

**1. Tiroler Tauchsportclub**  
**Innsbruck**

**Sonderausgabe**



**BERGSEETAUCHEN**

Version 01/01







# Bergseetauchen

Diese Arbeit wendet sich an Tauchlehrer und ausgebildete Taucher, die sich mit den Grundlagen der „Bühlmantabellen 1986“ genauer befassen wollen.

Tauchen am Bergsee heißt Tauchen bei vermindertem Luftdruck. Das Rechenmodell ZH-L12 beschreibt die Einflüsse von Druckänderungen auf die Gasdiffusion und damit die Auswirkungen auf die Dekompression.

Während Prof. Robert D. Workmann mit der „Tolerierten Tiefe“ rechnete, stellte Prof. Albert A. Bühlmann die Beziehung zum „Tolerierten Umgebungsdruck“ her und ermöglichte dadurch die Berechnung der Dekompression für Bergseen.

Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, auch den Einfluss des Aufstiegs zum Bergsee genauer zu untersuchen.

Da es neben der Gasdiffusion für die Entstehung von Symptomen der Dekokrankheit noch andere Ursachen gibt, welche die Bildung von Mikrobläschen betreffen, wird von DAN (Divers Alert Network) das Aufstiegsverhalten untersucht und als vorläufige Maßnahme die Einhaltung eines „extra tiefen Sicherheitsstops“ empfohlen.

Am Ende des Buches sind Kontrollfragen mit Antworten angegeben, damit der Leser erkennen kann, ob er die Inhalte richtig verstanden hat.

Alle Rechte, die mit der Verbreitung und Vervielfältigung dieses Buches zusammenhängen, bleiben dem Autor vorbehalten. Ohne schriftliche Genehmigung des Autors darf kein Teil des Buches in irgend einer Form verwendet werden.

**Der Autor kann keine Garantien für das Rechenmodell von Bühlmann abgeben. Alle in diesem Skriptum enthaltenen Angaben, Daten und Ergebnisse wurden nach bestem Wissen erstellt und mit größtmöglicher Sorgfalt überprüft. Gleichwohl sind inhaltliche Fehler nicht vollständig auszuschließen. Daher erfolgen die Angaben ohne jegliche Verpflichtung oder Garantie**

## Impressum:

Version	01/02	
Inhalt	Zauchner Helmut	(CMAS M** AUT 32)
Layout und Grafik	Singer Wolfgang	(CMAS M** AUT 223/98)





# Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort.....	1
2	Gewebe / Kompartimente .....	2
2.1	Die Halbwertszeit von Kompartimenten .....	2
2.1.1	Beispiel für Entsättigung und Halbwertszeit.....	2
2.1.2	Beispiel für Sättigung .....	3
3	ZH-L12-System von Prof. Bühlmann .....	4
3.1	Grafische Lösung der Sättigungsgleichung .....	5
3.2	Beispiel für die Aufladung eines Gewebes.....	6
3.3	Rechnerische Lösung.....	8
3.4	Die Gewebe des ZH-L12-Systems.....	8
3.5	Druckabhängigkeit der Gewebe.....	9
3.6	Grafische Lösung der Dekompression.....	12
3.7	Rechnerische Lösung der Dekompression (für Interessierte).....	14
4	Nullzeit eines Gewebes.....	15
4.1	Wie berechnet man die Nullzeit .....	16
4.2	Nullzeit am Bergsee.....	19
4.3	Nullzeit und Tiefenzuschlag .....	21
4.4	Die Nullzeit hängt vom Luftdruck ab.....	22
4.5	Nullzeit bei Verwendung von Nitrox .....	23
5	Dekotabellen .....	26
5.1	Der Geltungsbereich einer Tabelle .....	26
5.2	Berechnung einer einfachen Dekotabelle .....	27
5.3	Programm zur Berechnung von Bergseetabellen.....	27
5.4	Überprüfung des Rechenprogramms für Bergseen durch Tabellenvergleich.....	31
6	Methode des Tiefenzuschlages .....	33
6.1	ISO-Luftdruck.....	33
6.2	Vergleichsrechnungen .....	34
6.3	Anwendung des Tiefenzuschlages.....	37
6.4	Anwendung des Tiefenzuschlages im Grenzbereich.....	38



6.5 Fahrten über höher gelegene Pässe und Fliegen .....	39
7 Zusammenfassung .....	40
8 Ausblick.....	41
9 Kontrollfragen .....	42
10 Anhang .....	46
11 Notizen .....	49

### Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: <i>Anpassung an den Umgebungsdruck</i> .....	2
Diagramm 2: <i>Aufladung des 4- und 8 min Gewebes</i> .....	3
Diagramm 3: <i>Verlauf des Anpassungsfaktors</i> .....	5
Diagramm 4: <i>Anpassungsfaktor "F"</i> .....	7
Diagramm 5: <i>Aufladung von sieben verschieden schnellen Geweben</i> .....	9
Diagramm 6: <i>Verhalten verschiedener Gewebe</i> .....	10
Diagramm 7: <i>Verhalten des 4 min Gewebes</i> .....	11
Diagramm 8: <i>Verhalten des 12,5 min Gewebes</i> .....	12
Diagramm 9: <i>Anpassungsfaktor (vergrößerter Ausschnitt)</i> .....	14
Diagramm 10: <i>Nullzeit des 4 min Gewebes</i> .....	17
Diagramm 11: <i>"Umhüllende" der Nullzeitkurven (aller 16 Gewebe)</i> .....	18
Diagramm 12: <i>"Umhüllende" der Nullzeitkurven (16 Gewebe, vergrößerter Ausschnitt)</i> .....	19
Diagramm 13: <i>Nullzeitkurven des 12,5 min Gewebes in verschiedenen Seehöhen</i> .....	20
Diagramm 14: <i>Nullzeiten am Bergsee mit Tiefenzuschlag</i> .....	21
Diagramm 15: <i>30 m Nullzeit am Bergsee</i> .....	22
Diagramm 16: <i>"Nitrox" Nullzeiten</i> .....	23
Diagramm 17: <i>3000 m Nullzeit (verschiedene Mischungen)</i> .....	24
Diagramm 18: <i>Nullzeit am Bergsee (verschiedene Seehöhen)</i> .....	24
Diagramm 19: <i>Verlauf des Luftdruckes</i> .....	33

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: <i>Grenzfälle für die Dekozeiten</i> .....	26
Tabelle 2: <i>Vergleich in unterschiedlichen Tiefen bei mittleren Zeiten</i> .....	31



Tabelle 3:	<i>Überprüfung der Zeitstufen in unterschiedlichen Tiefen</i> .....	32
Tabelle 4:	<i>Vergleich der Dekozeiten in verschiedenen Seehöhen</i> .....	34
Tabelle 5:	<i>Angepasste Gewebe (Tiefenzuschlag 5 % pro 1000 m)</i> .....	36
Tabelle 6:	<i>Vergleich von Tiefenzuschlägen</i> .....	37
Tabelle 7:	<i>Tiefenzuschlag im Grenzbereich</i> .....	39

**In diesem Buch stecken viele Recherchen und damit viel Arbeit. Wenn sich jeder Leser dieses Buch kopiert, habe ich es nicht umsonst aber immerhin gratis geschrieben.**

**In Absam gibt es den Verein „WIR“, wo Behinderte unter Anleitung dieses Buch ausdrucken und binden und damit etwas verdienen wollen. Sie können dabei trotz ihrer Behinderung eine sinnvolle Leistung erbringen.**

**Wenn sich's einer für sich persönlich ausdrückt, habe ich nichts dagegen. Als Gegenleistung würde ich um eine kurze Stellungnahme bitten. Sollte jemand 2 oder mehrere Exemplare brauchen, oder irgendwelche Fragen oder Ergänzungsvorschläge haben, so bitte ich um Nachricht an die Adresse**

**[bergseetauchen@aon.at](mailto:bergseetauchen@aon.at)**

## Quellennachweis

- [1] Beat Müller: „Berechnungsgrundlagen der Bühlmann-tabelle 86“, NEREUS 1/1987. Seite 4 - 6
- [2] Beat Müller: „Passfahrten und Fliegen ohne Druck-kabine“, NEREUS (1/1988?) Seite 12 - 14
- [3] Klaus Meier-Ewert: „Grundlagen der Dekompression und Berechnung von Dekompressionsprofilen mit Hilfe der ZH-L12-Koeffizienten“ DER TAUCHLEHRER 4/1986, Seite 14 – 24





## 1 Vorwort

Ein Taucher, der in Tallage (500 m) wohnt und im Bergsee (1000 m) tauchen will, sollte bei vorschriftsmäßiger Anwendung von Tauchtabellen am Bergsee übernachten, weil er eine Wartezeit von 12 oder 24 Stunden einhalten muss. Es gibt keine Tabelle, die einen Aufstieg über 2 Höhenbereiche (von 500 auf 1000 m) berücksichtigt.

Früher gab es die „**alte Bergseeformel**“. Die Tauchtiefe wurde rechnerisch vergrößert und die Dekotiefe vermindert. Seit der Veröffentlichung des ZH-L12-Systems von Prof. Bühlmann weiß man, dass die Gewebe am Berg weniger Inertgasüberdruck „vertragen“ und die Dekompression deshalb nicht in verminderter, sondern in vergrößerter Tiefe beginnen muss.

Schon in der „alten Bergseeformel“ steckt die grundlegende Entdeckung, dass am Bergsee mit einer vergrößerten („fiktiven“) Tauchtiefe gerechnet werden kann.

Ansatzpunkt für eine „erneuerte Bergseeformel“ ist das „**lineare Rechenmodell von Bühlmann**“. Daraus kann direkt abgeleitet werden, dass die Tauchtiefe um 10 % vermindert werden muss, wenn der Luftdruck um 10 % abnimmt. Grundlegender Unterschied zur „alten Formel“ ist die Erkenntnis, dass Dekotiefen nicht vermindert werden dürfen.

Mit dem Nitroxtauchen sind wieder die Bühlmantabellen zu Ehren gekommen. Sie bilden die Grundlage für die „Methode des Tiefenzuschlages“. Diese Methode stellt eine Alternative dar, welche im Gegensatz zu üblichen Tabellen auch den Aufstieg zum Bergsee berücksichtigt.

In der vorliegenden Arbeit werden die Berechnungen mit einem einfachen, gut dokumentierten Rechenprogramm durchgeführt. Die Werte der Bergseetabelle von Bühlmann können sehr genau nachgerechnet werden. Es werden Dekozeiten in unterschiedlichen Bergseehöhen und Dekozeiten mit äquivalenten Tiefenzuschlägen berechnet und miteinander verglichen.

Dabei zeigt sich, dass die Methode des Tiefenzuschlages gleiche Ergebnisse liefert wie die Bühlmantabelle und dass die Methode auch unter Wasser angewendet werden kann.

Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag zur Sicherheit erbracht werden. Es wird gezeigt, dass ein schneller Aufstieg zum Bergsee (Einsatztaucher) und eine kurze Wartezeit bis zum Beginn des Tauchganges einen überaus großen Einfluss auf die Verlängerung der Dekompression hat.

Das ZH-L12-System von Prof. Bühlmann bildet die Grundlage für ein „dynamisches Zuschlags- und Abzugsmodell“, welches sowohl die Bergseehöhe als auch den Einsatz von Nitrox berücksichtigt.



## 2 Gewebe / Kompartimente (Wiederholung aus „Dekompression“)

Das Blut bildet das Transportmittel für die Atemgase von der Lunge zu den Körpergeweben. **Je stärker die Durchblutung und je größer der Fettgehalt, desto mehr „Inertgas“** können die Gewebe des menschlichen Körpers aufnehmen oder auch wieder abgeben. (Stickstoff und Edelgase werden als „inerte Gase“ bezeichnet, weil sie sich bei der Atmung nicht verändern). Die individuellen Unterschiede der Gewebe sind groß, deshalb wurde mit Modellgeweben = Kompartimenten experimentiert und gerechnet. Jedem Kompartiment kann man wiederum eine Gruppe menschlicher Gewebe zuordnen. Jedes Kompartiment muss als eigenes System betrachtet werden. Auch das Blut selbst gilt als eigenes System.

Bei einem Tauchgang werden alle Kompartimente einer Druckänderung ausgesetzt. Wenn die Druckänderung lange genug dauert, so werden alle Kompartimente (unterschiedlich schnell) mit Inertgasen und Sauerstoff auf denselben neuen Druck aufgeladen.

Im Zustand der Sättigung ist der Partialdruck der Inertgase in der Atemluft gleich groß wie der Druck der gelösten Inertgase in einem Gewebe.

### 2.1 Die Halbwertszeit von Kompartimenten

#### 2.1.1 Beispiel für Entsättigung und Halbwertszeit

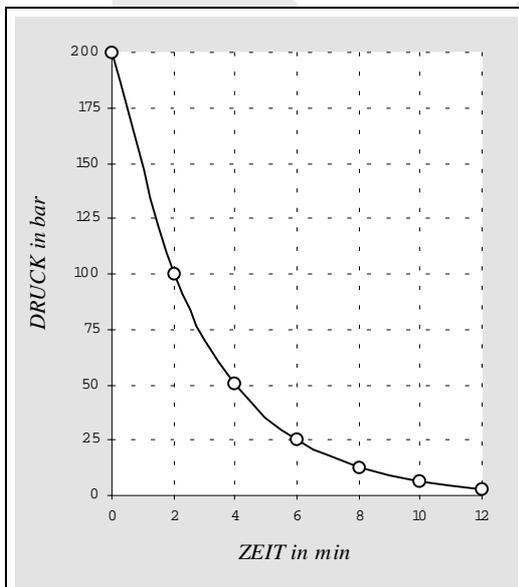


Diagramm 1: Anpassung an den Umgebungsdruck

Wir messen den Druck einer vollen Tauchflasche und drehen das zweite Ventil ein bestimmtes Maß auf. Wir beobachten, dass der Druck innerhalb von 2 min von 200 bar auf 100 bar fällt (halber Druck). Nach weiteren 2 min fällt er auf 50 bar, nach weiteren 2 min auf 25 bar usw. Die Druckabnahme wird immer langsamer. Nach 10 min entweicht immer noch ein bisschen Luft.

Unsere Tauchflasche hat bei dieser Ventilstellung die Eigenschaft eines Kompartiments mit der Halbwertszeit für Luft von  $T = 2 \text{ min}$ .

In der ersten Periode der Halbwertszeit (2 min) sinkt der Druck auf die Hälfte seines Anfangswertes, in der zweiten auf die Hälfte des verbliebenen Wertes usw., bis nach ca. 6 Perioden (12 min) der Umgebungsdruck annähernd erreicht worden ist.



Der Flaschendruck wird mit Ablauf einer Periode der Halbwertszeit jeweils „halbiert“.

Umgekehrt könnte man sich in der Flasche ein Vakuum vorstellen. Sobald das Ventil geöffnet wird, strömt die Luft mit der gleichen Gesetzmäßigkeit in die Flasche. In 2 min steigt der Druck in der Flasche auf den halben Umgebungsdruck (Luftdruck). **Die Differenz zwischen Innen- und Außendruck wird innerhalb von 2 min jeweils halbiert.** Der Innendruck gleicht sich an den Außendruck an.

## 2.1.2 Beispiel für Sättigung

Ein Kompartiment mit einer Halbwertszeit für Luft von  $T = 4 \text{ min}$  wird von der Oberfläche auf 40 m Tiefe gebracht. Der **Anfangsdruck** an der Oberfläche beträgt 1 bar, der neue **Umgebungsdruck** in 40 m beträgt 5 bar. Die **Druckdifferenz** beträgt daher 4 bar.

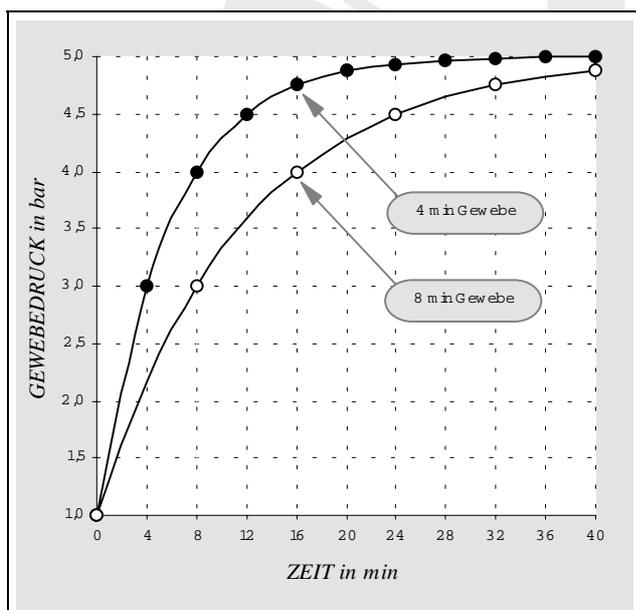


Diagramm 2: Aufladung des 4- und 8 min Gewebes

Der Gasdruck im 4 min Kompartiment steigt innerhalb von  $T = 4 \text{ min}$  von 1 bar auf 3 bar. Dadurch halbiert sich die Druckdifferenz auf 2 bar. Innerhalb der nächsten 4 min wird die Druckdifferenz wieder halbiert usw. Nach  $6 T = 24 \text{ min}$  wurde die Druckdifferenz 6 mal halbiert, so dass 98 % des neuen Gasdrucks erreicht worden sind.

