

G. Gesetze - Formeln - Tabellen - Diagramme für die Tauchtechnik

1. Die atmosphärische Luft

An der Wasseroberfläche des Meeres und auf dem Lande atmen wir atmosphärische Luft, deren Druck unter dem Wechsel der meteorologischen Bedingungen normalerweise bis ± 20 mm Quecksilbersäule schwankt.

Für das Tauchen sind diese Druckschwankungen ohne Belang.

Als „Normalbedingungen“ der Atmosphäre hat man die „physikalische Atmosphäre“ festgelegt, abgekürzt „atm“. Diese ist definiert als der Druck, den eine 760 mm hohe Quecksilbersäule QS von dem spezifischen Gewicht $13,5951 \text{ g/cm}^3$ an einem Ort der Normalbeschleunigung $980,665 \text{ cm/s}^2$ hervorruft und der dem mittleren Luftdruck an der Meeresoberfläche (N. N.) entspricht.

Der Luftdruck nimmt mit zunehmender Höhe ab und beträgt im Mittel

bei 1 000 m Höhe über N. N.	671 mm QS
bei 2 000 m Höhe über N. N.	593 mm QS
bei 3 000 m Höhe über N. N.	524 mm QS
bei 4 000 m Höhe über N. N.	463 mm QS
bei 10 000 m Höhe über N. N.	220 mm QS
bei 20 000 m Höhe über N. N.	64 mm QS
bei 30 000 m Höhe über N. N.	19 mm QS

In der Technik wird allgemein die „technische Atmosphäre“ verwendet, die man mit „1 at“ abkürzt und die dem Druck von $1,0 \text{ kp/cm}^2$ entspricht.

Es entsprechen:

1 atm	= 760 mm QS = 760 Torr (physikalische Atmosphäre)
	= $1,033 \text{ kp/cm}^2$ = 10,33 m W.S.
	= 1013,3 Millibar (mb)
	= 14,7 lbs/sq.in. (psi)
1 at	= 735,6 mm QS = 735,6 Torr (technische Atmosphäre)
	= $1,0 \text{ kp/cm}^2$ = 10 m W.S.
	= 980,7 Millibar (mb)
	= 14,22 lbs/sq.in. (psi)

Es muß noch auf den Unterschied zwischen absolutem Druck und Überdruck bzw. Unterdruck hingewiesen werden. Der absolute Druck ist der Bezugsdruck und entspricht dem jeweiligen atmosphärischen Druck (atm).

Für den Unterdruck gilt die Begriffsbestimmung: Unterdruck = Bezugsdruck, vermindert um den Druck.

Er ist positiv, wenn der Druck größer ist als der Bezugsdruck. Die gebräuchlichen Manometer (Druckmesser) geben meist den Überdruck über dem atmosphärischen Druck an.

Im allgemeinen wird der Überdruck in kp/cm^2 (= at) gemessen. Im englischen Sprachgebrauch spricht man von pressure gauge, der meist in pounds/sq.inch (psi) angegeben wird.

Die atmosphärische Luft enthält die in nachfolgender Tabelle 1 angegebenen Anteile an Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid (neben geringen, für die Taucherei belanglosen Anteilen an Wasserstoff und Edelgasen, insbesondere Argon). In der Zusammenstellung sind die Raunteile der Gase (bezogen auf trockene und feuchte Luft) und die entsprechenden Teildrücke der Gase angegeben, deren Gesamtdruck mit 760 mm QS (Normaldruck) angenommen ist.

Tabelle 1

Zusammensetzung der atmosphärischen Luft:

Gegenüberstellung: trocken — feucht

Gas	trocken		feucht	
	Vol. %	mm QS	Vol. %	mm QS
Sauerstoff	20,95	159,2	20,55	156,1
Stickstoff ¹⁾	78,09	600,5	77,44	588,6
Argon	0,93			
Kohlensäure	0,03	0,3	0,03	0,3
Wasserdampf	—	—	1,98	15,0 ²⁾

¹⁾ Hier sind auch die in Spuren vorhandenen Edelgase, Wasserstoff und Kohlenoxid enthalten.

²⁾ Unter der Annahme einer Lufttemperatur von 20 °C und einer relativen Feuchte von 86 % erhalten wir einen Teildruck des Wasserdampfes von 15 mm QS.

Im Gegensatz zu der Tabelle 1 ist in der Tabelle 2 die genaue prozentuale Zusammensetzung der trockenen atmosphärischen Luft angegeben, wobei die Molekularformel und das Molekulargewicht ebenfalls aufgeführt sind.

Tabelle 2

Zusammensetzung der atmosphärischen Luft:

genaue prozentuale Zusammensetzung, trocken

Gas	Molekularformel	Molekulargewicht	Vol.%
Stickstoff (N)	N ₂	28	78,09
Sauerstoff (O)	O ₂	32	20,95
Argon (Ar)	Ar	39,94	0,93
Neon (Ne)	Ne	20,20	0,0018
Helium (He)	He	4,00	0,00053
Krypton (Kr)	Kr	83,00	0,00011
Wasserstoff (H)	H ₂	2,00	0,00005
Xenon (X)	X	130,00	0,000008
Ozon	O ₃	48,00	0,000002
Kohlensäure	CO ₂	44,00	0,02—0,04

Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre schwankt erheblich mit den klimatischen Bedingungen, während das Verhältnis $O_2 : N_2 : CO_2$ praktisch stets gleich bleibt. Deren Summe schwankt also gegenüber dem als Normaldruck angenommenen Mittelwert von 760 mm QS.

Der Gehalt an Wasserdampf hat einen mit der Temperatur steigenden Höchstwert, den sog. Sättigungsdruck.

Ist dieser erreicht, so sprechen wir von 100% relativer Feuchte und bei niedrigerem Druck als dem Sättigungsdruck dieser Temperatur entsprechenden Werten von 90, 80, 70 . . . % Feuchtigkeit.

Unter der Annahme von 100% Feuchte ergeben sich für verschiedene Temperaturen z. B. folgende Werte:

Tabelle 3

Sättigungsdruck des Wasserdampfes in Abhängigkeit von der Temperatur

Temperatur [°C]	Sättigungs- druck des Wasserdampfes [mm QS]	Feuchtigkeits- gehalt [g/Nm ³ tr.]	Zusammensetzung der Luft in Vol. %	
			Luft	Wasserd.
0	4,6	4,8	99,4	0,6
10	9,2	9,8	98,8	1,2
15	12,8	13,7	98,3	1,7
20	17,5	18,9	97,7	2,3
25	23,8	26,0	96,9	3,1

2. Die Gasgesetze

Die Gesetzmäßigkeiten, denen die Gase, also auch das Gasgemisch der atmosphärischen Luft unterliegen, sind für das Tauchen von wesentlicher Bedeutung und müssen deshalb hier — wenn auch in gekürzter Form — aufgeführt werden. Gase haben grundsätzlich die Eigenschaft, jeden zur Verfügung stehenden Raum einzunehmen. Sie können erst bei erheblicher Abkühlung unter die normalen Temperaturen zu Flüssigkeiten kondensiert werden.

Alle Zustandsänderungen der Gase gehorchen den gleichen Gesetzen.

Die bei den einzelnen Gasen auftretenden Abweichungen vom sog. „idealen Gas“ sind so gering, daß sie meistens bei unseren Betrachtungen außer acht gelassen werden können. Bei unter hohen Drücken verdichteten Gasen müssen diese Abweichungen allerdings berücksichtigt werden.

Der Zustand, unter dem sich ein Gas befindet, ist abhängig von dem Druck, dem Volumen und der Temperatur. Durch diese Werte, die untereinander in den nachstehend behandelten Beziehungen stehen, ist der Zustand eines Gases eindeutig festgelegt.

2.1. Die Maßeinheiten

Als Einheit des Druckes haben wir in Abschnitt 1 bereits die Atmosphäre (atm) und die ihr entsprechenden anderen Maßeinheiten kennengelernt.

Die Einheit des Volumens ist das Liter (l) bzw. das Tausendfache ($1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ l}$) oder der tausendste Teil ($1 \text{ l} = 1000 \text{ cm}^3$). *)

Zur Messung der Temperatur wird entweder mit Graden ($^{\circ}\text{C}$) gerechnet oder aus Gründen der Einfachheit mit absoluten Temperaturen. Die absoluten Temperaturen werden mit $^{\circ}\text{Kelvin}$ ($^{\circ}\text{K}$) bezeichnet. Der Nullpunkt der absoluten Temperaturskala, deren Ableitung und Begründung hier zu weit führen würde, liegt bei -273°C . Ein Grad der absoluten Temperaturskala ist gleich einem Grad der Celsius-Skala. Bezeichnet man also die in Celsius-Graden gemessene Temperatur mit t und die in absoluten Graden gemessene Temperatur mit T , so erhält man:

(1)

$$T = t + 273 \quad [^{\circ}\text{K}]$$

2.2. Das Gesetz von Boyle-Mariotte

Das Gesetz von Boyle-Mariotte besagt, daß für eine bestimmte Gasmenge bei gleichbleibender Temperatur der Druck sich umgekehrt proportional dem Volumen ändert. Bezeichnet man die Werte für Druck und Volumen im Anfangszustand mit dem Index 1 und im Endzustand mit dem Index 2 so erhält man:

(2)

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

oder

$$p \cdot v = \text{const.}$$

Das heißt, wenn eine Gasmenge bei einem bestimmten Druck P_1 das Volumen V_1 hat und der Druck z. B. auf P_2 verdoppelt wird, so geht das Volumen V_1 auf das halbe Volumen V_2 zurück. Verdreifacht sich der Druck, so ist das Endvolumen nur noch $\frac{1}{3}$ des Anfangsvolumens, unter der Voraussetzung stets gleichbleibender Temperatur.

2.3. Das Gesetz von Gay-Lussac

Das Gesetz von Gay-Lussac (in den USA von „Charles“ genannt) sagt aus, daß bei gleichbleibendem Druck die Volumina einer Gasmenge sich wie die Temperaturen verhalten. Somit ergibt sich:

(3)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

*) Nach genauer Definition ist die nichtmetrische Volumeneinheit Liter = $1,000028 \text{ dm}^3$ oder $1000,028 \text{ cm}^3$. Für die Betrachtungen im Zusammenhang mit der Tauchtechnik ist dieser theoretische Unterschied belanglos.

Hat z. B. eine Gasmenge (mit V_1) einen Druck von 1 Atmosphäre und eine Temperatur von $0^\circ\text{C} = 273^\circ$ abs (oder $^\circ\text{K}$) und erhöht man die Temperatur auf das Doppelte, also auf 546° abs ($= 273^\circ\text{C}$), so steigt das Volumen auf das Doppelte, natürlich gleichbleibender Druck vorausgesetzt. Erhöht man die Temperatur nur auf 20°C , so ergibt sich ein Volumen von

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = V_1 \cdot \frac{293}{273}$$

Man kann also auch das Gesetz von Gay-Lussac so ausdrücken:

Bei gleichbleibendem Druck nimmt das Volumen eines Gases für jedes Grad Temperaturerhöhung um $1/273$ des Wertes zu, den das Gas bei 0°C einnimmt. Man ersieht hieraus, daß das Rechnen mit den absoluten Temperaturen wesentlich einfacher ist.

