

THEORIE: ein paar Formeln zur Theorie der Dekompression

Inhalt:

[die grundlegenden Formeln: Haldane- und Schreiner Gleichungen](#)

[Koeffizienten der Deko-Modelle \(Kopiervorlagen für eigene Deko-
Programme\)](#)

[Dekompressionsrechnung mit Mischgasen](#)

[Und das alles zusammen als PDF zum mitnehmen!](#)

[zurück zur: Homepage](#)

Zusammenfassung der Formeln

Stickstoff (N₂), Sauerstoff (O₂), Kohlendioxid (CO₂), Argon (Ar), Helium (He), ...

Index t (Index _t) tissue = Gewebe, eigentlich ist kein echtes Körpergewebe gemeint sondern ein Kompartiment

Index amb (index _{amb}) ambient = Umgebung

Zusammenhang zwischen den Teildrücken der einzelnen Gassorten und dem Gesamtdruck P_{amb} = P, (Gesetz von Dalton):

$$P = \sum p_i = p_1 + p_2 + p_3 + \dots \quad (51)$$

Für Luft auf Meereshöhe demnach in etwa:

$$P = \sum p_i = p_{O_2} + p_{N_2} + p_{Rest} = 1 \text{ Bar (ca.)}$$

Zur Berechnung der Partial-(=Teil)drücke benutzen wir die Volumenanteile f (= fraction) eines jeden Gases:

$$p_i = P_{amb} * f_i$$

Damit werden beispielsweise (ca.):

$$p_{O_2} = 1 \text{ Bar} * 0,2$$

$$p_{N_2} = 1 \text{ Bar} * 0,8$$

Längeneinheiten

Da wir es in der englischsprachigen Literatur viel mit imperialen Quellen zu tun haben, hier folgende Konversionsfaktoren:

$$1 \text{ m} = 1,094 \text{ yard} = 3,28 \text{ feet} = 39,37 \text{ inches}$$

$$1 \text{ foot} = 0,3048 \text{ m} = 12 \text{ inch}$$

$$1 \text{ inch} = 2,54 \text{ cm}$$

$$1 \text{ fathom} = 6 \text{ ft} = 2 \text{ yard}$$

$$3 \text{ feet} = 1 \text{ yard} = 0,91439 \text{ m}$$

$$1760 \text{ yard} = 1 \text{ mile}$$

$$1 \text{ km} = 0,62 \text{ mile}$$

Geschwindigkeit

$$1 \text{ knot (Knoten)} = 1,15 \text{ miles / hour} = \text{ca. } 51,48 \text{ cm / sec} = \text{ca. } 2,13 \text{ km / h}$$

Volumeneinheiten

1 Kubikmeter (m³) = 35.31 cubic feet (ft³)

1 L = 0,04 ft³

1 ft.³ = 28,317 L

Druckeinheiten

1 Bar = 10⁵ Pascal (Pa) (1 Pa = 1 N / m²) = 14,5038 psi

1 Bar = 10 msw = 100 kPa

1 Atmosphäre (atm) = 760 mm Hg (Torr) = 10,080 Meter Seewasser (msw) = 10,33227 m WS =

33,071 feet sea water (fsw) = 33,8995 feet fresh water = 14,6960 psi

1 fsw = 0,3064 msw

1 msw = 3,2633 fsw

1 fsw = 0,0306391 Bar

1 foot of pure water = 0,0298898 Bar

1 Atmosphäre (atm) = 1,03323 kg/cm² (bzw.: 1.033,23 cm H₂O) = 1,01325 Bar (= 1013,25 mbar) =

760 Torr (mmHg) = 101,325 Kilopascal (kPa)

d.h.: 1 fsw = 22,9809 mm Hg, also 1 Wdh-Gr der USN Tabelle entspricht ca. 37 mm Hg

1 psi = 0,0689474 Bar

zwischen der Tauchtiefe d (in einer Druckeinheit gemessen, z.B. [bar] oder [fsw])

und absolutem Druck (ambient pressure) P_{amb} und dem

Umgebungsdruck auf Meereshöhe (p₀) gilt der Zusammenhang:

$$P_{amb} = p_0 + d$$

bzw. ganz allgemein:

$$P_{amb} = p_0 + d * const.$$

Die Konstante const. dient zur Umrechnung einer Längenangabe (Tauchtiefe) in eine Druckeinheit. Wird die Tauchtiefe d in [m] angegeben, gilt deshalb in etwa folgender Zusammenhang für den Druck in [Bar]:

const. = 0,0980665 [Bar/m], für Süßwasser, und

const. = 0,100522 [Bar/m], für Salzwasser, und damit z.B.:

$$P_{amb} = p_0 + d / 10,197 \text{ bzw. } P_{amb} = p_0 + d / 9,948$$

Referenzen hierzu z.B.: [75], S. 575; [63], S. 457; und besonders [110], S. 893!

Allgemeines

Die Aufnahme und die Abgabe von Inertgasen aus einem System heraus, welches mit diesem Gas nicht im Zustand der Sättigung ist, es also kein Gleichgewicht der Partialdrücke inner- und ausserhalb des Systems gibt, lässt sich durch eine Differentialgleichung beschreiben:

$$dP_t(t)/dt = k[P_{alv}(t) - P_t(t)] \quad (1a)$$

Anschaulich lässt sich diese DGL so erklären: die zeitliche Druckänderung $dP_t(t)/dt$ in einem Kompartiment ist abhängig vom im Moment wirkenden Druckgradienten ΔP . Die Grundidee sieht also mathematisch ganz einfach so aus: $\partial P / \partial t \sim \Delta P$. Aus dieser Proportionalität macht man durch eine Konstante eine richtige Gleichung und aus den ∂ s werden dann die Differentiale gebildet: $dP(t)/dt = k * \Delta P$

Hierbei gilt die zentrale Idee aller sogenannten **Perfusionsmodelle**:
der Druckausgleich der Inertgase zwischen der Lunge und den Arterien erfolgt instantan!
D.h.: $P_{alv}(t) = P_{arteriell}(t)$, für alle t

Variable	Definition
$P_t(t)$	Partialdruck des Inertgases in einem Kompartiment zum Zeitpunkt t, in [Bar]
$P_{alv}(t)$	Partialdruck des Inertgases in den Alveolen [Bar]
k	eine Konstante, vom jeweiligen Kompartiment abhängig [min^{-1}]
t	Zeit (also Tauchzeit) [min]

Schritt 1: Wir trennen die Variablen in (1a) und finden die inhomogene Differential Gleichung (1b):

$$dP_t(t)/dt + kP_t(t) = kP_{alv}(t) \quad (1b)$$

Schritt 2: Die homogene Gleichung (2):

$$dP_{th}(t)/dt + kP_{th}(t) = 0 \quad (2)$$

wird mittels des folgenden Ansatzes gelöst: $P_{th}(t) = C_0 e^{-\lambda t}$

Das 'h' in P_{th} bedeutet, daß die homogene Gleichung gemeint ist. Setzen wir diesen Ansatz in (2) ein, so erhalten wir:

$$-\lambda C_0 e^{-\lambda t} + k C_0 e^{-\lambda t} = 0 \Rightarrow (k - \lambda) C_0 e^{-\lambda t} = 0,$$

nur wenn $k = \lambda$ oder $C_0 = 0$ (uninteressant: dies bedeutet keine Druckveränderung, also kein Tauchgang),

und da $e^{-\lambda * t} \neq 0$ für alle t, nehmen wir also $k = \lambda$ und erhalten somit die homogene Lösung von (2):

$$P_{th}(t) = C_0 e^{-kt}. \quad (3)$$

Schritt 3: Finde die spezielle Lösung der inhomogenen Gleichung (1b) mittels den Randbedingungen. Wir nehmen zwei spezielle Situationen bzgl. $P_{alv}(t)$ an.

1) $P_{alv}(t) = \text{const.}$, d.h. die Tiefe bleibt ebenfalls konstant!

2) $P_{alv}(t)$ variiert linear mit der Zeit, d.h. die Ab- und Aufstiegsrampen sind konstant, also Ab- bzw. Aufstiegsgeschwindigkeiten bleiben konstant.

Situation 1:

Konstante Tiefe = konstanter Umgebungsdruck

In diesem Falle wird auch der alveolare Inertgasdruck einen konstanten Wert annehmen: $P_{alv}(t) = P_{alv0}$. Dann wird die Gleichung (1b):

$$dP_t(t)/dt + kP_t(t) = kP_{alv0} \quad (4)$$

Wir nehmen die 'Lösung':

$$P_t(t) = C_0 e^{-kt} + C_1 \quad (5)$$

Wir setzen (5) in (4) ein und die Exponentialterme heben sich auf:

$$-kC_0 e^{-kt} + kC_0 e^{-kt} + kC_1 = kP_{alv0}$$

und wir erhalten: $C_1 = P_{alv0}$.

