

Abschätzungen von Tauchgangsdaten

17th September 2002

Der Text versucht mit minimalem theoretischen Aufwand, einfachste Prozeduren der Abschätzung von Tauchgangsdaten vorzuführen. Auf den ersten Seiten wird die Benutzung der Pressluft-Dekompressionstabellen beschrieben; auf den restlichen Seiten werden die Tauchgangsdaten abgeschätzt. Wegen ihrer einfacheren Handhabbarkeit verwendet der Text fast ausschließlich Werte physikalischer Größen in SI-Einheiten.

Von 1988 bis 1994, wurde dieser Text zusammengestellt von Haiko Schmarsow, unterstützt von DLRG-Tauchwart Andreas Menger. Für die Anregungen bedankt sich der Autor besonders bei Stefan Keim, Markus Krist and Oliver Bindi; sowie bei Herrn Sachs von der *Hessischen Ausführungsbehörde für Unfallversicherung*. Überarbeitet, Juni/Juli 2002.

Adresse: H.Schmarsow, Birkenweg 6, D-65623 Hahnstätten, Deutschland

Internet-Präsenz: <http://www.schmarsow.de>

E-mail: haiko@schmarsow.de

Das Copyright liegt bei Haiko Schmarsow. Alle Rechte vorbehalten. In Verbindung mit jeglicher kommerziellen Aktivität, darf diese Publikation, oder Teile davon, weder reproduziert, in einer Datenverarbeitungsanlage gespeichert, oder transferiert werden; in gleich welcher Form, elektronisch, mechanisch, durch Photokopieren, Aufnahme oder sonstwie, ohne eine schriftliche Erlaubnis des Rechteinhabers vorweisen zu können. Dies und das folgende gelten auch für die Ausgabe von 1994.

Das Benutzen von allgemeinen Begriffen, registrierten Namen, Handelsnamen, Marken, etc., in dieser Publikation, auch wenn die vorgenannten Begriffe nicht als solche identifiziert worden sind, bedeutet nicht dass diese Begriffe nicht durch Gesetze, Verordnungen oder Richtlinien geschützt wären und deswegen zur freien Benutzung zur Verfügung ständen.

Die in dieser Publikation genannten Namen und Angebote, welche Markennamen oder registrierte Markennamen ihrer assoziierten Firmen sind, werden nicht benutzt weil irgendeine spezielle Beziehung zu diesen Firmen bestünde.

Diese Publikation präsentiert sich "wie erhalten" ohne jegliche Garantie oder Zusicherung, explizit oder implizit, mit einschließend, aber nicht begrenzt, auf Verwendbarkeit für bestimmte Zwecke oder Verstoß gegen Rechtsregeln. Der Verleger oder der Halter des Copyrights übernehmen keine Verantwortung für jegliche Fehler oder Auslassungen und sich daraus möglicherweise ergebende Schäden, die sich aus dem Verwenden der in dieser Publikation entnommenen Informationen ergeben.

Geschrieben in Lyx 1.1.6fix2, die Figuren wurden erstellt mit Xfig 3.2, auf einer Linux/KDE Plattform (SuSE 7.2)

Tauchgangs-Profile

Arten von Tauchgängen

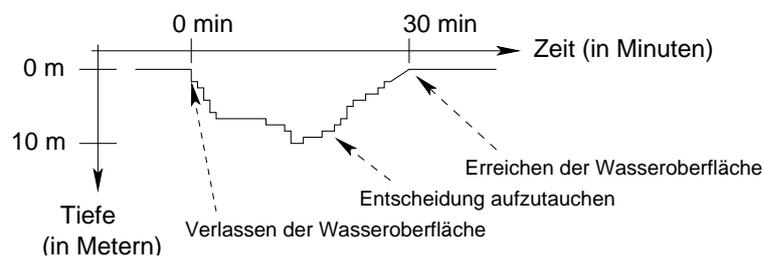
Überblicksweise kann man vier Arten von Tauchgängen unterscheiden: Nullzeittauchgänge, Dekompressionstauchgänge, Wiederholungstauchgänge und Bergseetauchgänge. Manche dieser Typen können sich überschneiden. Für jeden dieser Tauchgangstypen holt man sich passende Informationen aus den Tabellen am Ende dieses Textes.

Tabellenanwendung - Bedeutung

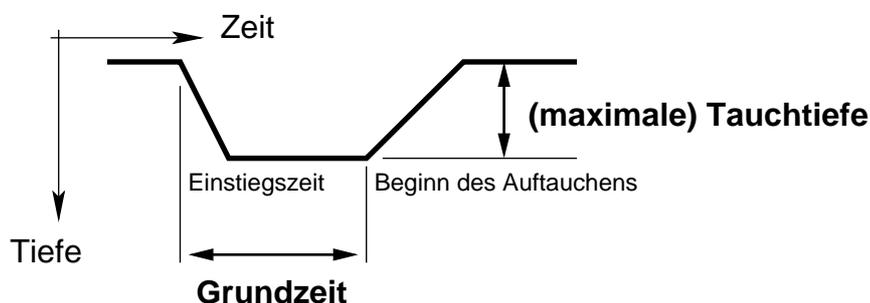
In diesem ersten Abschnitt wird nur die Benutzung der Tabellen erläutert. Man macht sich keine Gedanken über den endlichen Luftvorrat in der Tauchflasche, der die Aufendhaltungsdauer unter Wasser begrenzt. Die folgende Beschreibung nimmt also an, dass die tauchende Person, zum Beispiel über einen Druckluftschlauch, von der Wasseroberfläche her mit Atemluft versorgt wird. Das heißt, der Luftvorrat unter Wasser sei unbegrenzt. Später im Abschnitt über Tauchgangsdatenabschätzungen werden Rechnungen beschrieben und Beispiele gegeben, welche die endliche Atemgasmenge in der Tauchflasche berücksichtigen.

Tauchgangs-Profile und Ihre Charakteristischen Daten

Ein Tauchgang kann durch ein Diagramm dargestellt werden, welches die Tauchtiefe über der Tauchzeit aufträgt:



Diese Diagramme, auch Tauch(gangs)-Profile genannt, werden im Folgenden verkürzt und idealisiert verwendet werden:



Hier ergeben sich als Daten von Wichtigkeit: Die (**größte** beziehungsweise **maximale**) **Tauchtiefe** des Tauchganges — ablesbar am Tiefenmesser. Mit der Taucheruhr ermittelbar ist, die Zeit vom Verlassen der Wasseroberfläche bis zum Beginn des Auftauchens, genannt **Grundzeit**¹. Die Grundzeit ist die Zeit, die man sich unter Wasser befindet, bis man sich entscheidet aufzutauchen.

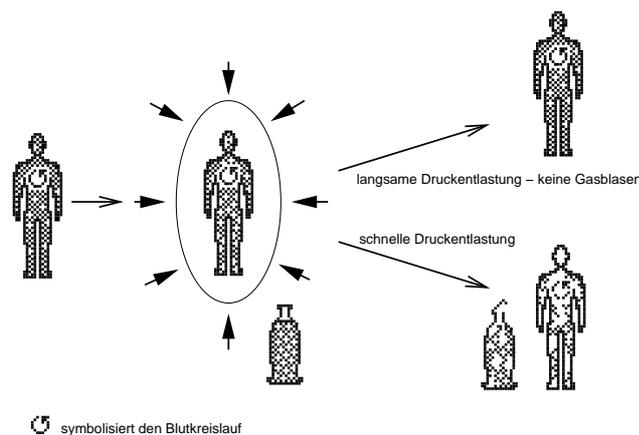
¹Die Nützlichkeit dieses Begriffes wird unter Seite 5 näher erläutert.

Warum sollte man schnelles Auftauchen vermeiden?

Zusätzlich zum Atmosphärendruck lastet auf tauchenden Menschen noch der Druck der über ihnen liegenden Wassersäule. Taucher mit Pressluftgeräten erhalten ihre Atemluft mit Umgebungsdruck.

Dies setzt den folgenden Mechanismus in Gang:

Nach dem Abtauchen wird die Atemluft unter erhöhtem Umgebungsdruck geatmet. Diffundiert durch das alveoläre Lungengewebe, transportiert durch den Blutkreislauf, diffundiert verstärkt Atemluft in das Körpergewebe. Auf dem umgekehrten Weg verlassen die Gasmoleküle normalerweise den Körper. Taucht man zu schnell auf, das heißt, entlastet man sich plötzlich vom erhöhten Umgebungsdruck, so geschieht die Rückdiffusion und der Rücktransport über den Blutkreislauf nicht schnell genug. In den Körperorganen ist die Gaskonzentration dann so groß, dass die Gasmoleküle das Gewebe verlassen, indem sie in den Organen Gasblasen bilden. (Als Standard-Beispiel betrachte eine Cola-Flasche: Öffnet man eine Cola-Flasche so befindet sich, die vorher unter Druck stehende, Flüssigkeit plötzlich in einer Umgebung mit niedrigerem Umgebungsdruck, dem Atmosphärendruck. In der Flüssigkeit war vorher unter hohem Druck so viel Gas gelöst worden, dass nun die überschüssige Gasmenge die Flüssigkeit einfacher durch Blasenbildung verläßt, als durch Diffusion. Der Transport-Effekt des Kreislaufes kann durch Verrühren des Inhaltes der Cola-Flasche idealisiert werden.) Gasblasen in den Organen des menschlichen Körpers können deren Funktion beeinträchtigen oder die Organe sogar schwer schädigen: Symptome und Behandlung einer solchen Gasblasen-Störung findet man in Tauchbüchern unter dem Begriff Dekompressions-Krankheit.



Was ist Diffusion?

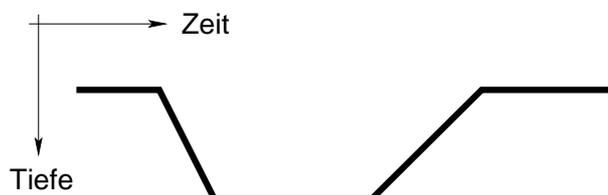
Einzelne Teilchen, (Gas-)moleküle können in Flüssigkeiten (und auch in Feststoffe) eindringen, sich darin bewegen und sie wieder verlassen. Dies geschieht allerdings normalerweise nur in sehr geringen Konzentrationen. Die effektive Fortbewegung von Teilchen in flüssigen oder festen Körpern nennt man Diffusion. Ein Diffusionsprozess kommt im Allgemeinen durch Konzentrationsunterschiede in Gang.

Warum braucht ein Taucher Tauchtabellen?

Die Diffusion und die Konzentrationen von Gasen in den Geweben eines tauchenden Menschen sind stark voneinander abhängig. Aussagekräftiges Datenmaterial darüber wird aus Labormesswerten und mathematischen Modellen und Tauchtests gewonnen. Die Ergebnisse werden dann in Tabellen zusammengefasst.

Nullzeit-Tauchgänge

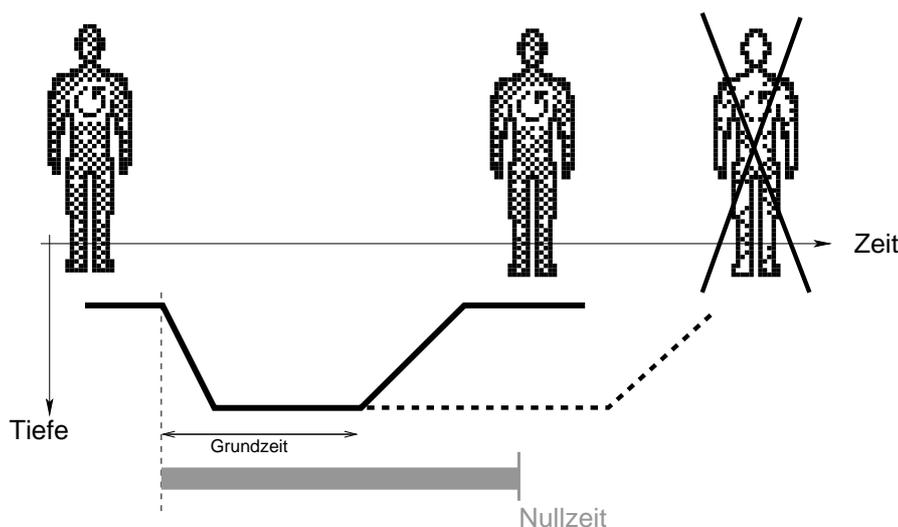
Sport-Taucher führen oft kurze und flache Tauchgänge durch; in diesen Fällen sollte der oben beschriebene Mechanismus der Gasblasen-Produktion im Körper der tauchenden Person nicht gefährlich werden. Die tauchende Person taucht ab, hält sich eine Weile unter Wasser auf, und kehrt zur Oberfläche zurück, wie im folgenden Diagramm angedeutet:



Wie kurz und wie flach darf ein Tauchgang sein, damit beim Auftauchen, im Allgemeinen, keine den Taucher gefährdenden Gasblasen im Körpergewebe entstehen? Für jede einzelne (maximale) Tauchtiefe existiert eine spezielle Grundzeit bis zu der man das obige Tauchgangs-Profil ohne eine nennenswerte Gesundheitsgefährdung tauchen darf:

Diese begrenzende Zeit heißt Nullzeit. Tauchgänge mit einer *Grundzeit* kleiner als die *Nullzeit* heißen **Nullzeit-Tauchgänge**. Für eine vorgegebene (maximale) Tauchtiefe kann man die jeweilige Nullzeit aus Tabellen ablesen, insbesondere aus der Tabelle am Ende dieses Textes.