2.4. Das allgemeine Gasgesetz

Die Gesetze von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac kann man zu einer grundlegenden Gleichung verbinden:

$$(4) \quad \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} = \frac{P_3 \cdot V_3}{T_3}$$

worin die Werte mit dem Index 1 die Anfangswerte und die mit dem Index 2 bzw. 3 die Endwerte beliebiger Zustandsänderungen angeben. Allgemein ausgedrückt ist für eine bestimmte Gasmenge der Ausdruck

$$\frac{P \cdot V}{T} = \text{eine konstante Größe,}$$

die man auf 1 m^3 bezieht und mit R bezeichnet.

Man erhält so die allgemeine Gleichung

$$(5) \quad P \cdot V = R \cdot T$$

R nennt man die allgemeine Gaskonstante.

2.5. Das Normalkubikmeter

Das „Normalkubikmeter“ ist kein Raummaß, sondern man versteht darunter diejenige wasserfreie Gasmenge, die unter Normalbedingungen, d. h. bei 0°C und 760 mm QS , den Raum von 1 m^3 einnimmt.

2.6. Die Gesetze von Dalton und Henry

Nach dem von Dalton gefundenen Gesetz übt in einem Gasgemisch jedes der vorhandenen Gase für sich einen Druck aus, der so groß ist, als wenn es allein unter den gleichen Bedingungen vorhanden wäre. Der von einem Gasgemisch ausgeübte Gesamtdruck ist gleich der Summe der einzelnen Teildrücke (Partialdrücke) der Komponenten.

In der atmosphärischen Luft, die rund 80 % Stickstoff und 20 % Sauerstoff enthält (der Einfachheit halber wird mit diesen abgerundeten Zahlen gerechnet), beträgt also bei einem Gesamtdruck von 1 atm der Partialdruck des Stickstoffs 80 % = 0,8 atm, der des Sauerstoffs 20 % = 0,2 atm. Wird der Gesamtdruck auf 5 atm erhöht, so beträgt der Teildruck des N_2 wieder 80 %, also 80 % von 5 atm = 4 atm und sinngemäß für den O_2 20 % von 5 atm = 1 atm. Das Verhältnis von N_2 : O_2 bleibt also stets dasselbe, es ändern sich nur die tatsächlichen Druckwerte entsprechend dem Gesamtdruck.

Gasdiffusion ist der Vorgang der gegenseitigen Durchdringung von Gasen.

Man denke sich ein Gefäß, das durch eine Wand in zwei Teile geteilt ist. In jeder der beiden Hälften ist eine Gasart eingeschlossen. Entfernt man die Zwischenwand, so vermischen sich die beiden Gasarten in kürzester Zeit zu einem überall gleichen Gasgemisch, wobei die Durchmischung nach allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit erfolgt.

Diese „Diffusionsgeschwindigkeit“ ist für jedes Gas eine sich mit der Temperatur verändernde, feststehende Größe.

Leichte Gase, z. B. Wasserstoff und Helium, haben eine große Diffusionsgeschwindigkeit.

Die **Löslichkeit der Gase in Flüssigkeit** behandelt das Gesetz von Henry.

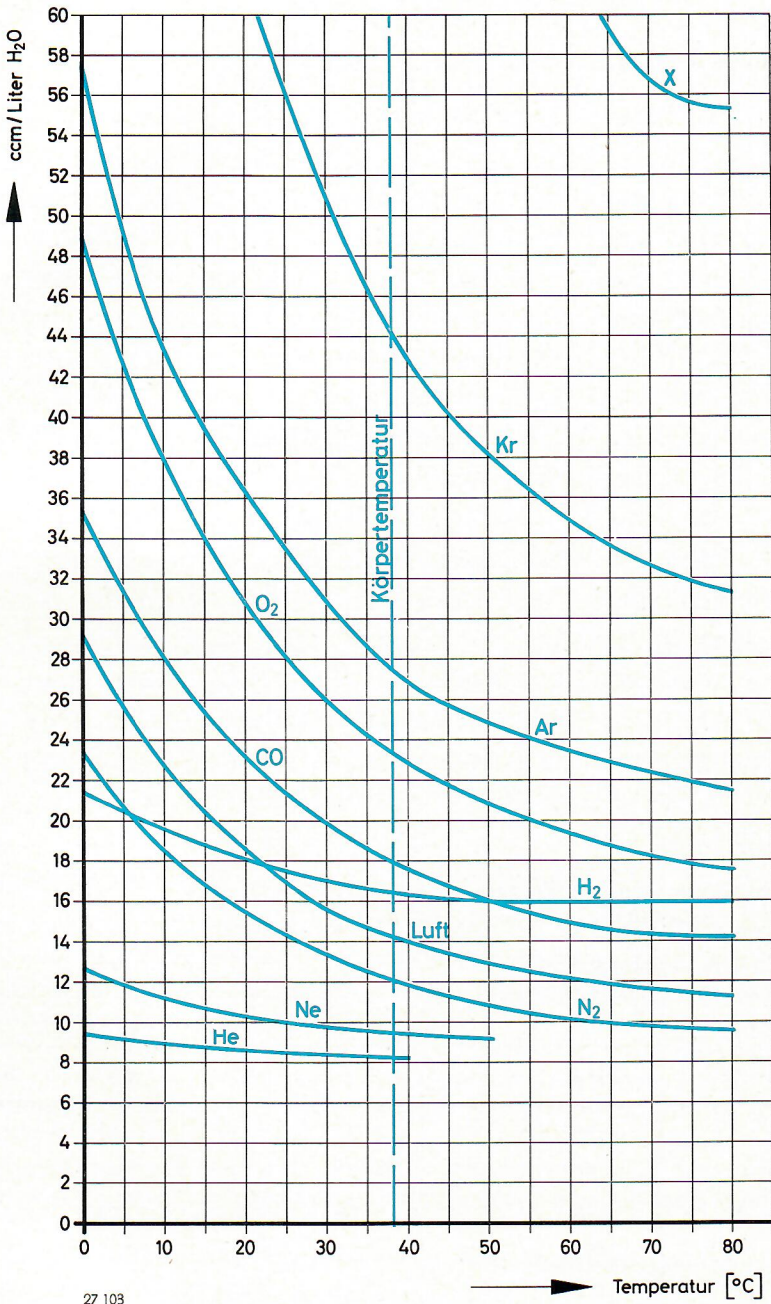
Steht ein Gas über einer Flüssigkeit, so stoßen die Moleküle des Gases gegen die Oberfläche der Flüssigkeit, dringen zum Teil ein und lösen sich auf.

Die gelösten Teilchen werden durch Diffusion fortgeführt. Schließlich stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, in dem ebenso viele Gasmoleküle sich auflösen, wie aus der Lösung entweichen, so daß überall in der Flüssigkeit die gleiche Anzahl Moleküle gelöst ist. Der Druck über der Flüssigkeit muß während des ganzen Vorganges selbstverständlich konstant gehalten werden. Im Gleichgewichtszustand ist die Flüssigkeit mit dem betreffenden Gas gesättigt.

Nach dem von Henry aufgestellten Gesetz ist die Menge des gelösten Gases in der Flüssigkeit proportional dem Druck des über der Flüssigkeit stehenden Gases. Da aber nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte das Volumen eines Gases umgekehrt proportional dem Druck ist, kann man auch sagen:

Bei konstanter Temperatur wird stets das gleiche Volumen eines Gases gelöst, wenn dieses beim Versuchsdruck gemessen wird. Für Gasmischungen gilt, daß die Löslichkeit jedes Teilgases so groß ist, als wenn es allein mit seinem Teildruck vorhanden wäre.

Die Löslichkeiten der Gase sind sehr verschieden. Mit steigenden Temperaturen nehmen sie unter sonst gleichen Verhältnissen ab, wie aus den Kurven Bild 1 und der Tabelle 4 für die in der atmosphärischen Luft enthaltenen Gase ersichtlich ist. Während die hier angegebenen Werte für Normaldruck gelten, sind in der Tabelle 5a—5d entsprechende Werte für höhere Drücke für die Gase Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid angegeben.



27 103

Bild 1 Löslichkeit von Gasen in Wasser bei Normaldruck (siehe auch Tabelle 4)

Tabelle 4

Löslichkeit von Gasen in Wasser in ccm/l H₂O

Temp. [°C]	N ₂	O ₂	H ₂	CO ₂	Luft	Ar	He	Ne	Kr	X
0	23,5	48,9	21,5	35,4	29,2	57,3	9,5	12,7	111	241
5	20,9	42,9	20,4	31,5	25,7	—	9,2	11,8	—	—
10	18,6	38,0	19,6	28,2	22,8	43,4	9,0	11,2	78,8	170
15	16,9	34,2	18,8	25,4	20,6	—	8,8	10,7	—	—
20	15,5	31,0	18,2	23,2	18,7	36,6	8,7	10,3	62,1	127
25	14,3	28,3	17,5	21,4	17,1	—	8,5	10,1	—	—
30	13,4	26,1	17,0	20,0	15,6	31,0	8,4	9,8	50,9	99,6
35	12,6	24,4	16,7	18,8	14,8	—	—	9,6	—	—
38	—	—	—	—	—	27,5	—	9,5	44,1	83,8
40	11,8	23,1	16,4	17,6	14,1	26,9	8,3	9,5	43,0	80,9
45	11,3	21,9	16,2	16,9	13,4	—	—	9,4	—	—
50	10,9	20,9	16,1	16,2	12,9	24,9	—	9,2	38,4	71,3
60	10,2	19,5	16,0	14,9	12,2	23,7	—	—	34,9	63,6
70	9,8	18,3	16,0	14,4	11,6	22,4	—	—	32,7	56,8
80	9,6	17,6	16,0	14,3	11,3	21,6	—	—	31,3	55,3

Tabelle 5

Löslichkeit von Gasen in Wasser bei erhöhtem Druck(Absorptionskoeffizient $\alpha = \text{ccm Gas/ccm H}_2\text{O}$):

Tabelle 5 a) Wasserstoff

Temp. [°C]	Druck [at]					
	25	50	100	150	200	300
0	0,536	1,068	2,130	4,187	4,187	6,139
10	0,487	0,969	1,932	2,872	3,791	5,579
20	0,450	0,895	1,785	2,649	3,499	5,158
30	0,426	0,848	1,689	2,508	3,311	4,897
40	0,413	0,822	1,638	2,432	3,210	4,747
50	0,407	0,809	1,612	2,395	3,165	4,695
75	0,414	0,826	1,643	—	3,420	—
100	0,462	0,912	1,805	2,681	3,544	5,220

Tabelle 5b) Stickstoff

Temperatur [°C]	Druck [at]				
	25	50	100	200	300
25	0,348	0,674	1,264	2,257	3,061
50	0,273	0,533	1,011	1,830	2,572
75	0,254	0,494	0,946	1,732	2,413
100	0,266	0,516	0,986	1,822	2,546

Tabelle 5c) Sauerstoff für 0 bis 70 at, gültig bei + 25 °C
 $\alpha = 0,0258 \cdot \text{at (ccm O}_2/\text{ccm H}_2\text{O)}$

Tabelle 5d) Kohlendioxid

Temperatur [°C]	Druck [at]								
	25	30	35	40	45	50	60	65	70
20	15,9	17,8	19,7	21,6	23,3	25,1	26,9	—	—
35	8,1	9,6	11,3	13,0	14,6	16,2	17,9	19,7	21,6
60	—	—	—	—	9,0	9,7	10,5	11,4	12,3

3. Wassertemperatur

Durch die hohe spezifische Wärme des Wassers ist die große Wärmeträgheit der ozeanischen Wassermassen bedingt. Unter normalen Verhältnissen ändern sich daher die Wassertemperaturen sehr langsam und verhältnismäßig wenig.

