_{surf} + dp/dT * T) ) * GF \quad \text{Gl. 18'}$$

$$= ( dp/dT * T * \underbrace{(1/b - 1)} + p_{surf} * \underbrace{(1/b-1)} + a ) * ( GF_{high} + k_{GF} * T ) \quad \text{Gl. 18''}$$

$$= \underbrace{(dp/dt * T * C1 + p_{surf} * C1 + a)} * \underbrace{(GF_{high} + k_{GF} * T)} \quad \text{Gl. 18'''}$$

$$= (C4 * C1 * T + C2) * (C3 + k_{GF} * T)$$

$$= C4 * C1 * C3 * T - C4 * C1 * k_{GF} * T * T + C2 * C3 + C2 * k_{GF} * T \quad \text{Gl. 18''''}$$

$$= \underbrace{-C4 * C1 * k_{GF}} * T^2 + \underbrace{(C4 * C1 * C3 + C2 * k_{GF})} * T + \underbrace{C2 * C3}$$

$\Delta p_{TIG.GF} = C5 * T^2 + C6 * T + C7$
--

**q.e.d.**

**Gl. 19**

Dies ist die klassische Form einer quadratischen Gleichung. Hier bedeutet sie, dass der mit GF reduzierte Gradient  $\Delta p_{TIG.GF}$  nicht linear zur Tiefe, resp.  $p_{amb}$  (l) ändert, sondern mit der Tiefe im Quadrat !

**Da aber die Ambient Pressure Line eine Gerade ist und der Gradient selbst sich mit dem Quadrat der Tiefe ändert, so muss auch die ehemals gerade Linie für  $p_{TIG.tol.} = f(p_{amb})$  nun eine gekrümmte Linie sein (s. numerisches Beispiel; s. auch Abb. 6!)**

## Numerisches Beispiel zu a)

Wir zeigen nachfolgend für 1 Kompartiment den Verlauf von  $p_{TIG.tol.} = f(p_{amb})$  auf; **Abb. 21**).

### Koeffizientensatz ZHL-16B

$t_H = 4.0\text{min}$  (für  $N_2$ )

$a_{N_2} = 1.25990$

$b_{N_2} = 0.50500$

$GF_{low/50m} = 0.50$

$GF_{high/0m} = 0.80$

$k_{GF} = (0.80 - 0.40) / (0m - 50m) = 0.40 / -50m = -0.008/m$

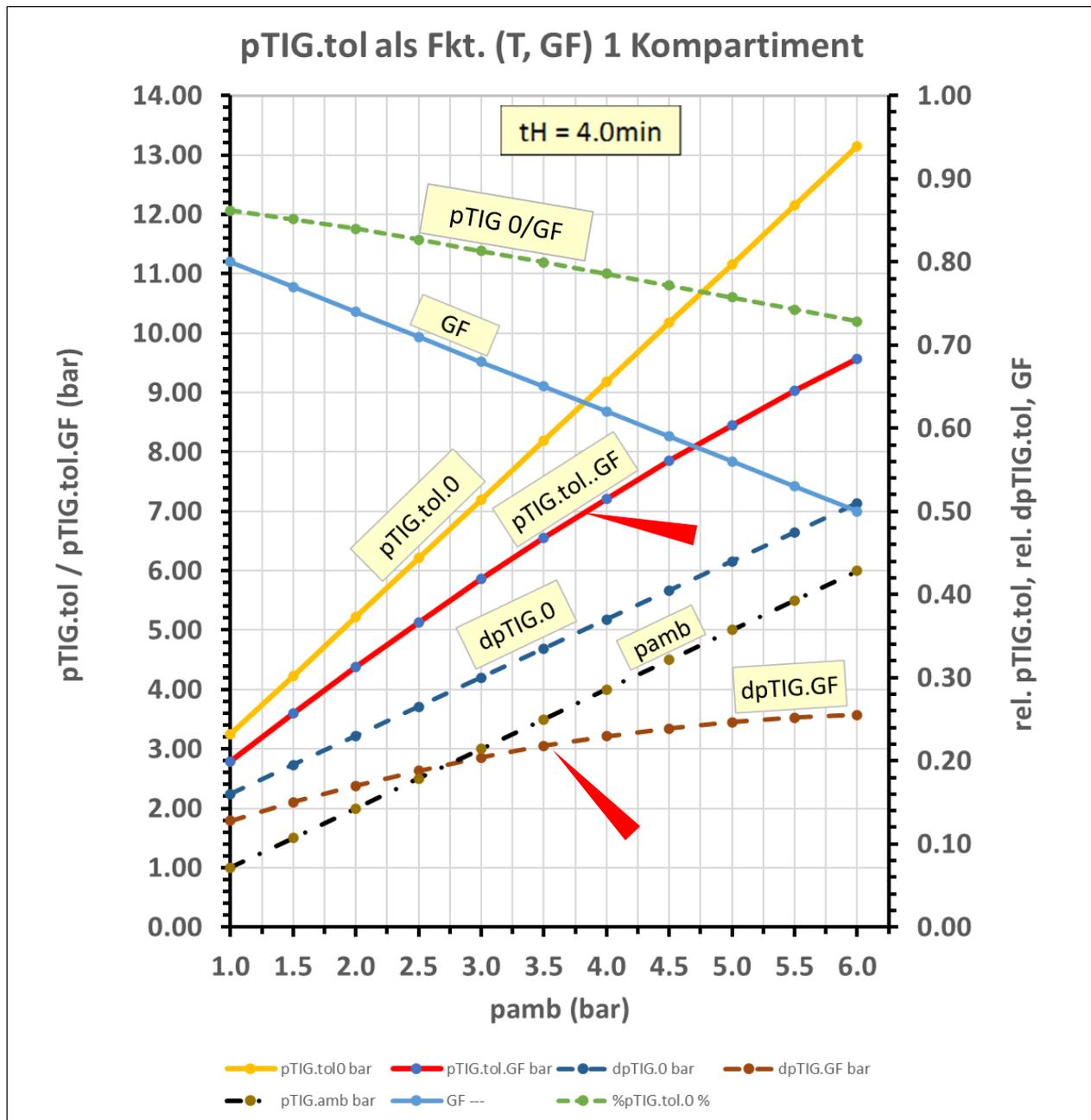


Abbildung 21: Verlauf von  $p_{TIG.tol.}$  als Fkt. ( $p_{amb}$ ) mit GF für 1 Kompartiment

## b) $GF = GF_{const}$ , resp. $k_{GF} = 0$

Für den Fall, dass  $GF_{high} = GF_{low} = GF_{const}$  folgt, dass  $k_{GF} = 0$  ist.

Wir starten mit Gl. 16:

$$\Delta p_{TIG.GF} = (p_{TIG.tol.} - p_{amb}) * GF_{const} = (p_{amb} / b_{GF} + a_{GF}) - p_{amb} * GF_{const} \quad \text{Gl. 16}$$

$$\text{mit } a_{GF} = a * GF_{const} \quad \text{Gl. 8'}$$

$$\text{und } b_{GF} = 1 / (GF_{const} / b - GF_{const} + 1) \quad \text{Gl. 13}$$

$$\Delta p_{TIG.GF} = (p_{amb} * (GF_{const} / b - GF_{const} + 1) + a * GF_{const}) - p_{amb} * GF_{const} \quad \text{Gl. 16'}$$

$\Delta p_{TIG.GF} = \underbrace{GF_{const} * p_{amb} * (1/b + 1/GF_{const} - 1)}_{\text{laufende Änderung Gradient}} + \underbrace{GF_{const} * (a - p_{amb})}_{\text{aus Nullpunktversatz}}$	<b>Gl. 16''</b>
--	-----------------

Damit sind wir wieder bei einem linearen Zusammenhang zw. dem Gradienten und der Tiefe (resp. Druck) angelangt (**q.e.d.**).

Das heisst, dass die mit  $GF_{const}$  reduzierte Linie für  $p_{TIG.tol.GFconst}$  eine Gerade ist, welche zw. derjenigen von  $p_{TIG.tol.max}$  und  $p_{amb}$  verläuft.

## c) Zusätzliche Verzerrung bei Trimix

Wem das Ganze bisher noch zu einfach erscheint, hier eine kleine Steigerung:

Wir haben bisher nur binäre Gasgemische, sogar weiter eingeschränkt auf  $N_2$ , untersucht. Bei Heliox ( $O_2$ -He) werden wir eine analoge Situation vorfinden, einziger Unterschied sind die anderen Halbwertszeiten und Koeffizienten  $a$ ,  $b$  für He.

Spannend wird es bei einem ternären Gas wie Trimix, da wir dort sowohl  $N_2$  wie He – also zwei Inertgase - haben.

Während sich bei einem Trimix-Gemisch das  $N_2$ -Kompartiment und das äquivalente He-Kompartiment *unabhängig voneinander* aufsättigen (und auch wieder entsättigen), berechnen sich die Übersättigungstoleranzen des «Mischkompartimentes» in Abhängigkeit vom jeweils gerade aktuellen Partialdruck des einzelnen Inertgases.

Auch die Zeitkonstante  $k$  ( $= \ln(2) / t_H$ ) für diese «Mischkompartimente» ändert sich entsprechend der «internen» Inertgas-Verteilung:

Nach Bühlmann gilt:

$$a_{j_{(N_2+He)}} = (a_{j_{N_2}} * p_{j_{TIG.N_2}} + a_{j_{He}} * p_{j_{TIG.He}}) / (p_{j_{TIG.He}} + p_{j_{TIG.N_2}})$$

$$b_{j_{(N_2+He)}} = (b_{j_{N_2}} * p_{j_{TIG.N_2}} + b_{j_{He}} * p_{j_{TIG.He}}) / (p_{j_{TIG.He}} + p_{j_{TIG.N_2}})$$

$$k_{j_{(N_2+He)}} = (k_{j_{N_2}} * p_{j_{TIG.N_2}} + k_{j_{He}} * p_{j_{TIG.He}}) / (p_{j_{TIG.He}} + p_{j_{TIG.N_2}})$$

mit:

$j$ : Nummer der entsprechenden HWZ / Kompartiment

$k_j$ : Zeitkonstante der entsprechenden HWZ, resp. des Kompartiments

$p_{j_{TIG.He}} / p_{j_{TIG.N_2}}$ : aktuelle Kompartiments-Gasdrücke der Inertgase He und  $N_2$  (natürlich auch wieder für jedes einzelne Kompartiment).

Sobald es dann um die Berechnung der Stufenzeiten (Deko-Stops) geht, müssen dann die Parameter dieser «Mischkompartimente» verwendet werden.