Für eine vorgegebene (maximale) Tauchtiefe sagt also die **Nullzeit** — ein Zeitintervall — wie lange man vom Verlassen der Wasseroberfläche an Zeit hat, sich zu entscheiden direkt zur Wasseroberfläche aufzutauchen.



Beispiel:

Tauchgang mit größter Tauchtiefe 25m. Bis zu Beginn des Auftauchens sind 15min vergangen. Betrachte die Tabelle am Ende des Textes.

Darin finde die Spalte 1, Größte Tauchtiefe (Meter) 27m (Da die Tabelle nur wenige Werte für größte Tauchtiefen enthält, wird die vorgegebene maximale Tauchtiefe von 25m verwendet, um Daten von dem nächsttieferen Wert (27m) in der Tabelle zu beziehen; dadurch überschätzt man die Gefährdung und schafft sich einen Sicherheitsspielraum.)

In dem Teil der Tabelle für den Tauchtiefen-Wert 27m betrachte nun die Zeile ohne Eintragungen in der Spalte 3.

In dieser Zeile liefert die Spalte 2 den Wert der Nullzeit: 25min.

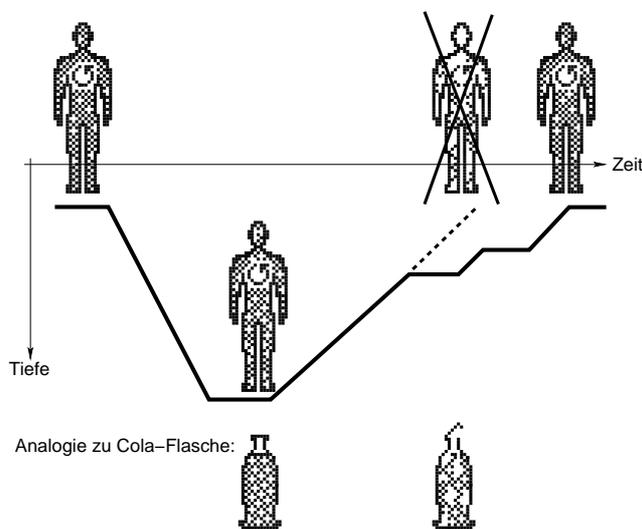
Weil die Zeit, vom Verlassen der Wasseroberfläche bis zur Entscheidung aufzutauchen, vorgegebenerweise 15min beträgt, ist dieser Wert kleiner als die aus der Tabelle ermittelte Nullzeit (25min) für diese Tauchtiefe, damit wird dieser Tauchgang zum Nullzeit-Tauchgang.

Dekompressions-Tauchgänge

Beim Auftauchen nach langen und/oder tiefen Tauchgängen sollte die Produktion von gefährlichen Gasblasen im Gewebe der tauchenden Person vermieden werden.

Wie? Durch entsprechend langsames Auftauchen kann der gelöste Gas-Überschuss über Diffusion und den Blutkreislauf den Körper des Tauchers durch die Lunge verlassen. Sehr langsam aufzutauchen ist im Allgemeinen sehr schwer. Stattdessen legt man Pausen beim Auftauchen ein. Je nach Tauchtiefe und Tauchdauer, verweilt man in einer bestimmten Tiefe eine bestimmte Zeit und setzt danach das Auftauchen fort.

Diese Auftauch-Pausen heißen **Dekompressions-Pausen**. Die Tauchgänge, welche ein so unterbrochenes Auftauchen verlangen, um das Entstehen gesundheitsgefährdender Gasblasen im Körper des Tauchers zu vermeiden, heißen **Dekompressions-Tauchgänge**. Das folgende Diagramm chematisiert einen Dekompressions-Tauchgang:



Für gegebene Grundzeit und Tauchtiefe, kann man aus Tabellen die Zahl der Austauschpausen, ihre jeweilige Tiefe und Dauer ablesen:

Beispiel:

Tauchgang mit größter Tauchtiefe von 25m. Bis zum Beginn des Auftauchens sind 33min vergangen.

Betrachte die Tabelle am Ende des Texts.

Folge der Spalte 1, Größte Tauchtiefe (Meter) zu dem Teil der Tabelle der durch den Wert 27m markiert ist.

In diesem Teil der Tabelle betrachte die Spalte 2 (Grundzeit) und fixiere die Zeile gegeben durch den Wert 40min.

Diese Zeile zeigt das Dekompressions-Profil: Während des Aufstiegs stoppe für fünf Minuten in sechs Metern (5min in 6m) und danach lege einen zweiten Stop für fünf Minuten in drei Metern Tiefe ein (5min in 3m).

(Frage: Wo etwa liegt im oberen Diagramm die Nullzeit? Antwort: Zeitlich VOR dem Beginn des Auftauchens!) Eine andere Frage: Wieso wurde der Begriff der Grundzeit in der Weise eingeführt wie es auf Seite 2 geschah? Für die tauchende Person markiert die Grundzeit das Ende der nutzbaren Zeit eines Tauchganges. Die Aufstiegszeit mit den Dekompressions-Pausen wird für eine vorgegebene Grundzeit aus der Tabelle ablesbar. Würde, die einen Tauchgang charakterisierende, Zeit durch das Zeitintervall vom Verlassen der Wasseroberfläche bis zum

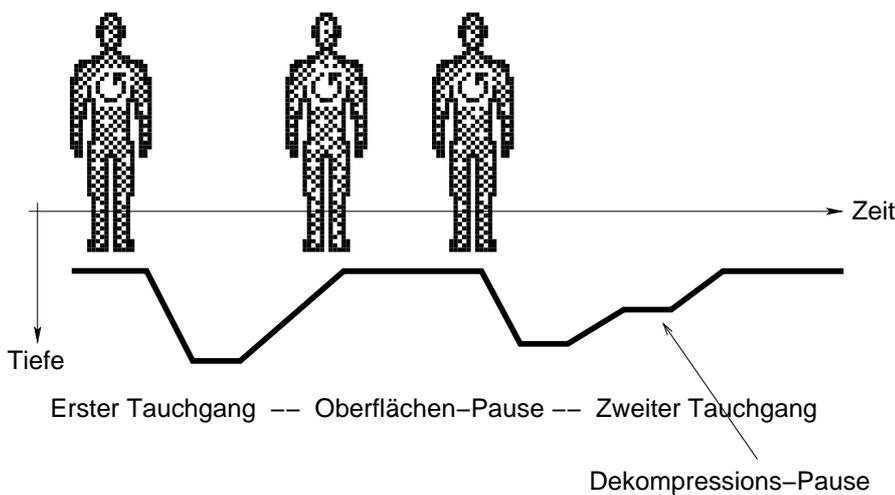
Wiedererreichen der Wasseroberfläche gegeben werden, so würden in dieser Zeit die voneinander abhängige Grundzeit und eventuelle Dekompressionszeiten enthalten sein.

Wiederholungs-Tauchgänge

Eine geöffnete Cola-Flasche hat meist noch nach Stunden einen leicht prickelnden Geschmack. — Stunden nach einem Tauchgang hat die Person noch einen Überschuss an gelösten Gasteilchen im Körpergewebe; bei einem nochmaligen Tauchgang hat man diesen, an der Wasseroberfläche sich kontinuierlich verringernden, Rest-Überschuss zu berücksichtigen.

Ein Tauchgang, bei dessen Durchführung man diesen Rest-Überschuss von Gasteilchen in dem Körper des Tauchers berücksichtigt, solch ein Tauchgang wird **Wiederholungs-Tauchgang** genannt.

Das Diagramm unten charakterisiert solch einen Wiederholungs-Tauchgang:



Beachte die unterschiedlichen Teilchen-Konzentrationen wie sie in den Figuren der oberen Graphik dargestellt worden sind. Vergleiche die zwei Teilchen-Konzentrationen vor dem Abtauchen: Beim zweiten Abtauchen kann man den Rest-Überschuss der Teilchen sehen, der noch vom ersten Tauchgang stammt.

Verschiedene Typen von Tabellen quantifizieren die Effekte, die durch wiederholtes unter Druck setzen des menschlichen Körpers zu erwarten sind. Hier wird lediglich eine einfache Regel gegeben:

Regel für Wiederholungs-Tauchgänge Jeder Tauchgang innerhalb der letzten ZWÖLF (12) vergangenen Stunden macht den folgenden Tauchgang zum Wiederholungs-Tauchgang.

Addiere die Grundzeiten, die Grundzeit des geplanten Tauchganges miteinbezogen. Verwende die tiefste Tauchtiefe von allen Tauchgängen innerhalb dieser Zeit, inklusive des geplanten Wiederholungstauchgangs.

Für den Wiederholungs-Tauchgang entnehme die Tauchgangsdaten der Tabelle für einen Tauchgang mit der Summe der Grundzeiten und der maximalen Tauchtiefe dieses und der vorangegangenen Tauchgänge.

Für viele Fälle könnte sich diese Regel als zu konservativ erweisen, in diesen Fällen greife man auf die spezialisierten Wiederholungs-Tauchtabellen zurück.

Beispiel:

Erster Tauchgang: (Benutzt das Profil des Nullzeit-Tauchganges.)

Tauchgang mit größter Tauchtiefe $25m$. Bis zu Beginn des Auftauchens sind $15min$ vergangen. Betrachte die Tabelle am Ende des Texts.

Darin finde die Spalte 1, Größte Tauchtiefe (Meter) $27m$.

In dem Teil der Tabelle für den Tauchtiefen-Wert $27m$ betrachte nun die Zeile ohne Eintragungen in der Spalte 3.

In dieser Zeile liefert die Spalte 2 den Wert der Nullzeit: $25min$.

Weil die Zeit, vom Verlassen der Wasseroberfläche bis zur Entscheidung aufzutauchen, vorgegebenerweise $15min$ beträgt, ist dieser Wert kleiner als die aus der Tabelle ermittelte Nullzeit ($25min$) für diese Tauchtiefe, damit wird dieser Tauchgang zum Nullzeit-Tauchgang.

Eine Oberflächen-Pause von sechs Stunden ($6h$) macht den nächsten Tauchgang zum Wiederholungs-Tauchgang.

Zweiter Tauchgang:

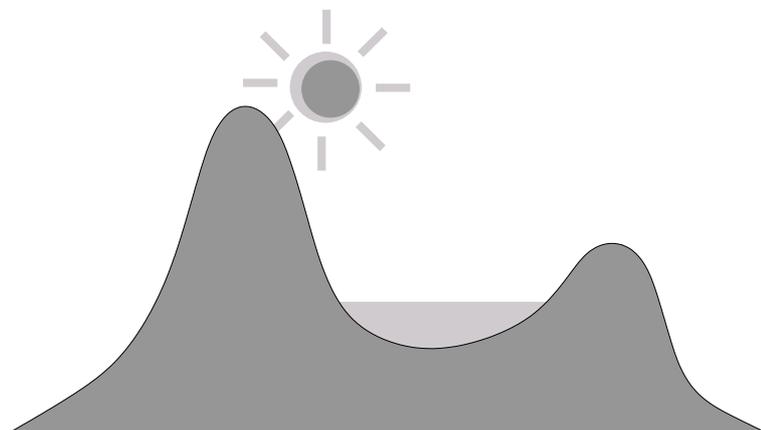
Tauchgang mit größter Tauchtiefe $25m$. Bis zu Beginn des Auftauchens sind $15min$ vergangen. (Dies ist das gleiche Profil wie es sechs Stunden zuvor getaucht wurde!) Die maximale Tiefe der zwei Tauchgänge bleibt $25m$. Addieren der Grundzeiten, zweimal $15min$, ergibt $30min$: Betrachte die Tabelle für einen hypothetischen Tauchgang von maximal $25m$ Tauchtiefe und einer Grundzeit von $30min$.

Suche in der Spalte 1, Größte Tauchtiefe (Meter) den Wert $27m$; in dem Teil der Tabelle für diesen Wert ($27m$) betrachte die Spalte 2 und fixiere die Zeile mit dem Wert $30min$. Diese Zeile schlägt eine Dekompressions-Pause vom fünf Minuten ($5min$) in einer Tiefe von drei Metern vor ($3m$).