Die extremen Werte für Wassertemperaturen an der Oberfläche schwanken zwischen -2°C in den Polargebieten und erreichen im Persischen Golf ein Maximum von $36,5^\circ\text{C}$. Selbstverständlich ändern sich die Temperaturen jahreszeitlich und sind besonders in Küstennähe stärkeren Schwankungen ausgesetzt als in der offenen See.

Die Binnenmeere und die Ozeane haben im allgemeinen in der Tiefe niedrigere Temperaturen als an der Oberfläche; ihre täglichen und jährlichen Schwankungen werden mit zunehmender Tiefe immer geringer.

In der Regel können von 20—25 m Tiefe an die täglichen Temperaturschwankungen vernachlässigt werden.

In einer Tiefe von 200 m hat das Wasser das ganze Jahr über die gleiche Temperatur.

In den Weltmeeren herrscht in 1000 m Tiefe eine gleichbleibende Temperatur zwischen $+4^\circ$ und $+8^\circ\text{C}$, die in größeren Tiefen bis auf 0°C sinkt und in noch größeren Tiefen bis auf -1°C abfallen kann.

4. Salzgehalt des Seewassers

Die Weltmeere enthalten große Mengen gelöster Salze, die im Laufe der Jahr-millionen durch die Flüsse zugetragen worden sind; Flüsse und Seen mit genü-gendem Abfluß sind dagegen meist salzarm.

Durchschnittlich beträgt der Salzgehalt der offenen See ungefähr 35‰, das sind 35 g in 1000 g Wasser.

Die Tabelle 6 gibt die mittleren Salzgehalte der Meere an, dabei handelt es sich vorwiegend um Kochsalz (NaCl).

Tabelle 6

Salzgehalt der Meere

Bottnischer Meerbusen	1 ‰
Finnischer Meerbusen	1 ‰
Westliche Ostsee	8 ‰
Schwarzes Meer	15—18 ‰
Nordsee (wechselnd)	29 ‰
die Ozeane	35 ‰
Mittelmeer	39 ‰
Persischer Golf	40 ‰
Rotes Meer	45 ‰
Totes Meer	230 ‰

Durch den Salzgehalt wird die Dichte des Seewassers, ein für den Taucher nicht unwesentlicher Faktor, stark beeinflusst.

Bei überschlägigen Berechnungen kann man die Dichte im Mittel mit 1,025 [g/cm³] annehmen. Durch den Salzgehalt wird aber auch der Gefrierpunkt des Seewassers beeinflusst.

Das Wärmeverhalten des Seewassers ist insofern anormal, weil sein spezifi-sches Volumen *) bei Abkühlung (bei chemisch reinem Wasser) bis + 4 °C ab-nimmt; hier ist also sein Dichtemaximum erreicht. Bei weiterer Abkühlung nimmt sein spezifisches Volumen wieder zu, bis es beim Gefrieren bei 0 °C sprunghaft um ca. 97 ‰ zunimmt. Diese Verhältnisse bleiben grundsätzlich auch im Meer-wasser erhalten, lediglich die Werte für das Dichtemaximum und den Gefrier-punkt werden verschoben.

Das Bild 2 zeigt eine kurvenmäßige Darstellung der Verhältnisse im Meerwasser bei verschiedenen Salzgehalten.

Solange der Salzgehalt des Meerwassers unter dem Wert von 24,7 ‰ bleibt, verhält sich dieses ähnlich wie Süßwasser, d. h., die Temperatur, bei der das Dichtemaximum erreicht wird, liegt oberhalb des Gefrierpunktes.

*) Unter spezifischem Volumen versteht man den Kehrwert der Dichte (cm²/g)

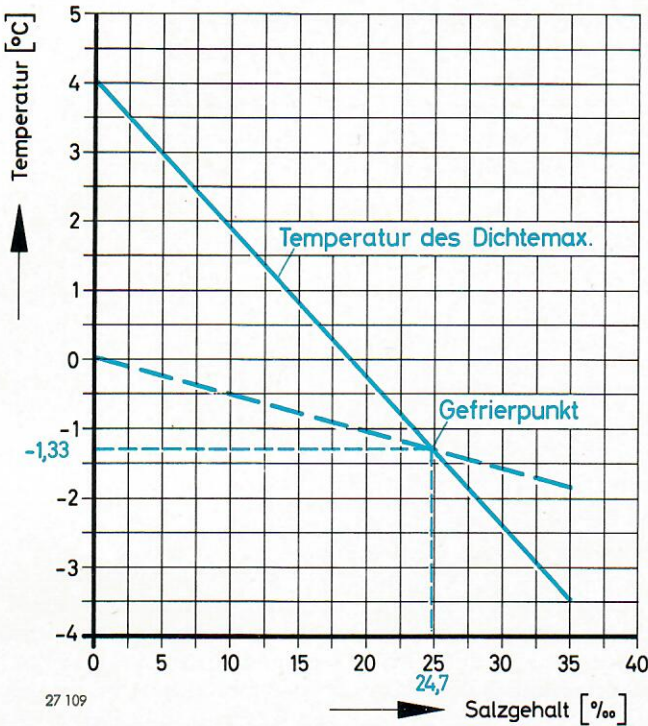


Bild 2 Temperatur des Dichtemaximums und Gefrierpunktes von Meerwasser

Da bei Abkühlung oberhalb des Dichtemaximums die Dichte zunimmt, werden die abgekühlten Wasserteilchen schwerer als ihre Umgebung und sinken ab (Konvektionsströmung). Der dadurch bedingte Wärmeübergang hält solange an, bis die ganze Wassermasse das Dichtemaximum erreicht hat, das für Süßwasser bis + 4 °C und für Meerwasser mit z. B. 20 ‰ Salzgehalt bei - 0,31 °C liegt. Bei noch weiterer Abkühlung der Oberfläche des Wassers werden die Teilchen wieder leichter, die Konvektion hört infolgedessen auf, es tritt nur noch eine durch Wind und etwaigen Strom bewirkte Durchmischung ein; das Wasser erstarrt bei Erreichung des Gefrierpunktes, während die darunter liegenden Wassermengen bei der Temperatur des Dichtemaximums stagnieren.

Hat das Meerwasser jedoch einen Salzgehalt, der über 24,7 ‰ liegt, so wird die Konvektion nicht unterbrochen, da die Wasserteilchen auch bei weiterer Abkühlung wegen der weit nach unten verschobenen Temperatur des Dichtemaximums immer noch schwerer werden. Dadurch kommt der Wärmegehalt der größeren Tiefen in weitem Maße der Oberfläche zugute, wodurch der Abkühlungsvorgang verlangsamt wird. Die oberen Schichten des Meeres erhalten dadurch einen zusätzlichen Schutz vor dem Gefrieren, das ohnehin durch die starke Gefrierpunktserniedrigung infolge des hohen Salzgehaltes erschwert ist. Dieses Verhalten des Meeres wirkt sich allgemein in einer weitgehenden Ausgleichung der Temperaturverhältnisse aus, die z. B. den ozeanischen Klimazonen der höheren geographischen Breiten milde Winter beschert, solange das Meer eisfrei bleibt.

Der Salzgehalt beeinflusst auch — neben den Faktoren Temperatur und Druck — die Zusammendrückbarkeit des Wassers (Kompressibilität). Wenn man auch normalerweise das Wasser als inkompressibel bezeichnen kann, so ist es doch so weit zusammendrückbar, daß zum Beispiel Wasser von 2,48 °C und 34,7 ‰ Salzgehalt bei 1000 atm eine Dichte von 1,0721 g/cm³ hat, während es bei Atmosphärendruck nur eine Dichte von 1,027 g/cm³ aufweist.

5. Schallgeschwindigkeit im Seewasser

Für die Schallgeschwindigkeit V gilt die von Laplace aufgestellte Gleichung:

$$(6) \quad V = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho \cdot K}} \quad [m/s]$$

- Darin bedeuten: γ = das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck und konstantem Volumen
- ρ = Dichte in g/cm³
- K = Kompressibilität

Anhand dieser Gleichung läßt sich berechnen, daß die Schallgeschwindigkeit in reinem Wasser ca. 1440 m/s beträgt, während sie in der Luft bei 333 m/s liegt. In Seewasser beträgt sie bei 0 °C, Atmosphärendruck und normalem Salzgehalt (34—35 ‰) ca. 1445 m/s. Infolge des anormalen physikalischen Verhaltens des

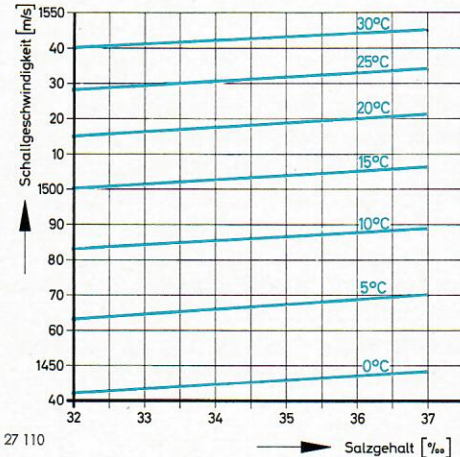


Bild 3

Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit im Seewasser von Salzgehalt und Temperatur

Wassers nimmt bemerkenswerterweise die Schallgeschwindigkeit mit steigender Temperatur zu, während sie bei anderen Flüssigkeiten mit steigender Temperatur abnimmt.

Das Bild 3 zeigt die Abhängigkeit der Werte für V von Temperatur und Salzgehalt, während aus dem Bild 4 die Berichtigungswerte für die Tiefe zu entnehmen sind.