**Dies führt bei Trimix-Tauchgängen zu einer *zusätzlichen Verzerrung* der  [\$p\_{TIG,tol,GF}\$](#)  "Linie". Eine saubere Polynomfunktion zweiten Grades hat man nur mit einem einzigen Inertgas, sei dies nun  $N_2$  oder He.**

**Für ein Trimix bewegt sich  [\$p\_{TIG,tol,GF}\$](#)  demnach zwischen den beiden Linien – gerade oder gekrümmt – von  $p_{TIG,tol,GF,He}$  und  $p_{TIG,tol,GF,N_2}$ .**

**Das gilt auch, wenn  $k_{GF} = 0$ , also  $GF = \text{const}$  !**

## Teil IV: Workman vs. Bühlmann

### Die Fundamentalgleichung von Workman

Ähnlich wie Bühlmann hat auch Workman die Beziehung von  $p_{TIG.tol.}$  und  $p_{amb}$  in Form einer linearen dargestellt. Hier spricht man von den „M-Values“. „M“ kommt von „Maximum“ und bezeichnet den maximal symptomlos ertragenen Inertgasdruck in einem Kompartiment. Das Spektrum der Halbwertszeiten ist nicht ganz deckungsgleich mit demjenigen von Bühlmann:

$$M(T) = M_0 + \Delta M * D$$

Gl. 20

Beachte dabei, dass M,  $M_0$  alles Drücke sind, allerdings in fsw (feet seawater) angegeben. 1 fsw = 1 atm = 1.013bar.  $M(D)$  ist dabei der  $p_{TIG.tol.}(D)$  und  $\Delta M$  die Steigung der Gradientenzunahme in fsw pro ft Tiefenzunahme.  $M_0$  ist der zulässige Inertgas-Kompartimentsdruck an der Oberfläche ( $D=0$ fsw) auf Meereshöhe.

Dabei ist  $\Delta M$  die Steigung (slope) der M-Value Geraden (=  $dp_{TIG}/dD$ ).

Workman hat – analog zu Bühlmann – jeder HWZ (= jedem Kompartiment) je einen  $M_0$ - und einen  $\Delta M$ -Wert zugeordnet. Damit lassen sich die Zusammenhänge zw.  $p_{amb.tot.}$  und  $p_{TIG.tol.}$  für jede HWZ ebenfalls durch eine Gerade darstellen.

Als Angehöriger der NEDU endet bei Workman der atmosphärische Druck auf Meereshöhe. Es wurden keine Versuche in irgendwelchen Höhenlagen gemacht, da die USA eben im Gegensatz zur Schweiz keine Gebirgsmarine hat !

Die tolerierte (minimale) Tiefe lässt analog wie bei Bühlmann (dort aber als tolerierter Umgebungsdruck) aus Gl. 5 ableiten:

$$D_{tol. [fsw]} = (p_{TIG [fsw]} - M_0 [fsw]) / \Delta M$$

Gl. 20'

Ein Set der M-Values ist in **Anhang A7, Tab. 3** enthalten.

Allgemein kann festgestellt werden, dass die Workman Werte weniger konservativ sind als diejenigen von Bühlmann. Die Range der HWZ ist ebenfalls kleiner. Dies erstaunt nicht, repräsentiert doch Workman den Wissensstand der Mitte 60er, diejenige von Bühlmann den Stand der Mitte 80er bis Mitte 90er Jahre.

### Umrechnungen W->B und B->W

Die beiden System können sehr wohl vom einen ins andere konvertiert werden. Dazu vergleichen wir die Gl. 5 und 20:

$$D_{tol.} * fp = fp * (p_{TIG} - M_0) / \Delta M = p_{amb.tol.} = (p_{TIG} - a) * b \quad \text{Gl. 21}$$

mit  $fp$  = Konversionsfaktor fsw in bar;  $33fsw = 1.013bar$ , d.h.  $fp=1.013bar/33fsw$

Daraus kann direkt die Beziehung zw. Steigung  $b$  und  $\Delta M$  abgeleitet werden:

$$W_o \rightarrow B_{\ddot{u}} \quad b = 1 / \Delta M, \text{ resp.}$$

Gl. 22

$$B_{\ddot{u}} \rightarrow W_o \quad \Delta M = 1 / b$$

Gl. 22'

Bleibt der Nullpunkt-Versatz a:

Dabei ist zu beachten, dass a bei Bühlmann der Versatz bei  $p_{amb} = 0\text{bar}$  ist, bei Workman jedoch ist  $M_0$  der zulässige Inertgas-Kompartimentsdruck auf Meereshöhe  $p_{surf}(H_0) = 1.013\text{bar}$ .

Damit gilt:

$$\text{Wo} \rightarrow \text{Bü:} \quad \mathbf{a \text{ [bar]}} = f_p * ( M_0 \text{ [fsw]} - \text{delta\_M} * p_{surf}(H_0) \text{ [fsw]} ) \quad \text{Gl. 23}$$

$$\text{Bü} \rightarrow \text{Wo:} \quad \mathbf{M_0 \text{ [fsw]}} = ( a \text{ [bar]} + p_{surf}(H_0) \text{ [bar]} / b ) * 1/f_p \quad \text{Gl. 23'}$$

Bei der Umrechnung müssen jeweils noch die fsw in bar und umgekehrt umgerechnet werden.  
Konkretes Bsp. s. **Anhang A7, Tab. 4.**

## Workman mit GF

Hinweis: alle Drücke werden hier in fsw angegeben! Die Tiefen normalerweise in ft; da Workman aber ausschliesslich „im/am Meer“ und damit im Salzwasser arbeitete, ist eben hier die Tiefe in ft identisch mit fsw.

Bei Workman berechnet sich der maximal tolerierte Inertgas-Kompartimentsdruck wie folgt:

$$M(D) = M_0 + \text{delta\_M} * D \quad \text{Gl. 20}$$

mit GF zusammen können wir schreiben:

$$M_{GF}(D) = M_{0GF} + \text{delta\_M}_{GF} * D \text{ (die Steigung verändert sich auch!)} \quad \text{Gl. 24}$$

Als erstes betrachten wir die Situation beim Nullpunkt nach Workman (Oberfläche,  $p_{surf}(H_0) = 33 \text{ fsw}$  (1.013bar); Tiefe  $D = 0\text{fsw}$ ):

$$M_{0GF} = p_{surf}(H_0) + GF * (M_0 - p_{surf}(H_0)) = GF * M_0 + p_{surf}(H_0) * (1 - GF) \quad \text{Gl. 25}$$

Wir wissen von früher:

$$\text{Bü} \rightarrow \text{Wo} \quad \text{delta\_M} = 1 / b \quad \text{Gl. 22'}$$

$$\text{dementsprechend} \quad \text{delta\_M}_{GF} = 1 / b_{GF}$$

$$\text{und} \quad b_{GF} = 1 / (GF / b - GF + 1) \quad \text{Gl. 13}$$

In Analogie zu Bühlmann  $p_{TIG.tol.GF} = p_{amb} / b_{GF} + a_{GF}$

Gl. 11

gilt bei Workman für  $M_{GF}$  wiederum unter analoger Verwendung von Gl. 20' u. 24':

$$M_{GF} = M_{0GF} + \text{delta\_M}_{GF} * D$$

$$= (p_{surf}(H_0) + GF * (M_0 - p_{surf}(H_0))) + \text{delta\_M}_{GF} * D$$

$$\mathbf{M_{GF} = D * (GF * \text{delta\_M} - GF + 1) + (p_{surf}(H_0) + GF * (M_0 - p_{surf}(H_0)))} \quad \text{Gl. 26}$$

umgestellt nach  $D (= D_{tol.} = D_{tol.GF})$  und  $M_{GF}$  ersetzt durch  $p_{TIG}$ :

$$\mathbf{D_{tol.GF} = (p_{TIG} - (p_{surf}(H_0) + GF * (M_0 - p_{surf}(H_0))) / (GF * \text{delta\_M} - GF + 1)} \quad \text{Gl. 27}$$

## Teil V: Andere Konservatismus-Faktoren und ihr Zusammenhang mit den GF

### Der Konservatismus-Faktor bei Tauchcomputer

Einige Hersteller von Tauchcomputern erlauben es ihren Benutzern, so genannte «Konservatismus-Faktoren» einzustellen, meist auf einer angegebenen Skala von 0...n. .

Praktisch nie wird einigermaßen verständlich angegeben, welcher Art dieser Faktor denn sein soll, also auf welche Parameter er einwirkt und wie.

Im *einfachsten* Fall ist dies ein Faktor – wir nennen ihn bezeichnenderweise KF – der nicht den/die Inertgas-Gradienten (also die Differenz zum Umgebungsdruck) reduziert, sondern direkt den zulässigen (tolerierten) Inertgas-Überdruck im Kompartiment selbst.

Es gilt also:

$$p_{\text{TIG.tol.KF}} = \text{KF} * p_{\text{TIG.tol.}}, \text{ zusammen mit der Gleichung 5':} \quad \text{Gl. 28}$$

$$\boxed{p_{\text{TIG.tol.KF}} = \text{KF} * (p_{\text{amb}}/b + a)} \quad \text{Gl. 28'}$$

Wie ist nun der Zusammenhang zw. dem bekannten Gradienten Faktor und diesem «Konservatismus-Faktor»?

Die Lösung ist einfach:

Wir schreiben einmal die Gleichung für  $p_{\text{TIG.tol.GF}}$  mit GF hin, und setzen sie gleich der Gleichung für dieselbe Grösse, diesmal aber mit KF:

$$\text{a) via GF: } p_{\text{TIG.tol.GF}} = \text{GF} * (p_{\text{TIG.tol.}} - p_{\text{amb}}) + p_{\text{amb}} \quad \text{Gl. 29}$$

$$\text{b) via KF: } p_{\text{TIG.tol.KF}} = \text{KF} * p_{\text{TIG.tol.}} \quad \text{Gl. 29'}$$

Durch Gleichsetzen erhalten wir:

$$\text{GF} * (p_{\text{TIG.tol.}} - p_{\text{amb}}) + p_{\text{amb}} = \text{KF} * p_{\text{TIG.tol.}} \quad \text{Gl. 30}$$

Diese Gleichung können wir einmal nach GF, einmal nach KF auflösen und erhalten:

a) für GF:

$$\boxed{\text{GF} = \frac{(\text{KF} * p_{\text{TIG.tol.}} - p_{\text{amb}})}{(p_{\text{TIG.tol.}} - p_{\text{amb}})}} \quad \text{Gl. 31}$$

b) für KF:

$$\boxed{\text{KF} = \frac{(\text{GF} * (p_{\text{TIG.tol.}} - p_{\text{amb}}) + p_{\text{amb}})}{p_{\text{TIG.tol.}}}} \quad \text{Gl. 31'}$$

### Zum Wertebereich des KF

Während der Gradienten Faktor GF sich auf die Druckdifferenz fokussiert und deshalb von völliger Ausnutzung (=100% od. 1.0) bis zur völligen «Nichtnutzung» (=0% od. 0.0) reichen kann, ist dies beim oben skizzierten KF nicht der Fall.

Der mit KF reduzierte maximal tolerierte Inertgas-Kompartimentsdruck darf minimal den Umgebungsdruck erreichen, damit ist die Differenz, resp. Gradient, auch Null.