Beachte zwei Dinge: Erstens, der zweite, Wiederholungs-Tauchgang dauert nur fünfzehn Minuten ($15min$), aber die charakterisierenden Daten werden aus der Tabelle für einen Tauchgang von dreißig Minuten entnommen, dieses Vorgehen liefert die Dekompressions-Pause! Zweitens: Beide Tauchgänge haben ein identisches Grundprofil, trotzdem verlangt der zweite Tauchgang eine Dekompressions-Pause; wegen des, noch vom ersten Tauchgang stammenden, Überschusses an Gasteilchen in dem Körper des Tauchers, ein Rest-Überschuss der noch zum Beginn des zweiten Tauchganges vorhanden ist.

Bergsee-Tauchgänge

Tauchen ist auch möglich in Bergseen hoch über dem Meeresspiegel. In großen Höhen ist der Druck der Erdatmosphäre geringer als auf Meereshöhe, wo der Luftdruck etwa ein Bar beträgt ($1bar$). In einer Höhe von etwa $5000m$ über dem Meeresspiegel, fünf Kilometer, kann der Luftdruck mit etwa der Hälfte des Werte auf Meereshöhe gemessen werden ($0.5bar$).



Weniger atmosphärischer Druck über Wasser wirkt zusammen mit etwa der gleichen Rate des Druckanstiegs unter Wasser. Daher ist die relative Veränderung der Gas-Konzentration unter Wasser, in großen Höhen, größer als auf Meereshöhe. Das Auftauchen in Bergseen kann daher mehr Zeit benötigen um den Überschuss an gelöstem Gas im Körper des Tauchers abzubauen. Es existieren auch Tabellen für das Bergsee-Tauchen.

Drei der wichtigeren Begriffe für die folgenden Abschätzungen vom Tauchgangsdaten sind:

(maximale) Tauchtiefe Eine Länge, die maximale Distanz zwischen Wasseroberfläche und dem Taucher während eines Tauchgangs. Die (maximale) Tauchtiefe gibt auch einen der charakterisierenden Parameter eines Tauchgang-Profiles.

Grundzeit Ein Zeitintervall, dies beginnt im Moment in dem die tauchende Person die Wasseroberfläche verlässt, und endet wenn die Person mit dem Aufstieg zur Wasseroberfläche beginnt. Die Grundzeit ist ein Parameter der einen Teil eines Tauchgangs-Profiles beschreibt.

Nullzeit Ein Zeitintervall, abhängig von der maximalen Tauchtiefe eines Tauchganges. Für solch eine vorgegebene (maximale) Tauchtiefe macht jede Grundzeit kleiner als die Nullzeit den Tauchgang zu einem Nullzeit-Tauchgang. Ein Tauchgang dessen Grundzeit sich der Nullzeit nähert wird fast zum Dekompressions-Tauchgang. Die (maximalen) Tauchtiefen und ihre assoziierten Nullzeiten geben einen Rahmen in dem man die Nullzeit-Tauchgänge findet.

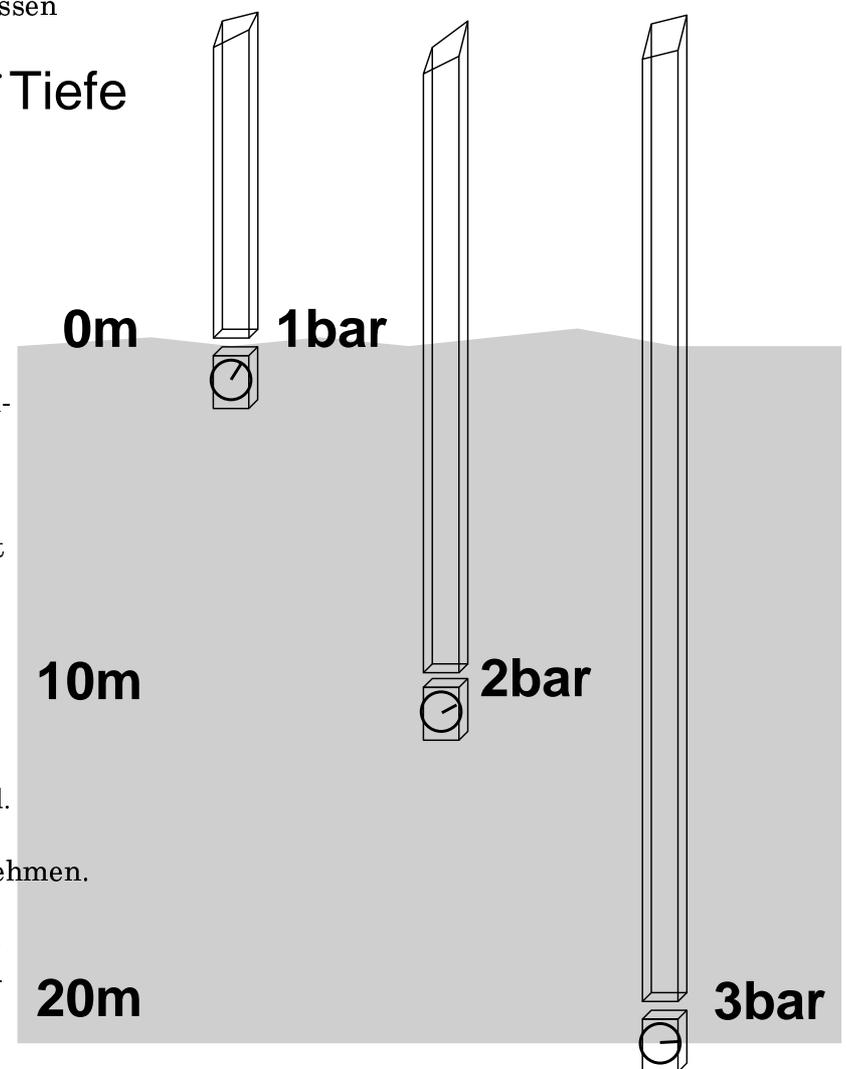
Eigenschaften von Gasen

Bisher wurde der Umgang mit Dekompressions-Tabellen für Fälle beschrieben, in denen der Vorrat an Atemluft nicht begrenzt war. Aber ein Pressluft-Flaschen-Taucher führt immer nur eine begrenzte Menge Atemluft mit sich. Jetzt soll für einen gegebenen Atemluftvorrat, und für eine vorgegebene maximale Tauchtiefe, die Grundzeit gesucht werden, die man maximal unter Wasser bleiben kann, so das die Luft zum sicheren Auftauchen reicht, inclusive der Dekompressionspausen. Um den Rechnungen zu folgen, könnte sich die Kenntnis einiger physikalischer Begriffe als nützlich erweisen. Trotzdem kann man die gezeigten Rechnungen auch mechanisch durchführen ohne einen theoretischen Hintergrund präsent zu halten.

Druck

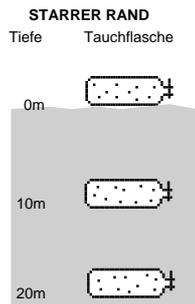
Die Gravitationskraft der Erdmasse hält die Erde zusammen. Diese Gravitationskraft bewirkt die Entstehung von Meeren, Flüssen und Seen indem sich das Wasser in den niedrigsten Bereichen der Erdoberfläche sammelt. Gasförmige Materie², die spezifisch leichter ist als Wasser, lagert über der flüssigen und festen Materie, und formt so die Erdatmosphäre. Alle diese Materiesorten erfahren die Wirkung der Gravitationskraft. Die Gase werden dadurch merkbar zusammengepresst und üben an der Meeresoberfläche einen Druck von etwa einem Bar aus. Neben dem atmosphärischen Druck übt auch das Wasser einen Druck auf darunterliegende Wasser- und Erdschichten aus. Jeder kennt das Gefühl sich in einer Gasmischung unter dem Druck von einem Bar zu bewegen, atmend, Wind und Sturm erlebend. Unter Wasser ist der Druck des umgebenden Wassers hinzuzunehmen. Auch der Wasserdruck erhöht sich mit zunehmender Tiefe, wegen des Gewichts darüberliegenden Wasserschichten. In der Physik beschreibt der Begriff Druck welche Kraft auf welche Fläche wirkt; eine der Einheiten für den Druck heißt "bar". Diese Einheit (*bar*) ist hier deshalb bequem, weil der atmosphärische Druck auf Meereshöhe gerade ein Bar beträgt.

Umgebungsdruck



²Etwa 78% gasförmiger Stickstoff (N_2), 21% gasförmiger Sauerstoff (O_2), Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2) und andere Gase.

Gasmenge — Intuitive Definition

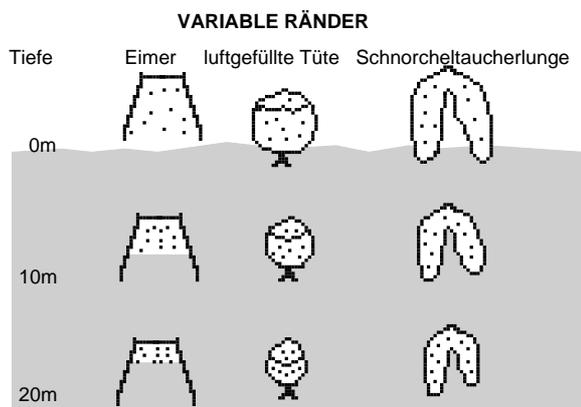


Das Volumen beschreibt nicht eine Gasmenge: In einer Pressluft-Tauchflasche findet man nur ein geringes Volumen komprimierter Luft, aber dieses geringe Volumen komprimierter Luft erlaubt es dem Taucher eine sehr lange Zeit zu atmen. Daher sollte man versuchen die Begriffe zu ordnen: Betrachte unterschiedliche gasgefüllte Behälter, die unter die Wasseroberfläche gebracht wurden:

STARRE UND GESCHLOSSENE Behälter können einem erhöhten Umgebungsdruck widerstehen. Das Material des Behälters hat genügend Festigkeit um die Druckdifferenz zwischen innen und außen aufrechtzuhalten; daher bleibt der Druck im inneren eines starren und geschlossenen Behälters konstant.

Starre und geschlossene Behälter halten ihren Innendruck konstant, unabhängig vom Umgebungsdruck!

Behälter mit VARIABLEN RÄNDERN, die eine Menge eines Gases enthalten, reagieren anders auf einen Wechsel des Umgebungsdrucks: In diesen Behältern ist der Gasdruck (nahezu) gleich dem Umgebungsdruck! Die Menge des Gases bleibt dieselbe, wie in der Graphik unten durch die gleichbleibende Zahl der Punkte angedeutet. Da Gase sehr viel leichter komprimierbar sind als Flüssigkeiten, bedeutet eine Änderung des Wasserdrucks auch eine Volumenänderung des Gases in dem Behälter. Je tiefer der Behälter sich unter Wasser befindet, desto höher der Wasserdruck und daher, desto kleiner auch das Gasvolumen.



Keiner der Behälter in den vorangehenden beiden Diagrammen läßt etwas von dem enthaltenen Gas entweichen (Der Schnorcheltaucher hielt freundlicherweise die Luft an.). Daher blieb die Luftmenge, die Gasmenge, die gleiche in jeder Wassertiefe (0m, 10m oder 20m).

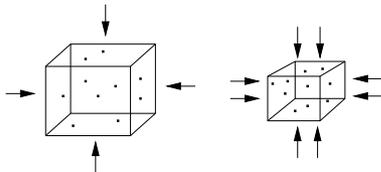
(Anzahl) Eine Gasmenge kann man beschreiben indem man die Anzahl der in ihr enthaltenen Gasteilchen ermittelt. (In dem linken Diagramm können 10, 8, 10 Gasteilchen gefunden werden.) Für kleine Zahlen wie Vielfache von 12 kann man die Einheit "Dutzend" wählen, für größere Zahlen wie Vielfache von $6.023 \cdot 10^{23}$ benutzt man die Einheit "mol"³.

(Masse) Oder die Gasmenge wird beschrieben indem man ihre Masse angibt. (Unter Atmosphären-Druck auf Meereshöhe und bei einer Temperatur von etwa zwanzig Grad Celsius (20° C) ergaben Messungen, dass ein Liter Luft eine Masse von etwa 1.3gram hat.)

Diese zwei Möglichkeiten um eine Gasmenge zu beschreiben, könnten sich unter Tauchbedingungen als unelegant erweisen. Physikalische Größen die sich beim Tauchen relativ gut zugänglich erweisen sind **Druck** und **Volumen**. Der Druck wird durch Druckmesser (Finimeter) an Tauchflaschen oder dem Tiefenmesser ermittelbar. Volumina sind gegeben durch die Tauchflasche oder die Lunge.

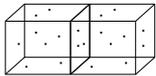
Oben wurde beschrieben wie eine gegebene Gasmenge im Eimermodell proportional zur Druckerhöhung sein Volumen verkleinert. Genauere Betrachtungen zeigen folgendes: Für eine gegebene Gasmenge ergibt der Druck (p) multipliziert mit dem Volumen (V) eine Konstante!