Wie die zweite Linie zeigt, benötigt das halb so schnelle 8 min Kompartiment dazu die doppelte Zeit.

Im Diagramm sind nur 2 „schnelle“ Gewebe mit kurzen Halbwertszeiten dargestellt. Der menschliche Körper besteht jedoch auch aus wesentlich „langsameren“ Geweben.

Nur die Gesamtheit aller Gewebe ermöglicht die Beurteilung, wie weit die Sättigung während eines Tauchganges fortgeschritten ist.

Der Sättigungszustand der Gewebe ist für nachfolgende Tauchgänge von Bedeutung. Tauchta-bellen geben daher einen **Gewebecode (Wiederholungsgruppe)** an.



### 3 ZH-L12-System von Prof. Bühlmann

Das ZH-L12-System ist ein vollständiges Rechenmodell für Tauchcomputer und die Berechnung von Bühlmann tabellen. Das „Perfusionsmodell“ (Modell für die Durchblutung) und die Herleitung der „Sättigungsgleichung“ wurden in verschiedenen Tauchzeitschriften ausführlich beschrieben (Quellennachweis [1], [3]).

- Die „Gewebe gleichung“ von **Bühlmann** beschreibt die Druckabhängigkeit der Gewebe.
- die „Gleichung für Sättigung und Entsättigung“, die schon **Haldane** verwendete, bildet die Grundlage für die Auf- und Entladung von Geweben mit Inertgasen. Sie beschreibt, wie sich der Druck des gelösten Gases in einem Gewebe verändert.

Es dürfen nur barometrische oder nur Inertgasdrücke eingesetzt werden.  
 Es kann immer nur ein einzelnes Kompartiment untersucht werden.

Die Drücke wurden vom Verfasser zunächst mit einem veränderten Index bezeichnet, damit sie bequemer angeschrieben und gelesen werden können:

$$p_t = p_0 + (p_U - p_0) \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t \cdot \ln(2)}{T}} \right)$$

.... oder etwas vereinfacht

$$p_t = p_0 + (p_U - p_0) \cdot \left( 1 - 2^{\frac{-t}{T}} \right)$$

**Bitte keine Angst! Niemand muss sich solche Formeln merken!**

**Sie dienen nur zur Ableitung eines Rechenwegs!**

Version 01/02

In dieser Gleichung bedeutet:

$p_t$	Druck im Gewebe am Ende der Tauchzeit t
$p_0$	Anfangsdruck (entspricht dem Luftdruck an der Oberfläche)
$p_U$	Umgebungsdruck in der Tauchtiefe
$p_U - p_0 = \Delta p$	Die Druckdifferenz (Delta p) entspricht der Tauchtiefe: $\Delta p = \frac{\text{Tiefe}}{10}$ Faustformel
$t$	Tauchzeit
$T$	Halbwertszeit des untersuchten Kompartiments



### 3.1 Grafische Lösung der Sättigungsgleichung

$\frac{t}{T}$  Anzahl von Perioden der Halbwertszeit, also eine „relative“ Tauchzeit.

$1 - 2^{-\frac{t}{T}}$  wird als **Anpassungsfaktor** „ $F$ “ bezeichnet. Er beschreibt die Krümmung der „Sättigungskurve“ bei der Druckanpassung eines Gewebes

Dieser „Anpassungsfaktor“ gibt an, wie weit die „relative“ **Druckänderung** in Abhängigkeit von der **Periodenzahl** ansteigt.

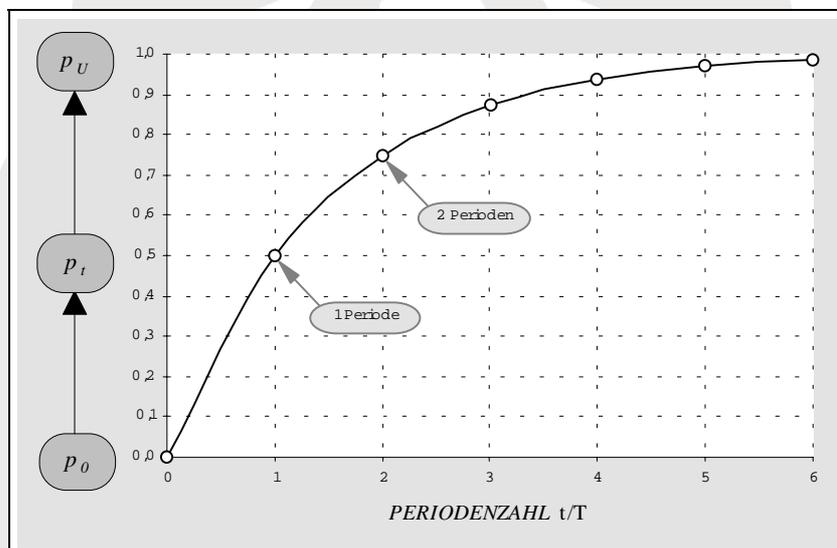


Diagramm 3: Verlauf des Anpassungsfaktors

#### Die Kennlinie zeigt den Verlauf des Anpassungsfaktors:

Der Anpassungsfaktor steigt ausgehend von „0“ nach 6 Perioden annähernd auf „1“ an. Er beschreibt damit ausgehend vom Anfangsdruck  $p_0$  die Anpassung des Gewebedrucks  $p_t$  an den Umgebungsdruck  $p_U$ .

Der „Anpassungsfaktor“ beträgt nach 1 Periode  $F = 0,50$  und nach 2 Perioden  $F = 0,75$  usw.

Die „Sättigungsgleichung“ kann somit einfacher angegeben werden:

**Gewebedruck = Anfangsdruck + Druckdifferenz · Anpassungsfaktor**

$$p_t = p_0 + (p_U - p_0) \cdot F$$



### 3.2 Beispiel für die Aufladung eines Gewebes

Tauchtiefe = 30 m  $p_v = 4 \text{ bar}$

Tauchzeit:  $t = 27 \text{ min}$

Meeresniveau:  $p_0 = 1 \text{ bar}$

- **Der Druck des 12,5 min Gewebes steigt an:**

Gewebe:  $T = 12,5 \text{ min}$

Periodenzahl:  $\frac{t}{T} = \frac{27 \text{ min}}{12,5 \text{ min}} = 2,16$

Anpassungsfaktor aus der nachfolgenden Kennlinie:  $F = 0,776$

Gewebedruck:  $p_t = p_0 + (p_v - p_0) \cdot F = 1 \text{ bar} + (4 \text{ bar} - 1 \text{ bar}) \cdot 0,776 = 3,33 \text{ bar}$

Der Gewebedruck des 12,5 min Gewebes ist in 27 min von 1 bar auf 3,33 bar angestiegen.

- **Der Druck des langsameren 27 min Gewebes steigt nicht so weit an:**

Gewebe:  $T = 27 \text{ min}$

Periodenzahl:  $\frac{t}{T} = \frac{27 \text{ min}}{27 \text{ min}} = 1$

Anpassungsfaktor aus der nachfolgenden Kennlinie:  $F = 0,5$

Gewebedruck:  $p_t = p_0 + (p_v - p_0) \cdot F = 1 \text{ bar} + (4 \text{ bar} - 1 \text{ bar}) \cdot 0,5 = 2,5 \text{ bar}$

Wie zu erwarten, ist der Gewebedruck innerhalb der Halbwertszeit nur um die halbe Druckdifferenz angestiegen.

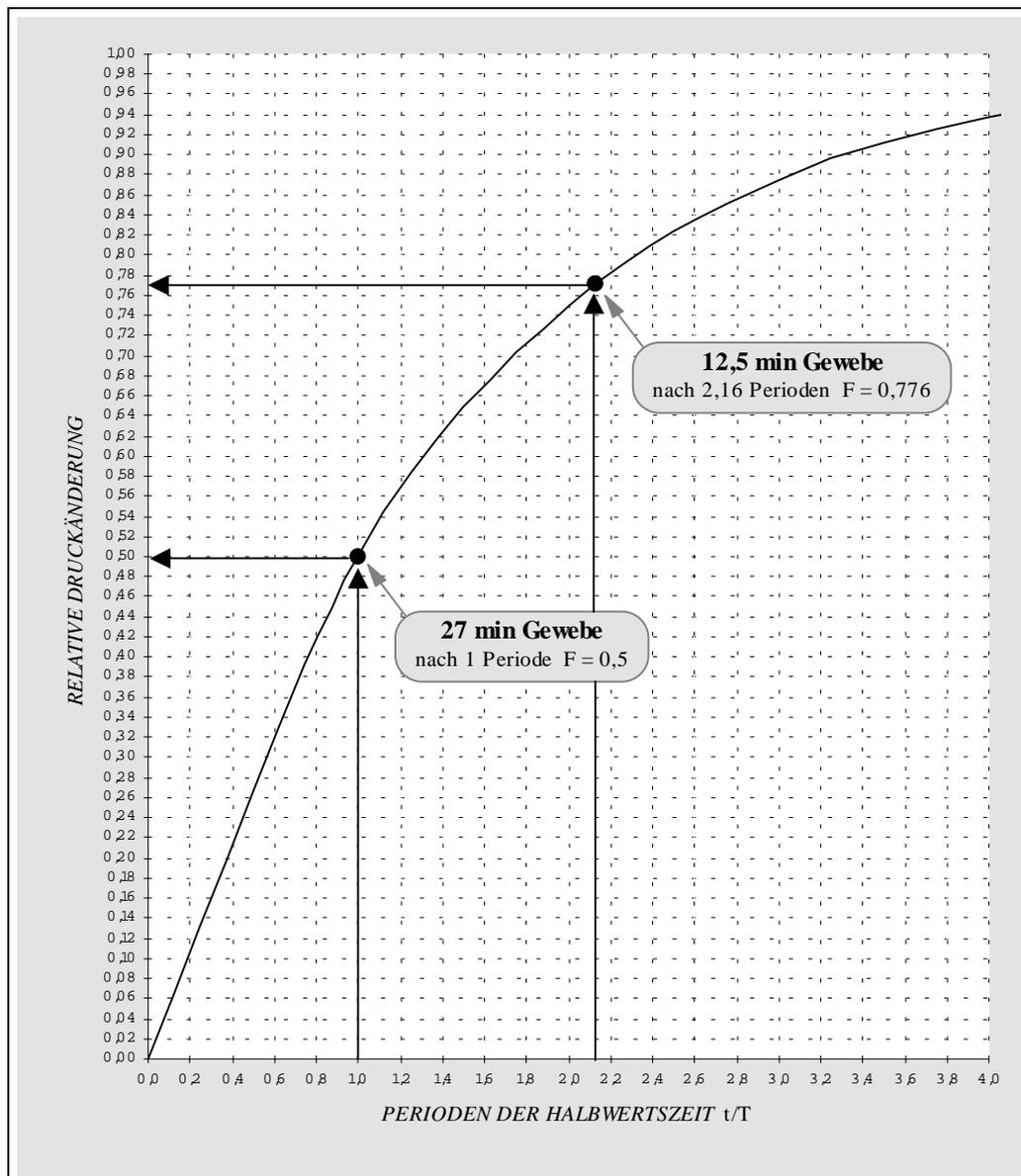


Diagramm 4: Anpassungsfaktor "F"

Die Anpassungsfaktoren kann man entweder berechnen oder wie vorhin von der Kennlinie ablesen.

- Für das 12,5 min Gewebe beträgt die „relative“ Tauchzeit 2,16 Perioden.
- Für das 27 min Gewebe hat sie nur eine Periode lang gedauert.

Da für Anfangs- und Umgebungsdruck barometrische Drücke eingesetzt wurden, ist auch der berechnete Gewebedruck ein barometrischer Druck. Der Inertgasdruck des Gewebes ist jedoch ein Partialdruck und entspricht dem Inertgasanteil der Luft von 79 %.



### 3.3 Rechnerische Lösung

Zum Vergleich soll der Rechenweg für das 12,5 min Gewebe gezeigt werden:

$$p_t = p_0 + (p_U - p_0) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t \cdot \ln(2)}{T}} \right)$$

$$p_t = 1 \text{ bar} + (4 \text{ bar} - 1 \text{ bar}) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{12,5 \text{ min} \cdot \ln(2)}{12,5 \text{ min}}} \right) = 3,33 \text{ bar}$$

Für das 27 min Gewebe gilt:

$$p_t = 1 \text{ bar} + (4 \text{ bar} - 1 \text{ bar}) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{27 \text{ min} \cdot \ln(2)}{27 \text{ min}}} \right) = 2,5 \text{ bar}$$

Damit die Berechnung übersichtlich bleibt, wurde der Druck des gesättigten Wasserdampfes in der Lunge des Tauchers vernachlässigt. In 30 m Tiefe ist sein Einfluss weniger als 2 %.

### 3.4 Die Gewebe des ZH-L12-Systems

Das ZH-L12-System ist ein lineares Rechenmodell. Es verwendet 16 Kompartimente mit Halbwertszeiten von 4 min bis 635 min und 12 Koeffizientenpaare.

Alle 16 Kompartimente werden gleichzeitig einer Druckänderung ausgesetzt. Der Lösungsdruck der Atemgase in den einzelnen Geweben steigt je nach Halbwertszeit unterschiedlich weit an.

Im folgendem Diagramm sieht man den Anstieg des Lösungsdruckes von 7 Geweben während eines Tauchgangs von 40 min in einer Tiefe von 40 m.

Der Anfangsdruck an der Oberfläche beträgt:  $p_0 = 1 \text{ bar}$

Der Umgebungsdruck in einer Tauchtiefe von 40m beträgt:  $p_U = 5 \text{ bar}$

Die Druckdifferenz beträgt daher:  $\Delta p = p_U - p_0 = 5 \text{ bar} - 1 \text{ bar} = 4 \text{ bar}$

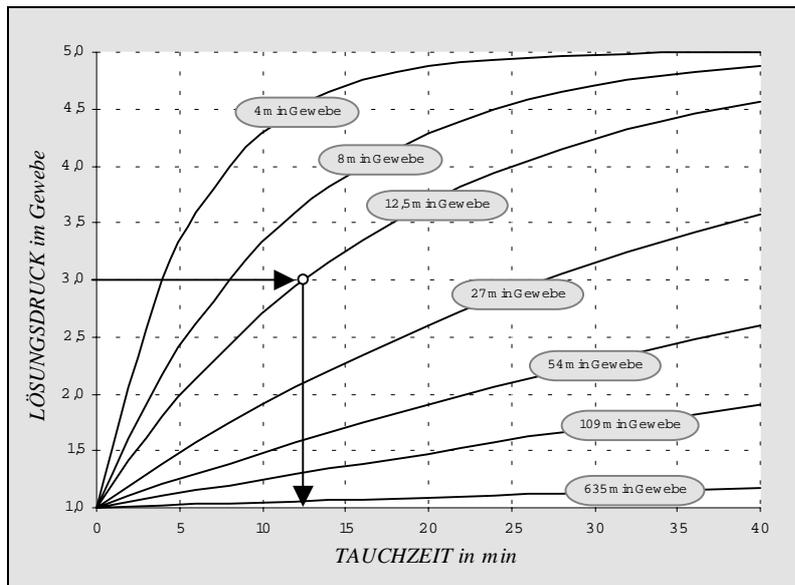


Diagramm 5: Aufladung von sieben verschiedenen schnellen Geweben

Oben sieht man den Sättigungsverlauf des schnellsten 4 min Gewebes, ganz unten den des langsamsten 635 min Gewebes.

Man findet die jeweilige Halbwertszeit (12,5 min), wenn man die Zeit bis zum Erreichen von 3 bar (Anfangsdruck 1 bar plus halbe Druckdifferenz) abliest.

Die Entladung der einzelnen Kompartimente entspricht einer neuerlichen Druckänderung und erfolgt nach derselben Gesetzmäßigkeit. Anfangsdruck für die Entladung ist der während des Tauchgangs erreichte Gewebedruck. Der

neue Umgebungsdruck ist der Oberflächenluftdruck (oder der Druck in der Dekostufe). Die Druckdifferenz ist daher beim Abstieg positiv, beim Aufstieg negativ. Beim Abstieg steigt der Gewebedruck an, beim Aufstieg geht er wieder zurück.

Der Gewebedruck (Druck der gelösten Gase im Gewebe) gleicht sich immer an den Umgebungsdruck an.

**„DIE GEWEBE PASSEN SICH AN“**

### 3.5 Druckabhängigkeit der Gewebe

Prof. Bühlmann ermittelte durch Versuche zu jeder Halbwertszeit die Koeffizienten „a“ und „b“. Mit ihnen berechnet man, welchen **Umgebungsdruck**  $p_{tol}$  ein Gewebe ohne Blasenbildung aushält (toleriert), wenn es auf den **Inertgasdruck**  $p_I$  aufgeladen worden ist.

**Gewebegleichung von Bühlmann:**

$$p_{tol} = (p_I - a) \cdot b$$



In dieser Gleichung bedeutet:

$p_{tol}$	der vom jeweiligen Gewebe tolerierte ( <b>barometrische</b> ) Umgebungsdruck. Blasenbildung erfolgt erst, wenn dieser Druck unterschritten wird
$p_I$	der ( <b>partielle</b> ) Inertgasdruck = Lösungsdruck im Gewebe
$a, b$	Koeffizientenpaar für eines von 16 Geweben mit der zugehörigen Halbwertszeit von $T = 4$ bis 635 min.