Also gilt :  $KF_{\min} * p_{TIG.tol.} - p_{amb} \geq 0$

Gl. 32

Je kleiner also der  $p_{TIG.tol.}$  eines Kompartimentes ist, desto weniger darf der KF kleiner werden. Die untere Grenze ist dann erreicht, wenn Gl. 32 Null ergibt:

Damit folgt:  $KF_{\min} = p_{amb} / p_{TIG.tol.}$

Gl. 32'

Da das langsamste Kompartiment #16 auch die kleinsten tolerierten Übersättigungswerte aufweist, nehmen wir dieses Kompartiment zur Illustration:

Modell: ZHL-16B

tH-#: 16 10bar

tH=635min (N<sub>2</sub>)  $KF_{\min 90m} = \frac{10\text{bar}}{(10\text{bar}/0.96530 + 0.23270\text{bar})} = 0.9441$  od. 94.4%

b=0.96530

Tauchtiefe: 90m →  $p_{amb} = 10$  bar

In Worten, den kleinsten KF-Wert, den wir benutzen dürften, wäre 94.41%. Würden wir einen tieferen Wert wählen, kämen wir unter die  $p_{amb}$  Linie, was physikalisch unmöglich ist und zu allem Übel würde der GF negativ, was per Definition des GF unmöglich ist!

Wir sehen aus Gleichung 32', dass der minimale KF nicht nur Kompartiments-abhängig ist, sondern auch noch von der Tiefe.

Wir nehmen obiges Beispiel, allerdings jetzt mit Tiefe 40m, also  $p_{amb}=5$ bar.

$KF_{\min 50m} = 5\text{bar} / (5\text{bar}/0.96530 + 0.23270\text{bar}) = 0.9237$  od. 92.37%

*Wir sehen daraus, dass der nutzungsfähige Wertebereich (und damit die Anpassungsfähigkeit) dieses KF vor allem bei den langsameren Kompartimenten sehr klein ist!*

Der wohl einzige Vorteil: KF ist konstant über den ganzen Tiefenbereich und der Verlauf des  $p_{TIG.tol.KF}$  demzufolge eine Gerade wie die «Original»-Bühlmann-Version.

### Der KF als Fkt. des GF

Trotzdem ist es interessant, den Verlauf des Verhältnisses  $p_{TIG.tol.GF}/p_{TIG.tol.}$  (also des KF!) zu sehen. Wir verwenden dazu Gl. 31'.

psurf	<b>1.00000</b>	bar	GFhigh	<b>100.0%</b>	---
dp/dT	<b>0.100</b>	bar/m	GFlow	<b>10.0%</b>	---
			Tlow	<b>90.0</b>	m
			kGF	<b>-0.0100</b>	1/m

ZHL-16B			Tiefe	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	m
tH	a	b	pamb	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	---
min	bar	---	GF	100.00%	90.00%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%	40.00%	30.00%	20.00%	10.00%	---
1	4.0	1.25990	0.50500	KF 1	100.0%	93.8%	88.3%	83.1%	77.9%	72.8%	67.8%	62.7%	57.7%	52.7%
2	8.0	1.00000	0.65140	KF 2	100.0%	94.9%	90.7%	86.8%	83.1%	79.4%	75.8%	72.2%	68.6%	65.0%
3	12.5	0.86180	0.72220	KF 3	100.0%	95.5%	92.0%	88.7%	85.7%	82.7%	79.8%	76.9%	74.0%	71.2%
4	18.5	0.75620	0.78250	KF 4	100.0%	96.0%	93.1%	90.4%	88.0%	85.6%	83.3%	81.0%	78.7%	76.5%
5	27.0	0.66670	0.81260	KF 5	100.0%	96.4%	93.8%	91.5%	89.3%	87.3%	85.3%	83.3%	81.3%	79.4%
6	38.3	0.56000	0.84340	KF 6	100.0%	96.8%	94.6%	92.6%	90.8%	89.1%	87.4%	85.7%	84.1%	82.5%
7	54.3	0.49470	0.86930	KF 7	100.0%	97.2%	95.2%	93.5%	92.0%	90.6%	89.1%	87.7%	86.4%	85.0%
8	77.0	0.45000	0.89100	KF 8	100.0%	97.4%	95.7%	94.3%	93.0%	91.8%	90.6%	89.4%	88.2%	87.1%
9	109.0	0.41870	0.90920	KF 9	100.0%	97.6%	96.1%	94.9%	93.8%	92.7%	91.7%	90.8%	89.8%	88.8%
10	146.0	0.37980	0.92220	KF 10	100.0%	97.8%	96.5%	95.4%	94.5%	93.6%	92.7%	91.8%	91.0%	90.2%
11	187.0	0.34970	0.93190	KF 11	100.0%	98.0%	96.8%	95.9%	95.0%	94.2%	93.4%	92.7%	91.9%	91.2%
12	239.0	0.32230	0.94030	KF 12	100.0%	98.2%	97.1%	96.2%	95.5%	94.8%	94.1%	93.4%	92.8%	92.1%
13	305.0	0.28500	0.94770	KF 13	100.0%	98.3%	97.4%	96.6%	96.0%	95.3%	94.7%	94.2%	93.6%	93.0%
14	390.0	0.27370	0.95440	KF 14	100.0%	98.4%	97.6%	96.9%	96.3%	95.7%	95.2%	94.7%	94.2%	93.7%
15	498.0	0.25230	0.96020	KF 15	100.0%	98.6%	97.8%	97.2%	96.6%	96.1%	95.7%	95.2%	94.8%	94.4%
16	635.0	0.23270	0.96530	KF 16	100.0%	98.7%	98.0%	97.4%	97.0%	96.5%	96.1%	95.7%	95.3%	95.0%

Tabelle 1: Verlauf des KF als Funktion der GF, Tiefe und HWZ

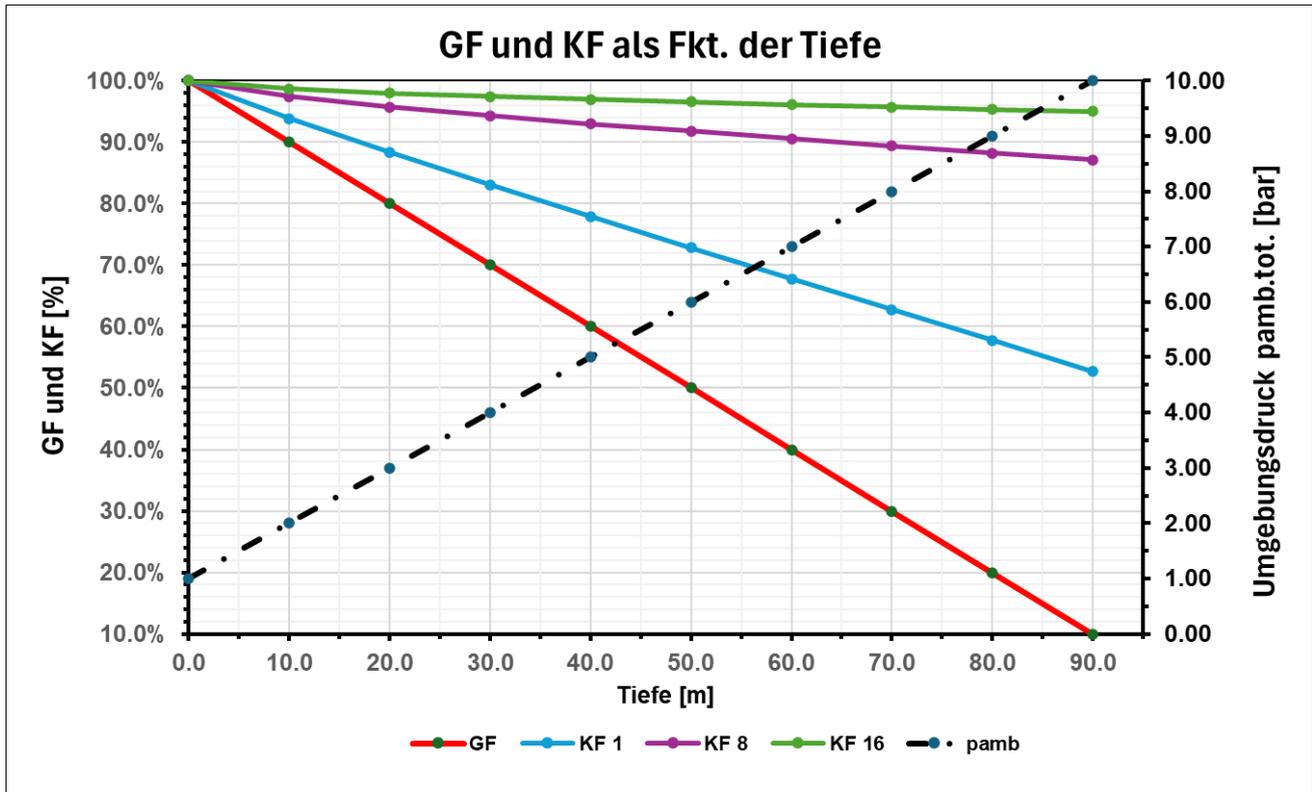


Abbildung 22: Verlauf des KF als Funktion der GF, Tiefe und HWZ

Im folgenden numerischen Beispiel zur Illustration gehen wir bewusst unter das berechnete Minimum von  $KF_{min}=94.41\%$ , d.h.  $p_{TIF,tol,KF}$  kleiner ist als  $p_{amb}$ , und sehen, wo dann folgerichtig der GF negativ wird, was natürlich physiologisch unmöglich ist.