³Diese Zahl kann man in Naturwissenschafts-Büchern unter dem Namen "AVOGADRO-Konstante" finden.



$$p \cdot V = \text{konstant}$$

Verdoppelt man die Menge des Gases, so benötigt man das doppelte Volumen, wenn der Druck konstant gehalten wird:



$$p \cdot 2 \cdot V = 2 \cdot \text{konstant}$$

Daher kann man die Konstante als proportional zur betrachteten Gasmenge erkennen. Also, bei einer gegebenen Gasmenge, ermittle den Druck und das Volumen, multipliziere beide, um das Ergebnis als Maßzahl für die Menge des Gases zu verwenden:

Eine gegebene **Gasmenge** kann durch die physikalische Größe $G := p \cdot V$ beschrieben werden, wobei die Gasmenge einmal in dem Zustand war, der durch die Werte für Druck p und Volumen V gegeben ist.

Luftverbrauch beim Atmen unter Wasser

In Abhängigkeit vom Trainingszustand, atmet die tauchende Person ein *Volumen* Luft pro Zeitintervall; die Werte reichen von 6 – 7 *liter/minute* in Ruhe bis über 100 *liter/minute* unter körperlicher oder psychischer Belastung.

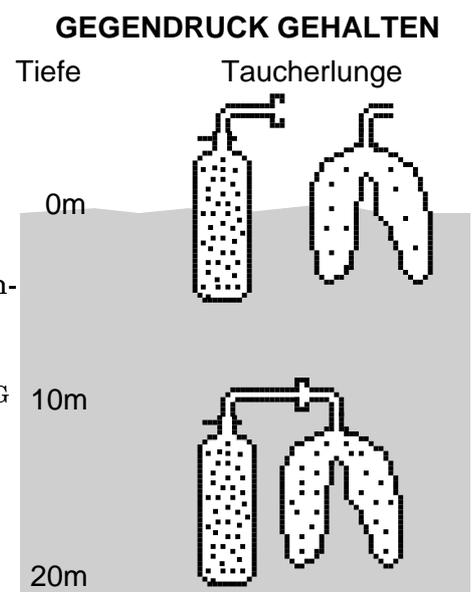
Unter Wasser spendet der Lungenautomat das Atemgas mit etwa dem Umgebungsdruck des Wassers. Bis auf die Atembewegung braucht eine Taucherlunge idealerweise keine weitere Kraft gegen einen äußeren Druck aufzuwenden. Und daher wird die Lunge auch nicht komprimiert, im Gegensatz zur Schnorcheltaucher-Lunge. Unter Wasser atmet die Tauchflaschenversorgte Lunge das *gleiche Volumen* wie an der Wasseroberfläche!

Die Lunge eines Druckflaschen-Tauchers behält ihr normales Arbeitsvolumen unter Wasser weil der Lungenautomat das Atemgas *mit* dem Umgebungsdruck abgibt. Das heißt, EIN ATEMZUG UNTER WASSER HAT DAS **SELBE VOLUMEN** WIE EIN ATEMZUG AN DER WASSEROBERFLÄCHE!

Das Atemgas wird mit dem Umgebungsdruck abgegeben und dieser Umgebungsdruck ist höher als der Atmosphärendruck an der Wasseroberfläche. Unter Wasser enthält daher ein Liter des, vom Lungenautomaten abgegebenen, Atemgases mehr Gasteilchen als ein Liter des Atemgases an der Wasseroberfläche. Das bedeutet, EIN ATEMZUG UNTER WASSER ENTHÄLT **MEHR GASTEILCHEN** ALS EIN ATEMZUG AN DER WASSEROBERFLÄCHE!

Also läßt ein Atemzug unter Wasser mehr Gasteilchen die Lungen passieren als ein Atemzug an der Wasseroberfläche. Daraus folgt, dass das Atmen unter Wasser eine größere Gasmenge verbraucht — bei gleichem Atemzug-Volumen — als das Atmen an der Wasseroberfläche.

Um den Verbrauch an Atemgas eines Druckflaschen-Tauchers unter Wasser abzuschätzen, verwende den Begriff "Gasmenge" wie folgt: Das geatmete Volumen pro Minute ($AMV = \text{Atem-Minuten-Volumen}$) multipliziert mit der Zeit (t) liefert das gesamte Gasvolumen das über dieses



Zeitintervall geatmet wurde: $V_{geatmet} = AMV \cdot t$ Multipliziert mit dem Umgebungsdruck p gibt das geatmete Volumen die veratmete Gasmenge: $G_{geatmet} = p \cdot AMV \cdot t$

Rechenbeispiel: Eine Person atme zwanzig Liter pro Minute ($AMV = 20l/min$) für eine Zeit von fünf Minuten ($t = 5min$). Dann beträgt der Wert des geatmeten Volumens hundert Liter ($V_{geatmet} = AMV \cdot t = 20l/min \cdot 5min$). Hundert Liter Atemgas wurden konsumiert, dieser Volumenwert bleibt etwa der gleiche an der Wasseroberfläche oder in verschiedenen Wassertiefen. Nun betrachte die Atmung in zwei unterschiedlichen Umgebungen:

FALL 1 (WASSEROBERFLÄCHE): Die Menge des Atemgases welches unter Atmosphärendruck ($p = 1bar$) an der Wasseroberfläche geatmet wird, beträgt hundert Bar Liter: $G_{geatmet} = p \cdot AMV \cdot t = 1bar \cdot 20l/min \cdot 5min$

FALL 2 (20 METER WASSERTIEFE): Der Umgebungsdruck in einer Wassertiefe von zwanzig Metern (20m) beträgt drei Bar ($p = 3bar$), eine Formel um die Tauchtiefe mit dem Umgebungsdruck zu korrelieren wird im nächsten Abschnitt gegeben. Die Gasmenge, die in dieser Tiefe geatmet wird, beträgt jetzt dreihundert Bar Liter: $G_{geatmet} = p \cdot AMV \cdot t = 3bar \cdot 20l \cdot 5$

Daher verbraucht ein Druckflaschen-Taucher in zwanzig Metern Tauchtiefe die dreifache Gasmenge im Vergleich zur Wasseroberfläche! WÄHREND DASSELBE VOLUMEN PRO MINUTE GEATMET WIRD, BEWIRKT DER HÖHERE UMGEBUNGSDRUCK IN ZWANZIG METERN TAUCHTIEFE DASS DREIMAL MEHR GASTEILCHEN DIE LUNGE DES TAUCHERS PASSIEREN!

Betrachte die Seite 18, dort wird eine Methode gezeigt, die es erlaubt einen Wert für das geatmete Volumen pro Minute zu ermitteln ($AMV = \text{Atem-Minuten-Volumen}$).

Gasmenge — Zusammenfassung und Anwendung

Für nahezu jede Menge Gas, die in einem Behälter eingeschlossen ist, gibt das Boyle-Mariotte Gesetz den Zusammenhang zwischen Druck p und Volumen V : $p \cdot V = \text{konstant}$ Die Konstante ist unabhängig von Druck und Volumen des Gases im Behälter, aber proportional zur Gasmenge:

Definition: "Gasmenge" $G = p \cdot V$

(Die Einheit der physikalischen Größe "Gasmenge", die hier benutzt wird ist "liter · bar" oder "bar · liter" oder kurz "l · bar" oder "bar · l". Der Multiplikationspunkt wird meist weggelassen.) Neben dem intuitiven Zugang kann die obige Definition auch mit dem Idealgas-Gesetz rechtfertigt werden: Das Boyle-Mariotte Gesetz kann als Spezialfall eines allgemeineren Gesetzes gesehen werden, nämlich des Idealgas-Gesetzes. Jeglicher Behälter der mit einem Gas gefüllt wurde — der Zustand des Gases werde hinreichend beschrieben durch das Quartett (Druck p , Volumen V , Teilchenzahl N , Temperatur T) — korreliert die Daten durch die folgende Gleichung, dem Idealgas-Gesetz: $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$, wobei die Größe k eine universelle Konstante bezeichnet⁴. Nun kann man erkennen, dass für eine konstante Temperatur die rechte Seite der Gleichung direkt proportional zur Anzahl der Teilchen in der betrachteten Gasmenge wird! Damit ist dieser Gasmengenbegriff auch nur nützlich in Umgebungen mit relativ konstanter Temperatur, beim Tauchen sollte dies im Allgemeinen als erfüllt angesehen werden können.

Ein Liter Luft in Atmosphären-Druck auf Meereshöhe (1bar) ist die Gasmenge, die durch den Wert 1barl beschrieben werden kann. Diese Gasmenge hat eine Masse von etwa 1.3gram.

⁴In Büchern über Naturwissenschaften, die auch das Model und Gesetz des Idealen Gases behandeln, erscheint die Konstante k als BOLTZMANN-Konstante: $k = 1.381 \cdot 10^{-23} J/K$. Die physikalischen Eigenschaften realer Gase lassen sich mit dem Idealgas-Gesetz gut beschreiben, aber das Gesetz hat man zu ändern sobald man in Bereichen von Temperatur, Druck und Volumen kommt in denen Phasenwechsel auftreten, zum Beispiel wenn das reale Gas verflüssigt wird.

Die Beschleunigung dieser Masse kann gefühlt werden wenn einem Wind ins Gesicht bläst.

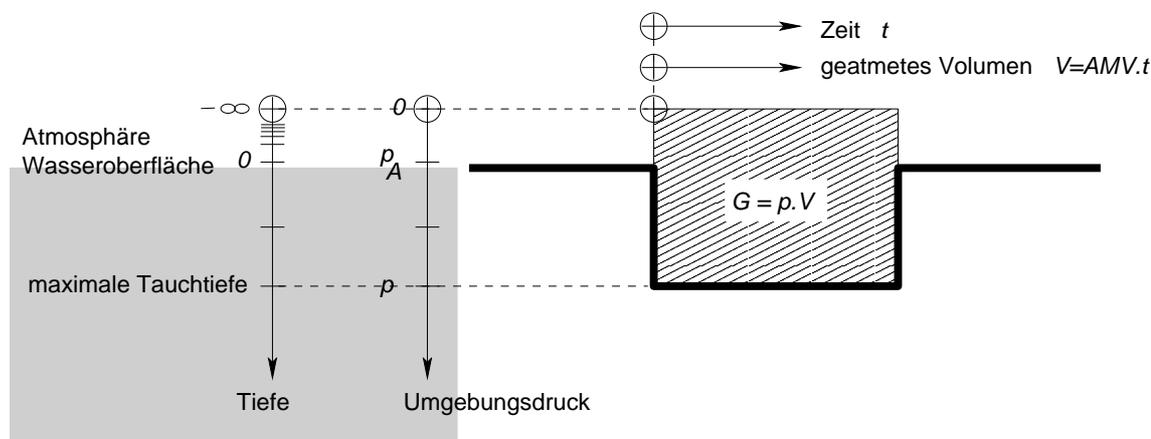
Tauchflasche Eine Tauchflasche mit einem Volumen von zehn Litern ($V_F = 10l$), gefüllt mit Atemgas auf einen Druck von zweihundert Bar ($p_F = 200bar$) enthält eine Gasmenge von etwa zweitausend *bar liter* ($G_F = p_F \cdot V_F = 200bar \cdot 10l = 2000barl$). Wenn diese Gasmenge auf Atmosphären-Druck ($p_A = 1bar$) expandiert wird, dann nimmt diese Gasmenge ein Volumen von zweitausend Litern ein $V_A = G_F/p_A = 2000barl/1bar = 2000l$, dies ist in etwa das Volumen einer Telephonzelle von zwei KubikMetern.

Atmen unter Wasser Atmet man ein bestimmtes Volumen pro Minute AMV , in einem Zeit-Intervall der Länge t , ergibt dies ein veratmetes Volumen $V = t \cdot AMV$. Der Lungenautomat gibt das Atemgas mit dem Umgebungsdruck ab. Wenn ein Druckflaschen-Taucher in einer konstanten Tiefe unter Wasser atmet, so hat der Umgebungsdruck einen konstanten Wert. Der Umgebungsdruck p unter Wasser auf Meeresebene kann mit der folgenden Formel abgeschätzt werden:

$$p = 1bar \text{ (Atmosphärendruck)} + (\text{Ein Bar alle zehn Meter } 10m \text{ Wassertiefe})$$

In einer Umgebung mit dem Druck p , während eines Zeit-Intervalles der Länge t und einer Atemtätigkeit mit einem zeitnormierten Volumenverbrauch, einer Volumen-Verbrauchsgeschwindigkeit AMV (=Atem-Minuten-Volumen), verbraucht ein Druckflaschen-Taucher die folgende Gasmenge:

$$G = p \cdot t \cdot AMV$$



Beachte, dass im obigen Diagramm die vertikale Skala, die ein Längenmaß bezeichnet, über der Wasseroberfläche so gestaucht worden ist, dass die Skala für den Umgebungsdruck linear geworden ist. Dann kann das übliche Tiefe-über-Zeit Diagramm zum Beschreiben von Tauchgangs-Profilen als ein Volumen-über-Druck Diagramm neu-interpretiert werden! Dies ermöglicht es die Gasmengen-Berechnungen als eine Flächenberechnung in einem Volumen-über-Druck Diagramm zu sehen.