### Beispiel:

Welchen Umgebungsdruck toleriert das 8 min Gewebe, wenn es auf einen Inertgasdruck von 3 bar aufgeladen wurde?

$$p_I = 3 \text{ bar}$$

$$a = 1,45 \text{ bar}$$

$$b = 0,8$$

$$p_{tol} = (p_I - a) \cdot b = (3 \text{ bar} - 1,45 \text{ bar}) \cdot 0,8 = 1,24 \text{ bar}$$

Das 8 min Gewebe toleriert den Umgebungsdruck in 2,4 m Tiefe. Es muss daher in der nächst größeren Stufe von 3 m so lange dekomprimiert werden, bis es den Luftdruck toleriert.

Das Diagramm 6 zeigt dieselben 7 Gewebe wie vorher, links das langsamste (635 min), rechts das schnellste (4 min).

Nach oben wird der **tolerierte Umgebungsdruck** aufgetragen.

Die Einteilung entspricht dem Druck in den Dekostufen.

2,2 bar entspricht einer Tiefe von 12 m, 1 bar entspricht der Meeresoberfläche und 0,7 bar entspricht einer Bergseehöhe von 3000 m.

Während des Tauchgangs sind die einzelnen Gewebe auf **unterschiedliche Inertgasdrücke** aufgeladen worden, wobei die schnellsten Gewebe die höchsten Drücke erreicht haben. Diese **Partialdrücke** werden nach rechts aufgetragen.

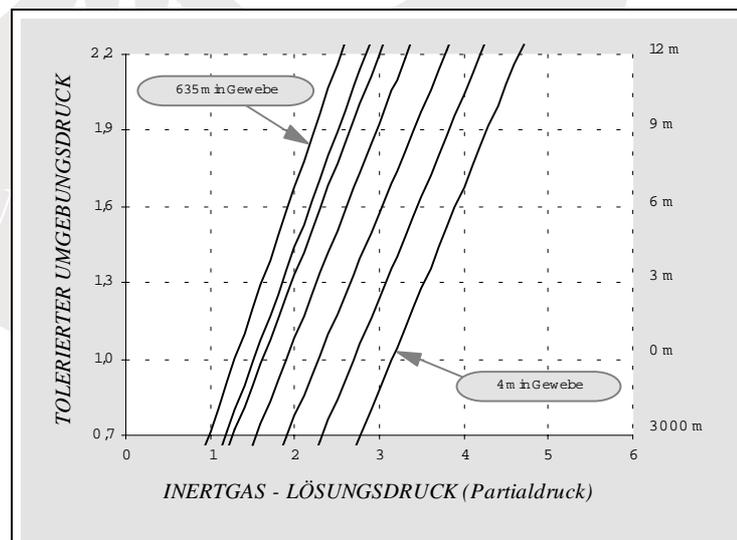


Diagramm 6: Verhalten verschiedener Gewebe



Die Kennlinien beschreiben, welchen Umgebungsdruck ein Gewebe toleriert (ohne Blasenbildung aushalten kann), wenn es mit Inertgasen aufgeladen wurde.

- (A) Nehmen wir an, das 4 min Gewebe sei während eines Tauchgangs auf 4,5 bar aufgeladen worden. Man sieht im folgendem Diagramm, dass es den Druck von ca. 2,1 bar in einer Tiefe zwischen 9 und 12 m toleriert.

*Der Taucher darf auf 12 m aufsteigen (wenn auch alle anderen Gewebe den Druck in 12 m tolerieren).*

Wenn eines der 16 Gewebe den Umgebungsdruck einer Dekostufe noch nicht toleriert, muss tiefer gewartet werden, bis sein Inertgasdruck weit genug abgesunken ist.

- (B) Auf Meeresebene, bei einem Umgebungsdruck von 1 bar verträgt das 4 min Gewebe einen Inertgasdruck von 3,15 bar. Wenn das Gewebe auf 3,15 bar aufgeladen wurde, darf es somit ohne Dekopausen zur Oberfläche gebracht werden, weil es den Luftdruck von 1 bar (an der Meeresoberfläche) toleriert.

*Der Tauchgang hat das Ende der Nullzeit erreicht.*

- (C) In **3000 m** Höhe ist der Umgebungsdruck auf 0,7 bar abgesunken und das Gewebe verträgt kaum noch 2,8 bar. Wenn das 4 min Gewebe auf 3,15 bar aufgeladen war, toleriert es den Luftdruck nicht mehr. Am Bergsee muss es dekomprimiert werden, bis sein Druck auf 2,8 bar gesunken ist.

*Der Tauchgang, der auf Meeresebene noch ein Nullzeittauchgang war, wird durch den verminderten Luftdruck am Bergsee zu einem Dekotauchgang.*

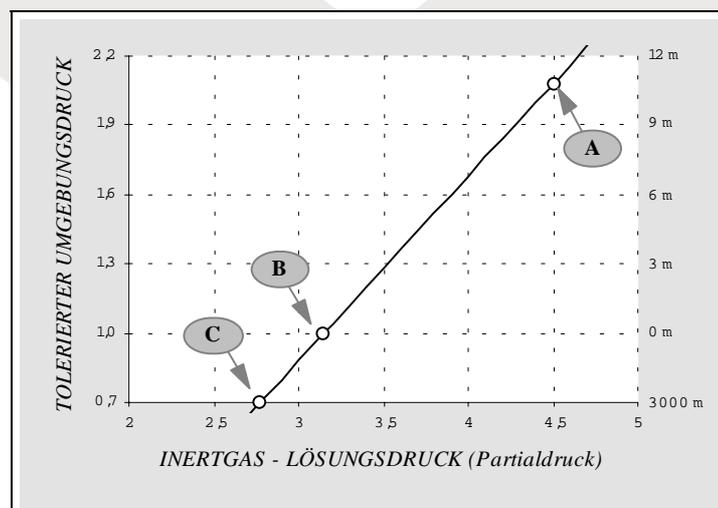


Diagramm 7: Verhalten des 4 min Gewebes



**Langsame Gewebe** vertragen weniger Inertgasüberdruck als schnelle. Ihre Aufladung erfolgt jedoch viel langsamer, so dass geringere Gewebedrücke erreicht werden. **Geringe Drücke können nur in geringer Tiefe dekomprimiert werden.** Die Gasteilchen diffundieren erst dann in die Umgebung zurück, wenn der Umgebungsdruck kleiner ist als der Gewebedruck.

Je höher der Umgebungsdruck und je schneller ein Gewebe, desto mehr Inertgasüberdruck verträgt es. Oder anders gesagt, je geringer der Umgebungsdruck und je langsamer ein Gewebe, desto geringer ist sein höchstzulässiger Inertgasüberdruck.

Je höher der Tauchplatz liegt, desto tiefer muss mit der Dekompression begonnen werden. Die Nullzeiten werden kürzer, weil die Gewebe, um einen gefahrlosen Aufstieg zu gewährleisten, nur mehr auf einen geringeren Inertgasdruck aufgeladen werden dürfen.

### 3.6 Grafische Lösung der Dekompression

- Welchen Umgebungsdruck toleriert das 12,5 min Gewebe nach einem Tauchgang von 30 m / 27 min?

Das 12,5 min Gewebe wurde, wie bereits berechnet, innerhalb von  $t = 27 \text{ min}$  auf einen barometrischen Druck von  $p_t = 3,33 \text{ bar}$  aufgeladen.

Dabei erreichte das 12,5 min Gewebe einen Inertgasdruck von:

$$p_i = 0,79 \cdot p_t = 0,79 \cdot 3,33 \text{ bar} = 2,63 \text{ bar}$$

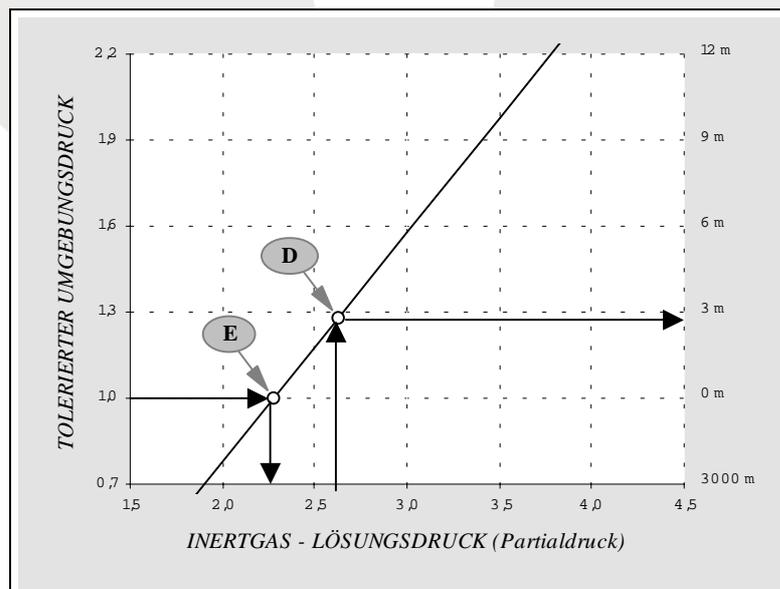


Diagramm 8: Verhalten des 12,5 min Gewebes



- **Es wird nun untersucht, wie weit das 12,5 min Gewebe aufsteigen darf:**

Gewebedaten:  $T = 12,5 \text{ min}$ ,  $a = 1,03 \text{ bar}$ ,  $b = 0,8$

$$p_{\text{tol}} = (p_t - a) \cdot b = (2,63 \text{ bar} - 1,03 \text{ bar}) \cdot 0,8 = 1,28 \text{ bar}$$

- (D) Dieser barometrische Druck herrscht in 2,8 m Tiefe. Das Gewebe darf daher aus 30 m auf die (nächst größere) Dekotiefe von 3 m gebracht werden.

Dieser Wert kann natürlich auch aus dem Gewebediagramm abgelesen werden: (siehe Diagramm 8)

- **Jetzt wird berechnet, wie groß der höchstzulässige Gewebedruck sein darf, wenn das Gewebe den Luftdruck an der Meeresoberfläche (1 bar) tolerieren soll.**

Zuerst muss die Gewebegleichung umgeformt werden. Der höchst zulässige Inertgasdruck (Maximalwert = M-value) des 12,5 min Gewebes an der Oberfläche beträgt:

$$p_t = \frac{p_{\text{tol}}}{b} + a = \frac{1 \text{ bar}}{0,8} + 1,03 = 2,28 \text{ bar}$$

- (E) Diesen Wert finden wir auch im Gewebediagramm: (siehe Diagramm 8)

Der Inertgasdruck in unserem 12,5 min Gewebe muss in einer Tiefe von 3 m von 2,63 auf 2,28 bar dekomprimiert werden.

- **Jetzt muss auch noch die Sättigungsgleichung umgeformt werden, denn die gesuchte Dekozeit steckt im Anpassungsfaktor:**

$$F = \left( \frac{p_t - p_0}{p_U - p_0} \right)$$

Version 01/02

Es dürfen **nur gleichartige Drücke** (z.B. Inertgasdrücke) eingesetzt werden:

Druck am Anfang der Dekompression ist der Gewebedruck:  $p_0 = 2,63 \text{ bar}$

Druck am Ende der Dekompression ist der zulässige Inertgasdruck:  $p_t = 2,28 \text{ bar}$

Inertgasdruck in der Dekotiefe von 3m:  $p_U = 1,3 \text{ bar} \cdot 0,79 = 1,03 \text{ bar}$

$$F = \frac{p_t - p_0}{p_U - p_0} = \frac{2,28 \text{ bar} - 2,63 \text{ bar}}{1,03 \text{ bar} - 2,63 \text{ bar}} = 0,219$$

Der Anpassungsfaktor des 12,5 min Gewebes beträgt 0,219.



Aus dem „vergrößerten Ausschnitt“ der Kennlinie für den Anpassungsfaktor finden wir für  $F = 0,219$  die erforderliche (relative) Dekozeit von 0,35 Perioden.

0,35 Perioden dauern für das 12,5 min Gewebe:

$$t = 0,35 \cdot 12,5\text{min} \approx 4,4\text{min}$$

Auf ganze Minuten gerundet beträgt die Dekozeit 5 min.

Das 12,5 min Gewebe muss 5 min lang in 3 m dekomprimiert werden, damit es den Umgebungsdruck von 1 bar an der Oberfläche toleriert (vergl. Bühlmantabelle 1986 des SUSV).

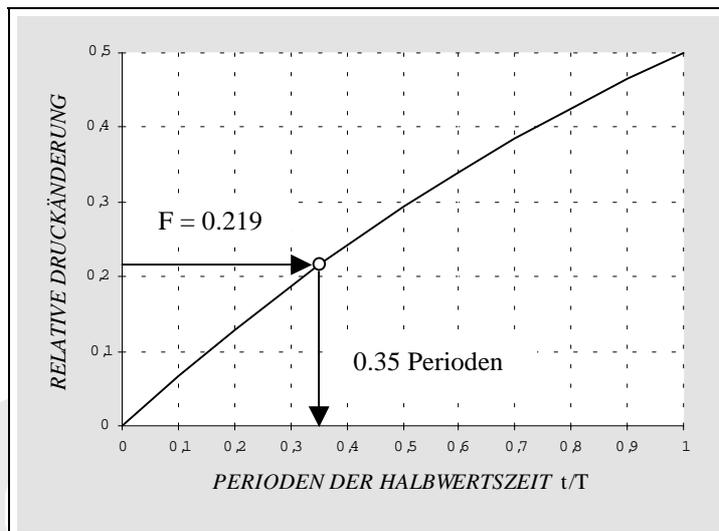


Diagramm 9: Anpassungsfaktor (vergrößerter Ausschnitt)

### 3.7 Rechnerische Lösung der Dekompression (für Interessierte)

Mit den vorliegenden Angaben kann **durch Umformung der Sättigungsgleichung** die Dekozeit unmittelbar berechnet werden:

Druck am Anfang der Dekompression ist der Gewebedruck:  $p_0 = 2,63 \text{ bar}$

Druck am Ende der Dekozeit ist der höchstzulässige Inertgasdruck:  $p_t = 2,28 \text{ bar}$

Der Inertgasdruck in der Dekotiefe von 3m beträgt:  $p_U = 1,3 \text{ bar} \cdot 0,79 = 1,03 \text{ bar}$

Die Dekozeit für das 12,5 min Gewebe in 3 m Tiefe beträgt somit:

$$t = -\frac{T}{\ln(2)} \cdot \ln \frac{p_U - p_t}{p_U - p_0} = -\frac{12,5\text{min}}{\ln(2)} \cdot \ln \frac{1,03\text{bar} - 2,28\text{bar}}{1,03\text{bar} - 2,63\text{bar}} = 4,45\text{min} \approx 5\text{min}$$

Am Bergsee sinkt der Umgebungsdruck, so dass untersucht werden muss, ob nicht der verminderte zulässige Inertgasdruck eines Gewebes schon die nächst größere Dekotiefe erfordert.

Diese Untersuchung muss für alle Gewebe erfolgen. Das Gewebe, welches die größte Dekotiefe und/oder die längste Dekozeit erfordert, wird als **Leitgewebe** bezeichnet. Das Leitgewebe oder das langsamste Gewebe, welches noch dekomprimiert werden muss, liefert den Gewebecode. Die 16 Gewebe werden nach ihrer Halbwertszeit mit fortlaufenden Buchstaben von A bis P gekennzeichnet (4 min = A, 8min = B usw.).

**Achtung:** Die Berechnung kann bei geringen Tiefen komplexe (unbrauchbare) Werte liefern, denn eine Nullzeit länger als unendlich ist nicht möglich.



## 4 Nullzeit eines Gewebes

Sie hängt ab von der **Halbwertszeit**  $T$  des Gewebes mit den zugehörigen Koeffizienten  $a$  und  $b$ , von der **Tauchtiefe** (Druckdifferenz) und der **Höhe des Tauchplatzes** (Luftdruck an der Oberfläche).

### Beispiel:

Gewebedaten:  $T = 4 \text{ min}$ ,  $a = 1,9 \text{ bar}$ ,  $b = 0,8$

Umgebungsdruck in 33 m Tiefe:  $p_U = 4,3 \text{ bar}$

Luftdruck auf Meeresniveau:  $p_0 = 1 \text{ bar}$

Tauchzeit:  $t = 13,6 \text{ min}$

Druckdifferenz (Delta p):  $\Delta p = p_U - p_0 = 4,3 \text{ bar} - 1 \text{ bar} = 3,3 \text{ bar}$

Berechnung der Druckdifferenz mit der Faustformel:

$$\Delta p = \frac{\text{Tiefe}}{10} = \frac{33}{10} = 3,3 \text{ bar}$$

Anstatt der graphischen Arbeit mit dem abgeleiteten Anpassungsfaktor „F“ soll nur die weniger aufwendige Berechnung mit der Sättigungsgleichung gezeigt werden. Für die Druckdifferenz wurde anstatt  $p_U - p_0$  die Faustformel  $\Delta p = \frac{\text{Tiefe}}{10}$  verwendet, weil sich damit schneller arbeiten lässt:

- Auf welchen (barometrischen) Druck wird das 4 min Gewebe aufgeladen?

$$p_t = p_0 + \Delta p \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t \cdot \ln(2)}{T}} \right)$$

$$p_t = 1 \text{ bar} + 3,3 \text{ bar} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-13,6 \text{ min} \cdot \ln(2)}{4 \text{ min}}} \right) = 3,99 \text{ bar}$$

- Wie weit ist der Inertgasdruck des Gewebes angestiegen?

$$p_I = 0,79 \cdot p_t = 0,79 \cdot 3,99 \text{ bar} = 3,15 \text{ bar} \text{ (Partialdruck)}$$



- Welchen Umgebungsdruck toleriert dieses Gewebe?

$$p_{tol} = (p_t - a) \cdot b$$

$$p_{tol} = (3,15 \text{ bar} - 1,9 \text{ bar}) \cdot 0,8 = 1 \text{ bar} \text{ (barometrischer Druck)}$$

Der tolerierte Druck von 1 bar herrscht an der Meeresoberfläche. Das Gewebe darf daher ohne Dekostufen an die Oberfläche gebracht werden. Somit beträgt die Nullzeit des 4 min Gewebes in 33 m Tiefe 13,6 min (vergl. Bühlmantabelle 1986 des SUSV).