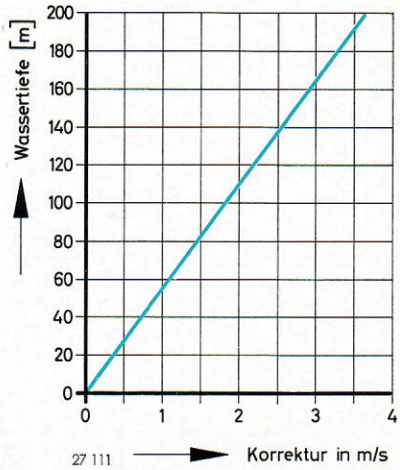


Bild 4

Berichtigungswerte für die Zunahme der Schallgeschwindigkeit im Seewasser mit der Tiefe

6. Unterwasser-Optik

Für den sich unter der Wasseroberfläche befindenden Taucher liegen bezüglich der Sicht andere Verhältnisse vor, da für das Licht beim Eintritt aus der Luft in das Wasser und ausschließlich im Wasser ganz andere Gesetzmäßigkeiten gelten als in der Luft.

Trifft ein Bündel paralleler Strahlen des Sonnenlichts auf die Wasseroberfläche, so wird ein Teil reflektiert, der andere Teil wird nach den von Descartes gefundenen Brechungsgesetzen gebrochen, und zwar in diesem Fall beim Übergang

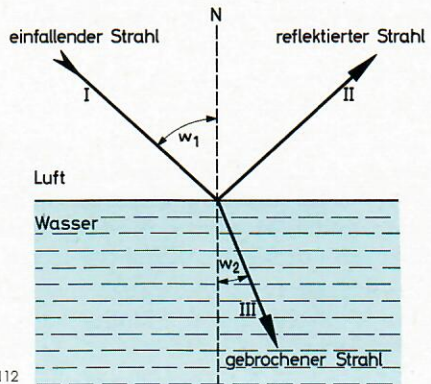


Bild 5

Brechung des Lichtes beim Eintritt von der Luft ins Wasser

27 112

vom dünneren Medium Luft in das dichtere Medium Wasser **zum** Lot hin. Der Einfallswinkel w_1 ist also größer als der Brechungswinkel w_2 (siehe Bild 5).

Für die Größe der Brechung ist das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten maßgebend, und diese verhalten sich wieder wie die Sinusse der Winkel:

$$\text{Brechungsindex } n = \frac{\sin w_1}{\sin w_2} = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit in Luft } C_1}{\text{Lichtgeschwindigkeit in Wasser } C_2}$$

(7)

$$n = \frac{\sin w_1}{\sin w_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

Einige Brechungszahlen:

Luft—Wasser	1,33
Luft—Fensterglas	1,5
Luft—opt. Gläser	1,5—1,75
Luft—Diamant	2,4

Die Lichtgeschwindigkeit in der Luft beträgt ca. 300 000 km/s, im Fensterglas nur 200 000 km/s (in runden Zahlen), also errechnet sich die Brechungszahl zu

$$n = \frac{300\,000}{200\,000} = 1,5.$$

Steht die Sonne im Zenith, dann tritt keine Brechung ein, da $w_1 = w_2$ ist. Auch die Reflexion ist hier am geringsten und beträgt bei ruhiger Wasseroberfläche nur ungefähr 2 %.

Durch diese Brechungsverhältnisse scheinen für einen Beobachter in der Atmosphäre, der nicht ganz senkrecht auf das Wasser blickt, die im Wasser befindlichen Gegenstände näher an der Oberfläche zu sein, als sie es in Wirklichkeit sind. Ein in das Wasser getauchter Stab scheint nach oben abgeknickt.

Im Wasser selbst unterliegt das Licht zwei wesentlichen Einflüssen, dem der Absorption und dem der Streuung.

Das reine Wasser und ebenso das filtrierte Seewasser verhalten sich gegenüber den verschiedenen Wellenlängen des sichtbaren Sonnenlichtes, dessen Spektrum von 750 m μ (rotes Licht) bis 375 m μ (violetttes Licht) reicht, nicht gleichmäßig. Reines Wasser hat ein Minimum der Absorption (= ein Maximum an Durchlässigkeit) für die Wellenlänge 470 m μ . Absorptionsbanden liegen bei 600—635 m μ und bei 656—670 m μ , während über 700 m μ die Absorption praktisch vollkommen ist.

Diese Ergebnisse beruhen auf Messungen in Gewässern von großer Reinheit, wie sie z. B. im Sargasso-Meer und im Tyrrhenischen Meer gegeben sind, wo also die Streuung durch suspendierte Teilchen weitgehend vermieden ist. Es gibt jedoch Meeresteile, wie z. B. die Ostsee, wo in einer Tiefe von 15 m bereits 95 % der gesamten einfallenden Lichtmenge verschluckt sind.

Die beschriebenen Absorptionsverhältnisse bewirken mit zunehmender Tiefe eine Verschiebung der Färbung des zur Verfügung stehenden Lichtes nach tiefem Blau.

Mißt man z. B. für Licht mit verschiedenen Wellenlängen diejenige Tiefe, in der ein einfallender Strahl auf einen bestimmten Betrag seiner Energie, die er an der Oberfläche hatte, vermindert ist, z. B. auf $\frac{1}{16}$, so ergibt sich diese Verminderung

für Gesamtlicht	bei 46 m Tiefe,
für Blau 475 m μ	bei 87 m Tiefe,
für Gelb 575 m μ	bei 31 m Tiefe,
für Rot 625 m μ	bei 9 m Tiefe.

Es muß also eine stete Verschiebung zu dem kurzwelligen Blau hin eintreten.

Diese durch Absorption bedingten Verhältnisse werden durch die Erscheinungen der „Diffusion“, der Streuung, überlagert. Diese Diffusion wird hauptsächlich durch suspendierte feinste Teilchen bewirkt, z. B. Plankton oder verschiedene Sedimente. Da Natur und Dichte der die Diffusion bewirkenden Teilchen in weiten Grenzen schwanken und da eine einheitliche physikalische oder chemische Charakterisierung nicht möglich ist, sind die Erscheinungen der Diffusion schwer in photometrische Gesetzmäßigkeiten zu fassen.

Für das Auge wirkt die Diffusion so, daß man den Eindruck hat, vor den im Blickfeld liegenden Gegenständen liege ein Schleier, der die Kontraste herabsetzt. Absorption und Diffusion verringern schnell mit zunehmender Tiefe die Sicht, wenn auch — wie in der Luft — das Sehvermögen durch zunehmende Anpassung an die schwachen Lichtverhältnisse verbessert wird. Von einer gewissen Tiefe an (jenseits 300 m) erscheinen alle Gegenstände in einem grünlichen Grau, obwohl das bis hier durchdringende Licht von einem sehr reinen Blau ist. In sehr großen Tiefen (über 500 m) sind die Lichtverhältnisse so schwach, daß von einem Licht praktisch nicht mehr gesprochen werden kann. Zur Erzeugung eines klaren Bildes müssen nun außer einer genügenden Aufhellung durch eine Lichtquelle noch weitere Voraussetzungen erfüllt werden. Ein klares Bild setzt nämlich weiter voraus, daß es sich genau in der Ebene der Netzhaut bildet. In der Luft ist dies für das normalsichtige Auge erfüllt. Für das gleiche Auge unter Wasser konvergieren jedoch die Lichtstrahlen nicht so stark und treffen sich zum Bild infolgedessen erst etwas hinter der Netzhaut. Das Auge wird gewissermaßen übersichtig. Schaltet man jedoch eine Glasscheibe dazwischen, so wird durch diese ein virtuelles Bild erzeugt, so daß das Bild wieder an der richtigen Stelle steht.

Die Augen des Tauchers, der mit Helm oder Maske arbeitet, bleiben in Verbindung mit der Luft. Die Lichtstrahlen müssen, bevor sie zum Auge gelangen, die Sichtscheiben im Helm oder in der Maske passieren, wo sie zum ersten Mal gebrochen werden. Die Masken haben heute im allgemeinen ein großes Sichtfenster, da die früher gebräuchlichen zwei Sichtscheiben praktisch niemals in einer Ebene lagen und die dadurch bedingten Brechungsverhältnisse den Taucher zum Schielen veranlaßten.

Durch die Sichtscheiben sind zwar die Augen vor den unmittelbaren Einwirkungen des Seewassers geschützt, auch die Sichtverhältnisse werden besser; aber nur die Gegenstände, die sich zentral im Blickfeld befinden, werden genau gesehen. Sie erscheinen jedoch im Verhältnis 4 : 3 (dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit Luft : Wasser) näher.

7. Druck und Auftrieb unter Wasser

An der Meeresoberfläche herrscht, wie bereits ausgeführt, derjenige Luftdruck, der im Mittel dem Wert der „physikalischen Atmosphäre“ entspricht und 760 mm QS = 1,033 kp/cm² beträgt. Auf einen sich unter Wasser befindenden Körper übt die Flüssigkeit einen nach allen Seiten wirkenden zusätzlichen Druck aus. Dieser beträgt für je 10 m Wassertiefe 1,00 kp/cm² und wird als „technische Atmosphäre“ bezeichnet.

Genau genommen ändert sich dieser Wert etwas mit der von der Temperatur abhängigen Dichte und auch noch mit dem Salzgehalt des Wassers, da dieser die Dichte des Wassers (auf im Mittel 1,025 g/cm³) erhöht. In der Taucherei kön-

nen aber diese beiden Korrekturen im allgemeinen unberücksichtigt bleiben. Auf einen unter Wasser befindlichen Körper wirkt also ein Gesamtdruck, der sich zusammensetzt aus:

- dem als physikalische Atmosphäre (atm) definierten Luftdruck von im Mittel 1,033 kp/cm² und
- dem Wasserdruck, der je 10 m 1,00 kp/cm² beträgt und als „technische Atmosphäre“ (at) bezeichnet wird.

Da der Unterschied zwischen den beiden Meßgrößen gering ist, kann man, sofern es sich nicht um besonders genaue Berechnungen handelt, in der Taucherei diese gleichsetzen, ohne einen wesentlichen Fehler zu begehen, und gibt

den Druck für eine Tiefe von x m an zu $\frac{x}{10} + 1$ [ata] ·

In 20 m Tiefe beträgt also der Gesamtdruck 3 ata, in 30 m 4 ata usw. Bei großen Höhen (z. B. bei Taucherarbeiten in Hochgebirgsseen) muß jedoch der wesentlich niedrigere Luftdruck berücksichtigt werden. Die Berechnung der fiktiven Tauchtiefe T_f erfolgt nach der Formel (8)

$$(8) \quad T_f = \frac{b_0}{b} \cdot T_t \quad [m]$$

darin bedeuten:

T_f = fiktive Tauchtiefe [m]

T_t = tatsächliche (gemessene) Tauchtiefe [m]

b_0 = barometrischer Druck in Meereshöhe [Torr]

b = barometrischer Druck in der gegebenen Höhe über dem Meer [Torr].

Mit dem Wert der fiktiven Tauchtiefe T_f ist also in die Austauschtabellen einzugehen, dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß die Austauschstufen ebenfalls als fiktive Werte anzusehen sind und deshalb in wirkliche Bergseetiefen umgerechnet werden müssen.

Eine Luftmenge von 1 m³ (an der Meeresoberfläche unter 1 atm gemessen) wird also unter 10 m Tiefe auf die Hälfte ihres Volumens, in 20 m Tiefe auf 1/3 usw. zusammengedrückt.