Abschätzung von Tauchgangsdaten

Beispiel für das Abschätzen von Tauchgangsdaten (Rechteck-Näherung)

(Die Kästen im Text unten können vom Leser mit den entsprechenden Werten gefüllt werden.)

Betrachte die folgende Situation: Ein Taucher bekommt eine 10l-Flasche gefüllt mit Pressluft unter einem Druck von 200bar. Der Taucher plant ein Tauchgang etwa 10m tief und erwartet eine Volumen-Verbrauchs-Rate von maximal 30l/min. Wie lange kann der Taucher unter Wasser bleiben bis zur Entscheidung aufzutauchen?

Flaschen-Daten — Luftvorrat Welche Menge Atemgas (Pressluft) ist erhältlich?

Flaschen-Volumen	$V_F =$ <input type="text"/> l	
Flaschen-Druck	$p_F =$ <input type="text"/> bar	
Gasmenge in der Flasche	$G_F = p_F \cdot V_F =$ <input type="text"/> barl	
	minus einer Reserve von 500barl	
	$G_F =$ <input type="text"/> barl	(1500barl)

Tauchgangsdaten — Luftbedarf Welche Menge Atemgas wird voraussichtlich verbraucht werden?

Geatmetes Volumen pro Zeit-Intervall	$AMV =$ <input type="text"/> l/min	
geplante maximal Tauchtiefe	<input type="text"/> m	
	gibt Umgebungsdruck	$p =$ <input type="text"/> bar
$(p =$ Atmosphärischer Druck plus ein Bar	für alle zehn Meter Tiefe)	
Grundzeit	$t = ?$	$G_V = p \cdot t \cdot AMV$

Setze Bedarf gleich Vorrat Die erforderliche Luftmenge sollte geringer oder maximal gleich der erhältlichen Luftmenge sein; daher setze die angeforderte Luftmenge gleich der vorhandenen Luftmenge und löse die Gleichung nach der noch unbekanntem Zeit:

$$G_V = G_F$$

$$p \cdot t \cdot AMV = G_F$$

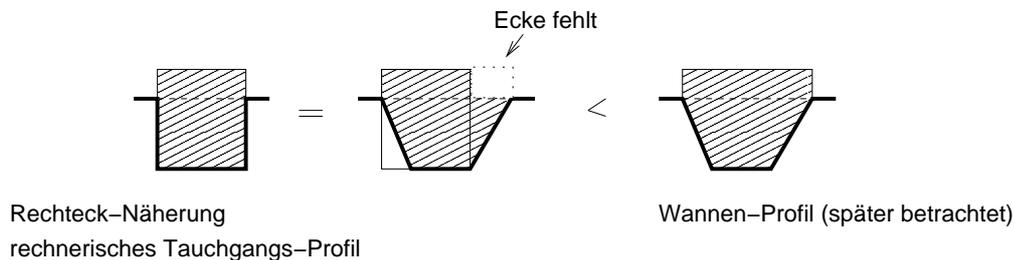
$$t = \frac{G_F}{p \cdot AMV} = \frac{\text{ barl}}{\text{ bar} \cdot \text{ l/min}} = \text{ min}$$

(Ergebnis: Die Grundzeit darf maximal fünfundzwanzig Minuten (25min) betragen. Dieser Wert bleibt klar unter der Nullzeit wie sie aus der Tabelle am Ende des Texts entnommen werden kann. Unter dem Tabellen-Teil für 12m, referenziere die erste Zeile, die die Nullzeit für diese Tauchtiefe mit 135min beziffert.)

Frage: Die Formel um den Luftverbrauch zu berechnen gilt für ein Tauchgangsprofil in Rechteckform, wie in dem Diagramm auf Seite 13 gezeigt. Wie können damit Ab- und Auftauch-Zeiten und ihr Einfluß auf den Luftverbrauch berücksichtigt worden sein? Tatsächlich sollte das Berücksichtigen von Ab- und Auftauch-Zeiten das Tauchgangsprofil wannenförmiger machen.

Antwort: Ignoriere Ab- und Auftauch-Zeiten, denn was an Luftmenge während des Abtauches gespart wird, wird dann beim Auftauchen verbraucht. Mehr Reserven sammeln sich weil man im Allgemeinen nicht den gesamten Tauchgang in der maximalen Tauchtiefe verbringt, und

wegen der oben mit eingerechneten Vorrats-Reserve. Daher kann das Arbeiten mit dem Begriff der Grundzeit den zusätzlichen Luftbedarf beim Ab- und Auftauchen decken (ein anderer Vorteil des Begriffes der "Grundzeit"). In anderer Formulierung: Durch das Verschieben von Flächen kann man aus dem Rechteck-Profil ein Wannen-Profil annähern.



Trotzdem kann sich diese Rechenmethode bei tiefen und längerdauernden Tauchgängen als risikobehaftet erweisen, weil der Taucher sich bemühen sollte langsamer aufzutauchen ($\leq 10m/min$) als der Taucher kontrolliert abtauchen mag ($\leq 48m/min$). Diese Komplikation wurde bei dem Erstellen der Tabellendaten durch Verwenden eines realistischeren Wannen-Profils vermieden.

Abschätzung von Daten für Dekompressions-Tauchgänge

Atmet eine Person, dann diffundieren die eingeatmeten Gas-Moleküle über das Lungengewebe in den Blutkreislauf. Der Blutkreislauf transportiert diese Gasmoleküle zu den anderen Organen. — Ein Druckflaschen-Taucher erhält das Gas aus dem Lungenautomaten mit Umgebungsdruck. Der Druck des Atemgases ist daher gleich dem Umgebungsdruck der tauchenden Person (größer als der Atmosphären-Druck von $1bar$ auf Meereshöhe). Daher erhöht sich die Konzentration der Atemgas-Moleküle mit der Zeit die die tauchende Person unter Wasser verbleibt. Taucht die Person zu schnell auf, dann kann der Unterschied der Gaskonzentrationsdruck in dem Körper der Person und der Atmosphäre Werte erreichen, die es der Diffusion und dem Blutkreislauf nicht erlauben den konzentrationsbedingten Druckunterschied auszugleichen. Dies bewirkt dann die Produktion von Gasblasen in dem Körper der tauchenden Person. Beim Auftauchen wird durch das Einlegen von Dekompressions-Pausen, die Produktion von gefährlichen Gasblasen im Körper der tauchenden Person weitgehend verhindert, da dem Blutkreislauf und dem Diffusionsprozess Gelegenheit gegeben wird, den Überschuss an Gasmolekülen über die Lunge zu verlieren.

Zusammenfassung: Die begrenzte Geschwindigkeit des Kreislaufs, speziell in den Kapillaren, die begrenzte Diffusions-Geschwindigkeit der Gas-Moleküle und die begrenzte Aufnahmefähigkeit des menschlichen Körpers für Gas-Moleküle machen Dekompressions-Pausen notwendig. Ohne Dekompressions-Pausen könnten gefährliche Gasblasen in dem Körper der tauchenden Person entstehen⁵.

Bemerkung: Soweit möglich, versuche vorgegebene Dekompressions-Pausen einzuhalten. Das bedeutet entweder fähig zu sein auch in geringer Tauchtiefe präzise tarieren zu können, was in Gewässern ohne Wellen bereits aufmerksamkeitszehrend sein kann; oder was sehr empfehlenswert wäre, eine Anker-Kette oder einen Felsen als Fixpunkt zu wählen. Hohe Wellen produzieren eine oszillierende Druck-Kurve unter Wasser, welche in extremen Fällen sogar schädliche Lungenüberdehnungs-Fälle hervorrufen kann!

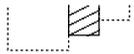
⁵In Tauchbüchern findet man diesen Notfall unter dem Begriff Dekompressions-Krankheit.

Gasverbrauch bei Dekompressions-Tauchgängen — Rechenprinzip

Die folgenden Paragraphen geben lediglich eine grobe Demonstration und werden in weiteren Abschnitten nicht benötigt. Die gezeigte Rechenmethode soll eine Idee davon vermitteln wie man die Gasmenge berechnet die bei einem Dekompressions-Tauchgang mit zwei Dekompressions-Pausen verbraucht wird:



Zuerst der Ausdruck der die Gasmenge beschreibt, die bei einem Tauchgang mit der Grundzeit t , einer maximalen Tauchtiefe mit dem äquivalenten Umgebungsdruck p und einer Volumen-Verbrauchs-Rate AMV verbraucht wird: $G = p \cdot t \cdot AMV$



Betrachte die Dekompressions-Pausen wie Mini-Tauchgänge: $G_{D1} = p_{D1} \cdot t_{D1} \cdot AMV$



Betrachte die Dekompressions-Pausen wie Mini-Tauchgänge: $G_{D2} = p_{D2} \cdot t_{D2} \cdot AMV$



Addiere die einzelnen Gasmenge auf, um den gesamten Gasmengeverbrauch des Dekompressions-Tauchganges zu ermitteln: $G_D = G + G_{D1} + G_{D2}$ mit den obigen Ausdrücken eingesetzt: $G_D = p \cdot t \cdot AMV + p_{D1} \cdot t_{D1} \cdot AMV + p_{D2} \cdot t_{D2} \cdot AMV$ und vereinfacht ergibt dies

$$G_D = (p \cdot t + p_{D1} \cdot t_{D1} + p_{D2} \cdot t_{D2}) \cdot AMV$$

Für jede Zeile der Dekompressions-Tabelle am Ende des Texts, kann der Faktor in Klammern aus den Tabellen-Daten berechnet werden. Dieser Faktor ist unabhängig von allen Daten die sich auf den konkreten Tauchgang beziehen (AMV , Flaschen-Daten). Dieser Wert, auch Faktor g genannt, ergänzt die Dekompressions-Tabelle in einer eigenen Spalte. Der Faktor g steht für eine Gasmenge die durch eine Volumen-Verbrauchs-Rate geteilt wurde. Der numerische Wert von g beschreibt diejenige Gasmenge die bei einer Volumen-Verbrauchs-Rate von $1l/min$ für den jeweiligen Dekompressions-Tauchgang benötigt werden würde. Die Werte in der Tabelle am Ende des Texts wurden für Wannen-Profile errechnet, was sichere Ergebnisse für größere Tachtiefen garantiert.

Tauchgangsdaten eines Decompressions-Tauchgangs (Wannen-Profil)

Situation: Suchtauchgang in einem Unterwassergebiet von bis zu zwanzig Metern (20m) Tiefe, keine schwere Arbeit, die Taucher sind trainiert, daher wird eine Volumen-Verbrauchs-Rate von weniger als zwanzig Liter pro Minute (20l/min) als realistisch angesehen. Jeder der Taucher trägt zwei zehn-Liter Druckgas-Flaschen gefüllt mit zweihundert Bar (200bar) Pressluft. Wie lange kann die Suche dauern?

Flaschen-Daten — Luftvorrat Welche Menge Atemgas ist vorhanden?

Volumen der Flasche(n) $V_F = \boxed{} \text{ l}$

Flaschen-Druck $p_F = \boxed{} \text{ bar}$

Gasmenge in den Flasche(n) $G_F = p_F \cdot V_F = \boxed{} \text{ barl}$
 minus einer Reserve von 200barl

$G_F = \boxed{} \text{ barl}$ (3800barl)

Tauchgangs-Daten — Luftbedarf Welche Menge Atemgas wird voraussichtlich verbraucht werden?