Das Gewebe wird in seiner Nullzeit so weit aufgeladen, dass an der Oberfläche der höchstzulässige Inertgasüberdruck (M-value) erreicht wird.

## 4.1 Wie berechnet man die Nullzeit ?

Das Gewebe muss den Luftdruck an der Oberfläche tolerieren:

Auf Meeresniveau beträgt:  $p_{tol} = 1 \text{ bar}$

Formt man die **Gewebeleichung von Bühlmann** um, so erhält man den höchstzulässigen Inertgasdruck, den man am Ende der Nullzeit erreicht:

$$p_t = \frac{p_{tol}}{b} + a = \frac{1 \text{ bar}}{0,8} + 1,9 \text{ bar} = 3,15 \text{ bar} \quad \text{siehe (B) im Diagramm 7}$$

Dieser Inertgasdruck am Ende der Nullzeit  $t$  entspricht dem barometrischen Umgebungsdruck von:

$$p_t = \frac{p_t}{0,79} = \frac{3,15 \text{ bar}}{0,79} = 3,99 \text{ bar}$$

Der Druck von 3,99 bar herrscht in 29,9 m Tiefe. Aus dieser Tiefe könnte das 4 min Gewebe jederzeit **ohne Dekopausen zur Oberfläche** gebracht werden („ewige“ Nullzeit).

Formt man nun die Sättigungsgleichung um, so kann man die Nullzeit für eine bestimmte Tauchtiefe berechnen. Wir wählen wieder das 4 min Gewebe in 33 m Tiefe. Es müssen gleichartige (z.B. barometrische) Drücke eingesetzt werden.



$$t = \frac{T}{\ln(2)} \cdot \ln \frac{\Delta p}{\Delta p + p_0 - p_t}$$

$$t = \frac{4 \text{ min}}{\ln(2)} \cdot \ln \frac{3,3 \text{ bar}}{3,3 \text{ bar} + 1 \text{ bar} - 3,99 \text{ bar}} = 13,6 \text{ min}$$

Nach einer Tauchzeit von 13,6 min in einer Tiefe von 33 m kann das 4 min Gewebe noch an die Oberfläche gebracht werden, ohne dass Blasenbildung erfolgt. Bei einem langsamen Aufstieg von 33 auf 29,9 m erfolgt noch eine weitere Aufsättigung des Gewebes. Erst beim weiteren Aufstieg zur Oberfläche beginnt die Entsättigung.

Der Aufstieg von 33 m auf 29,9 m könnte mit höchstmöglicher Geschwindigkeit (sprunghaft) erfolgen, weil erst ab dieser Tiefe die Entsättigung beginnt.

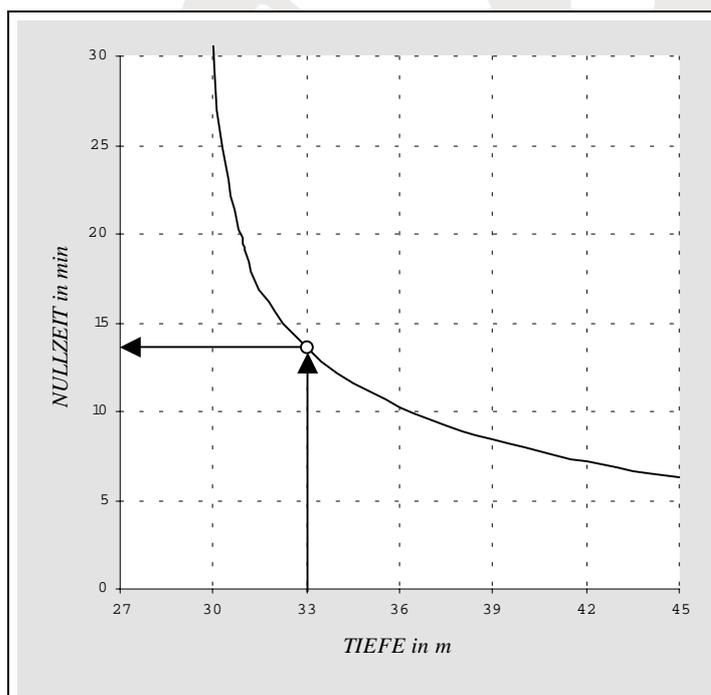


Diagramm 10: Nullzeit des 4 min Gewebes

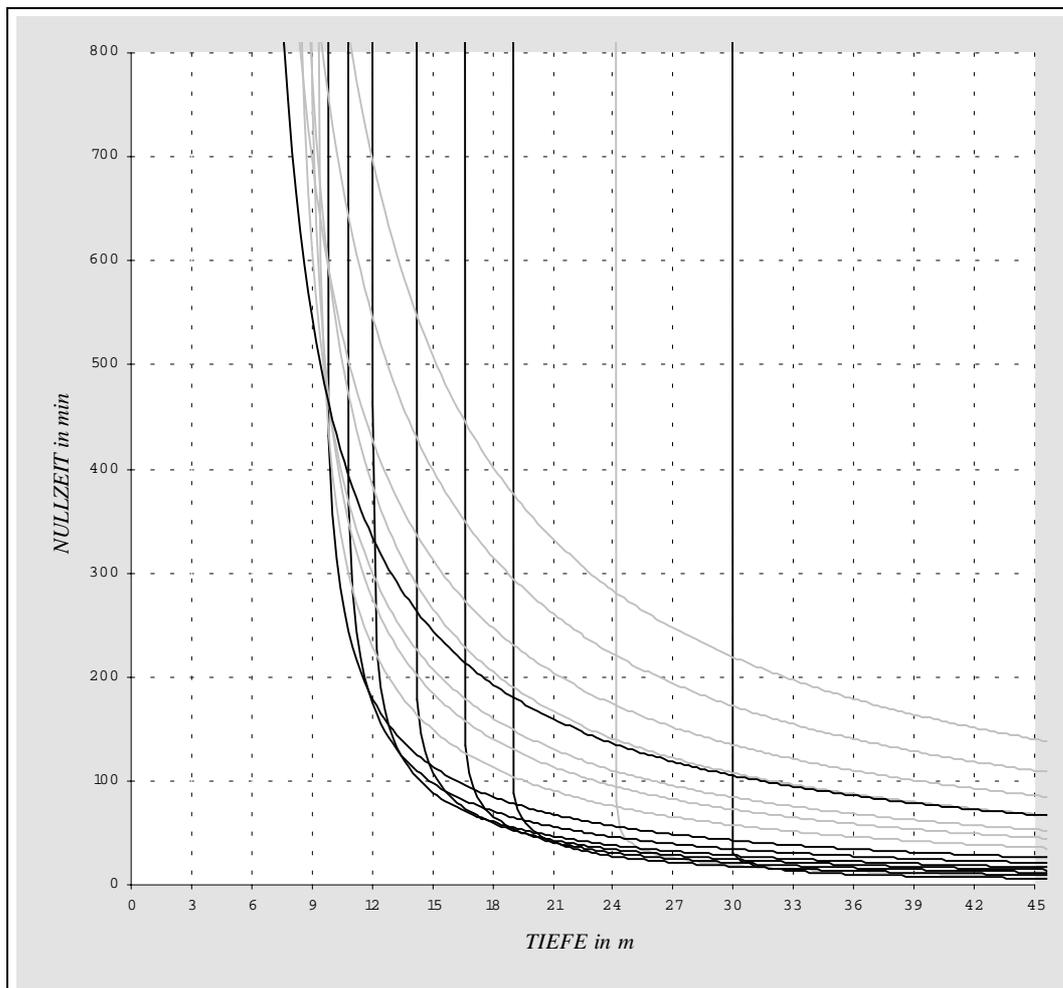
Das Diagramm zeigt, wie sich die Nullzeit des 4 min Gewebes mit der Tauchtiefe verändert. Je größer die Tiefe, desto kürzer wird die Nullzeit. Bei geringer werdenden Tiefen wird sie immer länger, bei 29,9 m geht sie gegen  $\infty$  (unendlich).

Jedes Gewebe hat eine andere Nullzeit, so dass man alle 16 Gewebe gleichzeitig und nebeneinander untersuchen muss.

Das Gewebe mit der kürzesten Nullzeit (Leitgewebe) bestimmt die Nullzeit für den Taucher.

Das folgende Diagramm zeigt den Nullzeitverlauf aller 16 Gewebe. Unten rechts beginnt das schnellste 4 min Gewebe mit seiner „ewigen Nullzeit“ bei 29,9 m, nach oben folgen die langsameren. Die **schwarz** dargestellten „Leitgewebe“, das sind die Gewebe mit der jeweils kürzesten Nullzeit, wechseln sich ab.

Daneben gibt es die **grau** gezeichneten Gewebe, welche für die Nullzeit nicht in Erscheinung treten.



**Diagramm 11:** "Umhüllende" der Nullzeitkurven (aller 16 Gewebe)

In großen Tiefen bestimmen die schnellen Gewebe die Nullzeit, in geringeren Tiefen die langsameren. Die Leitgewebe mit der jeweils kürzesten Nullzeit bilden nach unten die **Grenzlinie der Gesamtnullzeit** (umhüllende Kurve).

Die gezeigten Kurven gelten für einen Luftdruck von 1 bar und entsprechen dem Meeresniveau (0 m Seehöhe).

Im folgenden Diagramm (vergrößerter Ausschnitt) kann man noch einmal das Abwechseln der Leitgewebe genauer betrachten. In großen Tiefen bestimmt das 4 min Gewebe die Nullzeit - von 32 m bis 21 m das 12,5 min Gewebe - bei 21 m übernimmt das 18 min Gewebe - bei 19,5 m das 27 min Gewebe - bei 17 m das 38,3 min Gewebe. Das 8 min Gewebe tritt beim Luftdruck von 1 bar überhaupt nicht in Erscheinung.



Da das 8 min Gewebe die Nullzeit nicht beeinflusst, entsteht in dem Kurvenverlauf der „Grenzlinie“ ein zunächst unnatürlich erscheinender „Knick“ bei ca. 32 m. Würde ein weiteres

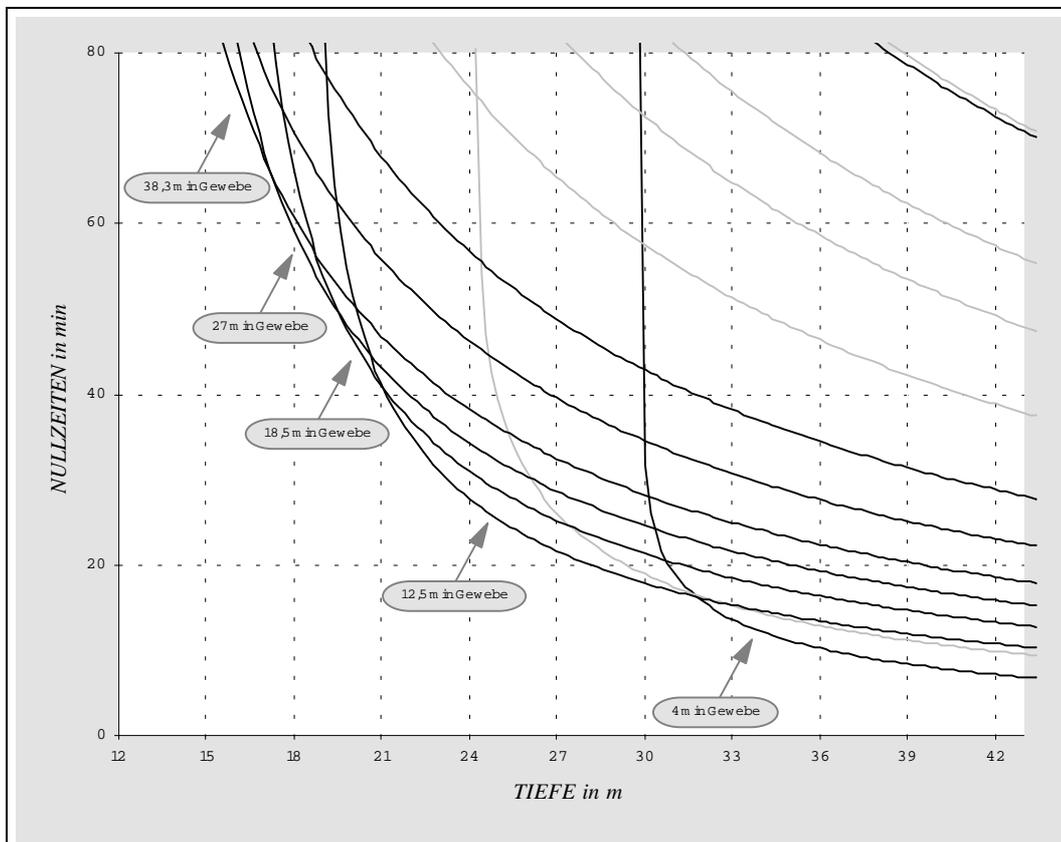


Diagramm 12: "Umhüllende" der Nullzeitkurven (16 Gewebe, vergrößerter Ausschnitt)

ausgetestetes Gewebe vorliegen, oder würde man die Koeffizienten ändern (wie für ZH-L16 oder ZH-L8), so würde der Knick verschwinden (Tabellenkosmetik?) Die Koeffizienten wurden in einer anderen Arbeit untersucht und gegenüber gestellt. Die Koeffizienten hängen von der Halbwertszeit des Gewebes ab. Bei den angegebenen Rechenmodellen werden sie durch eine Näherungsgleichung beschrieben.

## 4.2 Nullzeit am Bergsee

In 3000 m Höhe ist der Umgebungsdruck um ca. 30 % auf ungefähr 0,7 bar vermindert. Das 4 min Gewebe darf daher nur auf

$$p_t = \frac{1}{0,79} \cdot \left( \frac{0,7 \text{ bar}}{0,8} + 0,9 \text{ bar} \right) = 3,51 \text{ bar}$$

aufgeladen werden.



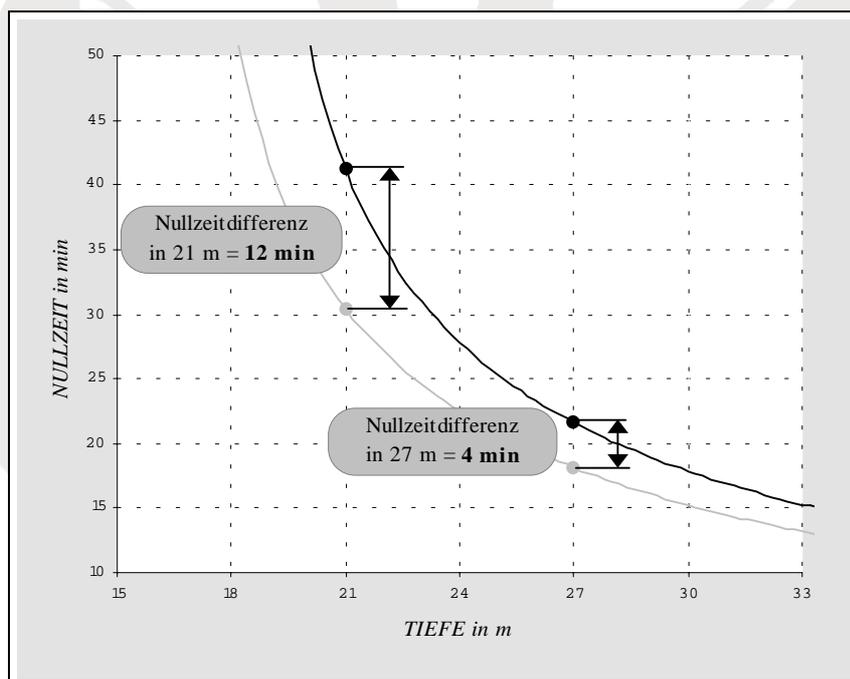
Nach einer Zeit von

$$t = \frac{4 \text{ min}}{\ln(2)} \cdot \ln\left(\frac{3,3 \text{ bar}}{3,3 \text{ bar} + 0,7 \text{ bar} - 3,51 \text{ bar}}\right) = 11 \text{ min}$$

ist dieser Druck erreicht.

Die 33 m-Nullzeit des 4 min Gewebes vermindert sich in 3000 m Seehöhe von 13,6 min auf 11 min.

Im folgenden Diagramm wurde für das 12,5 min Gewebe die Verminderung der Nullzeit dargestellt, wenn der Umgebungsdruck in 3000 m Höhe von 1 bar auf 0,7 bar zurück geht. Die **schwarze** Linie zeigt die **Nullzeit** für Meeresniveau, die **graue** Kurve die Nullzeit für **3000 m Seehöhe**.