Tiefe	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	m
pamb	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	bar
KF	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	---
GF 1	85.5%	83.8%	82.9%	82.3%	81.9%	81.6%	81.4%	81.2%	81.1%	81.0%	
GF 2	83.5%	80.3%	78.5%	77.3%	76.4%	75.8%	75.3%	74.9%	74.5%	74.3%	
GF 3	82.0%	77.7%	75.1%	73.3%	72.0%	71.1%	70.3%	69.7%	69.2%	68.8%	
GF 4	80.3%	74.8%	71.1%	68.6%	66.7%	65.2%	64.1%	63.2%	62.4%	61.7%	
GF 5	78.9%	72.3%	67.9%	64.8%	62.5%	60.7%	59.3%	58.1%	57.2%	56.4%	
GF 6	76.6%	68.5%	63.1%	59.3%	56.4%	54.2%	52.4%	50.9%	49.7%	48.6%	
GF 7	74.5%	64.9%	58.3%	53.5%	49.9%	47.0%	44.8%	42.9%	41.3%	40.0%	
GF 8	72.5%	61.2%	53.3%	47.4%	42.9%	39.3%	36.4%	34.0%	32.0%	30.2%	
GF 9	70.7%	57.7%	48.2%	41.1%	35.5%	31.1%	27.4%	24.3%	21.7%	19.4%	
GF 10	68.5%	53.5%	42.6%	34.2%	27.6%	22.3%	17.9%	14.1%	11.0%	8.3%	
GF 11	66.3%	49.7%	37.3%	27.7%	20.1%	13.9%	8.7%	4.4%	0.7%	-2.6%	
GF 12	64.1%	45.5%	31.5%	20.6%	11.8%	4.7%	-1.3%	-6.4%	-10.7%	-14.5%	
GF 13	60.6%	39.4%	23.4%	10.9%	0.9%	-7.4%	-14.3%	-20.1%	-25.1%	-29.5%	
GF 14	58.9%	35.8%	18.1%	3.9%	-7.5%	-17.1%	-25.1%	-32.0%	-37.9%	-43.1%	
GF 15	56.0%	30.3%	10.4%	-5.7%	-18.8%	-29.8%	-39.0%	-47.0%	-53.9%	-60.0%	
GF 16	52.8%	24.3%	1.9%	-16.2%	-31.2%	-43.8%	-54.5%	-63.8%	-71.8%	-78.9%	

Tabelle 2: Verlauf des GF als Funktion des KF bei  $KF < KF_{min}$ , Tiefe und HWZ

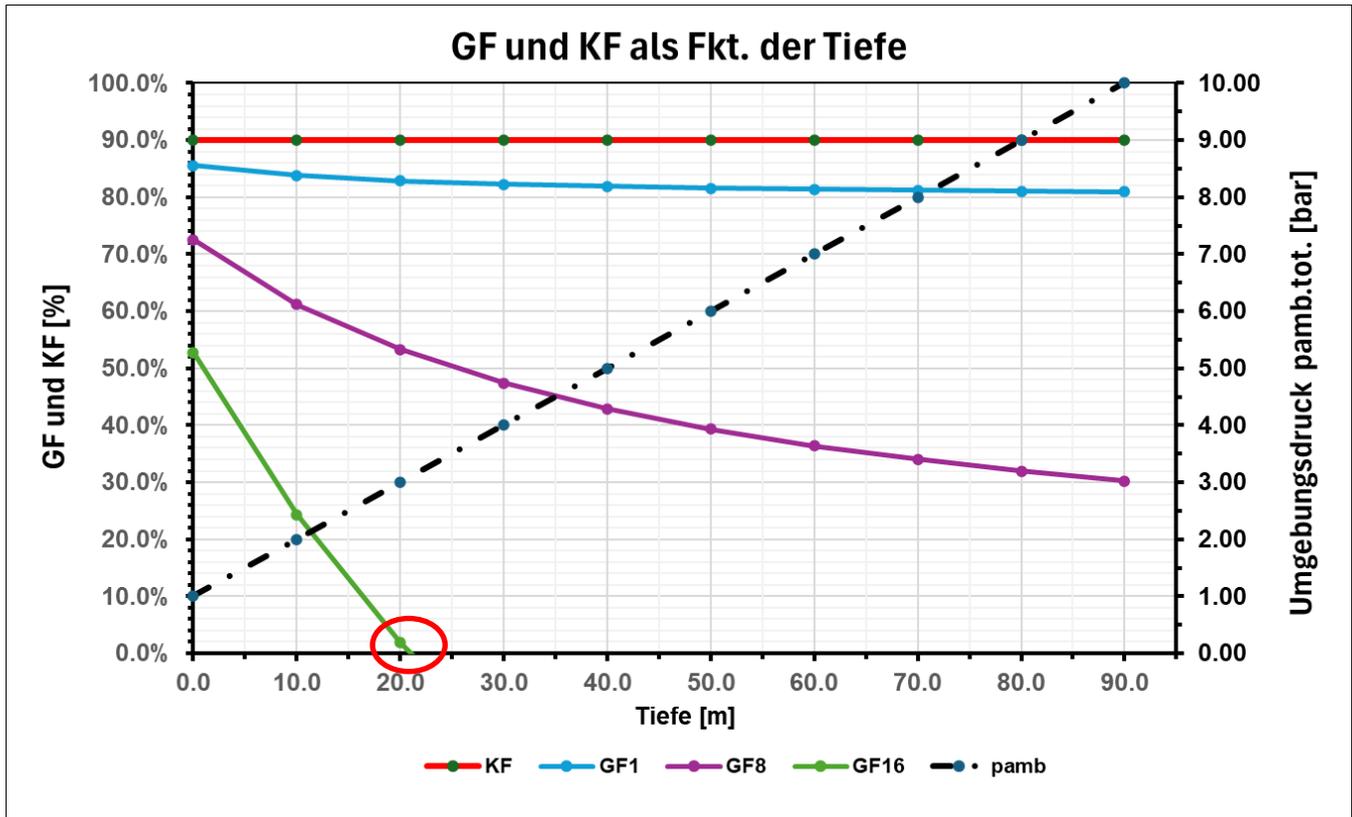


Abbildung 23: Verlauf des GF als Funktion des KF bei  $KF < KF_{min}$ , Tiefe und HWZ

**Fazit:**

Als Fazit kann man sagen, dass sich der soeben analysierte «Konservatismus-Faktor» nicht sehr gut eignen würde. Der nutzbare Wertebereich ist viel zu klein. Die Steuerung eines vom Taucher gewünschten «Konservatismus» via GF ist in jedem Falle vorzuziehen.

# Anhang

## A1: Quellen, Literatur

Baker EC. 1998. Understanding M-values. *Immersed*. Vol. 3, No. 3.

Baker EC; Clearing Up The Confusion About "Deep Stops"

Baker, EC; Some Introductory "Lessons" About Dissolved Gas Decompression Modeling

Bennett PB, Elliott DH, eds. 1993. *The Physiology and Medicine of Diving*. London: WB Saunders.

Bert, P. 1878 *La Pression barométrique, recherches de physiologie expérimentale*. Paris: G. Masson, Éditeur. 1168 pp.

Boycott AE, Damant GCC, Haldane JS. 1908. The prevention of compressed air illness. *J. Hyg (London)* 8:342-443.

Bühlmann, AA. 1984. *Decompression-Decompression Sickness*. Berlin: Springer-Verlag.

Bühlmann, AA. 1995. *Tauchmedizin*. Berlin: Springer-Verlag.

Hamilton RW, Rogers RE, Powell MR, Vann RD. 1994. Development and validation of no-stop decompression procedures for recreational diving: The DSAT Recreational Dive Planner. Santa Ana, CA: Diving Science and Technology Corp.

Hamilton RW, Muren A, Rockert H, Ornhagen H. 1988. Proposed new Swedish air decompression tables. In: Shields TG, ed. XIVth Annual Meeting of the EUBS (European Undersea Biomedical Society); Aberdeen: National Hyperbaric Center.

Hill, L. and M. Greenwood. 1907. The influence of increased barometric pressure on man.-II. *Proceedings of the Royal Society of London B – Biological Sciences* 79:21-27.

Hills, B.A. 1966. A thermodynamic and kinetic approach to decompression sickness. Doctoral Thesis, the University of Adelaide, Australia. 370 pp.

Kety, S.S. 1951. The theory and applications of the exchange of inert gas at the lungs and tissues. *Pharmacological Reviews* 3:1–40.

Møllerlækken, A., C. Gutvik, V.J. Berge, A. Jorgensen, A. Loset, and A.O. Brubakk. 2007. Recompression during decompression and effects on bubble formation in the pig. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 78:557–560.

Schreiner HR. 1968. Safe ascent after deep dives. *Rev. Subaquat. Physiol. Hyperbar. Med.* 1:28-37.

Schreiner HR, Kelley PL. 1971. A pragmatic view of decompression. In: Lambertsen CJ, ed. *Underwater Physiology IV*. New York: Academic Press.

Workman RD. 1965. Calculation of decompression schedules for nitrogen-oxygen and helium-oxygen dives. Research Report 6-65. Washington: Navy Experimental Diving Unit

Workman RD. 1969. American decompression theory and practice. In: Bennett PB, Elliott DH, eds. *The physiology and medicine of diving and compressed air work*. London: Bailliere, Tindall & Cassell. 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* 2010;109:1670-4.

Thalmann, E.D. 1984. Phase II testing of decompression algorithms for use in the U.S. Navy underwater decompression computer. NEDU Report No.1-84. Washington, DC: Navy Experimental Diving Unit. 134 pp.

Yount, D.E., and D.C. Hoffman. 1986. On the use of a bubble formation model to calculate diving tables. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 57:149–156

Yount DE, Hoffman DC. Decompression theory: a dynamic critical-volume hypothesis. In: Bachrach A J, Matzen MM, eds. *Underwater physiology VIII: proceedings of the eighth symposium on underwater physiology*. Bethesda: Undersea Medical Society, 1984:131-46.

Pollock N. Thoughtful Management of Decompression Stress. British Sub-Aqua Club. November 23, 2016. [Available here.](#)

<https://www.youtube.com/watch?v=HU04JhXggPg&t=3100s>

Mitchell S. Decompression Controversies. DAN South Africa. May 9, 2016. [Available here.](#)

<https://www.youtube.com/watch?v=UY61E49lyos&t=18s>

Partridge B. Review of Deep Stops in Technical Diving. November 9, 2015. [Available here.](#)

Doolette DJ, Gerth WA, Gault KA. *Redistribution of decompression stop time from shallow to deep stops increases incidence of decompression sickness in air decompression dives*. *Technical Report*. Panama City (FL): Navy Experimental Diving Unit; 2011 Jul. Report No.: NEDU TR 11-06. Durham (NC): Undersea and Hyperbaric Medical Society; 2009. p. 195-206. [cited 2013 Mar 3] [Available here.](#)

Blatteau JE, Hugon M, Gardette B. Deep stops during decompression from 50 to 100 msw didn't reduce bubble formation in man. In: Bennett PB, Wienke BR, Mitchell SJ, editors. *Decompression and the deep stop*. Undersea and Hyperbaric Medical Society Workshop; 2008 Jun 24-25; Salt Lake City (UT). Durham (NC): Undersea and Hyperbaric Medical Society; 2009. p. 195-206.

Spisni E, Marabotti C, De Fazio L, Chiara Valerii M, Cavazza E, Brambilla S, Hoxha K, L'Abbate A, Longobardi P. A comparative evaluation of two decompression procedures for technical diving using inflammatory responses: compartmental versus ratio deco. [Diving Hyperb Med](#). 2017 Mar; 47(1): 9–16. Published online 2017 Mar 31. doi: [28920/dhm47.1.9-16](https://doi.org/10.28920/dhm47.1.9-16) . [See more here.](#)

Gernhardt, M.L. 1991. Development and evaluation of a decompression stress index based on tissue bubble dynamics. Ph.D. Dissertation, University of Pennsylvania. 328 pp.

Gennser M. Use of bubble detection to develop trimix tables for Swedish mine-clearance divers and evaluating trimix decompressions. Presented at: *Ultrasound 2015 – International meeting on ultrasound for diving research*; 2015 Aug 25-26; Karlskrona (Sweden).

Gerth WA, Doolette DJ, Gault KA. Deep stops and their efficacy in decompression. In: Vann RD, Mitchell SJ, Denoble PJ, Anthony TG, editors. *Technical diving conference proceedings 2008*. Durham (NC): Divers Alert Network; 2009. p. 138-56. [cited 2012 Mar 3 login required] [Available here.](#)

Gerth, W.A., D.J. Doolette, and K.A. Gault. 2009. Deep stops and their efficacy in decompression: U.S. Navy research. In Bennett, P.B., B.R. Wienke, and S.J. Mitchell, eds. *Decompression and the deep stop*, 24-25 June 2008. Durham: Undersea and Hyperbaric Medical Society. p. 165–85.