Wir suchen uns eine weitere sinnvolle Randbedingung um C_0 zu bestimmen. Es wird ein bestimmter, konstanter Anfangs-Partialdruck im Kompartiment angenommen: $P_t(0) = P_{t0}$ zum Zeitpunkt $t=0$. Dies bedeutet z.B. einen bestimmten, erreichten Sättigungsdruck oder auch den Startdruck beim Bergseetauchen. Das wird in Gleichung (5) eingesetzt:

$$P_{t0} = C_0 e^{-0} + P_{alv0}$$

daraus folgt dann: $C_0 = [P_{t0} - P_{alv0}]$. Es ergibt sich dann die **Haldane** Gleichung für den Partialdruck eines Inertgases in einem spezifischen Kompartiment k :

$$P_t(t) = P_{alv0} + [P_{t0} - P_{alv0}] e^{-kt} \quad (6a)$$

Variable

Definition

$P_t(t)$ Partialdruck eines Inertgases im Kompartiment mit der Konstanten k [Bar]

P_{t0} Initialer Partialdruck des Inertgases im Kompartiment zum Zeitpunkt $t=0$ [Bar]

P_{alv0}	der konstante Partialdruck des Inertgases in den Alveoli [Bar], für $t = 0$ und damit für alle Zeiten wg. der Randbedingung
k	Eine Konstante, abhängig vom Kompartiment [min^{-1}]
t	Zeit [min]

(6a) ist die berühmte **Haldane Gleichung**, durch umformen kommen wir zu (6b);

wir addieren links und rechts einfach P_{t0} und ordnen nach $P_{alv0} - P_{t0}$ um:

$$P_t(t) = P_{t0} + [P_{alv0} - P_{t0}] [1 - e^{-kt}] \quad (6b)$$

Dies ist die allgemein zitierte Gleichung, z.B.:

Bühlmann, [4] S. 14, 1983; [5] S. 64, 1993; [65] S. 96, 2002, mit leicht geänderten Indizes. So ist z.B. P_I der inspiratorische Inertgasdruck, d.h. R_q (siehe Gleichung (13)) wird somit implizit = 1 gesetzt, hierin unterscheiden sich die Deko-Modelle: siehe Kapitel "Handwerkszeug", Abschnitt "Respiratorischer Koeffizient". Bei [4] auf S. 60 erscheint dies noch deutlich in der Formelzusammenstellung.

Situation 2:

der Umgebungsdruck ändert sich linear mit der Zeit

Beim Ab- bzw. Auftauchen mit konstanter Geschwindigkeit ändert sich der inspiratorische Partialdruck des Inertgases linear mit der Zeit (beim SCUBA Tauchen! Bei einem Rebreather (CCR = closed circuit rebreather) gelten, je nach Bauart, andere Gesetze!). In Gleichung (1) bedeutet dies:

$$P_{alv}(t) = P_{alv0} + R \cdot t.$$

P_{alv0} ist der anfängliche Partialdruck des Inertgases zum Zeitpunkt $t=0$, und R ist die Änderungsrate (in Bar/minute) des Partialdrucks dieses Inertgases in den Alveolen. R ist positiv für den Abstieg (Druckzunahme) und negativ für den Aufstieg (Druckabnahme). Wird dies in Gleichung (1b) eingesetzt ergibt das:

$$dP_t(t)/dt + k P_t(t) = k P_{alv0} + k R t \quad (7)$$

Der Lösungsansatz lautet:

$$P_t(t) = C_0 e^{-kt} + C_1 t + C_2 \quad (8)$$

Die Lösung (8) wird in Gleichung (7) eingesetzt und ergibt zunächst:

$$-k C_0 e^{-kt} + C_1 + k C_0 e^{-kt} + k C_1 t + k C_2 = k P_{alv0} + k R t$$

und deshalb:

$$[k C_1 - k R] t + [C_1 + k C_2 - k P_{alv0}] = 0 \quad (9)$$

Um eine Lösung für C_1 und C_2 zu finden, die für alle Zeiten t gilt, setzen wir die Rechteck-Klammerterme in (9) gleich 0. Dies ergibt:

$C_1 = R$ und $C_2 = P_{alv0} - R/k$. Daher gilt:

$$P_t(t) = C_0 e^{-kt} + R t + P_{alv0} - R/k \quad (10)$$

Erneut wird die Randbedingung $P_t(0) = P_{t0}$ für $t=0$ benutzt um C_0 zu berechnen. Wird dies in (10) eingesetzt, folgt:

$$P_{t0} = C_0 e^{-0} + P_{alv0} - R/k$$

und so gilt: $C_0 = P_{t0} - P_{alv0} + R/k$. Als endgültige Lösung finden wir:

$$P_t(t) = P_{alv0} + R t - R/k + [P_{t0} - P_{alv0} + R/k] e^{-kt}$$

bzw.:

$$P_t(t) = P_{alv0} + R [t - 1/k] - [P_{alv0} - P_{t0} - R/k] e^{-kt} \quad (11)$$

Variable	Definition
$P_t(t)$	Partialdruck des Inertgases im Kompartiment [Bar]
P_{t0}	Initialer Partialdruck des Inertgases im Kompartiment zum Zeitpunkt $t=0$ [Bar]
P_{alv0}	Initialer (alveolarer) Partial Druck zum Zeitpunkt $t=0$ [Bar]
k	eine Konstante, vom Kompartiment abhängig
R	Änderungsrate des Partial Druckes des Inertgases in den Alveolen (Bar/min) $R = f * R_{amb}$, f ist der Volumen-Anteil des Inertgases und R_{amb} ist die Änderungsrate des Umgebungsdruckes
t	Zeit [min]

die sogenannte **Schreiner Gleichung**. Wird die Änderungsrate $R = 0$ gesetzt (bei konstanter Tauchtiefe) wird aus der Schreiner Gleichung (11) wieder die Haldanegleichung (6a).

Halbwertszeiten (HWZ)

Die Variable τ (Tau) wird als 'Halbwertszeit' (HWZ) bezeichnet und kennzeichnet die verschiedenen Kompartimente: $-k * \tau = \ln(1/2) = -\ln(2)$. Die Beziehung zwischen k und der HWZ ist:

$$\tau = \ln(2) / k \text{ bzw.: } k = \ln(2) / \tau \quad (12)$$

Der streng physiologische Zusammenhang zwischen den HWZ und den Kompartimenten entsteht eigentlich durch die Fettlöslichkeit und der Perfusion (der Durchblutung):

$$\tau = 0,693 * \alpha_{ti} / (\alpha_{bl} * dQ/dt) \quad (12a)$$

wobei folgende Definitionen gelten:

α_{ti} = Löslichkeit des Inertgases im Gewebe (tissue), $\text{ml(S)}_{\text{gas}} \cdot \text{ml}_{\text{ti}}^{-1} \cdot (100 \text{ kPa})^{-1}$

α_{bl} = Löslichkeit des Inertgases im Blut (blood), $\text{ml(S)}_{\text{gas}} \cdot \text{ml}_{\text{blood}}^{-1} \cdot (100 \text{ kPa})^{-1}$

dQ/dt = Gewebsperfusion, $\text{ml}_{\text{blood}} \cdot \text{ml}_{\text{ti}}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$

Die Partialdrücke in den Lungenalveolen

Wir wollen den alveolaren Partialdruck P_{alv} genauer bestimmen. Die Gaszusammensetzung und damit die Partialdrücke der einzelnen Bestandteile sind abhängig vom Umgebungsdruck P_{amb} , Wasserdampf, Kohlendioxid und den Bestandteilen des Gasgemisches, also der chemischen Zusammensetzung des Atemgases.

Der Umgebungsdruck P_{amb} ist die Summe aus atmosphärischem Druck (ca. 1 Bar auf Meereshöhe) + statischem Druck der Wassersäule (Tiefe), er steigt um ca. 1 Bar mit je 10 m Tiefenzunahme. Der Umgebungsdruck und der absolute (Summe alle Partialdrücke) Druck in der Lunge müssen gleich gross sein: nur beim Ein- bzw. Ausatmen ergibt sich eine kleine Differenz von max. ca. 30 cm Wassersäule.

Der Partialdruck eines Inertgases in der Lunge P_{alv} lässt sich in etwa abschätzen durch:

- den Partialdruck (bedingt durch den Anteil f) des Inertgases in der Luft (Pressluft) oder im Atemgasgemisch
- den Wasserdampfpartialdruck $P_{\text{H}_2\text{O}}$. Die getrocknete Kompressorluft muss auf dem Weg zur Lunge in der Nase, Kehlkopf, den Tracheen und in diversen Schleimhäuten komplett befeuchtet werden. Somit wird das Atemgas verdünnt. Bei 37 Grad Celsius beträgt $P_{\text{H}_2\text{O}}$ in gesättigter Umgebung ca. 0.0627 Bar (47 mm Hg)
- Sauerstoff O_2 wird durch den Gasaustausch aus der Lunge entnommen
- Kohlendioxid CO_2 wird durch den Gasaustausch hinzugefügt
- da CO_2 im normalen, sauberen Atemgas vernachlässigbar ist, wird der CO_2 Partialdruck in der Lunge gleich dem arteriellen CO_2 Partialdruck angesetzt mit: 0.0534 Bar (40 mm Hg).