**Diagramm 13:** Nullzeitkurven des 12,5 min Gewebes in verschiedenen Seehöhen

Mit steigender Seehöhe verschiebt sich die Kurve zu geringeren Tiefen und geringeren Nullzeiten. Je geringer die Tauchtiefe, desto drastischer ist die Verminderung der Nullzeit.

Die Verminderung der Nullzeit des 12,5 min Gewebes von 0 m auf 3000 m macht in 27 m Tiefe ca. 4 min aus und steigt in 21 m auf 12 min.



### 4.3 Nullzeit und Tiefenzuschlag

- (F) Für 3000 m Seehöhe und eine Tiefe von 20 m finden wir im folgenden Diagramm eine Nullzeit von ca. 35 min.
- (G) Für Meeresniveau finden wir die selbe Nullzeit bei  $20\text{ m} + 10\% = 22\text{ m}$ .
- (H) Für 3000 m Seehöhe und eine Tiefe von 30 m finden wir eine Nullzeit von ca. 15 min.
- (I) Für Meeresniveau finden wir die selbe Nullzeit bei  $30\text{ m} + 10\% = 33\text{ m}$ .

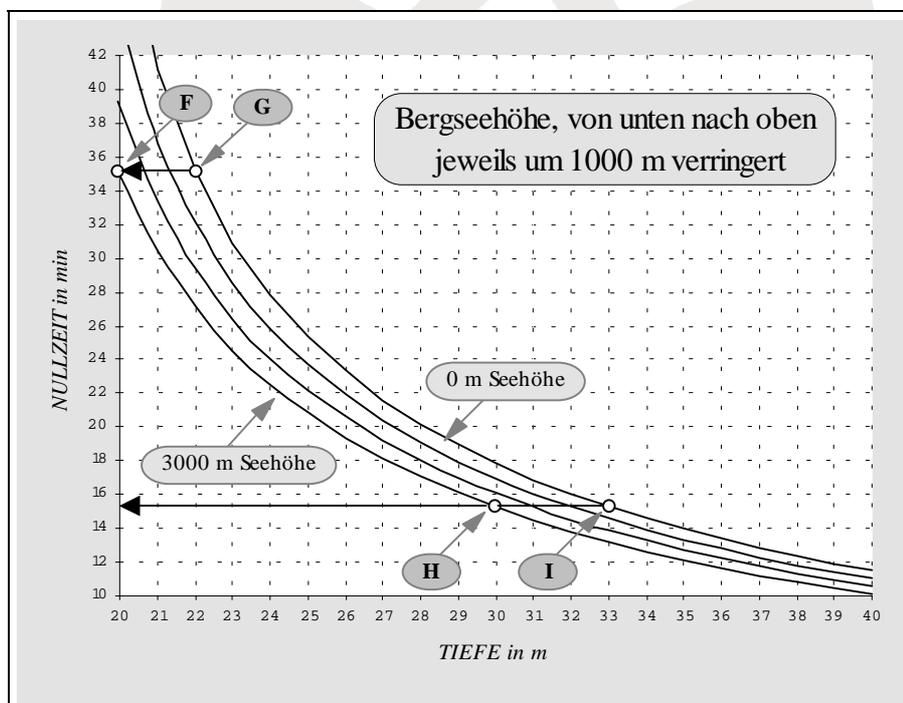


Diagramm 14: Nullzeiten am Bergsee mit Tiefenzuschlag

Es besteht offensichtlich ein Zusammenhang zwischen Tiefe und Bergseehöhe.

Wir können daher mit großer Genauigkeit die Nullzeiten des 12,5 min Gewebes für die Höhe von 3000 m bestimmen:

Wir berechnen einen **prozentuellen Zuschlag (10 %) zur Tauchtiefe** und lesen in der Kennlinie für Meeresniveau die zugehörige Bergsee-Nullzeit des 12,5 min Gewebes ab.



**Beispiel:**

Wie lange dauert die 3000 m Nullzeit des 12,5 min Gewebes in 30 m Tiefe?

30 m + 10 % = 33 m. In der Kennlinie für Meeressniveau finden wir 15 min.

### 4.4 Die Nullzeit hängt vom Luftdruck ab

Die Kennlinien gelten für eine Tiefe von 30 m bei einem Luftdruck von 0,6 bis 1 bar (grob angenähert einer Seehöhe von 4000 m bis 0 m). Die unterste Linie ist das 12,5 min Gewebe. Es bestimmt als Leitgewebe die (kürzeste) Nullzeit in 30 m. Je größer der Umgebungsdruck, desto weiter darf ein Gewebe aufgeladen werden. Die Kennlinien steigen daher mit dem Umgebungsdruck an.

- (J) Wenn das 12,5 min Gewebe auf eine Tiefe von 30 m gebracht wurde, hat es in 18 min den höchstzulässigen Inertgasüberdruck erreicht.
- (K) In 3000 m Höhe darf es weniger belastet werden und erreicht den Druck schon nach 15 min. Die langsameren Gewebe erreichen ihren höchstzulässigen Gewebedruck erst später und haben somit eine längere Nullzeit.

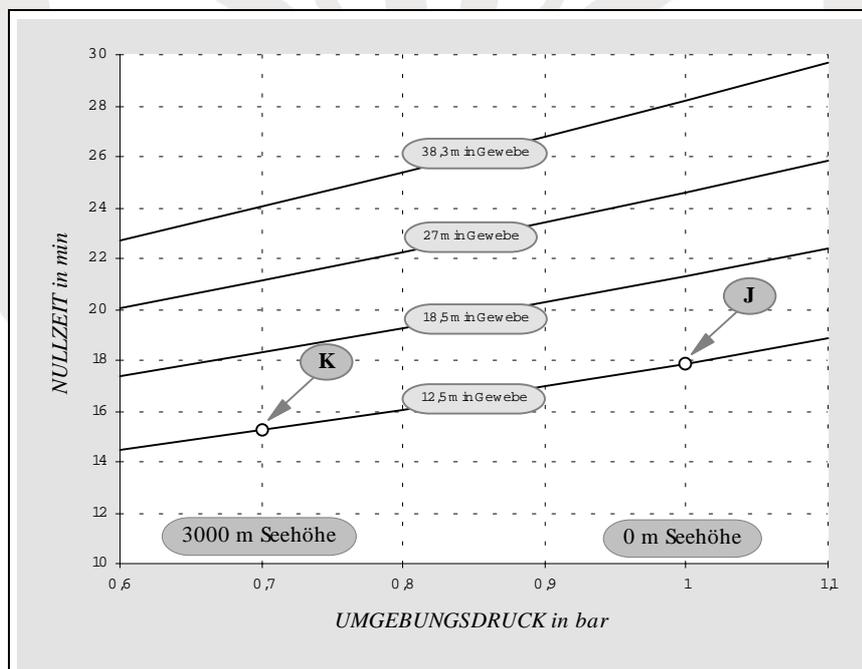


Diagramm 15: 30 m Nullzeit am Bergsee

Die 30 m Nullzeit des 12,5 min Gewebes wird somit in 3000 m Höhe von 18 min auf 15 min verkürzt.



## 4.5 Nullzeit bei Verwendung von Nitrox

„Nitrox“ ist mit Sauerstoff angereicherte Luft. **Je größer der Sauerstoffgehalt**, desto geringer ist der Inertgasanteil des Atemgemisches, desto geringer wird die Aufsättigung der Gewebe mit Inertgasen und **desto länger ist die Nullzeit**. Im folgenden Diagramm wird wieder das 12,5 min Gewebe untersucht:

Die unterste Kennlinie gilt für Luft (= Nitrox 21). Nach oben wird der Sauerstoffanteil jeweils um 3 Teile erhöht, so dass die oberste Kennlinie für Nitrox 36 gilt.

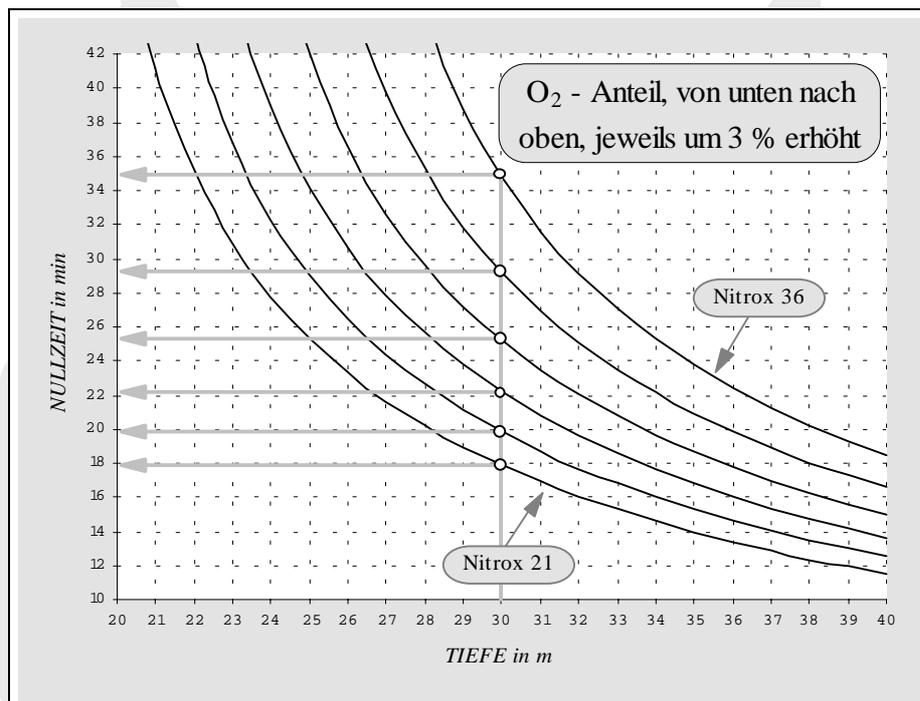


Diagramm 16: "Nitrox" Nullzeiten

Man erkennt die nichtlineare Zunahme der Nullzeit.

In einer Tiefe von 30 m hat das 12,5 min Gewebe eine Nullzeit von 18 min. Wird der Sauerstoffgehalt um 3 Teile erhöht (Nitrox 24) so steigt die Nullzeit um 2 min auf 20 min. Bei Nitrox 27 ist die Nullzeit schon über 22 min. Bei Nitrox 36 hat sie sich fast verdoppelt. Während am Bergsee die Kennlinien mit steigender Seehöhe nach links unten verschoben werden, verschiebt sie der steigende Sauerstoffgehalt wesentlich stärker nach rechts oben.

Die gegenläufige Verschiebung der Kennlinien legt den Schluss nahe, dass die Verminderung der Nullzeit mit steigender Seehöhe durch Erhöhung des Sauerstoffanteils kompensiert werden kann.



Die folgenden Nullzeitkurven wurden für 3000 m Seehöhe berechnet. Die unterste Kennlinie gilt für Nitrox 21, die nach oben folgenden für eine Sauerstoffanreicherung von jeweils 1,8 Teilen.

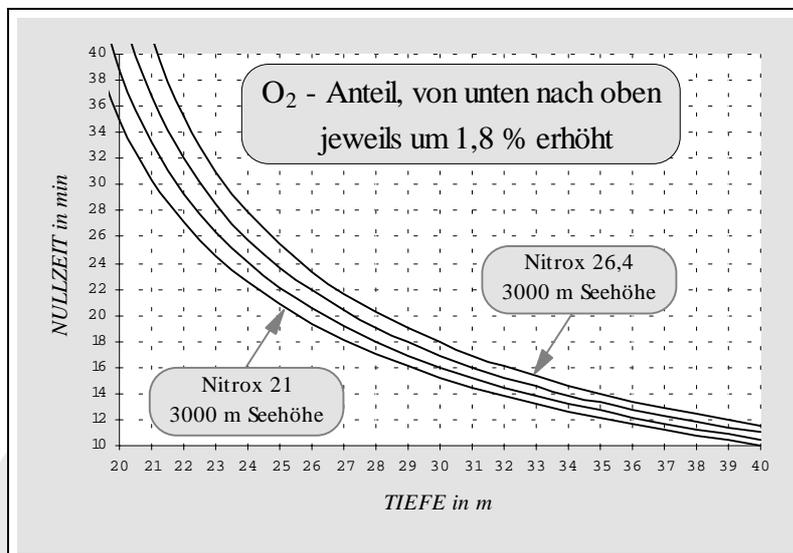


Diagramm 17: 3000 m Nullzeit (verschiedene Mischungen)

Die folgenden Kurven zeigen (als Wiederholung) die Veränderung der Nullzeiten in Höhenstufen von je 1000 m. Die unterste Kennlinie gilt für 3000 m, die nach oben folgenden gelten für eine Verringerung um jeweils 1000 m.

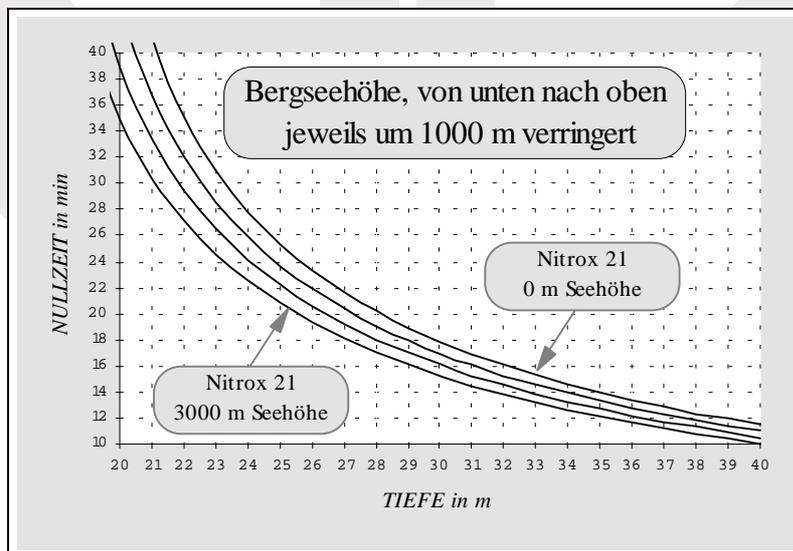


Diagramm 18: Nullzeit am Bergsee (verschiedene Seehöhen)

Beide Kennlinienscharen sind identisch.



- Die Nullzeit steigt, je größer der Sauerstoffanteil wird.
- Die Nullzeit sinkt, je höher der Bergsee liegt.

Wenn der Umgebungsdruck auf der Bergseehöhe vermindert wird, müssen wir den Sauerstoffanteil erhöhen um die gleiche Nullzeit zu erhalten.

Für das 12,5 min Gewebe kann der Höhenzuwachs von je 1000 m durch Sauerstoffanreicherung mit je 1,8 Teilen exakt kompensiert werden.





## 5 Dekotabellen

Zunächst waren für uns die militärischen Tabellen „GERS“ und „US-NAVY“ maßgebend, und keiner wusste so recht, wie er am Achensee in fast 1000 m Höhe austauchen sollte. Die nassen Anzüge in der großen Kälte und die kleinen Tauchflaschen haben unsere Tauchgänge verkürzt und uns wohl alle vor Dekounfällen bewahrt. Am Meer begleitete uns der SOS-Dekometer, dem wir (fast) unbedingt vertrauten. Das Tauchen am Bergsee war von einem mühsamen Rechenaufwand begleitet, so dass wohl alle aufatmeten, als die ersten Bühlmantabellen für verschiedene Bergseehöhen auftauchten.

### 5.1 Der Geltungsbereich einer Tabelle

Zur Zeit werden Tabellen für Meeressniveau oder mit einem gestaffelten Höhenbereich angeboten. Wenn ein Taucher im Höhenbereich 0 – 700 m wohnt und tauchen will, ergeben sich für einen Tauchgang von 30 m / 30 min folgende Grenzfälle für die Dekozeiten

**Tabelle 1:** Grenzfälle für die Dekozeiten

Anfangshöhe in m	Tauchplatzhöhe in m	berechnete Dekozeit in min
0	0	1 + 7 = <b>8</b>
700	700	1 + 8 = <b>9</b>
0	700	1 + 9 = <b>10</b>

Je höher der Tauchplatz, desto länger wird grundsätzlich die Dekozeit.

Da der Aufstieg von 0 m auf 700 m die Dekozeit am meisten vergrößert (25 %), sind „Höhenänderungen“ innerhalb von 12 (24) Stunden nicht zulässig.

Überschneiden sich die Höhenbereiche, weil der Taucher **unter 700m wohnt** und **über 700m tauchen will**, muss er erst recht **12 oder 24 Stunden warten**, bis sich die Mehrheit seiner Gewebe an den verminderten Umgebungsdruck angepasst hat. Über 1500 m sind nur mehr Bühlmantabellen erhältlich.

Es ergibt keinen Sinn, wenn ein Einsatztaucher auf den Berg oder Pass geflogen wird um ein versunkenes Auto zu suchen und erst nach 12 Stunden tauchen darf, weil seine ungeeignete Tabelle „angepasste“ Gewebe verlangt.



Als Höhe des Wohnortes könnte man im Extremfall Meeressniveau einsetzen und den Höhenbereich durch die Tauchplatzhöhe (ISO-Atmosphäre) ersetzen. Nach einem sprunghaften Aufstieg vom Wohnort zum Tauchplatz muss die Wartezeit bis zum Tauchgang realistisch eingeschätzt werden, weil sonst die Dekozeiten überlang werden. Der inspiratorische Druck des gesättigten Wasserdampfes und Fehler des Tiefenmessers wurden schon in den Koeffizienten von 1986 berücksichtigt. Vorläufig gibt es keinerlei Sicherheitszuschläge durch Föhn usw.