Geatmetes Volumen pro Zeit-Intervall $AMV = \boxed{} \text{ l/min}$

geplante maximale Tauchtiefe $\boxed{} \text{ m}$

$G_D = g \cdot AMV$

Bedarf kleiner gleich Vorrat Die benötigte Gasmenge sollte weniger oder gleich dem Gasmengevorrat sein, daher formuliere die Ungleichung für diese Werte und löse diese Ungleichung nach dem g-Wert:

$G_D \leq G_F$

$g \cdot AMV \leq G_F$

$g \leq \frac{G_F}{AMV} = \boxed{} \text{ barl} / \boxed{} \text{ l/min} = \boxed{} \text{ bar} \cdot \text{min} \quad (190\text{bar} \cdot \text{min})$

Nun suche mit der maximalen geplanten Tauchtiefe (20m) den relevanten Bereich der Dekompressions-Tabelle (21m). In diesem Bereich der Tabelle suche den kleineren Wert von g, der dem Berechneten von unten am nächsten kommt. Die so fixierte Zeile gibt das gesuchte gesamte Tauchgangs-Profil (Grundzeit, Dekompressions-Pausen) zusammen mit der Garantie das der Luftvorrat unter der vorgegebenen Volumen-Verbrauchs-Rate ausreicht. (Lösung: Lokalisierere den Teil der Tabelle für die maximale Tauchtiefe von einundzwanzig Metern (21m) unter der Spalte 1. Wähle die zweite Zeile ($g = 182\text{bar} \cdot \text{min}$) um das Profil abzulesen: Grundzeit 55min, Dekompressions-Pause 5min in 3m)

Sogar wenn der Tauchgang ein Nullzeit-Tauchgang ist teilt die oben beschriebene Methode dies mit und braucht wenig Rechenschritte. Häufig werden Wiederholungs-Tauchgänge, sogar mit geringer Grundzeit leicht zu Dekompressions-Tauchgängen, wie in dem Beispiel auf Seite 7 zu sehen ist. Wie soll man nun die Volumen-Verbrauchs-Rate der Atmung eines Menschen bestimmen? Dazu siehe den nächsten Abschnitt:

Abschätzung der Volumen-Verbrauchs-Rate einer Person

Unterschiedliche Umstände beeinflussen das Volumen des eingeatmeten Atemgases: Die Atmung wird tiefer und schneller beim Laufen. Stress, physische und psychische Zustände kön-

nen zu unterschiedlichen Volumen-Verbrauchs-Raten beim Atmen beitragen. Das Gleiche gilt für den Aufendhalt unter Wasser; aber unter Wasser ist der Luftvorrat begrenzt.

Das geatmete Volumen pro Minute variiert daher von Person zu Person und von Situation zu Situation, daher kann man insbesondere bei diesem Wert nur mit besonders groben Schätzungen arbeiten. Beim Tauchen sollte man eher mit zu großen Werten für das geatmete Volumen pro Minute arbeiten, als den Wert zu unterschätzen und daraufhin in Luftmangel-Situationen zu kommen.

Ein Beispiel wie ein Wert für das geatmete Volumen pro Minute unter Wasser gefunden werden kann: Betrachte die folgende Situation: Ein Taucher taucht mit einer acht-Liter Druckgas-Flasche. Der Taucher versucht fünf Minuten lang konstant in einer Tiefe von zehn Metern zu bleiben. Am Beginn des Zeit-Intervalls liest er vom Druckmesser an der Flasche den Wert hundertundfünfzig Bar ab, am Ende des Zeit-Intervalls ist die Anzeige auf hundertundzehn Bar gesunken. Kann das geatmete Volumen pro Minute aus diesen Daten errechnet werden?

Flaschen-Daten — Luftangebot Welche Menge Atemgas wurde aus der Druckgas-Flasche entnommen? Subtrahiere von der Gasmenge am Anfang des Zeit-Intervalles den Betrag der Gasmenge am Ende des Zeit-Intervalles um den Gasmengenverbrauch während des Zeit-Intervalls zu bekommen:

Volumen der Druckgas-Flasche	$V_F = \boxed{} \text{ l}$
Flaschen-Druck am Anfang	$p_{F1} = \boxed{} \text{ bar}$ (des Zeit-Intervalls)
Flaschen-Druck am Ende	$p_{F2} = \boxed{} \text{ bar}$ (des Zeit-Intervalls)
Gasmenge der Flasche entnommen (während des Zeit-Intervalls)	$G_{\text{angeboten}} = G_{F1} - G_{F2} =$ $= p_{F1} \cdot V_F - p_{F2} \cdot V_F = (p_{F1} - p_{F2}) \cdot V_F =$ $= (\boxed{} - \boxed{}) \text{ bar} \cdot \boxed{} \text{ l} = \boxed{} \text{ barl} \quad (320\text{barl})$

Tauchgangs-Daten — Luftbedarf Welche Atemgasmenge wurde während diesem Zeit-Intervall vom Taucher veratmet? Formuliere einen Ausdruck dafür der das geatmete Volumen pro Minute enthält.

Länge des Zeit-Intervalls	$t = \boxed{} \text{ min}$
Tauchtiefe	$\boxed{} \text{ m}$ während dieses Zeit-Intervalls
gibt den Umgebungsdruck von (p = atmosphärischer Druck plus ein Bar pro zehn Meter Tauchtiefe)	$p = \boxed{} \text{ bar}$
Geatmetes Volumen pro Minute	$AMV = ?$ $G_{\text{verbraucht}} = p \cdot t \cdot AMV$

Bedarf gleich Angebot Setze den Bedarf an Gasmenge gleich dem Angebot an Gasmenge und löse die entstandene Gleichung nach dem geatmeten Volumen pro Minute (der Volumen-Verbrauchs-Rate, dem Atem-Minuten-Volumen):

$G_{\text{verbraucht}} = G_{\text{angeboten}}$
$p \cdot t \cdot AMV = G_{\text{angeboten}}$
$AMV = \frac{G_{\text{angeboten}}}{p \cdot t} = \boxed{} \text{ barl} / (\boxed{} \text{ bar} \cdot \boxed{} \text{ min}) = \boxed{} \text{ l/min} \quad (32\text{l/min})$

Faktoren welche das geatmete Volumen pro Minute einer tauchenden Person erhöhen sind

- Irritation, Aufregung (neue Tauch-Partner, neuer Tauch-Ort, neue Ausrüstung)

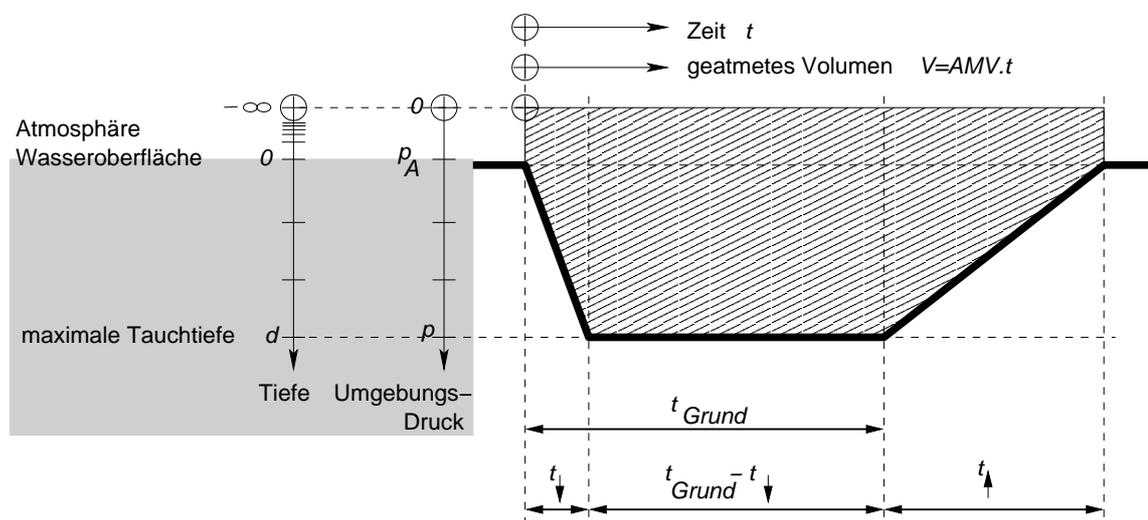
- körperliche Aktivität, körperlicher Stress (Flossenschlag beim Kompass-Tauchgang)
- Kältezittern, Unterkühlung

Durchschnittliche Werte für geatmete Volumina pro Minute sind: $10 - 20\text{ l/min}$ für trainierte Taucher die sich unter Wasser wohl fühlen; $20 - 35\text{ l/min}$ und mehr für Anfänger. Unter den oben erwähnten Umständen können sich diese Werte verdoppeln, verdreifachen oder sogar vervierfachen. Frauen haben im Allgemeinen eine geringere Volumen-Verbrauchs-Rate beim Atmen.

Die Qualität der Abschätzungen variiert stark mit der Fähigkeit den erwarteten Volumen-Verbrauch während des Tauchganges abzuschätzen. Speziell beim Planen von Dekompressions-Tauchgängen sollte man sich die Möglichkeit vorbehalten früher als geplant, sogar noch vor Erreichen der Nullzeit, aufzutauchen! Manchmal können auch unvorhergesehene, harmlose Ereignisse den Anlass zum Verkürzen des Tauchganges bieten. Ein Überschuss an *gefüllten* und *einsatzbereiten* Druckgas-Flaschen *mit Lungenautomaten* kann sehr beruhigend wirken. Die vorangegangenen und folgenden rechnerischen Prozeduren beschreiben allerdings NUR die Freiheit und Grenzen die durch einfache mathematische Modelle der physikalischen Effekte erfassbar sind. Die Vielfalt sozialer Effekte stellt eine andere Quelle, hoffentlich handhabbarer, Risiken dar.

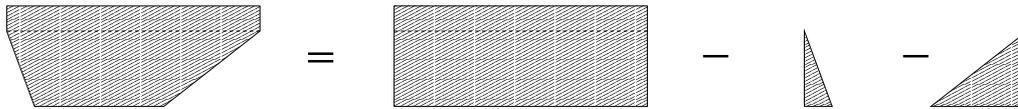
Rechnungen mit einem Wannen-Profil

Wie auf Seite 15 gezeigt, neigt die Rechteck-Näherung dazu den Verbrauch an Atemgas zu unterschätzen. Dies wird besonders problematisch bei Tauchgangs-Profilen mit großen maximalen Tauchtiefen und Abstiegsgeschwindigkeiten die größer sind als die Aufstiegsgeschwindigkeiten. Daher wurden die Werte für den normierten Verbrauch an Atemgas g für ein, unten beschriebenes, Wannens-Profil erstellt:



Die relevanten Parameter sind: t_{Grund} die Grundzeit; t_{\downarrow} die Dauer des Abtauchens; t_{\uparrow} die Dauer des Aufstiehs; p_A der atmosphärische Druck, normalerweise 1 bar ; p der Umgebungsdruck in der maximalen Tauchtiefe; v_{\downarrow} die Abtauch-Geschwindigkeit (hier gegeben durch den vorgeschlagenen Maximalwert von 48 m/min); v_{\uparrow} die Aufstiehs-Geschwindigkeit (hier gegeben durch den vorgeschlagenen Maximalwert von 10 m/min); und zum Schluss die maximale Tiefe d des Tauchganges. Wenn das Diagramm oben als ein Druck-über-Volumen Graph betrachtet wird ($G = p \cdot V$), dann entspricht der schraffierte Fläche die verbrauchte Gasmenge. Der Wert

dieser Fläche kann auf unterschiedliche Weise durch ein Aufteilen der Fläche in Rechtecke und Dreiecke bestimmt werden; unten wurde der Wert ermittelt indem von einem umschreibenden Rechteck überschüssige Dreiecke abgezogen wurden:

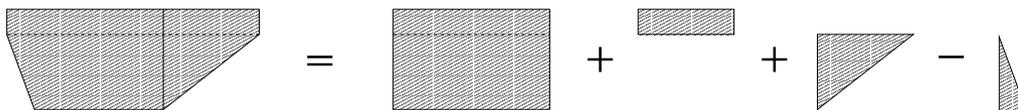


$$G_{Wanne} = \underbrace{p \cdot AMV \cdot (t_{Grund} + t_{\uparrow})}_{\text{umschreibendes Rechteck}} - \underbrace{\frac{(p - p_A) \cdot AMV \cdot t_{\downarrow}}{2}}_{\text{minus linkes Dreieck}} - \underbrace{\frac{(p - p_A) \cdot AMV \cdot t_{\uparrow}}{2}}_{\text{minus rechtes Dreieck}}$$

Und vereinfacht durch Sammeln gleicher Faktoren:

$$G_{Wanne}/AMV = p \cdot (t_{Grund} + t_{\uparrow}) - (p - p_A) \cdot \frac{t_{\uparrow} + t_{\downarrow}}{2}$$

Ein Umstellen von Summanden und Faktoren oder ein anderes Aufaddieren von Rechtecken und Dreiecken liefert auch folgendes Ergebnis:



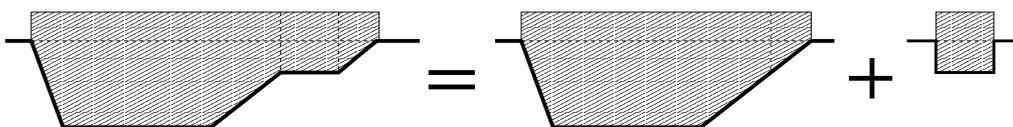
$$G_{Wanne}/AMV = p \cdot t_{Grund} + p_A \cdot t_{\uparrow} + (p - p_A) \cdot \frac{t_{\uparrow} - t_{\downarrow}}{2}$$

Vergleiche die obige Formel mit dem Ergebnis der Rechteck-Näherung $G_{Rechteck}/AMV = p \cdot t_{Grund}$: Da alle Faktoren nicht-negativ bleiben — Auftauchen nimmt mehr Zeit in Anspruch als Abtauchen ($t_{\uparrow} \geq t_{\downarrow}$) und $p \geq p_A$ — unterschätzt die Rechteck-Näherung eindeutig den Luftbedarf, ein Fehlbetrag bleibt sogar im Fall $t_{\uparrow} = t_{\downarrow}$ bestehen! Je tiefer der Tauchgang und je größer die Differenz zwischen Auftauch- und Abtauchzeit, desto deutlicher ist die Abweichung von der Rechteck-Näherung. Dies bestätigt auch Analyse von Formeln was bereits durch Betrachten der Graphiken auf Seite 15 vermutet werden konnte.