Der Sauerstoffverbrauch und damit die Kohlendioxidproduktion wird angegeben durch den **respiratorischen Quotienten** R_q . R_q ist das Volumenverhältnis von Kohlendioxidproduktion zu Sauerstoffverbrauch, Durchschnittswerte sind: 200 ml Kohlendioxidproduktion / 250 ml Sauerstoffverbrauch pro Minute, d.h. ca.:

$$R_q = 200 / 250 = 0,8.$$

R_q hängt von der Ernährung sowie der Anstrengung ab: siehe Kapitel "Handwerkszeug"

Die Gleichung der **alveolaren Ventilation** beschreibt dies:

$$P_{\text{alv}} = [P_{\text{amb}} - P_{\text{H}_2\text{O}} - P_{\text{CO}_2} + \Delta P_{\text{O}_2}] * f$$

oder:

$$P_{\text{alv}} = [P_{\text{amb}} - P_{\text{H}_2\text{O}} + (1 - R_q) / R_q * P_{\text{CO}_2}] * f \quad (13)$$

Variable	Definition
P_{alv}	Partialdruck des Inertgases in den Alveoli [Bar]
P_{amb}	Umgebungsdruck, also Absolutdruck des Atemgases [Bar]
$P_{\text{H}_2\text{O}}$	Wasserdampfpartialdruck, bei 37 Grad Celsius ca. 0.0627 Bar (47 mm Hg)
P_{CO_2}	Kohlendioxidpartialdruck, ca. 0.0534 Bar (40 mm Hg)
ΔP_{O_2}	Delta = Änderung des Sauerstoffpartialdruckes durch den Gasaustausch in der Lunge
R_q	der respiratorische Quotient Anteil des Inertgases im Atemgas; Bsp.: N_2 in trockener Atemluft = ca. 0.78.
f	Üblicherweise wird zum Tauchen $f = 0,79xx$ angesetzt, d.h.: es werden Spurengase etc. mitberücksichtigt

Kritische Übersättigungen, symptomlos tolerierte Inertgasüberdrücke, M-Werte

Definitionen siehe: Kapitel "Handwerkszeug"

Haldane Werte

2 : 1 für alle 5 Kompartimente, allerdings gilt das so nur für den absoluten Druck, bzgl. den Inertgasspannungen im Verhältnis zum Umgebungsdruck sieht dann das so aus:

$$2 * 0,78 = 1,56, \text{ also } 1,56 : 1 \text{ (Workman)}$$

und ist somit eine Konstante für alle Kompartimente.

Workman M-Werte

Die lineare Workman Gleichung, also eine einfache Geradengleichung für jedes Kompartiment sieht so aus:

$$M = M_0 + \Delta M * d \quad (14)$$

Variable	Definition
M	M-Wert, Maximaler Partialdruck des Inertgases im Kompartiment [fsw]
M_0	M-Null Wert, für Meereshöhe, oder Tauchtiefe = 0 ft für jedes Kompartiment [fsw]
ΔM	Delta M, Zunahme für M pro foot Tauch-Tiefe, für jedes Kompartiment definiert [fsw/ft]
d	Tauchtiefe [ft]

Alle aktuellen Koeffizienten gibt es weiter unten in einer Tabelle. Workman liest die M-Werte abnehmen mit zunehmender Halbwertszeit, danach können schnelle Kompartimente einen höheren Inertgasüberdruck tolerieren als die langsamen.

Mit Gleichung (14) können wir die minimale Tiefe d_{\min} berechnen in der der Taucher während des Deko-Stopps bleiben sollte. Dies muss man für jedes Kompartiment machen und ist abhängig von der bisher erreichten Inertgasübersättigung:

$$d_{\min} = (P_t - M_0) / \Delta M \quad (15)$$

Da jedes Kompartiment eine andere Sättigung und somit auch andere Minimaltiefen aufweist, nehmen wir aus diesen Werten den grössten: es darf dann maximal bis zu dieser Tiefe aufgestiegen werden und keinesfalls weiter!

Für den Zusammenhang zwischen den M-Werten und der Halbwertszeit gilt folgender empirischer Zusammenhang lt. Workman:

$$M = 152,7 \tau^{-1/4} + 3,25 d \tau^{-1/4} = M_0 + \Delta M d \quad (16)$$

Für den Zusammenhang zwischen Nullzeiten t_{NDL} [min] und der Tauchtiefe d [fsw] gilt nach Hempleman in etwa:

$$d * t_{\text{NDL}}^{1/2} = 475 \text{ fsw min}^{1/2} \quad (16.1)$$

Der **PADI/DSAT RDP** wurde genau nach so einer Formel generiert, allerdings mit weiteren Anpassungen:

$$d - A = C * t_{\text{NDL}}^{-x} \quad (16.2)$$

- A = "flache" Asymptote, 20,13 fsw
- C = 803
- x = 0,7476
- "tiefe" Asymptote = 262 fsw (theoretische Tauchtiefe mit NDL = 0!)

Die Bühlmann-Hahn Modelle

Bühlmann bietet ebenfalls wie Workman, eine lineare Beziehung zwischen Übersättigung und Umgebungsdruck an ([65], S. 117):

$$P_{\text{t.tol.ig}} = P_{\text{amb}} / b + a \quad (17)$$

Variable	Definition
$P_{\text{t.tol.ig}}$	tolerierter Inertgasdruck, für jedes Kompartiment, (analog M) [Bar], Summe aller Partialdrücke der inerten Atemgase
a	Grenzwert bei einem theoretischen Umgebungsdruck von 0 Bar, d.h. der Achsenabschnitt [Bar]
P_{amb}	Umgebungsdruck, absoluter Druck der Atemgase [Bar]

- b $1/b$ Druckgradient: Wert der Zunahme pro Druckeinheit Tiefe (dimensionslos), d.h. die Steigung der Geraden

Der Unterschied in den Definitionen liegt lediglich darin, dass Workman die M-Werte auf Umgebungsdruck beim Tauchen bezogen auf Meereshöhe angibt und Bühlmann gegen 0 Bar Umgebungsdruck extrapoliert (und damit den Bereich zwischen 1 und 0 Bar für Bergseetauchen automatisch erschließt!). Beide Definitionen kann man ineinander umrechnen:

$$\begin{aligned} P_{t, \text{tol. ig}} &= M \\ \Delta M &= \text{const.} * 1/b \\ M_0 &= a + p_0/b \end{aligned} \quad (18)$$

Für die a- und b- Koeffizienten benutzte Bühlmann die folgende empirische Relation in Abhängigkeit von der Halbwertszeit τ . Diese gelten so nur für Stickstoff ([65], S. 129)! Für Helium sieht diese Relation etwas anders aus ... (siehe [65], S. 131).

$$\begin{aligned} a &= 2 \text{ Bar} * \tau^{-1/3} \\ b &= 1.005 - \tau^{-1/2} \end{aligned} \quad (19)$$

Dies ist der sogenannte "A"-Koeffizienten Satz, weiterhin gibt es einen "B" (konservativer, für Tabellen) und einen "C" Satz (für Tauchcomputerberechnungen) von Koeffizienten (Tabellen hierzu: siehe weiter unten resp. [65], S. 158).

Das Verhältnis zwischen zwei aufeinanderfolgenden HWZs ist in etwa 1,2 bis 1,4. Dies entspricht nicht etwa einem physiologischen Gesetz, sondern lediglich dem Wunsch, ein enges Netz von HWZs zu stricken. Lediglich die ganz schnellen und ganz langsamen Kompartimente, also die HWZs 4 - 8 und 400 - 720 min. entsprechen direkt Ergebnissen medizinischer Überlegungen. Nichtsdestotrotz wird auf S. 115 [65] die Identifikation der Kompartimente mit echten Körpergeweben unternommen:

- Nr. 1 - 4: Gehirn und Rückenmark
- Nr. 5 - 11: Haut
- Nr. 9 - 12: Muskulatur
- Nr. 13 - 16: Gelenke, Knorpel, Knochen
- Nr. 7 - 16: Innenöhrchen

Die dritte Wurzel zur Ableitung von a gibt wohl einen Hinweis auf das damit verbundene tolerierte "Überschussvolumen" an Inertgas.

Die etwas griffigere Formulierung von (17) sieht so aus:

$$P_{\text{amb, tol}} = (P_{t, \text{ig}} - a) * b$$

Andere Perfusionsmodelle

DCAP (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 waren von 5 - 670 min., damit die für Helium: 5 - 240 min.

Der **PADI RDP™** Koeffizienten Satz benutzt die 16 M-Werte, die von Raymond E. Rogers und

Michael R. Powell, Diving Science and Technology Corp (DSAT), entwickelt wurden. Mit diesem Modell, ihr wißt es, können nur NDLs berechnet werden, es ist nicht für Deko-TGs validiert worden!

Diffusionsmodelle

Das **RNPL SLAB** Modell:

RNPL ist das "Royal Naval Physiological Laboratory" of Her Majesty, the Queen. Slab = Scheibe. Hieraus haben sich die BLACKPOOL Tabellen für Caisson-Arbeiter und dann die BSAC 1988 Tabellen entwickelt.

$$P_1 = P_{\text{ambient}} - 8 / \pi^2 * (P_{\text{ambient}} - P_0) * (e^{-k*t} + 1/9 * e^{-9*k*t} + 1/25 * e^{-25*k*t})$$

$$r = 27,5714 / P_1 + 12,407$$

r = Supersaturation Ratio, $1,6 < r < 1,9$
 P_1 in Bar
 $k = 0,007928$

Dies ist eine spezielle Lösung des zweiten Fick'schen Gesetzes. Für den Diffusionskoeffizienten D gilt damit:

$$k = D * \pi^2 / 4 * b^2, b \text{ ist die Dicke der Scheibe.}$$

Das **DCIEM Kidd-Stubbs** Modell:

DCIEM = Defence and Civil Institute of Environmental Medicine, Canada:

Bei diesem Modell sind **4 Kompartimente in Serie geschaltet**, $i = 1 - 5$.