Nun läßt sich mit den veröffentlichten Angaben (Quellennachweis [1], [2]) eine Tabelle berechnen, welche den Aufstieg zum Bergsee berücksichtigt. Die SUSV-Bergseetabelle berücksichtigt ebenfalls einen Aufstieg von 701 auf 2500 m.

## 5.2 Berechnung einer einfachen Dekotabelle

1. Die Gewebedaten werden bereitgestellt und der gemeinsame Anfangs-Inertgas-Partialdruck für alle Gewebe durch die Anfangshöhe festgelegt.
2. Berechnung des Umgebungsdruckes in der Tauchtiefe.
3. Berechnung der Aufsättigung der einzelnen Gewebe aufgrund der Tauchzeit. Man erhält den Inertgasdruck der einzelnen Gewebe am Ende der Tauchzeit.
4. Auswahl der tiefsten Stufe, z.B. 12 m.
5. Berechnung des Umgebungsdruckes in dieser Stufe.
6. Berechnung des höchstzulässigen Gewebedruckes für jedes einzelne Gewebe in dieser Stufe.
7. Vergleich, ob einer der Gewebedrucke höher ist als der zulässige.
8. Wenn NEIN, Verminderung der Stufe um 3 m und zurück zu Punkt 5.
9. Wenn JA, Berechnung der Mindestdekozeit für jedes einzelne Gewebe **3 m tiefer**. Man berechnet für jedes Gewebe die Zeit, in welcher der Inertgasdruck soweit zurückgegangen ist, dass der Umgebungsdruck in der gewählten Stufe toleriert wird.
10. Weil die Zeiten für die einzelnen Gewebe unterschiedlich lang sind, wird die längste Zeit (Leitgewebe) ausgewählt und auf ganze Minuten gerundet. Die Dekozeit muss 3m tiefer, (also auf 15m) verbracht werden, wenn einzelne Gewebe den verminderten Druck (in 12m) noch nicht tolerieren.
11. Berechnung der Entsättigung für alle Gewebe auf der Dekostufe. Man erhält die neuen Gewebedrucke am Ende der Dekopause.
12. Dekostufe vermindern und zurück nach Punkt 5 bis Stufe Null erreicht ist.

## 5.3 Programm zur Berechnung von Bergseetabellen

Früher wurden **geringere Bergseehöhen einfach vernachlässigt**. Es gab die Bergseeformel, welche die **Dekompression in zu geringe Tiefen verlagerte**. Die kanadische DCIEM-Tabelle verwendet ein System der Tiefenzuschläge am Bergsee. Die Zuschläge sind sehr groß, weil bei den Dekotiefen wiederum große Abschlüsse gemacht werden. Diese Tabelle verwendet somit



eine Zuschlagsmethode, erkennt aber offensichtlich die Arbeiten Bühlmanns noch nicht an. Die Bergseetabelle von Bühlmann und die Tabelle DECO-92 von Hahn widersprechen sich, obwohl Hahn über 1500 m die Bühlmanntabelle vorschreibt.

Um die Widersprüche in den Tabellen aufklären zu können, wurde vom Verfasser ein Programm zur Berechnung von Bergseetabellen geschrieben, welches auch den Aufstieg zum Bergsee und in weiterer Folge den Einfluss von Nitrox berücksichtigt:

## WIEDERHOLUNGS-BERGSEE-TABELLE entspricht der SUSV – BÜHLMANNTABELLE - 1986

(erstellt in QBASIC berechnet nach dem ZH-L12-SYSTEM von Bühlmann)

Aufstieg zum Bergsee sprunghaft von 701m auf 2500m & 40min Wartezeit, Rechteck-Tauchprofil, Aufstieg mit 10m/min, Fehler Tauchtiefe: die Tauchtiefe ist 0.5m größer als die wahre Tiefe, ISO-Luftdruck, **2500M.BAS** von der Nitroxversion "abgespeckt" am 7-12-2000 Za

DIM t(16), a(16), b(16), pg(16), pzul(16), mdz(16) *Speicherplatz festlegen*

FOR g = 1 TO 16

READ t(g), a(g), b(g) *Gewebedaten einlesen*

NEXT g

nullpunktfehler = .5 *Tiefenmesser 0.5 m*

### Auflistung der Bedingungen für den Tauchgang:

hanfang = 701 *Anfangshöhe*

hberg = 2500 *Bergseehöhe*

wz = 40 *Wartezeit am Bergsee = 40min*

geschwindigkeit = 10 *Aufstiegsgeschwindigkeit = 10 m/min*

pn2 = .79 *Inertgasanteil 79 %*

panfang = 1.013 \* EXP(-hanfang / 8000) *ISO-Anfangsluftdruck*

pberg = 1.013 \* EXP(-hberg / 8000) *ISO-Bergseeluftdruck*

eingabe:

INPUT "(quit)"; antwort\$

IF antwort\$ = "q" THEN END *Bedingung für Ausstieg*

PRINT *Leerzeile*

PRINT hanfang; "m,"; hberg; "m,"; wz; "min,"; geschwindigkeit; "m/min"

*die Bedingungen werden ausgedruckt*

### Eingabe der Daten des Tauchganges:

INPUT "Oberflächenpause in min "; pause *oder "Enter" für neuen Tauchgang*

INPUT "Tauchtiefe in m "; tiefe

INPUT "Tauchzeit in min "; tz

### Begrenzung der Tauchtiefe auf 66m:

IF tiefe > 66 THEN

GOTO eingabe

END IF

tiefe = tiefe + nullpunktfehler *wahre Tiefe um 0.5 m größer*

PRINT "-----"

Version 01/02



**Bedingungen für den Ersttauchgang:**

IF pause = 0 THEN  
FOR g = 1 TO 16  
pg(g) = panfang \* .79  
NEXT g  
END IF

*bei Ersttauchgang ("Enter")  
für alle Gewebe von 1 bis 16  
Sättigung aller Gewebe  
auf Anfangshöhe*

IF pause = 0 THEN  
bergaufstieg:  
pu = pberg \* .79  
zeit = wz  
GOSUB sat  
END IF

*bei Ersttauchgang  
sprunghafter Aufstieg zum  
Bergsee mit Entsättigung  
während der Wartezeit*

**Bedingungen für den Wiederholungstauchgang:**

IF pause > 0 THEN  
pu = pberg \* .79  
zeit = pause  
GOSUB sat  
END IF

*bei Wiederholungstauchgang  
Entsättigung während  
der Oberflächenpause  
in Tauchplatzhöhe*

**Kompressionsphase:**

pu = (pberg + tiefe / 10) \* pn2  
zeit = tz  
GOSUB sat

*Aufsättigung in der  
Tauchtiefe  
während der Tauchzeit*

**Dekompressionsphase:**

stufe = 15  
aufstieg:  
IF tiefe > stufe THEN  
tiefe = tiefe - 1  
pu = (pberg + tiefe / 10) \* pn2  
zeit = 1 / geschwindigkeit  
GOSUB sat  
GOTO aufstieg  
END IF

*Aufstieg annähernd gleichförmig  
in kleinen Schritten von je 1 m  
bis auf 15 m*

*Aufstiegsgeschwindigkeit*

*Berechnung der Entsättigung  
während des Aufstieges auf 15 m*

hier kann der extra tiefe Sicherheitsstopp eingeplant werden

**Schrittweite:**

schritt = 3  
IF stufe < 7 THEN  
schritt = 2  
END IF  
stufe = stufe - schritt  
pstufe = (pberg + stufe / 10)  
zeit = 0

*Dekoschrittweite 3 m  
NUR BÜHLMANN 2500  
NUR BÜHLMANN 2500  
3 m & 2 m Stufen  
nächsthöhere Stufe  
Umgebungsdruck in der Stufe  
Anfangsbedingung für Rundung*



## Berechnung & Ausgabe von Mindestdekozeiten und Gewebedrücken:

```

FOR g = 1 TO 16
    pzul(g) = pstufe / b(g) + a(g)
    IF pg(g) > pzul(g) THEN
        GOSUB dekozeit
    PRINT t(g), mdz(g); "min", pg(g); "bar"

    IF mdz(g) > zeit THEN
        zeit = INT(mdz(g)) + 1
    END IF
END IF
NEXT g
IF zeit > 0 THEN
    PRINT " "; stufe + schritt; "m "; zeit; "min"
END IF
IF stufe = 0 THEN
    IF zeit = 0 THEN
        PRINT "Nullzeit"
    END IF
END IF
IF stufe = 0 THEN
    GOTO eingabe
END IF
pu = (pstufe + schritt / 10) * pn2
GOSUB sat
GOTO aufstieg

```

*maximal zulässiger Gewebedruck in der Stufe*  
*Vergleich mit dem Gewebedruck & Berechnung der Dekozeit*  
*Gewebe-Mindestdekozeiten & Gewebedrücke werden ausgedruckt*  
*Aufrundung der längsten Dekozeit auf ganze Minuten*  
*Deko-Ausgabe*  
*Ausgabe Nullzeit*  
*zurück zur Eingabe für den nächsten Tauchgang*  
*Umgebungsdruck 1 Schritt tiefer*  
*Entsättigung während der Dekozeit*  
*Aufstieg zur nächsten Dekostufe*

## Unterprogramme für Sättigung, Entsättigung und Dekozeit

```

dekozeit:
    pdeko = (pstufe + schritt / 10) * pn2
    mdz(g) = -t(g) / LOG(2) * LOG(1 - (pg(g) - pzul(g)) / (pg(g) - pdeko))
    RETURN
sat:
    FOR g = 1 TO 16
        pg(g) = pg(g) + (pu - pg(g)) * (1 - EXP(-LOG(2) * zeit / t(g)))
    NEXT g
    RETURN

```

*Dekozeit 1 Schritt tiefer*  
*Druck in der Dekotiefe*  
*Sättigung/Entsättigung*

## Halbwertszeiten und Koeffizientensatz von Bühlmann

REM	Halbw.	a	b
DATA	4.00,	1.9,	.8
DATA	8.00,	1.45,	.8
DATA	12.5,	1.03,	.8
DATA	18.5,	.882,	.826
DATA	27.0,	.717,	.845



DATA	38.3,	.575,	.86
DATA	54.3,	.468,	.87
DATA	77.0,	.441,	.903
DATA	109,	.415,	.908
DATA	146,	.416,	.939
DATA	187,	.369,	.946
DATA	239,	.369,	.946
DATA	305,	.255,	.962
DATA	390,	.255,	.962
DATA	498,	.255,	.962
DATA	635,	.255,	.962

Die vorgestellte Version ist vom Original "abgespeckt" worden, damit man sie besser lesen kann. Die Ergebnisse weichen daher um die Rundungsgenauigkeit + - 1min von den in der Folge angegebenen Vergleichswerten ab. Das Original ist eine NITROX- Version, mit der man sämtliche Einflussgrößen, die auf die Dekozeit einwirken, untersuchen kann. Natürlich ist auch das Nitrox-Originalprogramm abrufbereit.

Um zu sehen, wie sich die Dekozeiten verändern, können die verschiedenen Daten überschrieben werden. Auch der inspiratorische Wasserdampfdruck kann vom ISO-Luftdruck abgezogen werden. Man kann auch die Dekotiefe oder die Aufstiegsgeschwindigkeit verändern.....

## 5.4 Überprüfung des Rechenprogramms für Bergseen durch Tabellenvergleich

Tabelle 2: Vergleich in unterschiedlichen Tiefen bei mittleren Zeiten

Tiefe / Zeit		701 – 2500 SUSV-Tabelle				Bergsee - Rechenwerte				Differenz
m	min	9 m	6 m	4 m	2 m	9 m	6 m	4 m	2 m	
12	120				8				8	0
15	80				10				10	0
18	70				19				20	+ 1
21	55			3	17			2	18	0
24	40			2	11			2	12	+ 1
27	30			2	7			2	7	0
30	30		1	4	11		1	4	11	0
33	30	1	3	6	14		3	6	15	0
36	25	1	3	5	12	1	3	4	13	0
39	21		3	4	10	1	3	4	10	+ 1
42	18		3	4	8	1	3	3	9	+ 1
45	18	2	3	4	11	2	3	4	12	+ 1



Die Werte unterscheiden sich durch die Rundungsgenauigkeit. Die Ergebnisse sind marginal „konservativer“, somit sollte auch der Rechenweg derselbe sein.

**Tabelle 3:** Überprüfung der Zeitstufen in unterschiedlichen Tiefen

Tiefe / Zeit		701 – 2500 SUSV-Tabelle				Bergsee - Rechenwerte				Differenz
m	min	9 m	6 m	4 m	2 m	9 m	6 m	4 m	2 m	
21	30				1				1	0
	35				2				2	0
	40				5				5	0
	45				9				9	0
	50			1	13			1	13	0
	55			3	17			2	18	0
	60			5	20			5	21	+ 1
	65			8	22			8	23	+ 1
	70			11	23			10	25	+ 1
42	8				1				1	0
	12			1	4			2	3	0
	15		1	3	5		1	4	4	0
	18		3	4	8	1	3	3	9	+ 1
	21	3	3	5	13	3	3	5	13	0
	24	4	4	7	18	4	4	7	19	+ 1

Auch die Dekovorschriften für unterschiedliche Tauchzeiten in „typischen“ Tiefen von 21 m und 42 m sind annähernd gleich.

Die Ergebnisse des Rechenprogramms stimmen mit den Werten der SUSV Bühlmann Bergseetabelle weitgehend überein.

Aufgrund der annähernd gleichartigen Koeffizienten und der gleichartigen Ergebnisse kann angenommen werden, dass auch der Rechenweg für die Vergleichstabelle prinzipiell gleich ist wie jener der SUSV-Bergseetabelle 1986.

Somit erscheinen Vergleichsrechnungen mit veränderten Tauchtiefen, Dekostufen und geänderten Höhenbereichen zulässig.



## 6 Methode des Tiefenzuschlages

Die Dekompression wird vom **Luftdruck** in Tauchplatzhöhe und von der **Wartezeit** bis zum Beginn des Tauchgangs bestimmt.

### 6.1 ISO-Luftdruck

Zunächst soll der Luftdruck (wie im Programm berücksichtigt) untersucht werden. Ausgehend von 1,013 bar nimmt der Luftdruck mit steigender Seehöhe um 0,1 bar pro 1000 m = 10 % ab.

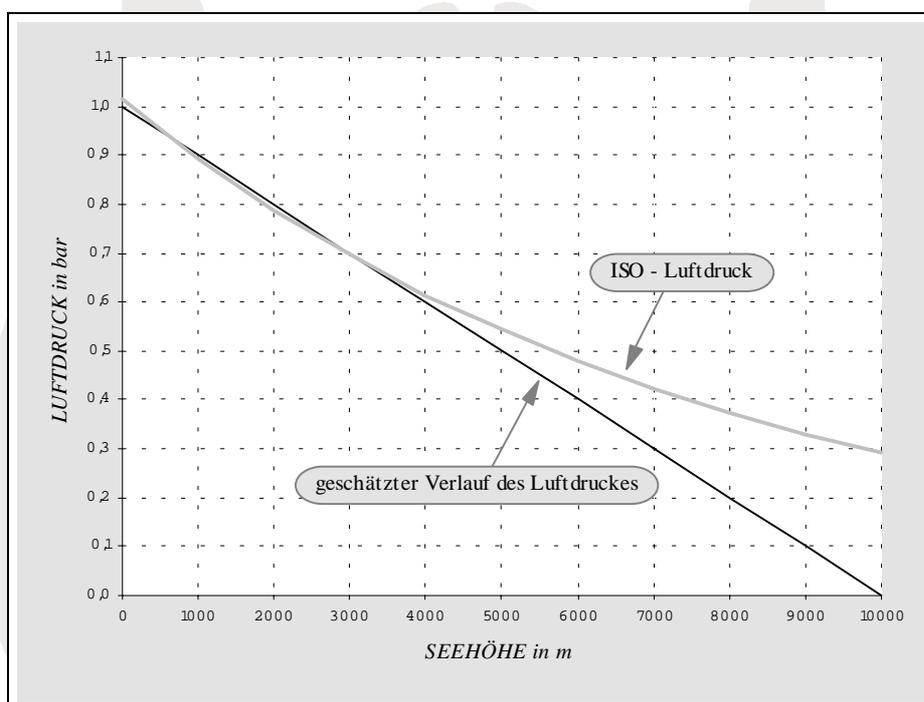


Diagramm 19: Verlauf des Luftdruckes

Der tatsächliche Luftdruck wird zunächst geringfügig kleiner und anschließend größer als der geschätzte. Über 4000 m kann nicht mehr von Linearität gesprochen werden. Für den Luftdruck am Bergsee wurde daher der Druck der ISO-Atmosphäre eingesetzt:

$$p_{\text{berg}} \approx p_0 \cdot e^{\frac{-H}{8000}}$$

In dieser Gleichung bedeutet:

$p_{\text{berg}}$	Luftdruck am Bergsee in bar
$p_0$	Luftdruck auf Meereshöhe (= 1,013 bar ~ 1 bar)
$H$	Höhe des Bergsees in m



Damit kann der tatsächliche Umgebungsdruck in größeren Höhen berechnet werden. Außerdem wurde die Schrittweite der Dekostufen gegenüber der Bühlmann-Bergseetabelle auf 3 m gesetzt. Die größere Schrittweite erfordert eine längere Dekompression, weil sie nicht so nahe an der idealen Dekompressionslinie liegt. Die Aufstiegs geschwindigkeit wurde beibehalten.