Gerth, W.A., and R.D. Vann. 1997. Probabilistic gas and bubble dynamics models of decompression sickness occurrence in air and N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> diving. *Journal of Undersea and Hyperbaric Medicine* 24:275–292.

Fraedrich D. Validation of algorithms used in commercial off-the-shelf dive computers. *Diving and Hyperbaric Medicine*. 2018 December 24;48(4):252–258. doi: 10.28920/dhm48.4.252-258. PMID: 30517958.)

BVM(3): Gerth WA, Vann RD. Probabilistic gas and bubble dynamics models of decompression sickness occurrence in air and N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> diving. *Undersea Hyperb, Med.* 1997;24:275-92.

Le Feng, Christian R. Gutvik, Tor A. Johansen: Optimal Decompression Through Multi-parametric Nonlinear Programming, Norwegian University of Science and Technology; 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, University of Bologna, Italy, September 1-3, 2010

C. R. Gutvik and A. O. Brubakk. A dynamic 2-phase, model for vascular bubble formation during decompression of divers. *IEEE Transactions Biomedical Engineering*, 2009.

C. R. Gutvik, R. G. Dunford, Z. Dujic, and A. O. Brubakk, Parameter estimation of the Copernicus decompression model using non-linear optimization. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2009a.

Petter Tøndel, C. R. Gutvik, and T. A. Johansen. Optimal decompression - diving computer implementation aspects of an explicit solution. Technical report, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 2005.

O. S. Eftedal, S. Lydersen, and A. O. Brubakk. The relationship between venous gas bubbles and adverse effects of decompression after air dives. *Undersea & hyperbaric medicine: journal of the Undersea and Hyperbaric Medical Society*, 34(2):99–105, 2007.

B. A. Hills. Vital issues in computing decompression schedules from fundamentals i. critical supersaturation versus phase equilibration. *Int J Biometeror*, 14(2): 111–128, 1970.

### **Speziell zum Thema RGBM:**

Wienke, Bruce R; O'Leary, Timothy R (13 February 2002). "[Reduced gradient bubble model: Diving algorithm, basis and comparisons](#)", Tampa, Florida: NAUI Technical Diving Operations. pp. 7–12. Retrieved 12 January 2010.

Campbell, Ernest S (30 April 2009). "[Reduced gradient bubble model](#)"

Scubadoc's Diving Medicine. Retrieved 12 January 2010. – Bruce Wienke describes the differences between RGBM and VPM

Craciun, Alexandru (19 May 2018). "[Decompression Algorithms – RGBM and VPM, a comparative approach](#)" (PDF). Proceedings of the International Conference on Applied Informatics - ICDD2018. Sibiu: 69–83.

["Suunto Reduced Gradient Bubble Model"](#) (PDF). Suunto. 24 July 2003. Retrieved 24 January 2010.

Wienke, B.R.; O'Leary, T.R. "[Deep RGBM](#)". *Advanced Diver Magazin*

Wienke BR. 1991. Basic decompression theory and application. Flagstaff, AZ: Best Publ.

Wienke BR. 1994. Basic diving physics and applications. Flagstaff, AZ: Best Publ.

Powell M. Delving Deeper into Deep stops. In: *Diver*; July 2018. [Available here.](#)

The DSAT Recreational Dive Planner. Santa Ana, CA: Diving Science and Technology Corp.

### **Speziell zum Thema “Pyle-Stops”:**

Pyle RL. 1996. The importance of deep safety stops: Rethinking ascent patterns from decompression dives. *DeepTech*. 5:64; *Cave Diving Group Newsletter*. 121:2-5.

Pyle RL. The importance of deep safety stops: rethinking ascent patterns from decompression dives. *SPUMS Journal*. 1997;27:112-5. [Available here.](#)

Irvine, G. The First stop/Deep Stops. GUE. [Available here.](#)

### **Speziell zum Thema Blasen-Lebensdauer**

Franklin Dexter, MD, PhD, and Bradley J. Hindman, MD: Recommendations for Hyperbaric Oxygen Therapy of Cerebral Air Embolism Based on a Mathematical Model of Bubble Absorption, *Anesth Analg* 1997;84:1203-7

Branger, Annette B., and David M. Eckmann. Theoretical and experimental intravascular gas embolism absorption dynamics. *J. Appl. Physiol.* 87(4): 1287–1295, 1999

## A2: Übersicht über verschiedene Dekompressionsmodelle

Quelle: Michael B Strauss, MD 1 ; Lientra Q Lu, BS 2 ; Stuart S. Miller, MD 1: The Gradient Perfusion Model Part 1: Why and at what sites decompression sickness can occur

### SUMMARY OF DECOMPRESSION MODELS

Model	Year	Concept	Details
<b>Neo-Haldanian Models</b>			
Workman <sup>1</sup>	1957	M-value	9 hypothetical compartments with half-times between 5 and 240 minutes. Maximum tissue tensions varied linearly with depth; the critical supersaturation ratios were a function of the ambient pressure. 27 parameters for air tables and 27 for heliox tables.
Bühlmann <sup>2</sup>	1965, 1986, 1990	Gas sequencing	Half-times for nitrogen/helium following a 2.6:1 supersaturation ratio. Several test series carried out in hyperbaric chambers. A decompression model widely applied in recreational diving.
French Navy <sup>3</sup>	1977	Oversaturation ratios for each tissue constant with pressure	Quantified the maximum allowable supersaturation states of five hypothetical tissues.
COMEX <sup>4</sup>	1992	M-value with infinite number of theoretical compartments	MT92 tables and procedures, including heliox saturation, were built for air, air + oxygen and heliox + oxygen decompressions.
<b>Diffusion-Limited Tissue Models</b>			
Hempleman <sup>5</sup>	1952	Joints as target tissues	Joint pain decompression sickness precedes neurological symptoms. Simplified model being a semi-infinite cartilage slab with a one-dimensional diffusion process. Limited to moderate- to short-duration exposures.
Hill <sup>6</sup>	1966	Deep stops. Zero supersaturation	The rate of the first part of decompression had to be reduced with a deep first stop to slow down the tissue-to-blood gas exchanges.
DCIEM <sup>7,8</sup> (Kidd-Stubbs)	1993	4 slabs of tissue connected in series	A more complex mathematical formulation of gas exchanges by both perfusion and diffusion than a simple perfusion approach considering only independent compartments.
<b>Tissular Bubble Models</b>			
Van Liew <sup>9</sup>	1969	"clamping" phenomenon	The rapid equilibrium between the separated and the dissolved phases, slowing the tissue-to-blood gas exchanges, was possible for high bubble densities but became false for low to moderate bubble densities.
Yount <sup>10</sup>	1977	Varying Permeability Model. Recruitment of micronuclei populations	The number of bubbles formed for a given exposure was linked to the supersaturation level induced by the decompression. The model generated deep/short decompression stops as it limited the supersaturation levels to reduce the number of micronuclei recruited.
Vann <sup>11</sup>	1982	A physical threshold controlling the decompression rate	The desaturation kinetics of tissues during a compression was assumed either classical (perfusion) or instantaneous (diffusion) depending on the tissue tension and ambient pressure.
Hennessy and Hempleman <sup>12</sup>	1988	Instantaneous inert gas equilibrium	The volume of the formed bubble can be determined by tensions, ambient pressure and tissue volume. A bubble phase and an asymmetry between gas saturation and gas elimination kinetics were introduced.
Wienke <sup>13</sup>	1989	Reduced Gradient Bubble Model.	Workman's and Yount's works were merged. RGBM is a hybrid model that modifies a Haldanian model with factors to take some account of bubble mechanics to model gas phase production during decompression.
<b>Probabilistic Models</b>			
Thalman <sup>14</sup>	1984	Exponential-linear real-time-algorithm	Exponential-linear gas exchange kinetics and various matrices of maximum permissible tissue tensions; a slower tissue desaturation with linear gas exchange for inert gas elimination.
Gernhardt <sup>15</sup>	1991	Dynamics of microbubbles	A classical perfusion scheme was chosen for gas exchanges with additional parameters for tissue half-times: growth index for microbubbles, tissue bulk modulus, and initial radius of micronuclei.
Tikuiss <sup>16</sup> /Gault <sup>17</sup>	1994	Maximum likelihood method	Model parameters included surface tension, diffusion, solubility, and tissue half-times. The predicted maximum bubble radii in the compartments were compared to the predicted risks of Doppler bubble score database from a probabilistic model to establish a relationship.

## A2: Übersicht über verschiedene Dekompressionsmodelle (Forts.)

Model	Year	Concept	Details
Vascular Bubble Models			
Hennessy's cardiac valve <sup>18</sup>	1989	Arterial bubble theory	Microbubble flow rate and global volume of microbubbles accumulated at the pulmonary filter constituted arterial bubble transfer. Proposed the basis of a global decompression model.
Flook <sup>19</sup>	1998	A classical perfusion-limited approach with 8 compartments	The volume of gas transported by bubbles onto the pulmonary artery and central venous blood was calculated by a weighted mean of gas in bubbles in the venous drainage from each tissue.
Thom <sup>20</sup>	2011	Decompression stresses activate neutrophils causing vascular injuries	Increased circulating annexin V-coated microparticles derived from leukocytes, erythrocytes, platelets, and endothelial cells initiate decompression-induced neutrophil activation and vascular injuries.
Endothelial Bubble Models			
Chappel and Payne <sup>21</sup>	2006	Formation of microbubbles at capillary endothelium level	The inert gas exchanges between the entrapped gas nuclei and the neighboring tissues as well as the dynamics of the resulting microbubbles growing until their release in the bloodstream were modeled.
Gutvik <sup>22</sup>	2009	Detectable venous gas emboli at the precordial level	The standard perfusion-limited tissue ↔ blood gas exchange formulation was modified to take into account the tissue ↔ bubbles gas exchange. The two selected compartments were for muscle and fat.