Dies Modell ist das Kidd-Stubbs Modell von 1962 bzw. KS-1971.

Hieraus wurden dann die DCIEM Tables 1983 (R.Y. Nishi und G.R. Lauckner) entwickelt.

$$dP_i / dt = A * ((B + P_{i-1} + P_i) * (P_{i-1} - P_i) - (B + P_i + P_{i+1})(P_i - P_{i+1}))$$

mit: $P_0 = P_{\text{ambient}}$

und: $P_i = P$ im Kompartiment i

und: $P_5 = 0$

$A = 0,0002596$

$B = 83,67$

A und B sind die sogenannten "Fluss Konstanten" für Luft, in msw

mit: SAD = Safe Ascent Depth

$SAD = P_{\text{max, Komp.i}} / 1,8 - 10,06$

für die DCIEM Tabelle gilt jedoch folgendes:

$SAD = P_{\text{max, Komp.i}} / R - \text{OFF} - P_{\text{sealevel}}$

$i = 1, R = 1,300$ und $\text{OFF} = 4,8$

$i = 2, R = 1,385$ und $\text{OFF} = 2,5$

$P_{\text{sealevel}} = 10,06 \text{ msw}$

und $i = 3; 4; 1/R = 0,0$ sowie $\text{OFF} = 0,0$

Stopp-Zeiten, Nullzeiten (= no decompression limits), Zeit bis Flug etc.

Wir nehmen Gleichung (6a) und formen diese etwas um:

$$e^{-k * t} = [(P_t(t) - P_{alv0}) / (P_{t0} - P_{alv0})] \quad (20)$$

Der Bruch sei der Term in der eckigen Klammer [...]. Die Gleichung wird logarithmiert:

$$\ln [\dots] = \ln (e^{-k * t}) = - k t$$

wir lösen nach t auf:

$$t = - 1 / k * \ln [\dots]$$

und aus (12) mit $k = \ln(2) / \tau$ ergeben sich die gefragten Zeiten zu:

$$t = - \tau / \ln 2 * \ln [(P_t(t) - P_{alv0}) / (P_{t0} - P_{alv0})] \quad (21)$$

Mit (21) und sinnvollen Annahmen für die einzelnen Druckterme können wir jetzt berechnen:

- die NDLs mittels (17) und $P_{amb} = 1$ Bar
- die Zeit bis Flug (Flugverbotszeit), wenn bei (17) der Kabinendruck im Flieger $P_{cabin} = 0,58$ Bar = P_{amb} gesetzt wird.
Dies ist wohl die unterste Grenze, normalerweise herrscht in der Kabine ein Druck von etwa 0,8 Bar.
- die Entsättigungszeit, wenn eine gewisse mathematische Unschärfe eingeführt wird:
 $P_t(t) = P_{N_2} + \Delta$, wobei Delta eine kleine Zahl sein kann, sonst schneiden sich die Gerade mit dem konstanten $P = P_{N_2}$ und die Exponentialkurve der Entsättigung $P = P_t(t)$ erst im Unendlichen, und das wäre etwas zu lange für einen Tauchurlaub ...
Völlm schlägt in [65], S. 216, vor, die Grenze auf die Tages-Schwankungen des Luftdruckes zu setzen, also ca. ± 30 mbar.
- die Zeiten auf den allfälligen Deko-Stopps
- (21) kann auch für Mischgase benutzt werden, wenn sinnvolle Annahmen über die die a- und b- Koeffizienten gemacht werden

Für Mischgase bietet Bühlmann folgendes an ([65], S. 119):

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

wobei die a- und b- Koeffizienten gemäss den Partialdrücken in jedem Kompartiment normiert werden sollen (siehe auch dazu die Bemerkung in [54] auf S. 86):

Es gilt somit für jede Kombination von a- & b-Werten für jedes Kompartiment zu jedem Zeitpunkt t:

$$\begin{aligned} a(He + N_2) &= [(P_{t, He} * a_{He}) + (P_{t, N_2} * a_{N_2})] / (P_{t, He} + P_{t, N_2}) \\ b(He + N_2) &= [(P_{t, He} * b_{He}) + (P_{t, N_2} * b_{N_2})] / (P_{t, He} + P_{t, N_2}) \end{aligned} \quad (22)$$

Siehe dazu auch die Beispiele in [4], S. 27 sowie [5], S. 80.

Gradienten Faktoren / Gradient Factors (GF) / VGM (Variable Gradient Method)

Die a- und b-Koeffizienten werden mit den GF verziert:

$$a \rightarrow a * GF \text{ sowie } b \rightarrow b / (GF - GF * b + b) \quad (22.a)$$

Für alle GF pro Kompartiment gilt: $0 < GF \leq 1$

wenn konservativer gerechnet werden soll.

Bei **aggressiver** Rechenweise werden die $GF > 1$ gesetzt.

Die meisten Desktop Deko-Softwares erlauben die Eingabe von 2 Gradientenfaktoren: GF Hi und GF Lo.

GF Hi (= High) bedeutet die Reduktion des führenden M-Wertes (oder des a- & b Wertepaares) und erzeugt so einen längeren letzten, flachen Stopp.

GF Lo (= Low) erzeugt einen tieferen, ersten Stopp.

Über eine lineare Funktion kann man die Gradientenfaktoren über alle Austauschstufen benutzen:

mit: **GF Hi > GF Lo**

$$\begin{aligned} GF_m &= (GF_{Hi} - GF_{Lo}) / \text{erste Stopptiefe} \\ GF &= GF_{Hi} - GF_m * \text{aktuelle Stopptiefe} \end{aligned} \quad (22.b)$$

Bei der **VGM (Variable Gradient Method)** kann man, statt nur ein GF-Paar für die komplette Schar aller Kompartimente, für jedes Kompartiment gezielt einen GF Hi / GF Lo angeben.

RGBM über ZH-L gefaltet / RGBM folded over ZH-L

Wienke bietet ein einfaches Verfahren an, ([31], S. 79 - 80; sowie [71], S. 33 - 40) wie die Ergebnisse aus den RGBM Modellen

über ein bestehendes ZHL-Modell gefaltet werden können: es werden lediglich die a-, b-Koeffizienten linear skaliert.

Bezeichnungen hierfür:

tiny RGBM (tiny = winzig)

modified RGBM (modified = verändert, angepasst)

recreational RGBM (recreational = für Sporttaucher)

Haldane-imbedded (in die Haldane Theorie eingebettet)

Dies Modell ist in allen RGBM-Simulatoren zu finden wie:

GAP, ABYSS, etc.-Softwares sowie in MARES und SUUNTO Computern.

Dies wird mittels den sogenannten "**reduction factors**" **f** bewerkstelligt. Im Klartext werden die 16 Kompartimente und die dazugehörigen HWZ sowie die zentrale Gleichung (17) weiter benutzt.

Mit diesen f ($f < 1$) wird aus (17):

$$P_{\min} = (p - a_f) * b_f$$

wobei:

$$a_f = a * f$$

und:

$$b_f = b / f * (1 - b) + b$$

f hängt von der HWZ ab und wird nur bei Luft/Nitrox für HWZ > 180 min. definiert.

(Bemerkung:

Bei genauem Hinsehen ist dies mit (22.a) identisch)

Desweiteren sollen genau diejenigen Faktoren eingehen, die eben im ZHL Modell bisher nicht berücksichtigt sind:

$$f = (1 - f_0) * \tau / 180 + f_0$$

wobei:

$$f < 1$$

und:

$$\tau > 180 \text{ min.}$$

Für die Faktoren: Wdh-TGs (rp), reversed Profiles (dp) und Mehrtages-Non-Limit Tauchen (dy) wird für f_0 folgendes angesetzt:

$$f_0 = 0,45 * f_{rp} + 0,30 * f_{dp} + 0,25 * f_{dy}$$

Es bedeutet:

rp = repetitive (Wdh-TG)

dp = deeper than previous (reversed Profil), also flacher TG zuerst

dy = multiday, Mehrtages-Tauchen, Zeitraum länger als 30 h

Für die einzelnen Faktoren gelten Abhängigkeiten:

$$\begin{aligned} f_{rp} &= 1 - 0,45 \exp \left[- (t_{sur} - \eta_{rp})^2 / 4 * \eta_{rp}^2 \right] \\ f_{dp} &= 1 - 0,45 * [1 - \exp (- \Delta P_{max} / P_{max})] * \exp \left[- (t_{sur} - \eta_{dp})^2 / 4 * \eta_{dp}^2 \right] \\ f_{dy} &= 0,70 + 0,30 \exp (- n / \eta_{dy}) \end{aligned} \quad (23)$$

(Bemerkung:

1) der Faktor bei f_{dy} schwankt irgendwie zwischen 0,25 und 1,0 ...(S. 36)

2) n ist offenbar nicht stabil definiert, desweiteren passen die Einheiten (1/Zeit oder dimensionslos) nicht zur Einheit von η !!!)

Für Helium gilt analog:

$$f = (1 - f_0) * \tau / 67,8 + f_0$$

wobei:

$$f < 1$$

und:

$$\tau > 67,8 \text{ min.}$$

Bei Trimix gilt entsprechend für die einzelnen Partialdrücke: $f_{O_2} + f_{N_2} + f_{He} = 1$.