Tabelle 7

	Druck [ata]	Volumen einer bestimmten Gasmenge [%]	Kugel ϕ der Gasmenge [%]
an der Wasseroberfläche	1	100	100
in 10 m Tiefe	2	50	79,3
in 20 m Tiefe	3	33,3	69,3
in 30 m Tiefe	4	25	63,0
in 40 m Tiefe	5	20	58,5
in 90 m Tiefe	10	10	46,2

Nach dem Prinzip von Archimedes verliert ein in einer Flüssigkeit eingetauchter Körper so viel an Gewicht, wie die von ihm verdrängte Flüssigkeitsmenge wiegt. Ist der Körper leichter als z. B. Wasser, so wird er mehr oder weniger aus dem Wasser herausragen, er „schwimmt“; wird er untergetaucht, so strebt er mit einem bestimmten „Auftrieb“ nach oben. Ist der Körper schwerer als Wasser, so geht er unter.

8. AustauchtabelLEN

8.1. AustauchtabelLEN für Luft

8.1.1. Vorbemerkungen

Beim Tauchen mit Luft als Atemgas nimmt der menschliche Körper bestimmte Mengen Stickstoff auf, die von der Tauchtiefe und der Expositionszeit abhängig sind. Wenn diese aufgenommene Menge einen bestimmten kritischen Betrag übersteigt, muß der Aufstieg so weit verzögert werden, daß dem Körper genügend Zeit gelassen wird, diese Stickstoffmengen wieder abzugeben.

Bei zu schnellem Aufstieg treten infolge zu plötzlicher Entsättigung des Körpers vom Stickstoff und wegen der hierdurch bedingten Blasenbildung im Körper Symptome auf, die man als „Dekompressionskrankheit“ bezeichnet und die in leichteren Fällen zu starken Schmerzen, in schweren Fällen jedoch durch eine Luftembolie zum Tode führen können. Das Verhalten der einzelnen Menschen bezüglich der Schnelligkeit der Entsättigung des Körpers sowie auch der Geschwindigkeit der Entsättigung der einzelnen Körperteile sind sehr unterschiedlich.

Man konnte jedoch mit Hilfe von Überlegungen und Berechnungen und vor allem aufgrund jahrzehntelanger Erfahrungen mit Tauchern und Caissonarbeitern AustauchtabelLEN aufstellen. Diese regeln die zeitliche Durchführung des Aufstieges von Tauchern bzw. die Druckentlastung von Caissonarbeitern in Abhängigkeit von der Tauchtiefe und der Tauchdauer.

Durch die Einhaltung bestimmter festgelegter „Austauchtstufen“ kann nach menschlichem Ermessen jede Dekompressionskrankheit vermieden werden.

8.1.2. Verschiedene AustauchtabelLEN

Viele bekannte AustauchtabelLEN wurden in jüngster Zeit überarbeitet. Dabei hat man die Haldanschen Konstanten (HS-Zeiten, Druckquotienten) den inzwischen gewonnenen Erfahrungen angeglichen.

Insgesamt gesehen unterscheiden sich aber die Nullzeiten und Gesamtaustauchtzeiten der einzelnen Tabellen nur unwesentlich.

In der Bundesrepublik wurde 1958 von amtlichen Stellen und Marinemedizinern zusammen mit der Taucherindustrie die vorher gültige Austauchtabelle überarbeitet und den neuesten Erkenntnissen angepaßt.

8.1.3. Austauchtabelle Luft 0—61 m

Die Austauchtabelle Luft Tabelle 8 ist beim Tauchen mit Luft atmosphärischer Zusammensetzung zu verwenden. Dabei ist es belanglos, ob mit Helmtauchgeräten oder mit Schwimmtauchgeräten (Preßluftatmern) getaucht wird.

Die Tauchtiefenbegrenzung ist auf 61 m festgelegt, weil in größeren Tiefen mit Luft atmosphärischer Zusammensetzung normalerweise nicht mehr getaucht werden sollte (Gefahr des Tiefenrausches).

Bei der Anwendung der Austauschtablelle müssen nachstehende Punkte besonders berücksichtigt werden:

- a) Die blauen Zahlen sollen beim Tauchen im Normalfall nie erreicht werden. Sie sind nur aufgeführt, weil im Notfall (z. B. bei Verschüttung oder Verklemmung des Tauchers, Verhaken des Schlauches und/oder der Signalleine) derartige, übermäßig lange Tauchzeiten auftreten können.
- b) Beim Tauchen sollte die durch den waagerechten blauen Strich gekennzeichnete Grenzzeit nicht überschritten werden, falls nicht zwingende Gründe dafür vorliegen, die eine mögliche gesundheitliche Gefährdung des Tauchers rechtfertigen (z. B. Hilfeleistung bei Unfällen, unaufschiebbare Arbeiten).
- c) Innerhalb von 12 Stunden darf der Taucher in Tiefen von mehr als 10 m nur dann wieder tauchen, wenn die Grenzzeit beim ersten Tauchgang nicht erreicht wurde. Die Gesamtaustauchzeit, die sich aus der Summe aller Tauchzeiten und der größten dabei erreichten Tiefe ergibt, darf 75 Minuten nicht überschreiten.

Beispiel:

Erstes Tauchen: 25 m Tiefe, 15 Min. Tabelle 24-27 m, 25 Min. = Austauschzeit 2 Min.

Zweites Tauchen: 28 m Tiefe, 30 Min. (+ 15 Min. v. 1. Tauchen) Tab. 27—30 m, 45—50 Min. = Austauschzeit 30 Min.

Drittes Tauchen: 30 m Tiefe, 15 Min. (+ 45 Min., v. 2. Tauchen) Tab. 30—33 m, 60—65 Min. = Austauschzeit 70 Min.

Das Beispiel zeigt, daß es besser wäre, den dritten Tauchgang von einem noch unbelasteten Taucher ausführen zu lassen, da dieser mit einer Austauschzeit von 2 Min. statt 70 Min. auskommen würde.

- d) Grundsätzlich sollte der Taucher seine maximal zulässige Tauchzeit nicht ausnutzen, wenn ein zweiter Taucher anschließend tauchen muß, um eine Tauchzeitreserve zu haben, falls er dem zweiten Taucher zu Hilfe kommen muß.
- e) Nach zu schnellem Aufstieg (Schießen) muß der Taucher unmittelbar wieder unter Druck gesetzt werden. Er muß entweder wieder auf Tiefe gehen oder in der Taucherdruckkammer unter Druck gebracht werden. Das Austauschen erfolgt nach der Austauschtablelle (siehe g). Die Tabellen gelten für mittlere Arbeit. Ist schwerere körperliche Arbeit geleistet worden, sind die nächst höheren Austauschzeiten zu wählen.
- f) Während des Austauschens sollen keinerlei gymnastische Übungen gemacht werden.
- g) Bereits erkrankte Taucher werden nach der Behandlungstabelle 9 in einer Taucherdruckkammer unter Druck gesetzt und dann dekomprimiert.

Tabelle 8

Erweiterte Austauschabelle für das Tauchen mit Druckluft für Tauchtiefen von 0—61 m mit Angaben über den Luftverbrauch für die Grundzeit und das Austauschen.

Den Tabellenwerten liegen Luftverbräuche an der Oberfläche von 25, 50 und 75 l/min für die Grundzeit und 25 l/min für das Austauschen zugrunde.

Lfd. Nr.	Tauchtiefe [m]	Tauchzeit [min]	Haltezeit in min während des Austauschens in							Gesamtzeit f. d. Aufstieg [min]	Max. Luftbedarf für die Grundzeit in NL bei Luftverbrauch			Luftbedarf f. d. Austausch [l]
			24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m		3 m	25 l/min	50 l/min	
1	0—10		keine Beschränkung							1				
2	10—12	bis 135								1	7 425	14 850	22 275	28
3		135—165						4		5	9 075	18 150	27 225	158
4		165—195						9		10	10 725	21 450	32 175	331
5		195—225						14		15	12 375	24 750	37 125	483
6		225—255						19		20	14 025	28 050	42 075	646
7		255—330						24		25	18 150	36 300	54 450	808
8		330—390						29		30	21 450	42 900	64 350	971
9		390—11 Std.						34		35	36 300	72 600	108 900	1 133
10		über 11 Std.						39		40				1 296
11	12—15	bis 85								1	5 312,5	10 625	15 937	31
12		85—105						4		5	6 562,5	13 125	19 687	161
13		105—120						9		10	7 500	15 000	22 500	324
14		120—135						14		15	8 437,5	16 875	25 312	486
15		135—145						19		20	9 062,5	18 125	27 187	649
16		145—160						24		25	10 000	20 000	30 000	811

Lfd. Nr.	Tauchtiefe [m]	Tauchzeit [min]	Haltezeit in min während des Austauschens in								Gesamtzeit f. d. Aufstieg [min]	Max. Luftbedarf für die Grundzeit in NL bei Luftverbrauch			Luftbedarf f. d. Aus-tauchen [l]			
			24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m		25 l/min	50 l/min	75 l/min				
17	12—15	160—170											10 625	21 250	31 875	1 004		
18		170—190							4	4	25			11 875	23 750		35 625	1 166
19		190—240											15 000	30 000	45 000	1 691		
20		240—360							9	29	40			22 500	45 000		67 500	2 491
21		360—450							34	34	40			28 125	56 250		84 375	
22		über 450							34	45						2 854		
23	15—18	bis 60											4 200	8 400	12 600	35		
24		60—70								4				4 900	9 800		14 700	165
25		70—80								4	5			5 600	11 200		16 800	
26		80—90											6 300	12 600	18 900	520		
27		90—100							4	10				7 000	14 000		21 000	683
28		100—110								4	20			7 700	15 400		23 100	
29		110—120											8 400	16 800	25 200	1 008		
30		120—130								4	25			9 100	18 200		27 300	1 170
31		130—140											9 800	19 600	29 400	1 370		
32		140—150								9	30			10 500	21 000		31 500	1 695
33		150—160								14	40			11 200	22 400		33 600	
34		160—180											12 600	25 200	37 800	2 095		
35		180—200								19	40			14 000	28 000		42 000	2 725
36		200—255								30	45			17 850	35 700		53 550	
37		255—325											22 750	45 500	68 250	4 001		
38		325—495								19	45			34 650	69 300		103 950	4 713
39		über 495								34	50							