### Liste der referenzierten Papers über Dekompressionsmodelle:

#### REFERENCES

1. Workman RD. Calculation of air saturation decompression tables. Research Report 11-57. Washington DC: US Navy Experimental Diving Unit; 1957.
2. Keller H, Buhlman AA. Deep diving and short decompression by breathing mixed gas. *J Appl Physiol.* 1965; 20(6):1267-1270.
3. Mesures particulieres de protection applicables aux scaphandriers. Bulletin officiel du Ministere du Travail. Fascicule special no 74-48 bis; 1977.
4. Travaux en milieu hyperbare, mesures particulieres de prevention. J. O. Rep. Franc Brochure no 1636; Juin 1992.
5. Hempleman HV. Investigation into the decompression tables. Report III, Part A. A new theoretical basis for the calculation of decompression tables. Report no UPS131RNPRC. London: Medical Research Council; 1952.
6. Hills BA. A thermodynamic and kinetic approach to decompression sickness. Libraries Board of South Australia; 1966.
7. Behnke AR. The isobaric (oxygen window) principle of decompression. In: *The New Thrust Seaward*. Trans. 3rd Annual Conf Marine Tech Soc. San Diego, Washington, DC: Marine Technology Society; 1967.
8. Kidd DJ, Stubbs RA. The use of pneumatic analogue computer for divers. Bennett PB, Elliot DH, eds. *Bennett and Elliot's Physiology and Medicine of Diving* 1st edition. Bailliere, Tindall & Cassell, London, 1969; 386-413.
9. Van Liew HD, Conkin J, Burkard ME. The oxygen window and decompression bubbles: estimates and significance. *Aviat Space Environ Med.* 1993; 64:859-865.
10. Yount DE, Kunkle TD, D'Arrigo JS. Stabilization of gas cavitation nuclei by surface-active compounds. *Aviat Space Environ Med.* 1977; 48(3):185-191.
11. Vann RD. Decompression theory and applications. In: Bennett PB, Elliot DH, edss. *The Physiology of Diving and Compressed Air Work*, 3rd edition. Bailliere, Tindall, 1982; 352-382.

## A2: Übersicht über verschiedene Dekompressionsmodelle (Forts.)

12. Hennessy TR, Hempleman HV. An examination of the critical released gas volume concept in decompression sickness. Proceedings of the Royal Society of London. 1977; B197:299-313.
13. Wienke BR. Tissue gas exchange models and decompression computations: A review. Undersea Biomed Res. 1989; 16(1):53-89.
14. Thalmann ED. Phase II testing of decompression algorithms for use in the US Navy underwater decompression computer. Research Report 1-84. Panama City, FL: US Navy Experimental Diving Unit; 1984.
15. Gernhardt ML. Development and evaluation of a decompression stress index based on tissue bubble dynamics. PhD thesis, University of Pennsylvania, Ann Arbor, MI: University Microfilms International Dissertation Information Service; 1991.
16. Tikuisis P, Gault KA, Nishi RY. Prediction of decompression illness using bubble models. Undersea Hyperb Med. 1994; 21(2):129-143.
17. Gault KA, Tikuisis P, Nishi RY. Calibration of a bubble evolution model to observed bubble incidence in divers. Undersea Hyperb Med. 1995; 22(3):249-262.
18. Hennessy TR. On the site of origin, evolution and effects of decompression microbubbles. In: Brubakk AO, Hemmingsen BB, Sundnes G, eds. Supersaturation and Bubble Formation in Fluids and Organisms, The Kongsvoll Symposium, 1988 ; Tapir Publishers, 1989: 292-332.
19. Flook V. Predictions from a mathematical model of decompression compared to Doppler scores. Undersea Hyperb Med. 2011; 38(3):187-196.
20. Thom SR, Yang M, Bhopale VM, et al. Microparticles initiate decompression-induced neutrophil activation and subsequent vascular injuries. J Appl Physiol. 2011; 110:341-350.
21. Chappell MA, Payne SJ. A physiological model of the release of gas bubbles from crevices under decompression. Resp Physiol Neurob. 2006; 153:166-180.
22. Gutvik CR, Brubakk AO. A dynamic two-phase model for vascular bubble formation during decompression of divers. IEEE Trans Biomed Eng. 1009; 56(3):884-889.
23. Vann RD, Dick AP, Barry PD. Doppler bubble measurements and decompression sickness. Undersea Biomed Res. 1982; 9(1) (Suppl):S24.
24. Tarr L, Oppenheimer BS, Sager RV. The circulation time in various clinical conditions determined by the use of sodium dehydrocholate. J Am Heart. 1933; 8(6):766-786.
25. Guyton AC and Hall JE. The textbook of medical physiology, 13th edition. WB Saunders; Philadelphia, PA. 2016; p 709.
26. Halata Z, Badalamente MA, Dee R, Propper M. Ultrastructure of sensory nerve endings in monkey (*Macaca fascicularis*) knee joint capsule. J Ortho Res. 1984; 2(2):169-176.
27. Strauss MB, Miller SS, Lewis IV AJ. The Ruffini Type-2 corpuscle as an explanation for pain-only decompression sickness. Undersea Hyperb Med. 2008; 35(4)Abst:241-242.
28. Balestra C. Dive computer use in recreational diving: Insights from the DAN-DSL database. Archive of Rubicon Foundation. 2012; 99-102.
29. Leigh B. What is the risk of DCI? Diving Research. 2005. <http://divingresearch.qofe.com/page2/page4/page4.html> ♦

## A3: Grundlagen des Kompartimentsmodelles

### 1. The Haldane Compartment Model

-----

#### 1.1 Blood Flow in various Tissues and Organs (influence of physical activities)

NOTES: - values for rest: left column  
 - " " work: right column  
 - blood flow in liters/minute/kg body weight

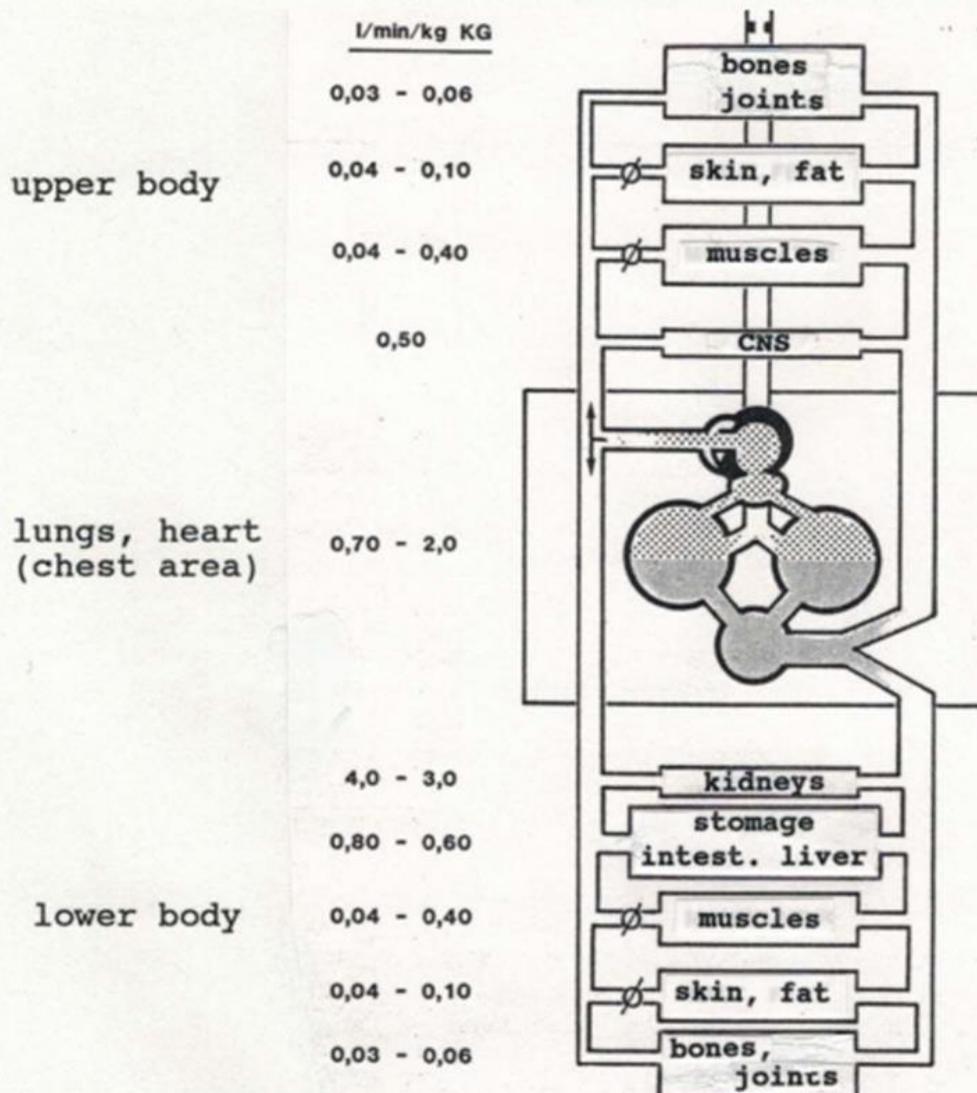


Abbildung 24a: Grundlagen des Kompartimentsmodelles: parallele Anordnung mit gleichen Eingangsbedingungen

### A3: Grundlagen des Kompartimentsmodelles (Forts.)

#### 2. The Saturation and Desaturation Process

##### 2.1 The Mathematical Approach (1 tissue)

	arterial side	Compartment C. (complete mixture)	venous side
	blood input flow	volume V	blood output flow
$p_{alv.N2}$	$b \implies$	pressure diff. $dp_C$	$b \implies$
blood flow per unit of time $\Delta t$ .	$b$	$b$	$b$
blood vol.	$\Delta t * b$	$\Delta t * b$	$\Delta t * b$
N2-solub. coeff.	$\alpha_b$	$\alpha$	$\alpha_b$
N2-tissue part. press.	$p_{alv.N2}$	$pC_{N2}$	$pC_{N2}$
N2-gas-volume	$\Delta t * b * \alpha_b * p_{alv.N2}$	$V * \alpha * dp_C$	$\Delta t * b * \alpha_b * pC_{N2}$

V

$$\text{input gas volume} - \text{output gas volume} = \text{remaining gas volume}$$

V

$$p_{TN2}(t1) = p_{TN2}(t0) + [ p_{alv.N2}(t1) - p_{TN2}(t0) ] * [ 1 - \exp(-k * \Delta t) ]$$

(for rectangular ambient pressure change only)

$\Delta t = t1 - t0$      $p_{TN2}$ : tissue pressure     $t_h$ : tissue half-time

$$k = \frac{b * \alpha_b}{V * \alpha} = \frac{\ln(2)}{t_h} \quad (\text{tissue constant})$$

Abbildung 24b: Grundlagen des Kompartimentsmodelles: Mengenbilanz als Basis für die Differenzialgleichung

## A4: Koeffizientensätze ZHL-16 A/B/C

### Das Kompartimentsmodell ZHL-16

(in der Form:  $p_{amb.tol.} = b * (p_{TIG} - a)$ )