Für den gesamten Inertgasdruck Π in den Kompartimenten gilt:

$$\Pi = (P_{\text{amb, N}_2} + P_{\text{amb, He}}) + (P_{t, N_2} - P_{\text{amb, N}_2}) * e^{(-k_{N_2} * t)} + (P_{t, He} - P_{\text{amb, He}}) * e^{(-k_{He} * t)}$$

wobei jetzt allerdings die mit den Anteilen f am Atemgas gewichteten Faktoren a_{f, N_2} und $a_{f, He}$ sowie b_{f, N_2} und $b_{f, He}$ zur Berechnung der kritischen A, B - Koeffizienten für das Trimix benutzt werden:

$$A_f = (f_{N_2} * a_{f, N_2} + f_{He} * a_{f, He}) / (f_{N_2} + f_{He})$$

sowie:

$$B_f = (f_{N_2} * b_{f, N_2} + f_{He} * b_{f, He}) / (f_{N_2} + f_{He})$$

und somit der kritische Druck:

$$P_{\text{min}} = (\Pi - A_f) * B_f$$

(Bemerkung:

1) die Formel für Π auf S. 39 ist falsch, hier bei uns aber korrigiert!

2) Π wird somit anders berechnet wie (22). Es ist fraglich, was bei einem Wechsel auf reinen Sauerstoff in der Deko passiert:

die Anteile von He und N_2 werden identisch 0 im Atemgas, somit würden $A_f = 0$

und auch $B_f = 0$ und damit würde auch $P_{\text{min}} = 0 \dots$)

Für die inhärente Untersättigung, (Sauerstoff-Fenster v) gibt Wienke folgendes an;
 v [fsw]:, $P = P_{\text{amb}} = P_{\text{absolut}}$ [fsw], f_{O_2} Sauerstoffanteil

$$v = f_{O_2} * P - 2,04 * (1 - f_{O_2}) - 5,47 \quad (24)$$

(Bemerkung:

Das Oxygen Window ist aber nicht-linear, es erreicht seine grösste Öffnung bei ca. 1600 mm Hg!)

Zusammenhang zwischen k und den Kompartimenten

Aus (12) gilt ja folgendes, zunächst einmal rein mathematisch: $\tau = \ln(2) / k$ bzw.: $k = \ln(2) / \tau$

Wie ist nun der Zusammenhang zwischen k und den Kompartimenten, d.h. den unterschiedlichen Perfusionsraten und den unterschiedlichen Löslichkeiten?

Eine einfache Massenbilanz für ein Inertgas in einem ausschliesslich durch Perfusion versorgtem Gewebe sieht so aus:

$$N_{2\text{gespeichert}} = N_{2\text{rein}} - N_{2\text{raus}}$$

Das Inertgas wird mit arteriellem Blut zum Gewebe transportiert und verlässt diesen Bereich mit dem venösen Blut.

Hierbei wird angenommen, dass der arterielle (pN_a) und der alveolare Inertgaspartialdruck (pN_A) gleich sind, und dass die Diffusion zwischen nahe aneinander gelegenen Kapillaren instantan erfolgt, d.h.: auch der venöse (pN_v) und der Gewebepartialdruck (pN_t) sollen für dieses Inertgas gleich sein.

Die Löslichkeitskoeffizienten des Inertgases für Blut (b) und Gewebe (t) sind: α_b sowie α_t . Q ist der Blutfluss, V_t ist das Gewebevolumen. Beginnend zur Zeit $t = 0$ wird vorausgesetzt, dass pN_a sofort mit einem konstanten Wert, p_a , gleichgesetzt wird. Die Änderungsrate des Gewebesdruckes bestimmt die Rate mit der ein Inertgas im Gewebe gespeichert wird. Die kleine Skizze unten mag helfen: deshalb gilt zunächst:

$$\alpha_t * V_t * dp_t/dt = \alpha_b * dQ/dt * pN_a - \alpha_b * dQ/dt * pN_v \quad (25)$$

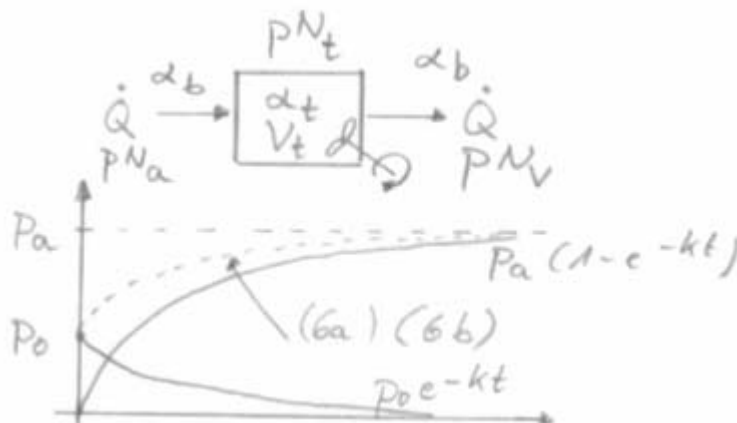
$$\text{mit: } dp_t/dt + k * p_t = k * p_a$$

$$\text{sowie: } k = \alpha_b * dQ/dt / (\alpha_t * V_t)$$

Die Lösung von (25) ist ja entweder (6a) bzw. (6b). Damit gilt letztendes ein Zusammenhang zwischen der HWZ und der Gewebepfusion und den Löslichkeiten wie folgt:

$$\tau = 0,693 / k = 0,693 / (\alpha_b * dQ/dt / \alpha_t * V_t) \quad (26)$$

Der Gewebesdruck über der Zeit ($p_t(t)$) ist die Summe aus der Abnahme von p_0 und dem Anstieg des alveolaren Drucks pN_A :



Der kleine Rührer soll andeuten, dass es sich um ein "well stirred" (gut vermischtes) Kompartiment handelt.

VVAL18 LEM Modell

Bei der Revision 6 von 04/2008 der USN Tabelle wurde das Haldane/Workman EE Modell auf ein LE- bzw. LEM Modell umgebaut.

Zunächst wird der arterielle Inertgaspartialdruck p_a korrigiert:

$$p_{a,N_2} = P_{amb} - P_{I,O_2} - 1,5 \quad (30)$$

p_{a,N_2} = arterieller Inertgaspartialdruck

P_{amb} = absoluter Umgebungsdruck

P_{I,O_2} = inspiratorischer Sauerstoffpartialdruck (in FSW)

1,5 = arterieller CO_2 Partialdruck in FSW (35 mmHg)

Der Wasserdampfpartialdruck wird zunächst ignoriert.

Ausgehend von Gleichung (6a) wird für die Entsättigung ein linearer Verlauf vorgeschrieben. Diese lineare Entsättigung wird bis zum "**exponential cross over point**" berechnet, danach geht es wie bisher exponentiell weiter.

Ist zu irgendeinem Zeitpunkt in irgendeinem Kompartiment während der Entsättigungsphase der Inertgaspartialdruck grösser wie der Umgebungsdruck wird gilt folgende lineare Gleichung:

$$p_{T,N_2} = P_{Ti,N_2} + (2,8 - P_{I,O_2}) * K * T \quad (31)$$

p_{T,N_2} = Inertgaspartialdruck im Kompartiment zur Zeit T

P_{Ti,N_2} = initialer Inertgaspartialdruck im Kompartiment

T = Zeit auf aktueller Tiefenstufe

2,8 = Summe aus venösem O_2 (46 mmHg) und CO_2 (53 mmHg) minus arteriellem CO_2 (35 mmHg) = 64 mmHg in FSW

Gleichung (31) wird benutzt, wenn gilt:

$$p_{T,N_2} \geq P_{amb} - 4,3 \quad (32)$$

Wobei die 4,3 = Summe aus venösem O_2 und CO_2 in FSW (=99 mmHg) ist.

Die Kriterien für einen "sicheren Aufstieg" (safe ascend) werden nun statt M-Werten:

MPTT = Maximum Permissible Tissue Tensions genannt. Die Werte hierfür findet ihr hier im Koeffiziententeil der Formelsammlung.

Die Kalibrierung für Mischgase sowie die Anpassungen über das NMRI Model werden mittels den

weiteren Blutgas-Parametern bewerkstelligt.