Lfd. Nr.	Tauchtiefe [m]	Tauchzeit [min]	Haltezeit in min während des Austauschens in								Gesamtzeit f. d. Aufstieg [min]	Max. Luftbedarf für die Grundzeit in NL bei Luftverbrauch			Luftbedarf f. d. Aus-tauchen [l]		
			24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m		25 l/min	50 l/min	75 l/min			
40	18—21	bis 40											3 100	6 200	9 300	78	
41		40—55												4 262,5	8 525	12 787	169
42		55—60												4 650	9 300	13 950	362
43		60—70												5 425	10 850	16 275	524
44		70—75												5 812,5	11 625	17 437	687
45		75—85												6 587,5	13 175	19 762	849
46		85—90												6 975	13 950	20 925	1 012
47		90—95						4		4	5	25	25	7 362,5	14 725	22 087	1 242
48		95—105												8 137,5	16 275	24 412	1 568
49		105—120												9 300	18 600	27 900	1 929
50		120—135												10 462,5	20 925	31 387	2 492
51		135—150												11 625	23 250	34 875	2 892
52		150—165												12 787,5	25 575	38 362	3 292
53		165—180												13 950	27 900	41 850	3 729
54		180—210												16 275	32 550	48 825	4 404
55		210—240										4	50	18 600	37 200	55 800	4 909
56	21—24	bis 30												2 550	5 100	7 650	85
57		30—40												3 400	6 800	10 200	141
58		40—50												4 250	8 500	12 750	366
59		50—55												4 675	9 350	14 025	528
60		55—60												5 100	10 200	15 300	491
61		60—70												5 950	11 900	17 850	853
62		70—75												6 375	12 750	19 125	1 016

Lfd. Nr.	Tauchtiefe [m]	Tauchzeit [min]	Haltezeit in min während des Austauchens in										Gesamtzeit f. d. Aufstieg [min]	Max. Luftbedarf für die Grundzeit in NL bei Luftverbrauch			Luftbedarf f. d. Austauchen [l]
			24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	25 l/min	50 l/min		75 l/min			
			63	21—24	75—80							4		5	30	6800	
64		80—90						4	10	35	7650	15300	22950	1771			
65		90—105					4	4	20	40	8925	17850	26775	2333			
66		105—120				4	5	30	45	10200	20400	30600	3164				
67		120—140			4	10	35	50	100	11900	23800	35700	3763				
68		140—160		9	30	40	50	130		13600	27200	40800	5188				
69	24—27	bis 25									2312,5	4625	6937	93			
70		25—30							3	3	2775	5550	8325	191			
71		30—40							3	5	3700	7400	11100	376			
72		40—45							3	10	4162,5	8325	12487	538			
73		45—50							3	15	4625	9250	13875	701			
74		50—55							3	20	5087,5	10175	15263	863			
75		55—60							4	20	5550	11100	16650	1087			
76		60—65							4	25	6012,5	12025	18037	1250			
77		65—70							4	30	6475	12950	19425	1612			
78		70—75							4	30	6937,5	13875	20812	1812			
79		75—80							4	35	7400	14800	22200	2175			
80		80—90							4	40	8325	16650	24975	2537			
81		90—100							4	45	9250	18500	27750	2900			
82		100—110				4	15	45	100	10175	20350	30525	3841				
83		110—120				4	20	50	110	11100	22200	33300	4242				
84		120—135			4	25	35	50	125	12487,5	24975	37462	4985				
85		135—150		4	4	10	35	50	140	13875	27750	41625	5735				

Lfd. Nr.	Tauchtiefe [m]	Tauchzeit [min]	Haltezeit in min während des Austauschens in									Gesamtzeit f. d. Aufstieg [min]	Max. Luftbedarf für die Grundzeit in NL bei Luftverbrauch			Luftbedarf f. d. Austausch [l]
			24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	25 l/min		50 l/min	75 l/min		
			86	27—30	bis 20											
87		20—25											2500	5000	7500	198
88		25—30											3000	6000	9000	383
89		30—35											3500	7000	10500	545
90		35—40											4000	8000	12000	708
91		40—45											4500	9000	13500	870
92		45—50						3					5000	10000	15000	1093
93		50—55						3					5500	11000	16500	1256
94		55—60						3					6000	12000	18000	1618
95		60—70						3					7000	14000	21000	2181
96		70—75						4					7500	15000	22500	2608
97		75—80						4					8000	16000	24000	3008
98		80—90						4	15				9000	18000	27000	3646
99		90—105						4	25				10500	21000	31500	4483
100		105—120					4	10	30				12000	24000	36000	5500
101	30—33	bis 17											1827,5	3655	5482	108
102		17—20											2150	4300	6450	206
103		20—25											2687,5	5375	8062	391
104		25—30											3225	6450	9675	553
105		30—35											3762,5	7525	11287	716
106		35—40											4300	8600	12900	878
107		40—45						3					4837,5	9675	14512	1001

Lfd. Nr.	Tauchtiefe [m]	Tauchzeit [min]	Haltezeit in min während des Austauchens in										Gesamtzeit f. d. Aufstieg [min]	Max. Luftbedarf für die Grundzeit in NL bei Luftverbrauch			Luftbedarf f. d. Austauchen [l]
			24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	25 l/min	50 l/min		75 l/min			
											25 l/min	50 l/min		75 l/min			
108	30—33	45—50								3	10	25	5375	10750	16125	1464	
109		50—55								3	15	30	5912,5	11825	17737	1826	
110		55—60								3	20	35	6450	12900	19350	2189	
111		60—65								5	20	40	6987,5	13975	20962	2611	
112		65—70								10	20	45	7525	15050	22575	3011	
113		70—75								15	25	45	8062,5	16125	24187	3449	
114		75—80								20	30	45	8600	17200	25800	3886	
115		80—90							4	20	40	45	9675	19350	29025	4592	
116		90—100							4	10	40	50	10750	21500	32250	5267	
117		100—110							4	20	45	50	11825	23650	35475	6254	
118		110—120							5	25	45	50	12900	25800	38700	7347	
119	33—36	bis 14											1610	3220	4830	115	
120		14—20										3	2300	4600	6900	213	
121		20—25									3	5	2875	5750	8625	398	
122		25—30									3	15	3450	6900	10350	723	
123		30—35									3	20	4025	8050	12075	885	
124		35—40								3	5	25	4600	9200	13800	1271	
125		40—45								3	10	25	5175	10350	15525	1471	
126		45—50								3	15	30	5750	11500	17250	1833	
127		50—55								5	20	35	6325	12650	18975	2456	
128		55—60								10	25	40	6900	13800	20700	3055	
129		60—70								20	30	45	8050	16100	24150	3893	
130		70—75							3	20	35	45	8625	17250	25875	4391	
131		75—80							3	25	45	45	9200	18400	27600	4904	

Lfd. Nr.	Tauchtiefe [m]	Tauchzeit [min]	Haltezeit in min während des Austauschens in										Gesamtzeit f. d. Aufstieg [min]	Max. Luftbedarf für die Grundzeit in NL bei Luftverbrauch			Luftbedarf f. d. Aus-tauchen [l]
			24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	25 l/min	50 l/min		75 l/min			
											25 l/min	50 l/min		75 l/min			
132	33—36	80—90				3	15	30	40	50		10 350	20 700	31 050	5 778		
133		90—100			4	5	20	35	40	50		11 500	23 000	34 500	6 638		
134		100—110			4	15	25	40	45	50		12 650	25 300	37 950	7 975		
135		110—120			4	20	35	40	45	50		13 800	27 600	41 400	8 837		
136	36—39	bis 11										1 347,5	2 695	4 042,5	184		
137		11—15								3		1 837,5	3 675	5 512,5	221		
138		15—20							3	5		2 450	4 900	7 350	406		
139		20—25							3	10		3 062,5	6 125	9 187,5	568		
140		25—30							3	20		3 675	7 350	11 025	893		
141		30—35						3	5	20		4 287,5	8 575	12 862,5	1 116		
142		35—40							10	25		4 900	9 800	14 700	1 479		
143		40—45					3	5	15	30		5 512,5	11 025	16 537,5	2 107		
144		45—50					3	5	20	35		6 125	12 250	18 375	2 464		
145		50—55					3	10	25	40		6 737,5	13 475	20 212,5	3 063		
146		55—60					3	15	30	45		7 350	14 700	22 050	3 664		
147		60—70				3	10	20	30	50		8 575	17 150	25 725	4 636		
148		70—75				3	15	25	40	50		9 187,5	18 375	27 562,5	5 549		
149		75—80				3	20	30	45	50		9 800	19 600	29 400	6 261		
150		80—90			3	5	25	40	45	50		11 025	22 050	33 075	7 346		
151		90—100		3	5	15	30	40	45	50		12 250	24 500	36 750	8 619		
152		100—110	3	3	10	25	30	45	45	50		13 475	26 950	40 425	9 832		
153		110—120	3	3	15	30	40	45	45	50		14 700	29 400	44 100	11 044		

Lfd. Nr.	Tauchtiefe [m]	Tauchzeit [min]	Haltezeit in min während des Austauchens in										Gesamtzeit f. d. Aufstieg [min]	Max. Luftbedarf für die Grundzeit in NL bei Luftverbrauch			Luftbedarf f. d. Austauchen [l]
			24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	25 l/min	50 l/min		75 l/min			
154	39—42	bis 9												1 170	2 340	3 510	195
155		9—10												1 300	2 600	3 900	260
156		10—15													1 950	3 900	5 850
157		15—20												2 600	5 200	7 800	575
158		20—25												3 250	6 500	9 750	738
159		25—30				3								3 900	7 800	11 700	1 123
160		30—35												4 550	9 100	13 650	1 486
161		35—40					3							5 200	10 400	15 600	2 108
162		40—45					3							5 850	11 700	17 550	2 508
163		45—50												6 500	13 000	19 500	3 108
164		50—55					3							7 150	14 300	21 450	3 769
165		55—60					3							7 800	15 600	23 400	4 406
166		60—65												8 450	16 900	25 350	5 119
167		65—70					3							9 100	18 200	27 300	5 793
168		70—75					3							9 750	19 500	29 250	6 603
169		75—80												10 400	20 800	31 200	7 153
170		80—85					3							11 050	22 100	33 150	7 978
171		85—95					3							12 350	24 700	37 050	9 213
172		95—105												13 650	27 300	40 950	10 264
173		105—115					3							14 950	29 900	44 850	11 714
174	42—45	bis 8												1 100	2 200	3 300	207
175		8—10												1 375	2 750	4 125	272
176		10—15												2 062,5	4 125	6 187,5	450