**Legende:** ZHL-16A --> theoretisches Modell  
 ZHL-16B --> für Tauchtabellen  
 ZHL-16C --> für Tauchcomputer

k: Zeitkonstante  
 $k = \ln(2) / t_H$

			ZHL-16A	ZHL-16B	ZHL-16C		
	RG	tH min	Faktor a bar	Faktor a bar	Faktor a bar	Faktor b ---	k 1/min
1	A	4.0	1.25990	1.25990	1.25990	0.50500	0.173287
2	B	8.0	1.00000	1.00000	1.00000	0.65140	0.086643
3	C	12.5	0.86180	0.86180	0.86180	0.72220	0.055452
4	D	18.5	0.75620	0.75620	0.75620	0.78250	0.037467
5	E	27.0	0.66670	0.66670	0.62000	0.81260	0.025672
6	F	38.3	0.59330	0.56000	0.50430	0.84340	0.018098
7	G	54.3	0.52820	0.49470	0.44100	0.86930	0.012765
8	H	77.0	0.47010	0.45000	0.40000	0.89100	0.009002
9	I	109.0	0.41870	0.41870	0.37500	0.90920	0.006359
10	J	146.0	0.37980	0.37980	0.35000	0.92220	0.004748
11	K	187.0	0.34970	0.34970	0.32950	0.93190	0.003707
12	L	239.0	0.32230	0.32230	0.30650	0.94030	0.002900
13	M	305.0	0.29710	0.28500	0.28350	0.94770	0.002273
14	N	390.0	0.27370	0.27370	0.26100	0.95440	0.001777
15	O	498.0	0.25230	0.25230	0.24800	0.96020	0.001392
16	P	635.0	0.23270	0.23270	0.23270	0.96530	0.001092

Tabelle 3: Bühlmann ZHL-16, A, B, C

## A5: Unterschiede zw. den ZHL-16 Versionen: Auszug für 1 tH:

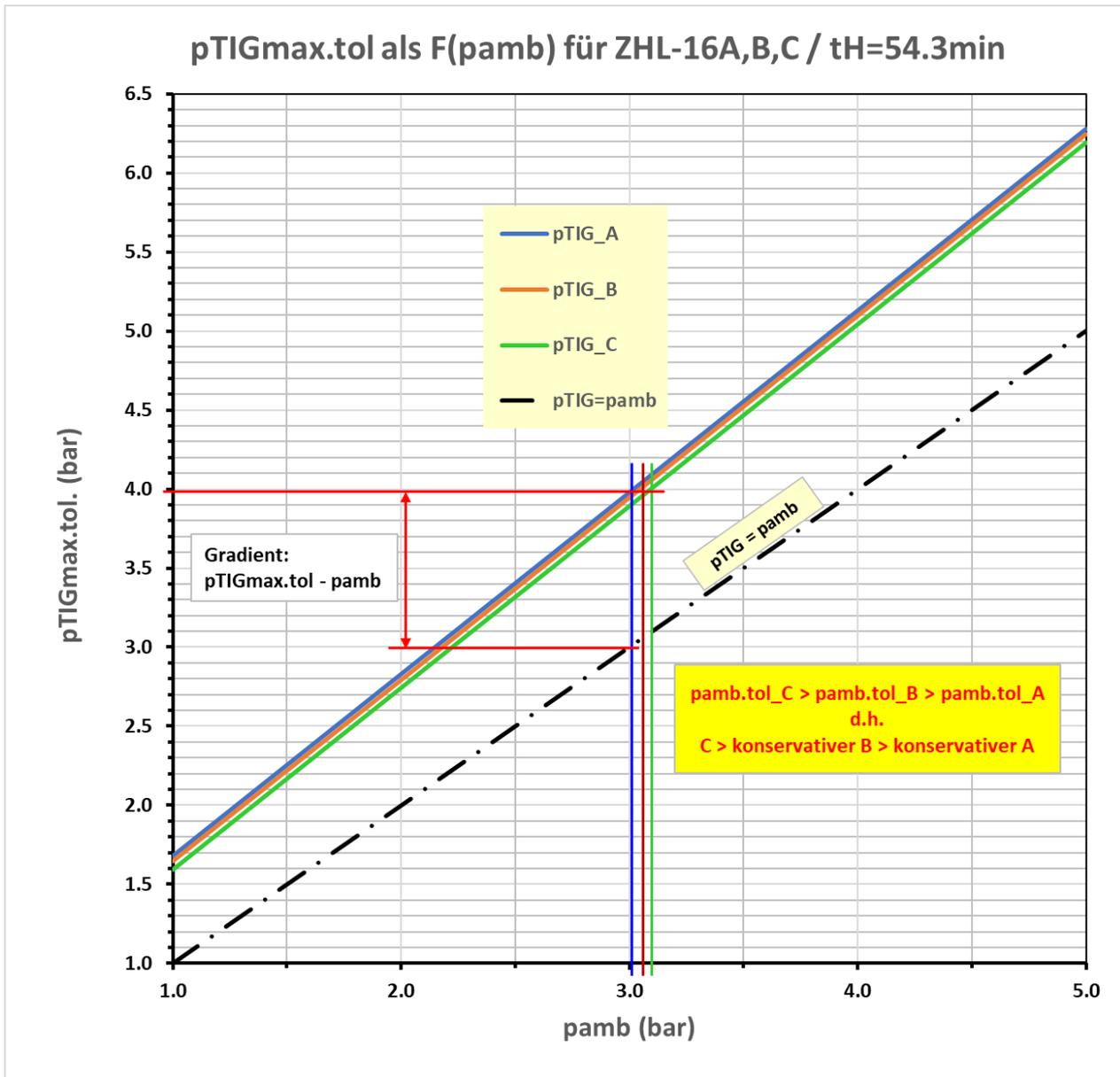


Abbildung 25:  $p_{TIG.tol.}$  als Fkt. ( $p_{amb}$ ) für 1 HWZ; „Konservatismus“ durch Horizontalverschiebung nach rechts Richtung höhere  $p_{amb}$

Aus der **Tabelle 3** unter **Anhang A4** ist ersichtlich, dass bei einigen Kompartimenten der Faktor a verändert worden ist, also der Nullpunkt-Versatz. Nicht jedoch der Faktor b, die Steigung.

In der obigen **Abb. 25** im **Anhang A5** ist der Effekt (der einer horizontalen Verschiebung der Geraden nach RECHTS) ersichtlich, näher zur Ambient Pressure Line und – bei gleicher  $p_{TIG}$  - Richtung grösserer  $p_{amb}$ , also grösserer Tiefe.

## A6: Vergleich Austauschprofil ohne und mit GF

### a) OHNE GF

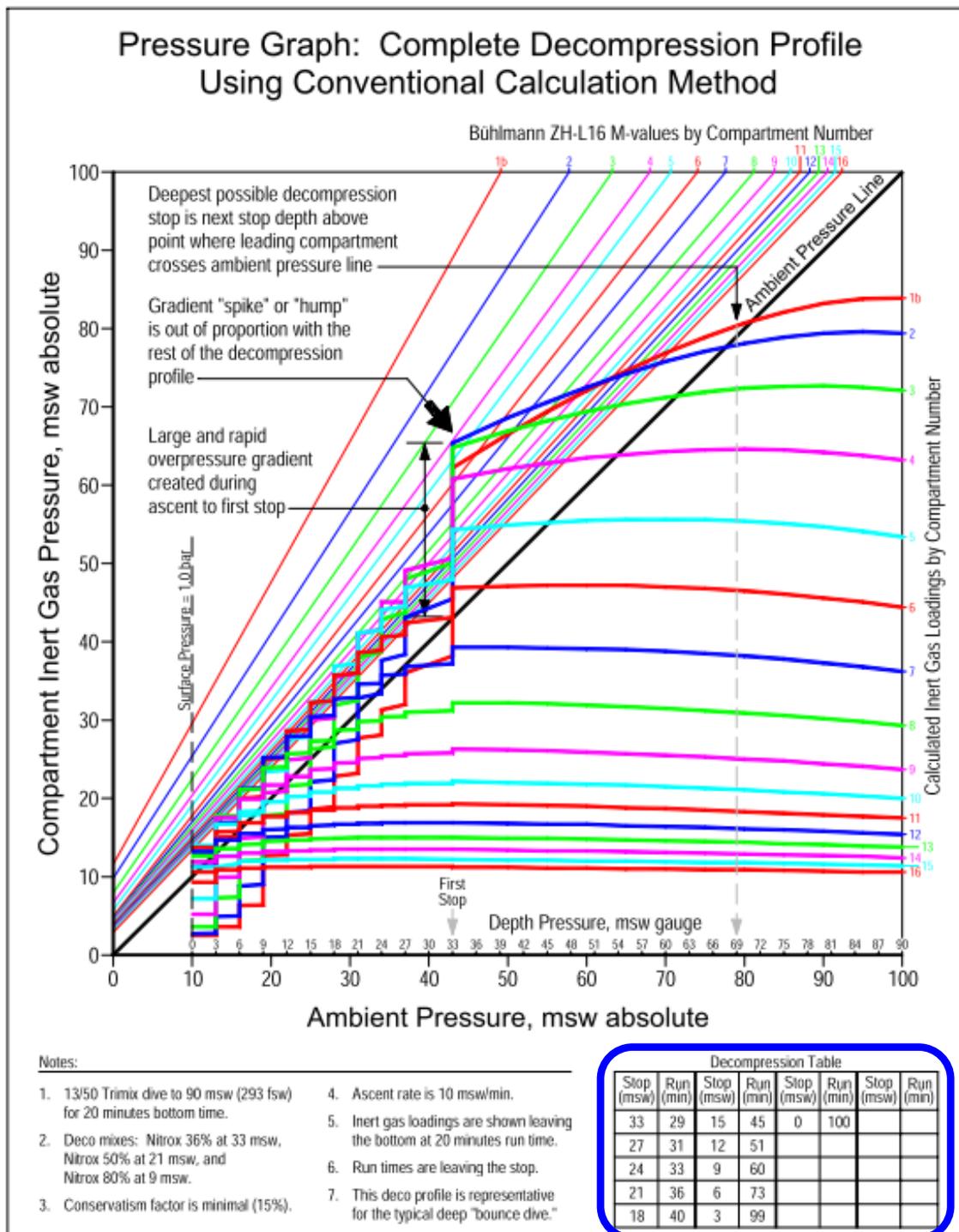


Abbildung 26: Dekompressions-Profil nach ZHL-16 ohne GF; Quelle: Erik C. Baker: „Clearing Up The Confusion About "Deep Stops"“