© **albi (at, bei:) divetable (dot, Punkt:) de**
Stand: 02 / 2010

Tabellen mit den Koeffizienten der verschiedenen Perfusionsmodelle

M-Werte USN / Workman (1965) für N₂

Halbwertszeit [min]	M ₀ - Wert [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

M-Werte USN / Workman (1965) für He

Halbwertszeit [min]	M ₀ - Wert [fsw = feet of sea water]	Delta M Δ M [fsw/ft]
5	86	1,5
10	74	1,4
20	66	1,3
40	60	1,2
80	56	1,2
120	54	1,2
160	54	1,1
200	53	1,0
240	53	1,0

MPTT-Werte USN VVAL18 / Ed Thalmann (2008) für N₂

Halbwertszeit [min]	MPTT - Wert [fsw = feet of sea water] für Tiefe = 10 feet	Delta M Δ M, [fsw/ft]
5	120	1,0
10	98	1,0
20	78	1,0
40	56	1,0
80	48,5	1,0
120	45,5	1,0
160	44,5	1,0
200	44	1,0
240	43,5	1,0

MPTT-Werte USN VVAL76 - 1 / Ed Thalmann für N₂

Halbwertszeit [min]	MPTT - Wert [fsw = feet of sea water] für Tiefe = 10 feet	Delta M Δ M, [fsw/ft]
5	106,7	1,0

10	86,7	1,0
20	70,3	1,0
40	56	1,0
80	48,5	1,0
120	45,5	1,0
160	44,5	1,0
200	44	1,0
240	43,5	1,0
255	40,4	1,0

Decompression Computation and Analysis Program, Dave Kenyon / R. W. Hamilton

DCAP MF11F6 M-Werte für N₂ (1975)

Kompartiment #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
HWZ [min]	5	10	25	55	95	145	200	285	385	520	670
M ₀ [fsw]	104,0	80,5	62,3	48,6	45,4	44,7	44,1	44,0	44,0	44,0	43,5
Δ M	1,30	1,05	1,08	1,06	1,06	1,02	1,01	1,0	1,0	1,0	1,0

ORCA EDGE M₀ (1981)

Kompartiment #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
HWZ [min]	5	11	17	24	37	61	87	125	197	271	392	480
M ₀ [fsw]	100,0	81,8	71,5	63,7	55,9	50,7	46,8	43,0	39,1	36,5	33,9	33,0

PADUA (Pennsylvania Analysis of Decompression for Undersea and Aerospace) (1976)

Kompartiment #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HWZ [min]	5	10	20	40	80	120	160	240	320	480
M ₀ [fsw]	100,00	84,00	68,00	53,00	52,00	51,00	50,00	49,00	49,00	48,00
Δ M	1,60	1,50	1,40	1,30	1,20	1,10	1,10	1,0	1,0	1,0

Hans Hass Deco-Brain II (Version P2-2, 1985)

Kompartiment #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
HWZ [min]	4	7,94	12,2	18,5	26,5	37	53	79	114	146	185	238	304	397	503	635
a [Bar]	1,8917	1,4699	1,0575	0,87828	0,69207	0,53783	0,43429	0,40135	0,41385	0,43085	0,43170	0,37321	0,25083	0,25086	0,25087	0,25088
b [-]	0,82593	0,82604	0,83132	0,84232	0,85687	0,88250	0,89375	0,91737	0,90848	0,94176	0,94122	0,94896	0,96671	0,96668	0,96666	0,96666

M₀-Werte RDP (für N₂, 1987)

Komp. #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
HWZ [min.]	5	10	20	30	40	60	80	100	120	160	200	240	360	480
M ₀ [fswa]	99,08	82,63	66,89	59,74	55,73	51,44	49,21	47,85	46,93	45,78	45,07	44,60	43,81	43,40

ZH-L Werte

Stickstoff (N₂) HWZ, a- & b Koeffizienten (1983)

Kompartiment #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
HWZ [min]	2,65	7,94	12,2	18,5	26,5	37	53	79	114	146	185	238	304	397	503	635
a	2,2	1,5	1,05	0,9	0,75	0,60	0,45	0,43	0,43	0,43	0,43	0,35	0,23	0,23	0,23	0,23
b	0,820	0,820	0,825	0,835	0,845	0,860	0,870	0,890	0,890	0,931	0,931	0,943	0,962	0,962	0,962	0,962

(aus [4], S. 27)

Helium (He) HWZ, a- & b Koeffizienten (1983)

Kompartiment #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
HWZ [min]	1	3	4,6	7	10	14	20	30	43	55	70	90	115	150	190	240
a	2,2	1,5	1,05	0,9	0,75	0,60	0,45	0,43	0,43	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
b	0,82	0,82	0,825	0,835	0,845	0,860	0,870	0,890	0,890	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925

(aus [4], S. 27, resp. [65], S. 158)

Helium (He) HWZ, a- & b Koeffizienten (1993)

Kompartiment #	1	1b	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
HWZ [min]	1,51	1,88	3,02	4,72	6,99	10,21	14,48	20,53	29,11	41,20	55,19	70,69	90,34	115,29	147,42	188,24	240,03
a	1,7424	1,6189	1,3830	1,1919	1,0458	0,9220	0,8205	0,7305	0,6502	0,5950	0,5545	0,5333	0,5189	0,5181	0,5176	0,5172	0,5119
b	0,4254	0,4770	0,5747	0,6527	0,7223	0,7582	0,7957	0,8279	0,8553	0,8757	0,8903	0,8997	0,9073	0,9122	0,9171	0,9217	0,9267

(aus [5], S. 109, resp. [65], S. 158)

Stickstoff (N₂) HWZ, a- & b Koeffizienten (1993)

Kompart. #	HWZ	ZHL-16 A	ZHL-16 A	ZHL-16 B	ZHL-16 C
Nr.	[min.]	b theoretisch	a theoretisch	a	a
1	4,0	0,5050	1,2599	1,2599	1,2599
1b	5,0	0,5578	1,1696	1,1696	1,1696
2	8,0	0,6514	1,0000	1,0000	1,0000
3	12,5	0,7222	0,8618	0,8618	0,8618
4	18,5	0,7825	0,7562	0,7562	0,7562
5	27,0	0,8126	0,6667	0,6667	0,6667
6	38,3	0,8434	0,5933	0,5600	0,5403
7	54,3	0,8693	0,5282	0,4947	0,4410
8	77,0	0,8910	0,4701	0,4500	0,4000
9	109,0	0,9092	0,4187	0,4187	0,3750
10	146,0	0,9222	0,3798	0,3798	0,3500
11	187,0	0,9319	0,3497	0,3497	0,3295
12	239,0	0,9403	0,3223	0,3223	0,3065
13	305,0	0,9477	0,2971	0,2850	0,2835
14	390,0	0,9544	0,2737	0,2737	0,2610
15	498,0	0,9602	0,2523	0,2523	0,2480
16	635,0	0,9653	0,2327	0,2327	0,2327

(aus [5], S. 108, resp. [65], S. 158)

ZH-L Parameter / Wienke (2003) für N₂

Halbwertszeit [min]	a [Bar]	b
5,0	1,198	0,542

10,0	0,939	0,687
20,0	0,731	0,793
40,0	0,496	0,868
65,0	0,425	0,882
90,0	0,395	0,900
120,0	0,372	0,912
150,0	0,350	0,922
180,0	0,334	0,929
220,0	0,318	0,939
280,0	0,295	0,944
350,0	0,272	0,953
450,0	0,255	0,958
635,0	0,236	0,966

ZH-L Parameter / Wienke (2003) für He

Halbwertszeit [min]	a [Bar]	b
1,8	1,653	0,461
3,8	1,295	0,604
7,6	1,008	0,729
15,0	0,759	0,816
24,5	0,672	0,837
33,9	0,636	0,864
45,2	0,598	0,876
56,6	0,562	0,885
67,8	0,541	0,892
83,0	0,526	0,901
105,5	0,519	0,906
132,0	0,516	0,914
169,7	0,510	0,919
239,6	0,495	0,927

Mischgas Theorie

Wird mehr als nur ein Inertgas (Stickstoff N_2 bei Luft/Nitrox) geatmet, also z.B. zwei im Falle von Trimix / Heliox (Stickstoff N_2 und Helium He) müssen die entsprechenden Ansätze (siehe Haldane-Gleichung, (6a)) erweitert werden.

Prinzipiell wird das Gesetz von Henry für jedes Inertgas_i separat gelten:

$$q_i = l_i * p_i * V_k \quad (50)$$

$$Q = \sum q_i$$

Summiert wird hierbei über alle Inertgase_i als auch über alle Kompartimente_k

Variable	Definition
q_i	Menge des gelösten Inertgases i in einem Kompartiment mit Volumen V_k
l_i	Löslichkeitskoeffizient des Inertgases _i bezüglich des Volumens V_k
p_i	Partialdruck des Inertgases _i
V_k	Volumen einer Kompartimentes k

Für die Summe aller Partialdrücke wird das Gesetz von Dalton gelten:

$$P = \sum p_i = p_1 + p_2 + p_3 + \dots \quad (51)$$

Demgemäß wird für stationäre Zustände in den Kompartimenten folgendes gelten:

$$P_t(0) = \sum p_{t,i}(0) = p_{t,N_2}(0) + p_{t,He}(0) \quad (52a)$$

sowie für die Alveolen:

$$P_{alv}(0) = \sum p_{alv,i}(0) = p_{alv,N_2}(0) + p_{alv,He}(0) \quad (52b)$$

sowie für alle Zeiten t:

$$P_{tiss}(t) = P_t(t) = \sum p_{tiss,i}(t) = p_{tiss,N_2}(t) + p_{tiss,He}(t) \quad (52c)$$

Deshalb erweitern wir die Haldane-Gleichung (6a):

$$P_t(t) = P_{alv0,N_2} + [P_{t0,N_2} - P_{alv0,N_2}] e^{-k_{N_2}t} + P_{alv0,He} + [P_{t0,He} - P_{alv0,He}] e^{-k_{He}t} \quad (53)$$

Wir prüfen nun, ob auch diese Erweiterung die grundlegende Differentialgleichung (1a) erfüllt. Die DGL (1a) wird um den Zusatzterm für ein zweites Inertgas erweitert:

$$dP_t(t)/dt = k_1 * [P_{alv,N_2}(t) - P_{t,N_2}(t)] + k_2 * [P_{alv,He}(t) - P_{t,He}(t)] \quad (54)$$