Nun sollen die maximalen Abtauch- und Auftauchgeschwindigkeiten in die Formel eingesetzt werden: Dafür verwende die Relation $t_{\downarrow} \cdot v_{\downarrow} = d = t_{\uparrow} \cdot v_{\uparrow}$, diese erlaubt die Abtauch- und Auftauchzeiten aus der Formel zu eliminieren:

$$G_{Wanne}/AMV = p \cdot \left(t_{Grund} + \frac{d}{v_{\uparrow}} \right) - \frac{1}{2} (p - p_A) \cdot d \cdot \left(\frac{1}{v_{\downarrow}} + \frac{1}{v_{\uparrow}} \right)$$

Und schließlich kann der Gasmengen-Verbrauch durch das Einlegen von Dekompressions-Pausen einfach durch Addieren geeigneter Rechtecks-Profile berücksichtigt werden:



Gleichheit und Addition im Bezug auf die Gasmenge

Die Werte der Spalte g in der Tabelle wurden auf diese Weise berechnet.

Dekompressions-Tabelle

1		2	3							4		
größte Tauchtiefe	g	Grundzeit	Dekompressions-Pausen (Minuten)							Auftauchzeit		
(Meter)	(bar min)	(Minuten)	24m	21m	18m	15m	12m	9m	6m	3m	(Minuten)	
KEINE Garantie für die Nutzbarkeit dieser Tabelle												
10	keine Beschränkung										1	
12	301	135									1	
	374	165								5	5	
	447	195								10	10	
	519	225								15	15	
	592	255								20	20	
	765	330								25	25	
	904	390								30	30	
	1508	660								35	35	
	über 660								40	40		
15	216	85									1	
	273	105								5	5	
	317	120								10	10	
	361	135								15	15	
	393	145								20	20	
	437	160								25	25	
	471	170							5	25	30	
	527	190							5	30	35	
	674	240							10	40	50	
	1008	360							30	40	70	
	1242	450							35	40	75	
		über 450							35	45	80	
18	172	60									1	
	207	70								5	5	
	243	80							5	5	10	
	277	90							5	10	15	
	312	100							5	15	20	
	347	110							5	20	25	
	382	120							5	25	30	
	416	130							5	30	35	
	452	140							10	30	40	
	494	150							10	40	50	
	530	160							15	40	55	
	594	180							20	40	60	
	676	200							5	30	40	75
	855	255							10	35	45	90
	1079	325							20	40	45	105
1586	496							35	40	45	120	
	über 495							35	40	50	125	

1		2	3							4		
größte Tauchtiefe	g	Grundzeit	Dekompressions-Pausen (Minuten)							Auftauchzeit		
(Meter)	(barmin)	(Minuten)	24m	21m	18m	15m	12m	9m	6m	3m	(Minuten)	
21	128	40									2	
	182	55								5	5	
	205	60							5	5	10	
	243	70							5	10	15	
	265	75							5	15	20	
	303	85							5	20	25	
	325	90							5	25	30	
	350	95							5	5	25	35
	394	105							5	5	35	45
	456	120							5	10	40	55
	525	135							5	20	45	70
	588	150							5	30	45	80
	651	165							10	30	50	90
	715	180							15	35	50	100
836	210							25	40	50	115	
950	240						5	30	40	50	125	
24	107	30									2	
	148	40								5	5	
	190	50							5	5	10	
	214	55							5	10	15	
	237	60							5	15	20	
	278	70							5	20	25	
	302	75							5	25	30	
	335	80							5	5	30	40
	384	90							5	10	35	50
	457	105							5	20	40	65
	542	120						5	5	30	45	85
	635	140						5	10	35	50	100
	761	160						10	30	40	50	130
27	98	25									2	
	124	30								5	5	
	169	40							5	5	10	
	194	45							5	10	15	
	219	50							5	15	20	
	244	55							5	20	25	
	272	60							5	5	20	30
	297	65							5	5	25	35
	331	70							5	10	30	45
	357	75							5	15	30	50
	390	80							5	20	35	60
	442	90							5	25	40	70
	494	100							5	30	45	80
	569	110						5	15	35	45	100
	623	120						5	20	35	50	110
709	135					5	5	25	40	50	125	
794	150					5	10	35	40	50	140	

1		2	3								4
größte Tauchtiefe	g	Grundzeit	Dekompressions-Pausen (Minuten)								Auftauchzeit
(Meter)	(bar min)	(Minuten)	24m	21m	18m	15m	12m	9m	6m	3m	(Minuten)
30	87	20									2
	113	25								5	5
	142	30							5	5	10
	168	35							5	10	15
	195	40							5	15	20
	222	45							5	20	25
	251	50						5	5	20	30
	278	55						5	5	25	35
	312	60						5	10	30	45
	375	70						5	20	35	60
	402	75						5	20	40	65
	449	80					5	5	30	40	80
	515	90					5	15	30	45	95
	609	105					5	25	35	50	115
710	120				5	10	30	40	50	135	
33	81	17									2
	100	20								5	5
	130	25							5	5	10
	158	30							5	10	15
	186	35							5	15	20
	215	40							5	20	25
	246	45						5	5	20	30
	282	50						5	10	25	40
	318	55						5	15	30	50
	354	60						5	20	35	60
	382	65						5	20	40	65
	431	70					5	10	20	45	80
	470	75					5	15	25	45	90
	510	80					5	20	30	45	100
	581	90				5	5	20	40	45	115
	652	100				5	10	25	40	50	130
735	110				5	20	30	45	50	150	
822	120			5	5	25	40	45	50	170	

1		2	3								4
größte Tauchtiefe	g	Grundzeit	Dekompressions-Pausen (Minuten)								Auftauchzeit
(Meter)	(barmin)	(Minuten)	24m	21m	18m	15m	12m	9m	6m	3m	(Minuten)
36	73	14									2
	108	20								5	5
	139	25							5	5	10
	175	30							5	15	20
	205	35							5	20	25
	244	40						5	5	25	35
	275	45						5	10	25	40
	313	50						5	15	30	50
	361	55					5	5	20	35	65
	409	60					5	10	25	40	80
	489	70					5	20	30	45	100
	532	75				5	5	20	35	45	110
	576	80				5	10	25	35	45	120
	657	90				5	15	30	40	50	140
	746	100			5	5	20	35	45	50	160
	838	110			5	15	25	40	45	50	180
919	120			5	20	35	40	45	50	195	
39	64	11									3
	90	15								5	5
	123	20							5	5	10
	154	25							5	10	15
	192	30							5	20	25
	216	35							5	20	25
	265	40						5	10	25	40
	315	45					5	5	15	30	55
	354	50					5	5	20	35	65
	403	55					5	10	25	40	80
	452	60					5	15	30	45	95
	541	70				5	10	20	30	50	115
	602	75				5	15	25	40	50	135
	656	80				5	20	30	45	50	150
	749	90			5	5	25	40	45	50	170
	850	100		5	5	15	30	40	45	50	190
948	110		5	10	25	30	45	45	50	210	
1046	120		5	15	30	40	45	45	50	230	

1	2	3								4	
größte Tauchtiefe	g	Grundzeit	Dekompressions-Pausen (Minuten)								Auftauchzeit
(Meter)	(bar min)	(Minuten)	24m	21m	18m	15m	12m	9m	6m	3m	(Minuten)
42	58	9									3
	70	10								5	5
	104	15							5	5	10
	137	20							5	10	15
	169	25							5	15	20
	212	30						5	5	20	30
	252	35						5	10	25	40
	304	40					5	5	15	30	55
	346	45					5	10	15	35	65
	396	50					5	15	20	40	80
	450	55				5	5	15	25	45	95
	501	60				5	5	20	35	45	110
	556	65				5	10	25	40	45	125
	610	70				5	15	30	40	50	140
	678	75			5	5	20	35	45	50	160
	717	80			5	10	20	35	45	50	165
776	85			5	15	25	40	45	50	180	
879	95		5	5	20	35	40	45	50	200	
981	105		5	15	25	35	45	45	50	220	
1083	115		5	20	35	40	45	45	50	240	
45	57	8									3
	74	10								5	5
	110	15							5	5	10
	151	20							5	15	20
	194	25						5	5	20	30
	237	30						5	10	25	40
	282	35					5	5	10	30	50
	333	40					5	10	15	35	65
	385	45					5	15	20	40	80
	440	50				5	5	15	25	45	95
	503	55				5	10	20	30	50	115
	559	60				5	15	25	35	50	130
	618	65			5	5	15	30	40	50	145
	678	70			5	10	20	30	45	50	160
	738	75			5	15	25	35	45	50	175
	815	80		5	5	20	30	40	45	50	195
880	85		5	10	25	35	40	45	50	210	
955	90		5	15	30	40	45	45	50	230	

1		2	3								4
größte Tauchtiefe	g	Grundzeit	Dekompressions-Pausen (Minuten)								Auftauchzeit
(Meter)	(barmin)	(Minuten)	24m	21m	18m	15m	12m	9m	6m	3m	(Minuten)
48	87	10							5	5	10
	122	15							5	10	15
	168	20						5	5	15	25
	211	25						5	10	20	35
	258	30					5	5	10	25	45
	311	35					5	10	15	30	60
	362	40					5	10	20	40	75
	427	45				5	5	15	25	45	95
	485	50				5	10	20	30	45	110
	551	55				5	15	25	40	45	130
	612	60			5	5	20	25	40	50	145
	681	65			5	10	20	35	45	50	165
	743	70			5	15	25	40	45	50	180
	811	75		5	5	20	30	40	45	50	195
	878	80		5	10	25	35	40	45	50	210
954	85		5	15	30	40	45	45	50	230	
50	90	10							5	5	10
	126	15							5	10	15
	173	20						5	5	15	25
	224	25						5	10	25	40
	280	30					5	5	15	30	55
	334	35					5	10	20	35	70
	394	40				5	5	15	25	35	85
	459	45				5	10	20	30	40	105
	528	50			5	5	10	25	35	45	125
	593	55			5	5	15	30	40	50	145
	664	60			5	10	20	35	45	50	165
	734	65		5	5	15	25	35	45	50	180
	798	70		5	10	15	30	40	45	50	195
	876	75		5	15	20	35	45	45	50	215
	953	80	5	5	20	25	40	45	40	50	230
54	96	10							5	5	10
	144	15						5	5	10	20
	191	20						5	10	15	30
	247	25					5	5	10	25	45
	310	30					5	10	15	35	65
	379	35				5	5	15	20	40	85
	446	40				5	10	20	25	45	105
	518	45			5	5	10	25	35	45	125
	585	50			5	5	15	30	40	50	145
	658	55			5	10	20	35	45	50	165
	739	60		5	5	15	25	40	45	50	185
	809	65		5	10	20	30	40	45	50	200
	888	70		5	15	25	35	45	45	50	220
	975	75	5	5	20	30	40	45	45	50	240

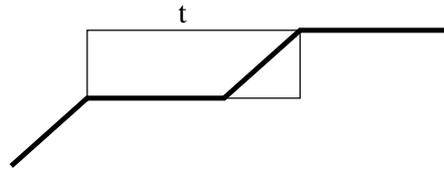
1		2	3								4
größte Tauchtiefe	g	Grundzeit	Dekompressions-Pausen (Minuten)								Auftauchzeit
(Meter)	(bar min)	(Minuten)	24m	21m	18m	15m	12m	9m	6m	3m	(Minuten)
57	100	10							5	5	10
	157	15						5	5	15	25
	205	20						5	10	20	35
	264	25					5	5	15	25	50
	341	30				5	5	10	20	35	75
	413	35				5	5	15	30	45	100
	490	40			5	5	10	20	35	45	120
	559	45			5	5	15	25	40	50	140
	633	50			5	10	20	30	45	50	160
	716	55		5	5	15	25	35	45	50	180
	797	60		5	10	20	30	40	45	50	200
	880	65	5	5	10	25	35	45	45	50	220
967	70	5	10	15	30	40	45	45	50	240	
60	112	10							5	10	15
	163	15						5	5	15	25
	224	20						5	5	10	40
	276	25						5	10	15	50
	368	30				5	5	15	20	40	85
	446	35				5	10	20	30	45	110
	532	40			5	5	15	25	40	45	135
	615	45			5	10	20	30	45	50	160
	699	50		5	5	15	25	35	45	50	180
	781	55		5	10	20	30	40	45	50	200
	867	60	5	5	10	25	35	45	45	50	220
	955	65	5	10	15	30	40	45	45	50	240

Die Menge des Atemgases G , die nötig ist um ein ganzes Profil zu tauchen, kann berechnet werden indem man die erwartete mittlere Volumen-Verbrauchs-Rate AMV mit dem entsprechenden Faktor g multipliziert: $G = g \cdot AMV$. Der Wert g wurde berechnet für ein Wannens-Profil mit einer Abtauchgeschwindigkeit von $48m/min$ und einer Auftauchgeschwindigkeit von $10m/min$ (dies sind Maximalwerte, wenn möglich, sollte man versuchen unterhalb dieser Werte zu bleiben). Der atmosphärische Druck geht mit einem Wert von $1.01325bar$ in die Rechnung ein.