Die 3 m Stufen können bei Wellengang und einem Nullpunktfehler des Tiefenmessers besser als 2 m eingehalten werden.

## 6.2 Vergleichsrechnungen

Der Zusammenhang von Tiefenzuschlag und Nullzeit legt nahe, dass ein gleicher Zusammenhang auch mit der Dekozeit besteht.

Zum Vergleich soll ein Tauchgang in verschiedenen Bergseehöhen untersucht werden. Vom sprunghaften Aufstieg, ausgehend von Meeresniveau, bis zum Beginn des eigentlichen Tauchganges, vergeht eine realistische Mindestwartezeit von 40 min

**Tabelle 4:** Vergleich der Dekozeiten in verschiedenen Seehöhen

TG am Bergsee				TG auf Meeresniveau					Differenz
Höhe in m	Gewebe	Deko		Zuschlag in %	Rechtiefe in m	Deko			
		6 m	3 m			9 m	6 m	3 m	
0	38,3	1	7		30		1	7	0
1000	54,3	1	10	+ 10	33		3	10	+ 2
2000	54,3	2	14	+ 20	36	1	4	15	+ 4
3000	77	3	22	+ 30	39	2	6	18	+ 1
3200	77	3	23	+ 32	39,6	3	6	18	+ 1
3400	77	3	25	+ 34	40,2	3	7	19	+ 1
3600	305	3	26	+ 36	40,8	3	8	20	+ 2
3800	305	3	28	+ 38	41,4	4	8	21	+ 2
4000	305	4	60	+ 40	42	4	9	22	- 18

Die **linke Tabelle** zeigt die berechnete Dekovorschrift für einen 30 m / 30 min Tauchgang in verschiedenen Höhen.



Ab 3600 m fällt auf, dass die langsamen Kompartimente (305 min Gewebe) weniger Inertgasdruck vertragen und dekomprimiert werden müssen.

Das 77 min Kompartiment muss ab 3000 m dekomprimiert werden. Ab 3600 m müssen die wesentlich langsameren Gelenke (305 min Kompartiment) dekomprimiert werden. Ab 4000 m müssen bereits die Knochen (390 min Kompartiment) dekomprimiert werden. Man erkennt dies an den extrem langen Dekozeiten in geringer Tiefe.

Die **rechte Tabelle** zeigt denselben Tauchgang für Meeresniveau mit Tiefenzuschlägen von 10 % pro 1000 m Höhenzuwachs. Vergleicht man die Werte, so erkennt man, dass man zu geringfügig „konservativeren“ Dekovorschriften kommt, wenn man eine Null-Meter- Meerestabelle verwendet und pro 1000 m Höhe 10 % zur Tauchtiefe schlägt.

Der Tiefenzuschlag berücksichtigt sowohl die Bergseehöhe als auch den Aufstieg aus Meeresniveau, wenn nach einem sehr schnellen Aufstieg zum Tauchplatz eine Mindestwartezeit von 40 min eingehalten wird.

Im Bereich 0 – 3800 m sind bei Anwendung des Tiefenzuschlages die Dekozeiten zunächst durchwegs geringfügig konservativer als jene der Bergseetabelle.

Der Anteil an langsamen Kompartimenten, die dekomprimiert werden müssen, steigt ab 3600 m kräftig an.

Die Dekompression der langsamen Kompartimente wird in größere Tiefen verlagert, **ein Umstand, der grundsätzlich der Vermeidung von Mikrobläschen dient**. Ab 3200 m sind es schon 3 min, welche in eine Tiefe von 9 m verschoben werden. Die Dekompression der langsamsten Kompartimente dauert jedoch in vergrößerter Tiefe länger, so dass sie nicht mehr gesichert erscheint. Es muss eine realistische Höhengrenze eingezogen werden.

Als sichere Höhengrenze erscheinen 3000 m, wie sie bereits von Prof. Wienke in seinen Sicherheitsregeln empfohlen wurden.

Bei angepassten Geweben (in der folgenden Tabelle) ergibt sich eine Verminderung der Dekozeit. Es genügt eine Tiefenzuschlag von exakt 5 % pro 1000 m:



**Tabelle 5:** Angepasste Gewebe (Tiefenzuschlag 5 % pro 1000 m)

Höhe in m	Gewebe	TG am Bergsee		Zuschlag in %	Rechentiefe in m	TG auf Meeresniveau			Differenz
		Deko 6 m	Deko 3 m			Deko 9 m	Deko 6 m	Deko 3 m	
0	38,3	1	7		30		1	7	0
1000	38,3	1	9	+ 5	31,5		2	8	0
2000	54,3	2	11	+ 10	33		3	10	0
3000	54,3	3	13	+ 15	34,5		4	12	0
3200	54,3	3	14	+ 16	34,8		4	13	0
3400	54,3	3	15	+ 17	35,1		4	14	0
3600	54,3	3	15	+ 18	35,4		5	13	0
3800	54,3	3	16	+ 19	35,7		5	14	0
4000	54,3	3	16	+ 20	36	1	4	15	+ 1

### DIE ÜBEREINSTIMMUNG IST PERFEKT

Für angepasste Gewebe erscheint eine Meerestabelle sogar bis 4000 m verwendbar, wenn man pro 1000 m Höhenzuwachs 5 % zur Tauchtiefe addiert.

Will man Tauchgänge in einem Bergsee durchführen, so muss man den überaus großen Einfluss langsamer Gewebe berücksichtigen.

Wiederholungstauchgänge erhöhen die Restsättigung der langsamsten Gewebe so weit, dass bei großen Bergseehöhen auch nach einer langen Oberflächenpause nur ein einziger Folgetauchgang zulässig erscheint.

Da das Programm nicht nur für Tauchgänge am Bergsee, sondern auch für Wiederholungstauchgänge geeignet ist, kann jeder Leser den Anstieg der Drücke langsamster Gewebe selbst mitverfolgen.

Hiermit soll gezeigt werden, dass es nicht gleichgültig ist, ob ein Gewebe bereits an den Luftdruck des Bergsees angepasst ist oder nicht. Es soll auch gezeigt werden, dass die **kritischen langsamen Gewebe sehr lange Zeiten zur Anpassung benötigen.**



In diesem Zusammenhang erscheint es erforderlich, die Vorschriften der jeweiligen Tabellenautoren über die Anwendung des Höhenbereiches einer Bergseetabelle genau zu kennen und ernst zu nehmen.

### 6.3 Anwendung des Tiefenzuschlages

Wenn keine passende Bühlmann-Bergseetabelle zur Verfügung steht und nach einem sehr schnellen Aufstieg eine Mindestwartezeit von 40 min eingehalten wird, erscheint die Methode des Tiefenzuschlages bis zu einer Bergseehöhe von 3000 m sicher. Es muss dabei eine geringfügig verlängerte Dekompression in Kauf genommen werden.

Da die Zusammenhänge allgemein gelten, wie schon bei der Nullzeit gezeigt wurde, kann der Tiefenzuschlag auch auf alle Bühlmann Tabellen angewendet werden:

Die 700 m Tabelle hat schon einen Zuschlag von 7 %, die 2500 m Tabelle hat schon einen Zuschlag von 25 % gegenüber einer Meerestabelle. Um von der 700 m Tabelle auf die 2500 m Tabelle zu kommen muss man die Differenz 25 % - 7 % = 18 % zur Tiefe zuschlagen. (Auf den „ungünstigeren nächstgrößeren Wert“ gerundet rechnet man einfacher mit Zuschlägen von 20 %). Diese Rechnung geht während des „extra tiefen Sicherheitsstopps“ auch im Kopf und unter Wasser. Ein direkter Tabellenvergleich ist wegen der unterschiedlichen Dekotiefen nicht durchführbar, wohl aber eine Berechnung mit dem Rechenprogramm.

Der Tiefenzuschlag wurde bei einem 30 m / 30 min Tauchgang mit einer Wartezeit von 40 min in Höhen von 700 m & 2500 m untersucht

**Tabelle 6:** Vergleich von Tiefenzuschlägen

Anfangshöhe in m	Bergseehöhe in m	Methode entspricht	Tiefe in m	Deko			Differenz
				9 m	6 m	3 m	
0	700	700 m Tabelle	30		1	9	
0	0	Meerestabelle + 7 %	30 + 7 % = 32,1		2	9	+ 1
0	2500	2500 m Tabelle	30		2	18	
0	0	Meerestabelle + 25 %	30 + 25 % = 37,5	2	5	16	+ 3
700	700	700 m Tabelle + 18 %	30 + 18 % = 35,4	1	5	15	+ 1



- ➔ Wird eine 0 m Meerestabelle in 700 m verwendet (Zuschlag + 7 %), so verlängert sich die Dekozeit um 1 min.
- ➔ Wird eine 0 m Meerestabelle in 2500 m verwendet (Zuschlag + 25 %), so verlängert sich die Dekozeit um 3 min.
- ➔ Verwendet man die 700 m Tabelle in 2500 m (Zuschlag + 18 %), so verlängert sich die Dekozeit um 1 min.

Die mit dem Tiefenzuschlag ermittelten Werte sind somit in allen Fällen geringfügig konservativer als die berechneten Werte.

Sie zeigen deutlich, dass der Tiefenzuschlag auf Tabellen mit unterschiedlichen Höhenbereichen angewendet werden kann und die Dekompression sicher erscheint.

Bezogen auf die Gesamtdekozeit erscheint eine Verlängerung der Dekozeit um 1 bis 3 min zumutbar.

## 6.4 Anwendung des Tiefenzuschlags im Grenzbereich

Die Fahrt vom Tal zum Bergsee in 1000 m dauert 10 min. Die Wartezeit vom Erreichen der Bergseehöhe bis zum Beginn des Tauchganges ist länger als 40 min und der Tiefenzuschlag daher anwendbar. Zum Vergleich wird die Bühlmantabelle für 0 – 700 m verwendet. Die Tiefe wurde so gewählt, dass ein möglichst kleiner Zuschlag an die Grenzen der Zuschlagsmethode gehen soll.

### Beispiel:

Höhe des Tauchplatzes:	1000 m
Höhe des Wohnortes:	500 m (keinen Einfluss auf die Zuschlagsmethode)
Beabsichtigter Tauchgang:	29 m, 30 min
Höhendifferenz zur Tabelle:	$1000\text{ m} - 700\text{ m} = 300\text{ m}$
Tiefenzuschlag beträgt daher 3 %:	$29\text{ m} \times 0,03 = 0,9\text{ m}$
Rechentiefe = Tiefe + Zuschlag:	$29\text{ m} + 0,9\text{ m} = 29,9\text{ m} \rightarrow$ Tabellenwert 30 m
Dekompression nach Tabelle:	30 m, 30 min erfordern 2 + 7 min



**Berechnung: Tauchgang 29 m, 30 min, mit Aufstieg von 500 m auf 1000 m**

**Tabelle 7:** Tiefenzuschlag im Grenzbereich

Anfangshöhe in m	Bergseehöhe in m	Tiefe in m	Deko	1. TG
			6 m	3 m
500	1000	29	1	8
700	700	29 + 3 % = 29,9	1	8
Tabelle 0 – 700 m		29 + 3 % = 29,9	2	7

Der Aufstieg von 500 auf 1000 m erfordert dieselbe Dekozeit wie der Tiefenzuschlag von 3 % bei Verwendung der 700 m Tabelle.

## 6.5 Fahrten über höher gelegene Pässe und Fliegen

Der Luftdruck in der Kabine eines Verkehrsflugzeugs entspricht einer Seehöhe von ca 3000 m und vermindert den tolerierten Umgebungsdruck auf 0,7 bar. Wenn nach dem Tauchen ein Flug geplant ist, müssen alle Gewebe an der Oberfläche bei 1 bar so lange dekomprimiert werden, bis sie den verminderten Druck von 0,7 bar in der Kabine eines Flugzeuges tolerieren.

Für Flüge und Fahrten über höher gelegene Pässe nach dem Tauchen wurde daher vom SUSV 1986 eine eigene Tabelle herausgebracht (Quellenachweis [2]).

Der Aufstieg zu einem höher gelegenen Pass bedeutet ebenfalls eine Verminderung des Luftdruckes und damit des tolerierten Umgebungsdruckes. Es muss so lange in Tauchplatzhöhe gewartet werden, bis alle Gewebe den verminderten Luftdruck in der Höhe des Passes tolerieren. Da die langsamsten Gewebe immer weniger Inertgasüberdruck vertragen, sind die Wartezeiten verhältnismäßig lang. Die Wartezeit hängt wie bei einem Wiederholungstauchgang von der Wiederholungsgruppe und der beabsichtigten Höhenänderung (Luftdruckänderung) ab.

Bei Passfahrten darf nach einer Wartezeit von 1 Stunde mit einem stetigen Aufstieg zur Passhöhe begonnen werden. Die Zielhöhe darf frühestens nach dem in der Tabelle angegebenen Zeitintervall erreicht werden. Die einstündige Wartezeit soll wegen der Entwicklung von Mikrobläschen auf jeden Fall eingehalten werden.

Je höher der Bergsee, desto geringer wird der Unterschied zwischen Gewebedruck und Druck in der Flugzeugkabine, desto kürzer wird das Flugverbot. Nach einem Tauchgang in 4000 m Seehöhe erscheint kein Flugverbot mehr sinnvoll, weil der Kabinendruck im Flugbetrieb nur mehr zunimmt und nur bei einem Unfall unter 0,6 bar abfallen kann.

Nach Wiederholungstauchgängen im Urlaub soll vor dem Heimflug unbedingt eine Wartezeit von 24 Stunden eingehalten werden, weil es noch andere medizinische Gründe gibt, die besonders bei langen Flugstrecken eine Embolie begünstigen.



## 7 Zusammenfassung

Das mehrfach in verschiedenen Tauchzeitschriften vorgestellte ZH-L12-System von Bühlmann bildet die Grundlage von Tabellen und Tauchcomputern. In dieser Arbeit wurde der Versuch unternommen, die vorliegenden Bezeichnungen zu vereinfachen und die mathematischen Zusammenhänge durch Beispiele durchschaubar zu machen. Die grafische Darstellung der Gleichungen für Gewebe, Sättigung und Nullzeit soll die Zusammenhänge bei vermindertem Umgebungsdruck am Bergsee veranschaulichen.

Nicht nur der Koeffizientensatz, sondern das gesamte Rechenmodell wurde den Zeitschriften „NEREUS“ und „DER TAUCHLEHRER“ entnommen, so dass der Verfasser ein gut dokumentiertes DEKO-Programm in QBASIC schreiben konnte, welches PC-Besitzer leicht anwenden und überprüfen (und vereinfachen und kompilieren...) aber auch erweitern können.

Die Ergebnisse wurden mit den Werten der 701-2500 m SUSV-Tabelle verglichen, die den selben Koeffizientensatz verwendet und daher annähernd gleiche Dekovorschriften ergeben müßte. **Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist nahezu perfekt, wodurch die prinzipielle Richtigkeit des Bergsee-Programms bestätigt erscheint.**

Mit diesem Rechenprogramm wurden nun Untersuchungen für unterschiedliche Bergseehöhen durchgeführt, welche die Zusammenhänge bei der Nullzeit bestätigen.

- Wenn nach Erreichen der Bergseehöhe eine Wartezeit vom mindestens 40 min eingehalten werden kann, so muss pro 1000 m Höhenzuwachs ein Zuschlag von 10 % zur Tauchtiefe addiert werden.
- Mit dieser Rechentiefe geht man in die 0 m Meerestabelle. Im Gegensatz zur „alten Bergseeformel“ kann ein Zuschlag von 10 oder 20 % auch unter Wasser berechnet werden und führt weder zu überlangen Dekozeiten noch zu Dekopausen in unzureichender Tiefe.
- Der Tiefenzuschlag am Bergsee verändert Dekozeit und / oder -tiefe sowie die Wiederholungsgruppe und natürlich die Nullzeit.
- Der Tiefenzuschlag passt die Deko-Vorschrift an den verminderten Umgebungsdruck an.

Die Kompression hängt jedoch, wie aus der Sättigungsgleichung ersichtlich, von der **tatsächlichen Tiefe des Wiederholungstauchgangs** ab. Der Zeitzuschlag ist somit unabhängig von Bergseehöhe und Rechentiefe, wie es auch die Wiederholungstabelle von Bühlmann zeigt.

Die Methode des Tiefenzuschlages kann offensichtlich bis zu einer Bergseehöhe von 3000 m sicher angewendet werden.

Über 3000 m muss eine passende Bergseetabelle verwendet werden.



## 8 Ausblick

Sobald sich ein Taucher für die Dekompression interessiert, wird er entdecken, dass jedes Land und jeder Verband seine eigenen, traditionellen Dekotabellen hat. Unglücklicherweise wird selten angegeben, unter welchen Bedingungen die Tabellen gelten. Es ist daher nicht ohne weiters verständlich, warum Dekovorschriften mehr als 100 % voneinander abweichen können. Die ersten klaren und fundierten Aussagen gab es über das Rechenmodell ZH-L12 von Bühlmann.