Wir bestimmen die Proportionalitätsfaktoren k_1 und k_2 , indem wir aus (53) $dP_t(t) / dt$ berechnen:

$$dP_t(t)/dt = -k_{N_2} * [P_{t0,N_2} - P_{alv0,N_2}] e^{-k_{N_2}t} - k_{He} * [P_{t0,He} - P_{alv0,He}] e^{-k_{He}t} \quad (53a)$$

... und jetzt damit die linke Seite von (54) ersetzen:

$$\begin{aligned} & -k_{N_2} * [P_{t0,N_2} - P_{alv0,N_2}] e^{-k_{N_2}t} - k_{He} * [P_{t0,He} - P_{alv0,He}] e^{-k_{He}t} = \\ & k_1 * [P_{alv,N_2}(t) - P_{t,N_2}(t)] + k_2 * [P_{alv,He}(t) - P_{t,He}(t)] = \\ & k_1 * P_{alv,N_2}(t) - k_1 * P_{t,N_2}(t) + k_2 * P_{alv,He}(t) - k_2 * P_{t,He}(t) \end{aligned} \quad (55)$$

Für die $p_{t,i}(t)$ bemühen wir nochmals den Ansatz (52c) bzw. (53), setzen diesen in (55), rechte Seite, ordnen um und erhalten:

$$\begin{aligned} & -k_{N_2} * [P_{t0,N_2} - P_{alv0,N_2}] e^{-k_{N_2}t} - k_{He} * [P_{t0,He} - P_{alv0,He}] e^{-k_{He}t} = \\ & k_1 * P_{alv,N_2}(t) + k_2 * P_{alv,He}(t) - k_1 * [P_{alv0,N_2} + [P_{t0,N_2} - P_{alv0,N_2}] e^{-k_{N_2}t} - k_2 * \\ & [P_{alv0,He} + [P_{t0,He} - P_{alv0,He}] e^{-k_{He}t}] \end{aligned} \quad (55a)$$

Ausmultiplizieren der eckigen Klammern [...] der rechten Seite und Umordnung nach konstanten bzw. zeitabhängigen Termen ergibt:

$$\begin{aligned} & -k_{N_2} * [P_{t0,N_2} - P_{alv0,N_2}] e^{-k_{N_2}t} - k_{He} * [P_{t0,He} - P_{alv0,He}] e^{-k_{He}t} = \\ & k_1 * P_{alv,N_2}(t) + k_2 * P_{alv,He}(t) - k_1 * P_{alv0,N_2} - k_1 * (P_{t0,N_2} - P_{alv0,N_2})e^{-k_{N_2}t} - k_2 * \\ & P_{alv0,He} - k_2 * (P_{t0,He} - P_{alv0,He})e^{-k_{He}t} = \\ & k_1 * [P_{alv,N_2}(t) - P_{alv0,N_2}] + k_2 * [P_{alv,He}(t) - P_{alv0,He}] - k_1 * (P_{t0,N_2} - P_{alv0,N_2})e^{-k_{N_2}t} - \\ & k_2 * (P_{t0,He} - P_{alv0,He})e^{-k_{He}t} \end{aligned} \quad (55b)$$

Bemühen wir nun die identischen Randbedingungen für beide Inertgase die zur Lösung (6a) geführt haben:

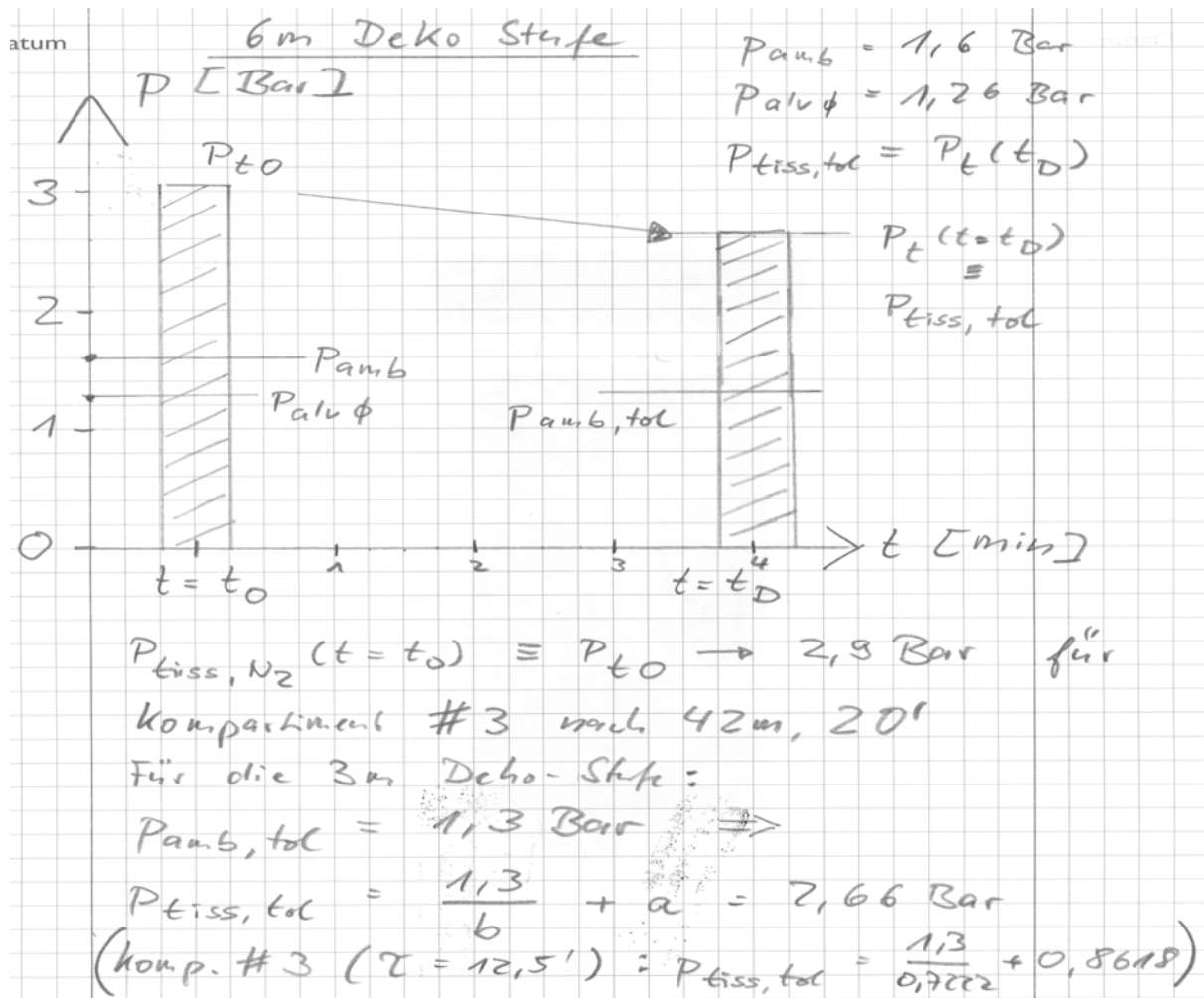
$$\begin{aligned} & P_{alv,N_2}(t) = P_{alv0,N_2} \text{ für alle Zeiten } t \text{ und analog} \\ & P_{alv,He}(t) = P_{alv0,He} \\ & \text{wird die Gleichung (55a) identisch erfüllt für:} \\ & k_1 = k_{N_2} \text{ sowie: } k_2 = k_{He} \end{aligned} \quad (55c)$$

Der Ansatz (53) erfüllt also die zentrale DGL (1a), wenn das zweite Inertgas als additiver Zusatz berechnet wird: sowohl für den stationären Teil, also den zeitlich konstanten Anteil am alveolären Gas (52b) als auch

den zeitabhängigen (52c).

Berechnung von Dekompressionszeiten mit Mischgasen

Schauen wir zunächst die einfachen Verhältnisse bei nur einem Inertgas (Luft/Nitrox) auf einer konkreten Deko-Stufe (6m) an, bevor auf die nächsthöhere Dekostufe (3m) aufgetaucht werden kann:



NB: die Zahlen sind nur eine grobe Näherung: die Identifikation der Variablen dient zur Übersicht über die Gleichung (21):

$$t = -\tau / \ln 2 * \ln [(P_t(t) - P_{alv0}) / (P_{t_0} - P_{alv0})]$$

Die wirkliche Deko-Zeit t_d ist dabei der Maximalwert aus allen berechneten Deko-Zeiten die über die komplette Schar aller Kompartimente ermittelt wird.

Für die Terme im Einzelnen gilt:

- $P_t(t)$: Gewebsdruck am Ende zur Deko-Zeit t_d , dieser wird ermittelt über den

- $P_{\text{ambient, tolerated}}$ der Ziel-Dekostufe.
- Mit $p_{\text{amb, tol}}$ wird der tolerierte Gewebsdruck $p_{\text{tissue, tolerated}}$ berechnet über die Formel (17):

$$P_{\text{t, tol. ig}} = P_{\text{amb}} / b + a$$

Die a- & b-Werte sind aus der Tabelle bekannt und somit kann für jedes Kompartiment der jeweilige $P_t(t)$ bestimmt werden.

- P_{alv0} : ist der alveolare Druck des jeweiligen Inertgases, bei Beginn der Deko, im Wesentlichen aus dem aktuellen Umgebungsdruck bestimmt, der mit dem Anteil f des Inertgases_i verziert wird (R_q etc. vergessen wir im Moment ...):
- $P_{\text{alv0}} = P_{\text{alv0}}(t_0) = P_{\text{ambient}} * f_i$
- P_{t0} : der Gewebsdruck bei Beginn der Deko, bei $t = t_0$
also die Summation über das komplette Tauchprofil bis einschliesslich t_0 .