## A6: Vergleich Austauschprofil ohne und mit GF

### b) MIT GF

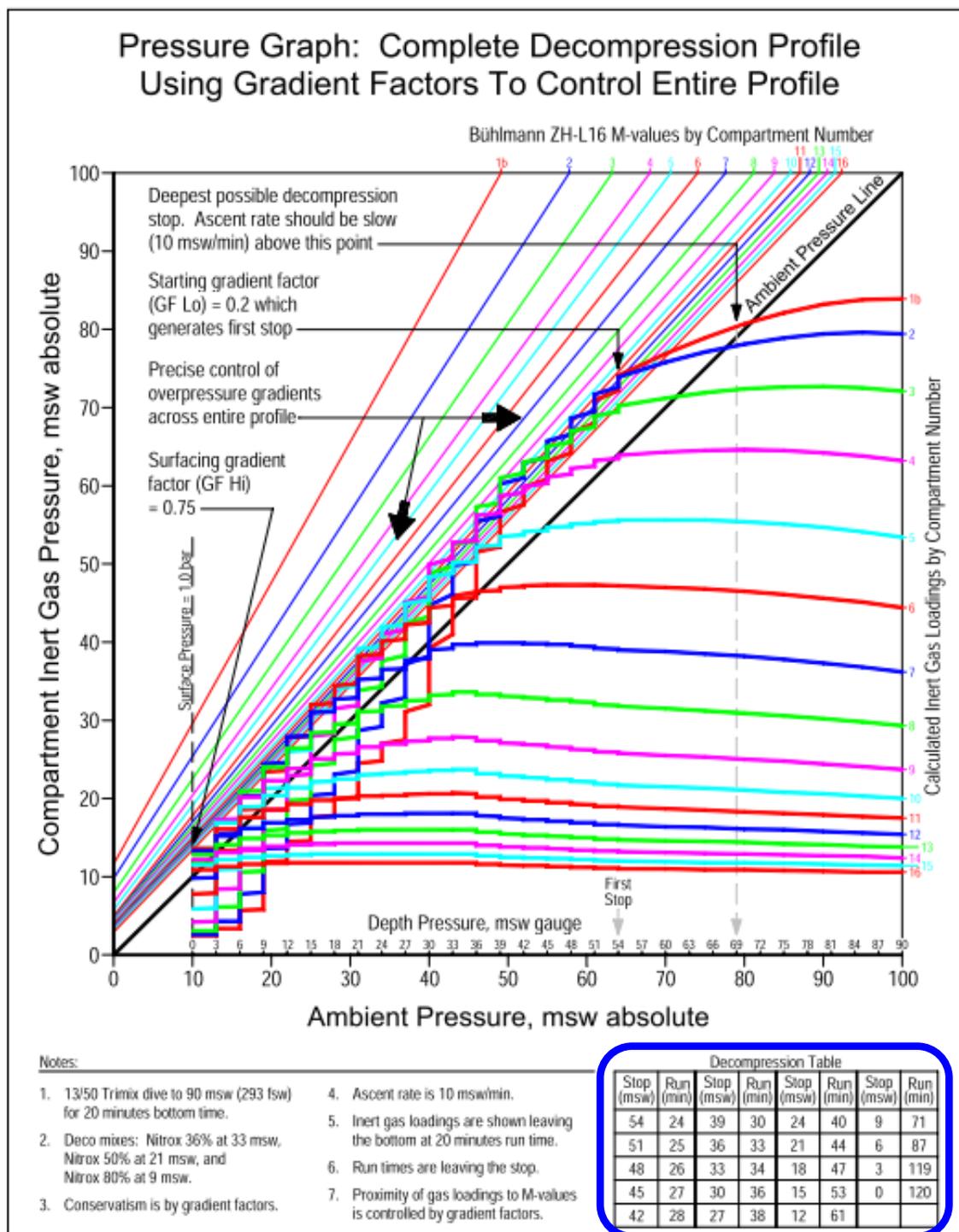


Abbildung 27: Dekompressions-Profil nach ZHL-16 mit GF20/75; Quelle: Erik C. Baker: „Clearing Up The Confusion About “Deep Stops”

## A7: M-Values von Workman

### M-Values USN / Workman (1965) for N<sub>2</sub>

Halftime [min]	M <sub>0</sub> - Value [fsw = feet of sea water]	Delta M Δ M, [fsw/ft]
5	104	1,8
10	88	1,6
20	72	1,5
40	56	1,4
80	54	1,3
120	52	1,2
160	51	1,15
200	51	1,1
240	50	1,1

Tabelle 3: Halbwertszeiten der Kompartimente und M-Values für Luft (also N<sub>2</sub>); Quelle: divetable.com

### Das Kompartimentsmodell Workman 1965

Legende:  $M^* = M_0 + \text{deltaM} * \text{depth}$

1 FT = 0.304800 m

1 FSW = 0.030639 bar

psurf0 = 33.070 FSW

dp/dT = 1.01325 bar

dp/dT = 0.100522 bar/m

fresh water = 0.098067

salt water = 0.100522

density ratio salt/fresh = 1.02503913

Conversion:  $1/b = \text{deltaM}$

$a = M_0 - 1/b * \text{psurf0}$

	RG	tH min	M <sub>0</sub>		a*	b*=1/deltaM	deltaM	k
			FSW	bar	bar	---	FSW/FT	1/min
1	A	5.0	104.0	3.186	1.36262	0.55556	1.800	0.138629
2	B	10.0	88.0	2.696	1.07504	0.62500	1.600	0.069315
3	C	20.0	72.0	2.206	0.68614	0.66667	1.500	0.034657
4	D	40.0	56.0	1.716	0.29724	0.71429	1.400	0.017329
5	E	80.0	54.0	1.655	0.33729	0.76923	1.300	0.008664
6	F	120.0	52.0	1.593	0.37733	0.83333	1.200	0.005776
7	G	160.0	51.0	1.563	0.39736	0.86957	1.150	0.004332
8	H	200.0	51.0	1.563	0.44802	0.90909	1.100	0.003466
9	I	240.0	50.0	1.532	0.41738	0.90909	1.100	0.002888
10	n.a.	999999.0	999999.0	999999.000	0.00000	0.00000	999999.000	0.000000
11	n.a.	999999.0	999999.0	999999.000	0.00000	0.00000	999999.000	0.000000
12	n.a.	999999.0	999999.0	999999.000	0.00000	0.00000	999999.000	0.000000
13	n.a.	999999.0	999999.0	999999.000	0.00000	0.00000	999999.000	0.000000
14	n.a.	999999.0	999999.0	999999.000	0.00000	0.00000	999999.000	0.000000
15	n.a.	999999.0	999999.0	999999.000	0.00000	0.00000	999999.000	0.000000
16	n.a.	999999.0	999999.0	999999.000	0.00000	0.00000	999999.000	0.000000

$k = \ln(2) / tH$

Tabelle 4: Workman Modell (US Navy, 1965); Konversion in Bühlmann-Notation

## **A8: EUROPÄISCHE NORM EN 13319**

### **Tauch-Zubehör - Tiefenmesser und kombinierte Tiefen- und Zeitmessgeräte – Funktionelle und sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfverfahren**

(Auszugsweise)

#### **1 Anwendungsbereich**

Diese Norm legt funktionelle und sicherheitstechnische Anforderungen an Tiefenmesser, Tiefenmessungseigenschaften von anderen Geräten und sowohl Tiefen- als auch Zeitmessungseigenschaften von anderen Geräten fest.

Diese Norm gilt nicht für andere Informationen außer Tiefe und Zeit, die der Benutzer ablesen kann. Informationen hinsichtlich Druckminderung, die von Geräten angezeigt werden, die diese Norm umfasst, sind von ihrem Anwendungsbereich ausdrücklich ausgeschlossen.

Diese Norm gilt für Geräte, die die Wassertiefe mit Hilfe des Umgebungsdrucks, der den Taucher umgibt, messen.

Anforderungen an die Zeitmessung gelten nur, wenn Geräte die Tauchzeit automatisch messen

#### **4 Anforderungen**

##### **4.1 Tiefenmessung**

###### **4.1.1 Eichfaktor für die Umsetzung von Druck in Tiefe**

Der Eichfaktor muss so sein, dass eine Druckerhöhung um 1 bar eine angezeigte Zunahme der Tiefe um 10 m bewirkt.

**ANMERKUNG:** Bei diesem Richtmass wird die Dichte des Wassers mit **1,0197 kg/l** angenommen, d. h. in Süßwasser mit 1,00 kg/l beträgt die geometrische Tiefe 102 % der Anzeige, während in Meerwasser bei einer Dichte von 1,03 kg/l die geometrische Tiefe 99 % der Anzeige beträgt.

Da die physiologisch bedeutsame Zahl nur der Umgebungsdruck ist, ist die geometrische (angezeigte) Tiefe für den Taucher nur von untergeordneter Bedeutung.

###### **4.1.2 Genauigkeit der Tiefenmessung**

Die Anzeige der Tiefe innerhalb des vom Hersteller festgelegten Tiefenbereichs muss nach der Prüfung nach 5.1 und 5.3.8 den in Tabelle 1 angegebenen Werten entsprechen.

Wenn die vom Hersteller festgelegte maximale Tiefe grösser als 60 m ist, sind die Werte von Tabelle 1 um diese festgelegte Tiefe in Stufen von 15 m und der Prüfdruck in Stufen von 150 kPa mit gleichbleibenden Grenzabweichungen von ( +10/-15) kPa fortzusetzen

## **A9: Über den Autor / about the author**

Born 3.1.1953 in Bern, Switzerland

MSc Mechanical Engineering ETH / Fed. Inst. of Technology, Zurich with specializing in thermodynamics and fluid dynamic and working for more than 30 years in the IT Business and Energy Procurement as an Analyst, Project Manager and Business Consultant (ret. 2016)

Additional training at the SIBP (Swiss Institute for Vocational Pedagogy) in Zurich; teaching qualification for vocational secondary schools granted by the Department of the Interior of the Canton AG (1982-83)

Banking Specialist course of the IGK (Association of the Swiss Cantonal Banks for management executive training); graduated with distinction (extra-occupational, 1997-98)

Technical & Marketing Director at the Deco Brain company (Keller Druckmesstechnik AG, Winterthur); program version P2-3, backlight display version

Start diving 1980

Start wreck diving 1985

Start cave diving 1988

Start Instructor Career: 1984 (1\* Instructor CMAS)

NAUI Course Director #7708 (ret.)

PADI IDC Staff Instructor #18656 (ret.)

**CMAS Federal (OW) Instructor (I4) 2009 (for life)**

Moniteur \*\*\* CMAS/FASSAS (Algeria) 1991

Ice Diving Instructor TSVÖ/CMAS 1986 / cmas.ch 2012

DAN Oxygen Provider Instructor (ret.)

**Cave-/Sidemount-/DPV- Diving Staff Instructor [Instructor Trainer] CMAS/SCD 2003+**

Advanced Nitrox Diving Instructor SCD 2020

Stage Tank Diving Instructor SCD 2023

Diving Leadership Instructor SCD 2018

**Approx. 4500 dives, of which 1500+ in wrecks and caves around the globe**

Vice President Technical Committee CMAS International 2004-2008

Co-founder/President Swiss Cave Diving 2004-2014

Director of Standards & Member of the Board SCD (current)

Responsible for cave diving within TC cmas.ch 2000-2013

Head of Specialty Diving Program Sub-Commission CMAS Int'l. 1994-2000

Head Cave Diving Working Group CMAS Int'l. 2002-2013

**Research assoc. to Prof. A.A. Bühlmann 1986-1990 (high altitude experiments, Lake Titicaca expedition, T'86 air diving table calculation)**

Co-author of „Cave Diving Manual“ (accredited by CMAS International and Swiss Cave Diving)

Author of „Cavern Diving Manual“ (accredited by Swiss Cave Diving)

Author of various scientific papers on diving physics, physiology and mathematics, decompression research.

Panelist at div. Internat. Forums on Decompression in Amsterdam, Ireland, Portugal, Spain, France

Panelist at the Bühlmann Memorial Symposium 2019, University Hospital Zurich

Lives with his wife in the Swiss Cantons Aargau and Ticino