Die Tabelle ist mit Erlaubnis der GUV 10.7 (Ausgabe vom Juli 1985, eine Kopie aus der VBG39) entnommen worden. Die Tabelle wurde erstellt vom Schifffahrts-Medizinischen-Institut der Marine in Kiel. Eine neuere Version findet man in der BGV C23 (die frühere VGB39) in der Ausgabe vom 1. Januar 2001.

(Belastung) Die Tabelle wurde entwickelt für Taucher die mittelschwere Arbeit leisten. Im Falle SCHWERER ARBEIT unter Wasser, benutze rechnerisch das Profil der NÄCHSTEN ZEILE mit den erweiterten Dekompressions-Pausen. Es kann nützlich sein, sich daran zu erinnern, dass das geplante Tauchgangs-Profil lediglich eine äußere Grenze des technisch Machbaren darstellt, innerhalb dieses Bereiches sollte idealerweise der Taucher *allein* über den Verlauf und die Dauer seines Einsatzes entscheiden können.

(Auftauchzeit) In den Tabellendaten wurde das Wechseln der Dekompressions-Tiefen in die Dekompressions-Zeiten mit einbezogen.



(ruhige Dekompressions-Pausen) Wenn möglich, vermeide zu viel Bewegung während der Dekompressions-Pausen.

(Vorwegnahme) Potentiell unerwartete Situationen könnten manchmal durch Vorbereitung gehandhabt werden, indem man zum Beispiel entsprechendes Gerät bereitstellen hat (eine Liste der Dekompressions-Kammern in der Gegend, ein Mobil-Telephon, gefüllte Sauerstoff-Flaschen, ...), mehr darüber kann man in Büchern finden oder auf Ausbildungsgängen lernen.

Die Dekompressions-Tabelle ermöglicht es auch Bergsee-Tauchgänge zu behandeln: Entweder benutzt man ein Barometer um der Wert des atmosphärischen Drucks p_H an dem Tauch-Ort zu bestimmen. ODER, wenn die Höhe h über dem Meeresspiegel in Metern bekannt ist, kann man versuchen den Atmosphären-Druck mit der folgenden Formel abzuschätzen:

$$p_H = 1 - h/meter \cdot 0.0001225$$

(Dies gibt etwa 0.4bar für 5000meter Höhe über dem Meeresspiegel). Beachte dass wegen $p_A \geq p_H$ (der atmosphärische Druck auf Meereshöhe ist größer als der atmosphärische Druck in den äußeren Schichten der Atmosphäre) folgt $\frac{p_A}{p_H} \geq 1$ und $\frac{p_H}{p_A} \leq 1$!

Wenn die tatsächliche maximale Tauchtiefe eines Bergsee-Tauchganges durch den Wert d gegeben ist, dann suche die Werte des rechnerischen Tauch-Profiles in der Tabelle unter GRÖßERER Tiefe $d_{Tabelle} = d \cdot \frac{p_A}{p_H}$.

Aber benutze FLACHERE Dekompressions-Tiefen, die durch die Werte aus der Dekompressions-Tabelle wie folgt ermittelbar sind: $d^{deko} = d_{Tabelle}^{deko} \cdot \frac{p_H}{p_A}$

VORSICHT: Tiefenmesser könnten bei solchen Tauchgängen nicht zufriedenstellend funktionieren: Zum einen wegen dem geringeren atmosphärischen Druck und zum anderen weil Süßwasser eine geringere Dichte als Salzwasser hat!

Die Rechnungsfreie! Methode von Herrn Klaus Ritter

Herr Klaus Ritter aus Waiblingen hat die folgende Methode vorgeschlagen, die *jegliche* Rechnung eliminiert und daher eine sehr sichere Methode in Tauchsituationen sein dürfte: Ein Taucher, der regelmäßig mit der gleiche Flaschenkonfiguration taucht und sein Atem-Minuten-Volumen gut abschätzen kann, generiert sich Tabellen, die ihm die relevanten g -Werte sofort liefern. Damit liefert das Ablesen von Daten aus nur *zwei* Tabellen sofort das komplette Tauchgangs-Profil:

FLASCHEN-VOLUMEN 10l							
<i>g-Einträge in bar · min</i>	<i>Volumen-Verbrauchs-Rate in l/min</i>						
FLASCHEN-DRUCK in bar	18 l/min	20 l/min	22 l/min	24 l/min	25 l/min	27 l/min	30 l/min
220 bar	100	90	82	75	72	67	60
210 bar	94	85	77	71	68	63	57
200 bar	89	80	73	67	64	59	53
190 bar	83	75	68	63	60	56	50
180 bar	78	70	64	58	56	52	47
170 bar	72	65	59	54	52	48	43
160 bar	67	60	55	50	48	44	40
150 bar	61	55	50	46	44	41	37
140 bar	56	50	45	42	40	37	33
130 bar	50	45	41	38	36	33	30
120 bar	44	40	36	33	32	30	27
110 bar	39	35	32	29	28	26	23
100 bar	33	30	27	25	24	22	20
90 bar	28	25	23	21	20	19	17
80 bar	22	20	18	17	16	15	13

FLASCHEN-VOLUMEN 12l							
<i>g-Einträge in bar · min</i>	<i>Volumen-Verbrauchs-Rate in l/min</i>						
FLASCHEN-DRUCK in bar	18 l/min	20 l/min	22 l/min	24 l/min	25 l/min	27 l/min	30 l/min
220 bar	124	112	102	93	90	83	75
210 bar	118	106	96	88	85	79	71
200 bar	111	100	91	83	80	74	67
190 bar	104	94	85	78	75	70	63
180 bar	98	88	80	73	70	65	59
170 bar	91	82	75	68	66	61	55
160 bar	84	76	69	63	61	56	51
150 bar	78	70	64	58	56	52	47
140 bar	71	64	58	53	51	47	43
130 bar	64	58	53	48	46	43	39
120 bar	58	52	47	43	42	39	35
110 bar	51	46	42	38	37	34	31
100 bar	44	40	36	33	32	30	27
90 bar	38	34	31	28	27	25	23
80 bar	31	28	25	23	22	21	19
70 bar	24	22	20	18	18	16	15

FLASCHEN-VOLUMEN 15l							
<i>g</i> -Einträge in <i>bar · min</i>	Volumen-Verbrauchs-Rate in <i>l/min</i>						
FLASCHEN-DRUCK in <i>bar</i>	18 <i>l/min</i>	20 <i>l/min</i>	22 <i>l/min</i>	24 <i>l/min</i>	25 <i>l/min</i>	27 <i>l/min</i>	30 <i>l/min</i>
220 <i>bar</i>	161	145	132	121	116	107	97
210 <i>bar</i>	153	138	125	115	110	102	92
200 <i>bar</i>	144	130	118	108	104	96	87
190 <i>bar</i>	136	123	111	102	98	91	82
180 <i>bar</i>	128	115	105	96	92	85	77
170 <i>bar</i>	119	108	98	90	86	80	72
160 <i>bar</i>	111	100	91	83	80	74	67
150 <i>bar</i>	103	93	84	77	74	69	62
140 <i>bar</i>	94	85	77	71	68	63	57
130 <i>bar</i>	86	78	70	65	62	57	52
120 <i>bar</i>	78	70	64	58	56	52	47
110 <i>bar</i>	69	63	57	52	50	46	42
100 <i>bar</i>	61	55	50	46	44	41	37
90 <i>bar</i>	53	48	43	40	38	35	32
80 <i>bar</i>	44	40	36	33	32	30	27
70 <i>bar</i>	36	33	30	27	26	24	22
60 <i>bar</i>	28	25	23	21	20	19	17

Quellen

Für mehr Informationen auch zu verwandten Themen und weiterer Literatur siehe unter den folgenden Adressen:

<http://www.diversresource.com>

<http://www.nau1.org>

<http://diverlink.com/training/lht/divetablecomparison.htm>

Contents

Tauchgangs-Profile	2
Arten von Tauchgängen	2
Tabellenanwendung - Bedeutung	2
Tauchgangs-Profile und Ihre Charakteristischen Daten	2
Warum sollte man schnelles Auftauchen vermeiden?	3
Was ist Diffusion?	3
Warum braucht ein Taucher Tauchtabelle?	3
Nullzeit-Tauchgänge	4
Dekompressions-Tauchgänge	5
Wiederholungs-Tauchgänge	6
Bergsee-Tauchgänge	7

Eigenschaften von Gasen	9
Druck	9
Gasmenge — Intuitive Definition	10
Luftverbrauch beim Atmen unter Wasser	11
Gasmenge — Zusammenfassung und Anwendung	12
Abschätzung von Tauchgangsdaten	14
Beispiel für das Abschätzen von Tauchgangsdaten (Rechteck-Näherung)	14
Abschätzung von Daten für Dekompressions-Tauchgänge	15
Gasverbrauch bei Dekompressions-Tauchgängen — Rechenprinzip	16
Tauchgangsdaten eines Decompressions-Tauchgangs (Wannen-Profil)	17
Abschätzung der Volumen-Verbrauchs-Rate einer Person	17
Rechnungen mit einem Wannen-Profil	19
Dekompressions-Tabelle	21
Die Rechnungsfreie! Methode von Herrn Klaus Ritter	28
Quellen	30

Index

- Abschätzung: Dekompressions-Tauchgang mit
Wannen-Profil, 17
- Abschätzung: Geatmetes Volumen pro Minute
(Rechteck-Profil), 18
- Abschätzung: Nullzeit-Tauchgang in Rechteck-
Näherung, 14
- Avogadro-Konstante, 10
- Behälter mit variablen Rändern, 10
- Behälter, starre und geschlossene-, 10
- Bergsee-Tauchgänge, 7
- Boltzmann-constant, 12
- Cola-Flasche, 3, 6
- Dekompressions-Pausen, 5
- Dekompressions-Krankheit, 3, 15
- Dekompressions-Tauchgänge, 5
- Diagramm, Tiefe-über-Zeit-, 2, 13
- Diagramm, Volumen-über-Druck-, 13
- Diffusion, 3
- Druckmesser an der Flasche (Finimeter), 18
- Finimeter/Manometer/Druckmesser, 10
- Formel: Atmosphärischer Druck, 28
- Formel: Bergsee-Konversion, 28
- Formel: Gasmenge, 12
- Formel: Geatmete Gasmenge, 13
- Formel: Gesetz des Idealen Gases, 12
- Formel: Umgebungsdruck unter Wasser, 13
- Formel: Wannen-Profil, 20
- Formel: Wannen-Profil verglichen mit Rechteck-
Profil, 20
- Gasblasen, 3–5, 15
- Gasmenge, 12
- Gasmenge (intuitiv), 11
- Gasmenge in einer Tauchflasche, 13
- Gravitationskraft, 9
- Grundzeit, 2, 8
- Grundzeit, Nützlichkeit der-, 6, 15
- Idealgas (Model und Gesetz), 12
- Lungenautomat gibt Atemgas ab, 11
- mol, 10
- Nullzeit, 4, 8
- Nullzeit in einem Dekompressions-Tauchgang,
5
- Nullzeit-Tauchgänge, 4
- Profil, Rechteck-, 14
- Profil, Tauchgangs-, 2
- Profil, Wannen-, 19
- Rechteck-Näherung, 14
- Rechteck-Profil, 14, 15
- Rechteck-Profil für die Volumen-Verbrauchs-
Rate, 18
- Tauchtiefe (maximale-), 2, 8
- Telephonzelle, 13
- Tiefenmesser, 2, 10, 28
- Volumen (beschreibt keine Gasmenge), 10
- Volumen geatmet vom Taucher, 11
- Volumen pro Zeitintervall, 11
- Volumen-Verbrauchs-Rate (AMV), 13, 14, 16,
18
- Wannen-Profil, 17, 19
- Wiederholungs-Tauchgang, 6
- Wiederholungs-Tauchgangs Regel, 6