Die Erweiterungen für Mischgase mit (22) umfassen neben den a- und b-Koeffizienten auch die τ resp. λ Werte (Gleichungssatz 56)!

$$\begin{aligned} a^* &= a(\text{He} + \text{N}_2) = [(P_{t, \text{He}} * a_{\text{He}}) + (P_{t, \text{N}_2} * a_{\text{N}_2})] / (P_{t, \text{He}} + P_{t, \text{N}_2}) \\ b^* &= b(\text{He} + \text{N}_2) = [(P_{t, \text{He}} * b_{\text{He}}) + (P_{t, \text{N}_2} * b_{\text{N}_2})] / (P_{t, \text{He}} + P_{t, \text{N}_2}) \\ \lambda^* &= \lambda(\text{He} + \text{N}_2) = [(P_{t, \text{He}} * \lambda_{\text{He}}) + (P_{t, \text{N}_2} * \lambda_{\text{N}_2})] / (P_{t, \text{He}} + P_{t, \text{N}_2}) \end{aligned} \quad (56)$$

Und zwar jeweils für alle k Kompartimente, z.B.: $k = 1 - 16$!

Weiterhin gelten für unsere zwei Inertgase He und N_2 (52a, 52b, 52c) und somit:

- $P_{\text{alv0}} = p_{\text{alv0, N}_2}(t_0) + p_{\text{alv0, He}}(t_0)$
- $P_{t0} = p_{\text{N}_2, t0} + p_{\text{He, t0}}$
- Für den tolerierten Gewebsdruck $p_{\text{tissue, tolerated}}$ gilt nun analog:

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

Wird nun zur Berechnung der Dekozeiten t_d die Formel (21) mit allen obengenannten Erweiterungen für Mischgase benutzt, entsteht damit eine Gleichung mit zwei weiteren Unbekannten,

nämlich $p_{\text{tiss, N}_2}(t)$ und $p_{\text{tiss, He}}(t)$ zum Zeitpunkt $t = t_d$

da ja: $P_t(t) = p_{\text{tiss, N}_2}(t) + p_{\text{tiss, He}}(t)$, und dies jeweils für alle Kompartimente_k!

a^* , b^* sowie λ^* werden ja zum Zeitpunkt $t = t_0$ ermittelt, gelten also nur für den Startzeitpunkt der Deko!

Da ja t_d noch unbekannt ist, sind es auch die jeweiligen Kompartimentssättigungen $p_{\text{tiss}}(t_d)$ und somit auch a^* , b^* , λ^* zum Zeitpunkt $t = t_d$.

- 1) die numerische Methode:
Somit muss (21) ab 2 Inertgasen entweder approximativ gelöst werden, indem für kleine

Zeitschritte Δt , z.B. $\Delta t = 1$ Sek, jeweils der neue

$P_t(t + \Delta t) = p_{\text{tiss}, N_2}(t + \Delta t) + p_{\text{tiss}, He}(t + \Delta t)$ aus dem vorigen $P_t(t)$ berechnet wird und mit dem

tolerierten Umgebungsdruck $P_{\text{ambient, tolerated}}$ der Ziel-Tiefe / Zieldeko-Stufe der gesuchte $P_{\text{tissue, tolerated}}$ berechnet und verglichen wird: ist nach n Zeitschritten

$P_t(t = t_d) = P_t(t_0 + n * \Delta t) \leq P_{\text{tiss, tol}}$, dann haben wir mit $t = t_d$ die benötigte Deko-Zeit gefunden.

Weitere Möglichkeiten:

- 2) die "quasi"-analytische Methode:

es wird ein **Fehler** in Kauf genommen, indem einfach mit dem beim Start der Deko-Phase zur Zeit t_0 bekannten

$$P_t(t_0) = p_{\text{tiss}, N_2}(t_0) + p_{\text{tiss}, He}(t_0)$$

die entsprechenden Gewichtungen der a-, b-Koeffizienten und λ (Gleichungen 56) vorgenommen wird und diese auch bei der Berechnung von $P_t(t)$ einfach mitbenutzt werden.

Dieser Fehler führt i.d.R. zunächst zu einer Überschätzung der Deko-Zeiten! (in Abhängigkeit von Tiefe, Zeit und He-Anteil)

(Wird aber anscheinend gerne in Desktop Deco-Softwares bzw. Mischgas-Computern so gemacht: die numerische Berechnung nach Methode 1 erfordert Aufwand bei Programmierung und ebenso bei der Anzahl der zusätzlich erforderlichen Variablen (Speicherplatz). Weiterhin kostet es Rechenzeit: jedes Kompartiment muss für jede Deko-Stufe u.U. mehrere längere Schleifen durchlaufen, je nachdem, wie eng bzw. präzise das Zeitintervall gewählt wird.)

- 3)

Lösung der erweiterten Gleichung (21) über eine Taylor-Entwicklung:

wir nehmen die Gleichung (53) und formen diese analog dem Vorgehen bei (21) um:

$$P_t(t) = P_{\text{alv}0, N_2} + P_{\text{alv}0, He} + [P_{t0, N_2} - P_{\text{alv}0, N_2}] e^{-k_{N_2} t} + [P_{t0, He} - P_{\text{alv}0, He}] e^{-k_{He} t}$$

$$= P_{\text{amb}} / b^* + a^*$$

Wir benutzen die Taylor-Entwicklung für den Exponentialterm in den $P_t(t)$

mit $x = -k_i * t$, und für e^x :

$$e^x \cong 1 + x + (x^2 / 2) + (x^3 / 6) + \dots + \dots$$

Die Taylor-Entwicklung wird nach dem 3. oder auch schon nach dem 2. Term abgebrochen: dies ist genügend genau für kleine x , d.h. kurze Deko-Stops!

Da die $P_t(t)$ über die b^* und a^* und somit auch $t(t)$ nun sowohl im Zähler als auch im Nenner auftauchen, erhalten wir ein kubisches oder ein bi-quadratisches Polynom für t in voller

Schönheit: auch dieses könnten wir nun numerisch lösen. Doch damit hätten wir gegenüber der Methode 1 nichts gewonnen!

- 4)

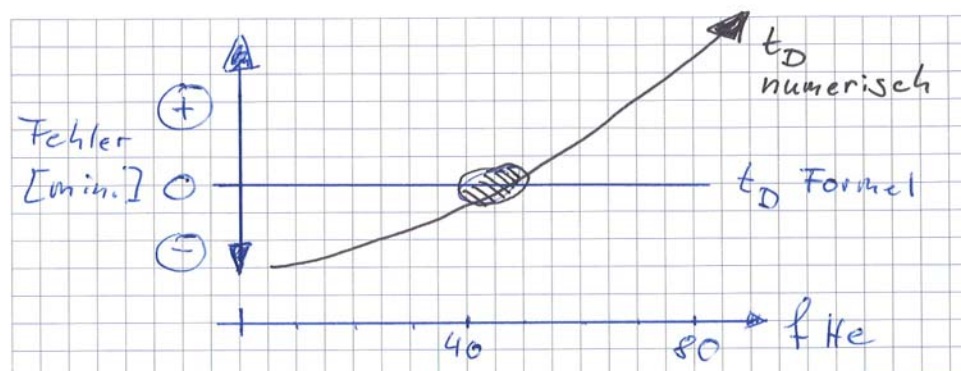
Wir wollen nun anhand von einigen (*) Beispielen den Fehler der bei der üblichen Methode Numero 2 entsteht, berechnen, in dem wir die Differenzen zu den "echten" Dekozeiten auf jeder Stufe der Methode 1 bilden; dies machen wir für verschiedene Tauchprofile und verschiedene Gemische: zur Kontrolle dienen hierbei:

zwei (2) verschiedene kommerziell erwerbbar Desktop-Deco Softwares und als Vergleichsbasis **DIVE V3 mit Methode 1 und Methode 2.**

(*) einige bedeutet in diesem Zusammenhang ca. 1.900 Tauchprofile aus dem TEC-recreational Bereich.

Um es genau zu sagen: 6 Tiefenprofile von 30 - 80 m, 5 Grundzeiten von 20 - 60 min., und Helium- Anteile von 5 - 80 % (16 Gemische), alles in allem 480 Profile, und das Ganze dann 4 mal ...

Der Fehler nimmt mit der Dekompressionsverpflichtung zu, also mit Tiefe und Zeit und verhält sich in Abhängigkeit des Helium-Anteiles in etwa (rein qualitativ) so:



Wir sehen die Deko-Zeiten t_D in Abhängigkeit des Helium-Anteils f_{He} :

die Abweichungen sind die Differenzen Formel (17) (= Methode 2) aus dem Mittelwert aus allen 3 Softwares gegenüber der numerischen Berechnung (Methode 1).

D.h. wie oben angedeutet, werden die Deko-Zeiten zunächst überschätzt, im Bereich der bei TEC-REC üblichen Trimixe, speziell so um die 35 - 45 % verschwindet dieser Fehler, um bei steigendem Helium-Anteil dann wieder schnell und kräftig zuzunehmen.

© albi (at, bei:) divetable (dot, Punkt:) de

Stand: 02 / 2010