Lfd. Nr.	Tauchtiefe [m]	Tauchzeit [min]	Haltezeit in min während des Austauschens in										Gesamtzeit f. d. Aufstieg [min]	Max. Luftbedarf für die Grundzeit in NL bei Luftverbrauch			Luftbedarf f. d. Aus-tauchen [l]
			24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	25 l/min	50 l/min		75 l/min			
177	42—45	15—20											2 750	5 500	8 250	775	
178		20—25				3		2	5	20			3 437,5	6 875	10 312,5	1 131	
179		25—30						10	10	25			4 125	8 250	12 375	1 494	
180		30—35				3		10	10	30			4 812,5	9 625	14 437,5	1 916	
181		35—40				3		10	15	35			5 500	11 000	16 500	2 516	
182		40—45						20	20	40			6 187,5	12 375	18 562,5	3 116	
183		45—50				3		25	45	50			6 875	13 750	20 625	3 777	
184		50—55				3		30	45	50			7 562,5	15 125	22 687,5	4 651	
185		55—60						35	50	50			8 250	16 500	24 750	5 364	
186		60—65				3		40	50			8 937,5	17 875	26 812,5	6 138		
187		65—70				3		45	50			9 625	19 250	28 875	6 923		
188		70—75						45	50			10 312,5	20 625	30 937,5	7 749		
189		75—80				3		45	50			11 000	22 000	33 000	8 946		
190		80—85		3		10		45	50			11 687,5	23 375	35 062,5	9 884		
191		85—90		3		15		45	50			12 375	24 750	37 125	11 059		
192	45—48	bis 10						2	5			1 450	2 900	4 350	461		
193		10—15						2	10			2 175	4 350	6 525	623		
194		15—20						2	15			2 900	5 800	8 700	1 001		
195		20—25						2	20			3 625	7 250	10 875	1 363		
196		25—30						3	5			4 350	8 700	13 050	1 761		
197	30—35						3	10			5 075	10 150	15 225	2 360			
198	35—40						3	10			5 800	11 600	17 400	2 885			
199	40—45						3	15			6 525	13 050	19 575	3 784			

Lfd. Nr.	Tauchtiefe [m]	Tauchzeit [min]	Haltezeit in min während des Austauschens in										Gesamtzeit f. d. Aufstieg [min]	Max. Luftbedarf für die Grundzeit in NL bei Luftverbrauch			Luftbedarf f. d. Aus-tauchen [l]
			24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	25 l/min	50 l/min		75 l/min			
											25 l/min	50 l/min		75 l/min			
200	45—48	45—50				3	10	20	30	45	45	7 250	14 500	21 750	4 496		
201		50—55				3	15	25	40	45	45	7 975	15 950	23 925	5 409		
202		55—60			3	5	20	25	40	50	50	8 700	17 400	26 100	6 181		
203		60—65			3	10	20	35	45	50	50	9 425	18 850	28 275	7 168		
204		65—70			3	15	25	40	45	50	50	10 150	20 300	30 450	7 993		
205		70—75		3	5	20	30	40	45	50	50	10 875	21 750	32 625	8 953		
206		75—80		3	10	25	35	40	45	50	50	11 600	23 200	34 800	9 891		
207		80—85		3	15	30	40	45	45	50	50	12 325	24 650	36 975	11 066		
208	48—51	bis 10							2	5	5	1 525	3 050	4 575	472		
209		10—15							2	10	10	2 287,5	4 575	6 862,5	634		
210		15—20						2	5	15	15	3 050	6 100	9 150	1 012		
211		20—25						2	10	25	25	3 812,5	7 625	11 437,5	1 537		
212		25—30					2	5	15	30	30	4 575	9 150	13 725	2 152		
213		30—35					2	10	20	35	35	5 337,5	10 675	16 012,5	2 752		
214		35—40				3	5	15	25	35	35	6 100	12 200	18 300	3 467		
215		40—45				3	10	20	30	40	40	6 862,5	13 725	20 587,5	4 341		
216		45—50			3	5	10	25	35	45	45	7 625	15 250	22 875	5 277		
217		50—55			3	5	15	30	40	50	50	8 387,5	16 775	25 162,5	6 151		
218		55—60			3	10	20	35	45	50	50	9 150	18 300	27 450	7 176		
219		60—65		3	5	15	25	35	45	50	50	9 912,5	19 825	29 737,5	8 137		
220		65—70		3	10	15	30	40	45	50	50	10 675	21 350	32 025	8 999		
221		70—75		3	15	20	35	45	45	50	50	11 437,5	22 875	34 312,5	10 174		
222		75—80	3	5	20	25	40	45	45	50	50	12 200	24 400	36 600	11 522		

Lfd. Nr.	Tauchtiefe [m]	Tauchzeit [min]	Haltezeit in min während des Austauschens in								Gesamtzeit f. d. Aufstieg [min]	Max. Luftbedarf für die Grundzeit in NL bei Luftverbrauch			Luftbedarf f. d. Aus-tauchen [l]	
			24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m		25 l/min	50 l/min	75 l/min		
223	51—54	bis 10											1 600	3 200	4 800	483
224		10—15							2	2	5	10	2 400	4 800	7 200	860
225		15—20							2	2	10	15	3 200	6 400	9 600	1 223
226		20—25							2	5	10	25	4 000	8 000	12 000	1 801
227		25—30						2	10	15	35	4 800	9 600	14 400	2 563	
228		30—35				2	5	15	20	30	40	50	5 600	11 200	16 800	2 453
229		35—40				2	10	20	25	35	45	50	6 400	12 800	19 200	4 328
230		40—45			3	5	10	15	25	35	45	50	7 200	14 400	21 600	5 284
231		45—50			3	5	10	15	20	30	40	50	8 000	16 000	24 000	6 158
232		50—55			3	10	20	35	45	50	50	50	8 800	17 600	26 400	7 183
233		55—60		3	5	10	15	25	40	45	50	50	9 600	19 200	28 800	8 381
234		60—65		3	10	20	30	40	45	50	50	50	10 400	20 800	31 200	9 318
235		65—70		3	15	25	35	45	50	50	50	50	11 200	22 400	33 600	10 494
236		70—75		5	20	30	40	45	50	50	50	50	12 000	24 000	36 000	11 841
237		54—57	bis 10								2	5	10	1 675	3 350	5 025
238		10—15								2	5	15	2 512,5	5 025	7 537,5	1 035
239		15—20							2	2	10	20	3 350	6 700	10 050	1 397
240		20—25					2	5	15	25	35	45	4 187,5	8 375	12 562,5	2 013
241		25—30				2	5	10	15	20	30	40	5 025	10 050	15 075	3 065
242		30—35				2	5	15	20	30	45	50	5 862,5	11 725	17 587,5	4 028
243		35—40			2	5	10	15	20	25	35	45	6 700	13 400	20 100	5 068
244	40—45			2	5	15	25	35	45	50	50	7 537,5	15 075	22 612,5	5 943	

Lfd. Nr.	Tautiefe [m]	Tauchzeit [min]	Haltezeit in min während des Austauschens in										Gesamtzeit f. d. Aufstieg [min]	Max. Luftbedarf für die Grundzeit in NL bei Luftverbrauch			Luftbedarf f. d. Aus-tauchen [l]
			24 m	21 m	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m	25 l/min	50 l/min		75 l/min			
											25 l/min	50 l/min		75 l/min			
245	54—57	45—50			2	10	20	30	45	50	8 375	16 750	25 125	6 967			
246		50—55		3	5	15	25	35	45	50	9 212,5	18 425	27 637,5	8 152			
247		55—60		3	10	20	30	40	45	50	10 050	20 100	30 150	9 326			
248		60—65	3	5	10	25	35	45	45	50	10 887,5	21 775	32 662,5	10 562			
249		65—70	3	10	15	30	40	45	45	50	11 725	23 450	35 175	11 886			
250	57—61	bis 10							2	10	1 775	3 550	5 325	672			
251		10—15						2	5	15	2 662,5	5 325	7 987,5	1 050			
252		15—20					2	5	10	20	3 550	7 100	10 650	1 665			
253		20—25					2	10	15	30	4 437,5	8 875	13 312,5	2 427			
254		25—30				2	5	15	20	40	5 325	10 650	15 975	3 480			
255		30—35				2	10	20	30	45	6 212,5	12 425	18 637,5	4 555			
256		35—40			2	5	15	25	40	45	7 100	14 200	21 300	5 796			
257		40—45			2	10	20	30	45	50	7 987,5	15 975	23 962,5	6 982			
258		45—50		2	5	15	25	35	45	50	8 875	17 750	26 625	8 173			
259		50—55		2	10	20	30	40	45	50	9 762,5	19 525	29 287,5	9 347			
260		55—60		3	5	10	25	35	45	50	10 650	21 300	31 950	10 572			
261		60—65	3	10	15	30	40	45	45	50	11 537,5	23 075	34 612,5	11 896			

8.1.4. Behandlungstabelle für erkrankte Taucher

Bereits erkrankte Taucher sind entsprechend der nachstehenden Behandlungstabelle unter Druck zu setzen und zu dekomprimieren.

Dabei sind folgende Anmerkungen zu berücksichtigen:

- a) Jeder Taucher mit Caissonkrankheit oder Symptomen, die nicht eindeutig auf andere Ursachen zurückzuführen sind, muß nach dieser Behandlungstabelle behandelt werden. Abweichungen sind nur auf Rat eines Taucherarztes oder in besonderen Notfällen (z. B. Brand) zulässig. Die Rekompresseion verursacht keine Schäden und kann ernste Folgen verhindern.
- b) Wenn ein Taucherarzt anwesend ist und keine Zeichen einer schweren Erkrankung vorliegen, soll der Taucher vor der Rekompresseion sorgfältig untersucht werden.
- c) Die Abstiegs-geschwindigkeit beträgt normalerweise 8 m/min, in schweren Fällen ist ein rascherer Abstieg erwünscht. Wenn die Schmerzen beim Abstieg zunehmen, muß angehalten werden und dann der Abstieg so fortgesetzt werden, wie es der Patient verträgt.
- d) Die jeweils erforderliche Behandlungstiefe muß erreicht, sie darf nur auf Anweisung eines Taucherarztes überschritten werden. Wenn möglich, soll die Tiefe, in der die Beschwerden verschwinden, protokolliert werden.
- e) Die Aufstiegs-geschwindigkeit beträgt jeweils 5 Minuten von Stufe zu Stufe. Sie ist in den Behandlungszeiten **nicht** enthalten und muß zugerechnet werden.
- f) Sobald als möglich soll ein Taucherarzt den Patienten untersuchen und sich vergewissern, daß auch die richtige Behandlung gemäß Tabelle angewandt wird. Insbesondere ist auf Erscheinungen von seiten des Zentralnervensystems zu achten, die eine höhere Behandlungsstufe erfordern. Nach Erreichen des Maximaldruckes soll der Taucherarzt, sein Gehilfe oder ein anderer Taucher in der Kammer den Patienten so genau und vollständig wie möglich untersuchen, um ein unvollständiges Verschwinden der Beschwerden oder zuvor übersehene Symptome feststellen zu können. Dazu muß der Patient zumindest aufstehen und in der Kammer auf und ab gehen.

Vor Beginn des Aufstiegs, d. h. vor Verlassen der Maximaltiefe, muß diese Untersuchung wiederholt werden. Der Patient muß vor dem Verlassen und nach dem Erreichen jeder Stufe (bei längeren Aufenthaltszeiten auch zwischendurch) nach seinem Befinden befragt werden. Er darf bei einer Tiefenänderung nicht schlafen, auch darf er nicht länger als eine Stunde während des Aufenthaltes auf einer Stufe schlafen, weil dann die Symptome während des Schlafens wieder auftreten können. Vor dem Verlassen der letzten Stufe (3 m) muß der Patient erneut untersucht werden.