Der Tabellensatz von 1986 ist der einzige, mit einem vollständig beschriebenen Geltungsbereich und nachvollziehbaren Dekovorschriften.

Mit der Einführung von Tauchcomputern bekam die Dekompressionsforschung neuen Schwung. Man versuchte zunächst Tabellen immer „sicherer“ zu machen, indem man die Dekozeiten aufgrund von Unfallstatistiken verlängerte (DEKO 92). Neueste Forschungen der Sicherheitsorganisation DAN über Mikrobläschen brachten jedoch die Erkenntnis, dass Symptome der Dekokrankheit nicht auf falsche Berechnung der Tabellen, sondern eher auf andere Ursachen zurückzuführen sind.

Die Sicherheit eines Tauchers kann somit nicht nur durch immer „strengere“ Tabellen und lange Wartezeiten gewährleistet werden. Sie kann nur durch Aufklärung erhöht werden. Erst wenn ein Taucher die Einflüsse kennt, die seine Dekozeit verändern, kann er für sich selbst erkennen, ob er vom „normalen Taucher“ abweicht und daher einen zusätzlichen Sicherheitsstopp braucht (vergleiche „Dekompression“ von H. Zauchner).

Für die Dekompression erscheint ein „dynamisches Modell“ zweckmäßig, welches die wichtigsten Änderungen durch die Einflussgrößen Nitrox & Bergsee berücksichtigen kann. Mit der Methode des Tiefenzuschlages ist es gelungen, eine echte Alternative zur Bergseetabelle zu entwickeln, die auf dem ZH-L12-System aufgebaut ist. Diese Methode soll hiermit zur Diskussion gestellt werden.

Version 01/02

Das vorliegende Rechenprogramm wurde vom Verfasser der Allgemeinheit im Quellcode zur Verfügung gestellt, damit eine möglichst große Zahl von Tauchern Zugang zu den „Geheimnissen der Dekompression“ bekommt.

Das Programm berücksichtigt nur die Theorie der gelösten Gase, aber nicht die Entwicklung von Mikrobläschen. Es dient daher lediglich der Ausbildung und darf nicht zum Schreiben beliebiger Tabellen für den regulären Tauchbetrieb missbraucht werden.

Die Tauchausbildung soll „transparenter“ werden. Der Verfasser möchte mit dieser Arbeit eine breite Diskussion über Rechenmodelle in Gang bringen.



## 9 Kontrollfragen

1. Was ändert sich beim Aufstieg zum Bergsee?  
*Der Luftdruck wird vermindert.*
2. Wie groß ist die Verminderung des Luftdruckes beim Aufstieg zum Bergsee?  
*Sie beträgt etwa 10 % pro 1000 m Höhenzuwachs.*
3. Was bewirkt der verminderte Luftdruck?  
*Der tolerierte Umgebungsdruck wird vermindert.*
4. Was versteht man unter dem tolerierten Umgebungsdruck?  
*Man versteht darunter den Umgebungsdruck, den ein mit Inertgasen aufgeladenes Gewebe aushalten kann, ohne dass Gas ausperlt.*
5. Welche Auswirkungen hat die Verminderung des tolerierten Umgebungsdruckes?  
*Die Dekompression muss in größerer Tiefe begonnen werden.*
6. Welche Auswirkungen hat das Bergseetauchen auf die verschiedenen Körpergewebe?  
*Je langsamer ein Gewebe, desto weniger Umgebungsdruck toleriert es. Je höher der Bergsee, desto langsamere Gewebe bestimmen als Leitgewebe die Nullzeit.*
7. Welche Austauschhilfen gibt es für Bergseen?  
*Bergseecomputer, Bergseetabellen und die Methode des Tiefenzuschlages.*
8. Wodurch unterscheiden sich Bergseetabellen?  
*Durch ihre Höhenbereiche.*
9. Welche Tabelle berücksichtigt den Aufstieg zum Bergsee?  
*Nur die 701 - 2500 m Tabelle von Bühlmann.*
10. Welche Tabelle verwendet ein Einsatztaucher, der in 500 m Höhe wohnt und in 1000 m Höhe eingesetzt wird?  
*Für ihn gibt es keine Tabelle.*
11. Welche Möglichkeiten hat ein Einsatztaucher, um sicher dekomprimieren zu können?  
*Er verwendet entweder die Methode des Tiefenzuschlages oder einen Computer, der den Aufstieg zum Berg mitrechnen kann.*
12. Wie groß ist der Tiefenzuschlag?  
*Pro 1000 m Seehöhe werden 10 % zur Tauchtiefe zugeschlagen.*



13. Gibt es Einschränkungen für die Zuschlagsmethode?  
*Der Höhenbereich ist auf 3000 m eingeschränkt und vom Erreichen des Tauchplatzes bis zum Beginn des Abstieges muss eine Wartezeit von mindestens 40 min eingehalten werden.*
14. Wozu dient die Sättigungs- Entsättigungsgleichung?  
*Zur Berechnung der Auf- und Entsättigung der Gewebe und nach Umformung der Gleichung zur Berechnung der Null- und Dekozeiten.*
15. Welche Drücke werden in die Sättigungsgleichung eingesetzt?  
*Entweder nur barometrische oder nur Inertgasdrücke.*
16. Wozu dient die Gewebegleichung?  
*Zur Berechnung der Druckabhängigkeit von Geweben.*
17. Was versteht man unter Sättigungs- oder Entsättigungsvorgang?  
*Die Angleichung des Gewebedruckes an den Umgebungsdruck.*
18. Wann ist ein Gewebe gesättigt?  
*Wenn der Gewebedruck gleich groß ist wie der Umgebungsdruck.*
19. Was gibt der Sättigungsfaktor an?  
*Er beschreibt den Anstieg des Gewebedruckes in Abhängigkeit von der Periodenzahl.*
20. Was versteht man unter Halbwertszeit?  
*Man versteht darunter die Zeit, in der die Differenz zwischen Gewebedruck und Umgebungsdruck halbiert wird.*
21. Was versteht man unter Anfangsdruck?  
*Es ist jener Druck, von dem aus die Auf- oder Entladung eines Gewebes beginnt.*
22. Was versteht man unter Umgebungsdruck?  
*Die Summe aus Wasserdruck und dem darauf lastenden Luftdruck.*
23. Was versteht man unter Gewebedruck?  
*Den Druck des gelösten Gases (Lösungsdruck) im Gewebe.*
24. In welcher Tiefe werden schnelle Gewebe dekomprimiert?  
*Sie erreichen während des Tauchgangs die höchsten Drücke und können daher bereits in größeren Dekotiefen dekomprimiert werden. Durch den „extra tiefen Sicherheitsstopp“ wird verhindert, dass schnelle Gewebe ihren tolerierten Umgebungsdruck erreichen und in weiterer Folge Blasenkerne und Mikrobäschen bilden können.*



25. In welcher Tiefe werden langsame Gewebe dekomprimiert?  
*Sie erreichen während des Tauchgangs nur geringe Drücke und müssen daher in geringen Dekotiefen dekomprimiert werden.*
26. Warum können langsame Gewebe nur in geringen Tiefen dekomprimiert werden?  
*Weil der Umgebungsdruck kleiner sein muss als der Gewebedruck.*
27. Warum verändert sich die Nullzeit am Bergsee?  
*Weil die Gewebe weniger weit aufgeladen werden dürfen.*
28. Wer bestimmt die Nullzeit für den Taucher?  
*Das jeweilige Leitgewebe in Abhängigkeit von der Tauchtiefe. Dazu kommen Luftdruck & Sauerstoffanteil*
29. Wie verändert sich die Nullzeit, wenn die Bergseehöhe zunimmt?  
*Sie wird kürzer.*
30. Wie verändert sich die Nullzeit, wenn der Sauerstoffgehalt steigt?  
*Sie wird länger.*
31. Was versteht man unter Kompensation der Bergseehöhe?  
*Die Bergseehöhe wird kompensiert, wenn die Verkürzung der Nullzeit durch die Bergseehöhe gleich groß ist, wie ihre Verlängerung durch die Anreicherung der Atemluft mit Sauerstoff.*
32. Welche Atemmischung dient zur Kompensation von 1000 m?  
*Nitrox 28*
33. Welchen Vorteil hat die Kompensation der Bergseehöhe?  
*Es kann mit einer Null - Meter - Meerestabelle ausgetaucht werden.*
34. Warum ist eine Bergseetabelle erst nach einer Wartezeit von 12 oder 24 Stunden gültig?  
*Der Höhenbereich einer Bergseetabelle hängt nicht von einer Wartezeit ab. Die Wartezeit wird erst durch den Aufstieg zum Bergsee erforderlich.*
35. Wie verhalte ich mich, wenn die Rückfahrt nach dem Bergseetauchgang über einen höher gelegenen Pass erfolgen muss?  
*Für das Verhalten gilt die SUSV-Tabelle für Fliegen und Passfahrten nach dem Tauchen.*
36. Wie verändert sich die Zusatzzeit bei Bergseetabellen?  
*Wiederholungstabellen sind unabhängig von der Bergseehöhe. Die Veränderung der Zusatzzeit wird durch die Veränderung der Wiederholungsgruppe berücksichtigt.*



37. Was versteht man unter ISO-Atmosphäre?

*Sie beschreibt, wie der Luftdruck mit der Bergseehöhe abnimmt. Nur im Bereich von 0 – 4000 m ist die Druckabnahme annähernd gleichförmig.*

38. Gilt der „Nullzeit-Sicherheitsstop“ auch für Bergseen?

*Er wurde eingeführt, um die Aufstiegsgeschwindigkeit im Bereich nahe der Oberfläche zu senken, damit die Bildung von Mikrobäschen verringert wird. Weil der tolerierte Umgebungsdruck am Bergsee vermindert ist, wurde der Nullzeitstop in 5m Tiefe gelegt und auch die Aufstiegsgeschwindigkeit im Bereich nahe der Oberfläche auf 5 m/min vermindert.*

39. Verändert sich die Flugverbotszeit durch den Bergsee

*Der Bergsee verändert durch den Tiefenzuschlag die Wiederholungsgruppe. Die Aufsättigung der Gewebe hängt nur von der tatsächlichen Tauchtiefe ab und hat mit der Höhe des Bergsees nichts zu tun. In 4000 m Seehöhe ist praktisch kein Flugverbot mehr sinnvoll, weil die Differenz zwischen Gewebe- und Umgebungsdruck gegen Null geht.*

Version 01/02



## 10 Anhang

Bei allen abgebildeten Tauchtabelle  
handelt es sich um Abschriften aus den  
Originaltabellen.

Eine Verwendung dieser Tauchtabelle im regulären Tauchbetrieb ist nicht zulässig, diese Tabellen sind lediglich zu Berechnungen innerhalb des Theoriekurses zu verwenden.

### Passfahrten und Fliegen ohne Druckkabine

Zwischenwerte der Höhe aufrunden

Höhe (m)	RG am Ende des Tauchganges				
	A – D	E	F	G	H
2500	1:00	1:00	1:00	1:00	2:00
3000	1:00	1:00	1:00	1:30	3:30
3500	1:00	1:00	1:30	3:30	5:30
4000	1:00	1:30	3:00	5:00	7:00
Alle Wartezeiten in Std:Min					

#### Anmerkungen:

1. Kein Zusätzlicher Aufstieg innerhalb der ersten Stunde des Intervalls nach dem TG!
2. Nach Ablauf dieser ersten Stunde: gleichmäßiger Aufstieg zur Zielhöhe.
3. Zielhöhe darf nicht vor angegebener Wartezeit erreicht werden.



© A. A. Bühlmann, Universität de CH-Zürich 1986 **Aufstieg 10 m / min, Sicherheitsstopp 1 min bei 3 m**  
**Nullzeiten und Dekompressionszeiten** **0 – 700 m Seehöhe**

Tiefe m	Zeit min	Stufen				RG
		12 m	9 m	6 m	3 m	
12	125				1	G
	140				5	H
	150				8	H

15	75				1	G
	80				3	G
	90				7	G
	100				12	G
	110				17	H
120				20	H	

18	51				1	F
	60				5	F
	70				11	G
	80				18	G
	90				24	H

21	35				1	E
	40				2	E
	50				8	F
	60				16	G
	70				25	G
	80			3	29	H

24	25				1	E
	30				2	E
	35				4	F
	40				8	F
	50				17	G
	60			4	24	G
70			10	30	H	

27	20				1	E
	30				5	F
	35				10	F
	40				13	G
	45			2	18	G
	50			3	22	G
	55			6	27	G
	60			8	30	H

30	17				1	D
	20				2	D
	25				5	E
	30			2	7	F
	35			3	14	G
	40			5	17	G
	45			9	23	G
	50		2	10	28	G

33	14				1	D
	20				4	E
	25				7	F
	30			2	11	G
	35			4	17	G
	40			6	23	G
	45		2	8	28	G
	50		4	11	31	H

36	12				1	D
	15				3	D
	20				5	E
	25			2	9	F
	30			4	15	G
	35		2	5	23	G
	40		2	8	28	G
	45		5	10	31	H
	45		7	15	31	H

Tiefe m	Zeit min	Stufen					RG
		15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	
39	10					7	D
	15					4	E
	20				3	7	F
	25			2	4	12	G
	30			3	7	18	G
	35			5	9	28	G
40		2	6	15	29	H	

42	9					1	D
	12					4	D
	15				1	5	E
	18				4	6	F
	21			2	4	10	F
	24			3	6	16	G
	27			4	7	19	G
	30		2	4	9	25	G
	33		2	6	12	29	G
	36		2	7	15	32	H

45	9					2	E
	12					5	E
	15				3	5	E
	18			2	4	9	F
	21			3	5	13	G
	24			4	6	18	G
	27		2	4	9	22	G
	30		3	6	10	27	G

48	9					3	E
	12				2	5	E
	15				4	6	F
	18			3	4	10	F
	21			4	6	16	G
	24		2	4	7	22	G
	27		4	5	10	26	G
	30	1	4	6	13	30	H

51	9					4	E
	12				3	6	E
	15			2	4	8	F
	18			4	5	13	F
	21		3	4	7	18	G
	24		4	5	9	24	G
	27		5	6	13	28	G
	30	3	4	8	16	32	H

54	9				1	5	E
	12				4	6	E
	15			3	4	10	F
	18		1	3	6	17	G
	21		4	4	9	21	G
	24	2	4	5	12	27	G
27	3	5	7	15	31	H	

57	9				2	5	E
	12				4	8	E
	15			1	4	11	F
	18			3	4	18	G
	21	2	3	6	10	24	G
	24	3	4	9	12	29	H

60	9				4	5	E
	12				5	9	F
	15			2	4	14	F
	18		4	5	6	22	G
	21	3	4	5	11	27	G
	24	3	4	9	12	29	H



© A. A. Bühlmann, Universität de CH-Zürich 1986 **Aufstieg 10 m / min, Sicherheitsstopp 1 min bei 2 m**  
**Nullzeiten und Dekompressionszeiten** **701 – 2500 m Seehöhe**

Tiefe m	Zeit min	Stufen				RG
		9 m	6 m	4 m	2 m	
9	238				1	G

12	99				1	G
	110				4	G
	120				8	G

15	62				1	F
	70				4	G
	80				10	G
	90				15	G

18	44				1	F
	50				4	F
	60				11	G
	70				19	G
	80			4	23	H
	90			8	25	H

21	30				1	E
	35				2	F
	40				5	F
	45				9	G
	50			1	13	G
	55			3	17	G
	60			5	20	G
	70			8	22	G

24	22				1	F
	30				3	F
	35				7	F
	40			2	11	G
	45			4	16	G
	50			7	19	G

27	18				1	D
	20				2	E
	25				4	F
	30			2	7	F
	35			4	11	G
	40		1	6	16	G
	45		2	9	20	G

30	15				1	D
	20				3	E
	25			2	6	F
	30		1	4	11	G
	35		2	7	15	G
	40	1	5	10	20	G
	45	2	6	12	23	G

33	12				1	D
	15				2	E
	20			2	4	F
	25		2	3	9	G
	30	1	3	6	14	G
	35	2	4	9	20	G
	40	3	6	12	23	G

36	10				1	D
	15			1	3	E
	20		1	3	6	F
	25	1	3	5	12	G
	30	3	3	8	19	G
	35	4	6	12	23	G

Tiefe m	Zeit min	Stufen					RG
		12 m	9 m	6 m	4 m	2 m	
39	9					1	D
	12					3	E
	15				2	4	E
	18			2	3	7	F
	21			3	4	10	G
	24		2	3	6	15	G
	27		4	4	8	18	G

42	8					1	D
	12				1	4	E
	15			1	3	5	F
	18			3	4	8	F
	21		3	3	5	13	G
	24		4	4	7	18	G
	27	1	5	5	9	21	G
	30	3	6	6	13	24	G

45	9					3	D
	12				3	3	E
	15			3	3	6	F
	18		2	3	4	11	F
	21		4	4	7	16	G
	24	2	4	5	10	21	G

48	9				1	4	E
	12			1	3	4	F
	15		2	2	4	9	G
	18		4	5	5	14	G

51	6					2	E
	9			1	1	3	F
	12		1	2	3	5	F
	15		3	3	4	11	G
	18	2	4	4	7	17	G
	21	4	4	6	11	21	G

54	6					2	D
	9			1	3	3	F
	12		2	3	3	7	F
	15	1	4	4	6	13	G
	18	3	4	5	9	19	G



## 11 Notizen