- g) Wenn sich der Zustand des Patienten während der Ausschleusung verschlimmert, muß angehalten und folgendermaßen verfahren werden:

Der Druck wird bis zu dem Verschwinden der Beschwerden gesteigert, niemals jedoch auf eine Tiefe von weniger als 10 m oder mehr als 50 m (mit Ausnahme der Anweisung eines Taucherarztes). Die weitere Ausschleusung erfolgt von dieser Tiefe nach Spalte 4. Tritt der Rückfall im Anschluß an die

Tabelle 9 Behandlungstabelle für erkrankte Taucher

Kammerdruck [ata]	6,0	5,2	4,6	4,0	3,4	2,8	2,5	2,2	1,9	1,6	1,3	1,0
entspr. Wassertiefe [m]	50	42	36	30	24	18	15	12	9	6	3	0
Spalte	Aufenthaltszeit in Min. oder Std. auf den verschiedenen Stufen mit Luft- oder Sauerstoff-(O ₂ -)Atmung											
1	Wenn die Schmerzen in weniger als 20 m (3 ata) Tiefe verschwinden			30 Min. Luft	12 Min. Luft	je 30 Minuten Luft (oder O ₂)			1 Std. Luft (oder 5 Min.* O ₂)	1 Std. Luft (oder 5 Min.* O ₂)	2 Std. Luft (oder 5 Min.* O ₂)	je 1 Min. Luft (oder Sauerstoff)
2	Wenn die Schmerzen in mehr als 20 m (3 ata) Tiefe verschwinden ¹⁾	30 Min. Luft	je 12 Minuten Luft			je 30 Minuten Luft (oder O ₂)			2 Std. Luft (oder 60 Min.* O ₂)	2 Std. Luft (oder 5 Min.* O ₂)	4 Std. Luft (oder 5 Min.* O ₂)	
3	Wenn die Symptome ²⁾ innerhalb weniger als 30 Min. in 50 m (6 ata) verschwinden	30 Min. Luft	je 12 Minuten Luft			je 30 Minuten Luft (oder O ₂)			12 Std. Luft	2 Std. Luft	2 Std. Luft (oder O ₂)	
4	Wenn die Symptome ²⁾ nach 30 Min. Aufenthalt in 50 m (6 ata) noch bestehen	30 Min. bis 2 Std. Luft	je 30 Minuten Luft			je 6 Stunden Luft			11 Std. Luft, dann 1 Std. Luft (od. O ₂)	je 1 Std. Luft, dann 1 Std. Luft (oder O ₂)		

Behandlungstabelle

¹⁾ Falls die Schmerzen nach 30 Min. in 50 m Wassertiefe nicht verschwinden, sind Bends unwahrscheinlich. Ausschleusen nach Austauschtablette für Gesamtaufenthaltszeit unter Druck.

²⁾ Bewußtlosigkeit, Kramp fzustände, Schwäche oder Gebrauchsunfähigkeit der Gliedmaßen, Zeichen von Luftembolie, Sehstörungen, Schwindelgefühl, Sprach- oder Hörverlust, schwere Atemnot (Kurzatmigkeit), Erstickungsgefühl, Schmerzen, die schon unter Überdruck aufgetreten sind.

^{*}) Nur, wenn durchgehend Sauerstoff geatmet wurde.

Weitere Hinweise (Auf- und Abstiegsgeschwindigkeit, Behandlung von Rückfällen) s. Anmerkung.

Anmerkungen zur Behandlungstabelle:

1. Jeder Taucher mit Caissonkrankheit oder Symptomen, die nicht eindeutig auf andere Ursachen zurückzuführen sind, muß nach dieser Behandlungstabelle behandelt werden. Abweichungen sind nur auf Rat eines Taucherarztes oder in besonderen Notfällen (z. B. Brand) zulässig. Die Rekompresseion verursacht keine Schäden und kann ernste Folgen verhindern.
2. Wenn ein Taucherarzt anwesend ist und keine Zeichen einer schweren Erkrankung vorliegen, soll der Taucher vor der Rekompresseion sorgfältig untersucht werden.
3. Die **Abstiegsgeschwindigkeit** beträgt normalerweise 8 m/min, in schweren Fällen ist ein rascherer Abstieg erwünscht. Wenn die Schmerzen beim Abstieg zunehmen, muß angehalten und sodann der Abstieg so fortgesetzt werden, wie es der Patient verträgt.

Behandlung auf, so wird ebenfalls bis zum Verschwinden der Beschwerden rekomprimiert. Ist dies in weniger als 10 m Tiefe der Fall, so wird bis 9 m abgestiegen und anschließend nach Spalte 3 ausgeschleust. Verschwinden die Beschwerden erst in mehr als 10 m Tiefe, so bleibt man 30 Minuten in der Tiefe, in der die Beschwerden verschwanden und schleust von da aus entweder nach Spalte 3 oder (wenn ursprünglich bereits nach Spalte 3 behandelt wurde) nach Spalte 4 aus.

- h) Auf eine ausreichende Lüftung der Druckkammer durch entsprechende Spülung muß geachtet werden, insbesondere, wenn Sauerstoff geatmet wird.
- i) Falls vorhanden, soll Sauerstoff geatmet werden, wenn es in der betreffenden Spalte vorgesehen und ein Taucherarzt oder Tauchermeister anwesend ist. Dabei sind die Maßnahmen des Feuerschutzes besonders zu beachten. Treten Schwindelgefühl, Übelkeit, Muskelzuckungen oder verschwommenes Sehen während der Sauerstoffatmung auf, so muß die Sauerstoffmaske entfernt und die restliche Behandlung mit Luft durchgeführt werden.
- j) Im Anschluß an die Behandlung muß der Patient noch mindestens 6 Stunden in der Nähe der Druckkammer bleiben (bzw. 24 Stunden, wenn kein rascher Rücktransport gewährleistet werden kann).
- k) Jeder Taucher, der wegen einer Caissonkrankheit (oder Luftembolie) behandelt wurde, muß anschließend so lange vom Tauchen ausgeschlossen werden, bis er durch einen Taucherarzt untersucht und wieder für tauglich befunden wurde.

8.1.5. Austauchen ohne Haltestufen

Bis zu einer Tauchtiefe von 10 m gelten keine Beschränkungen hinsichtlich Tauchzeiten und Einhaltung von Austauchstufen. Auch bei größeren Tauchtiefen kann gegebenenfalls ohne Stufen ausgetaucht werden, wenn bestimmte höchstzulässige Tauchzeiten nicht überschritten werden.

Entnimmt man der Austauchtabelle für Luft diese Höchstzeiten, so ergibt sich eine Grenzkurve (siehe Bild 6), die für jede Tauchtiefe die zugehörige Höchstzeit für das „Austauchen ohne Halt“ angibt und bei einer bestimmten Tiefe endet.

Man spricht bei diesen Höchstzeiten auch von der „Nullzeit“.

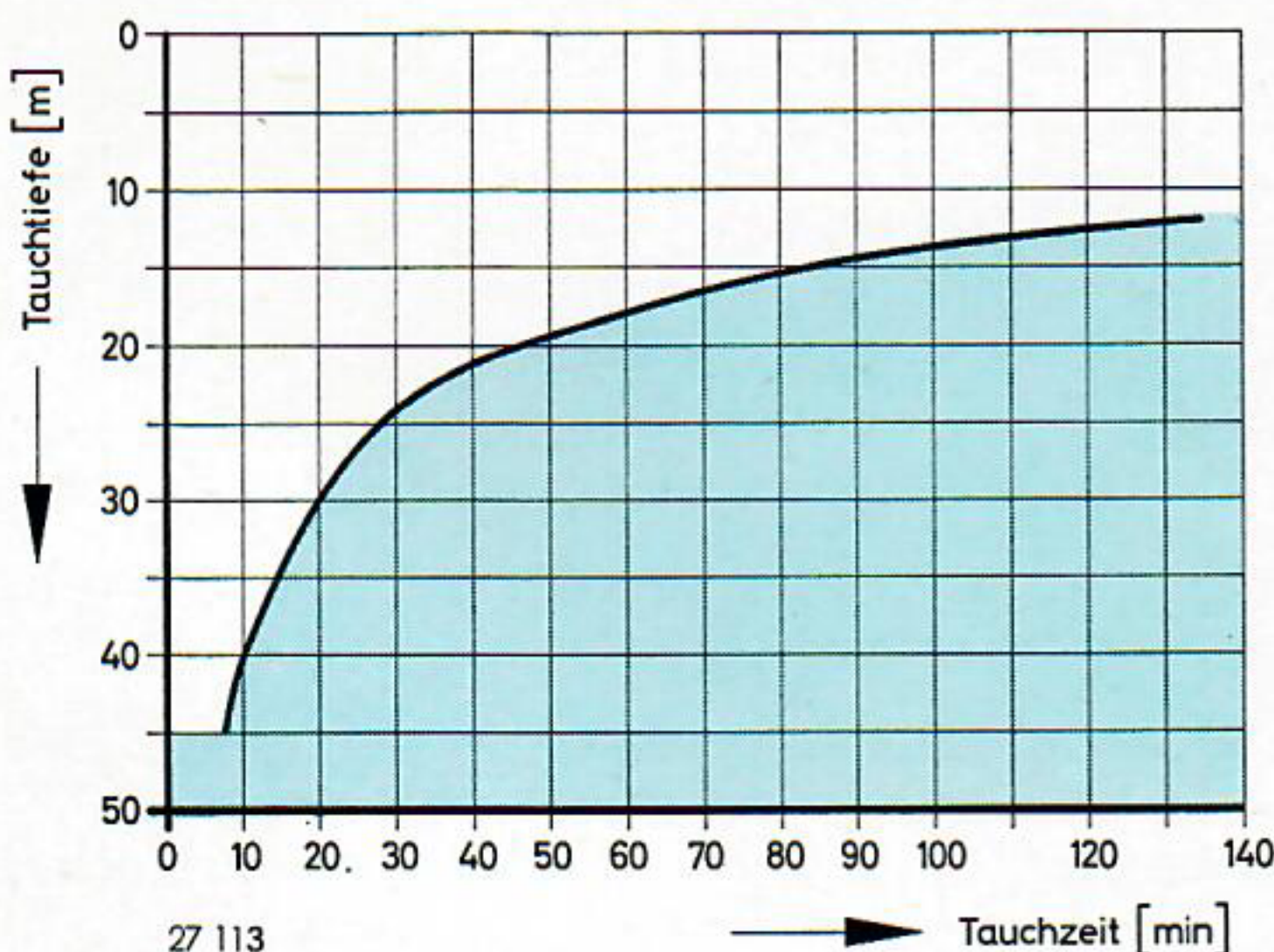


Bild 6

Grenzkurve der Nullzeiten für das Tauchen mit Luft

Bei einem Vergleich der Grenzkurven, die für die verschiedenen Austausch-tabel-len ermittelt wurden, hat sich ergeben, daß diese nahe beieinander liegen. Der Endwert dieser Kurve liegt bei 45 m; für das praktische Tauchen bedeutet dies, daß über diese Tiefe hinaus immer Austauschzeiten in der tabellenmäßigen Stufung eingehalten werden müssen.

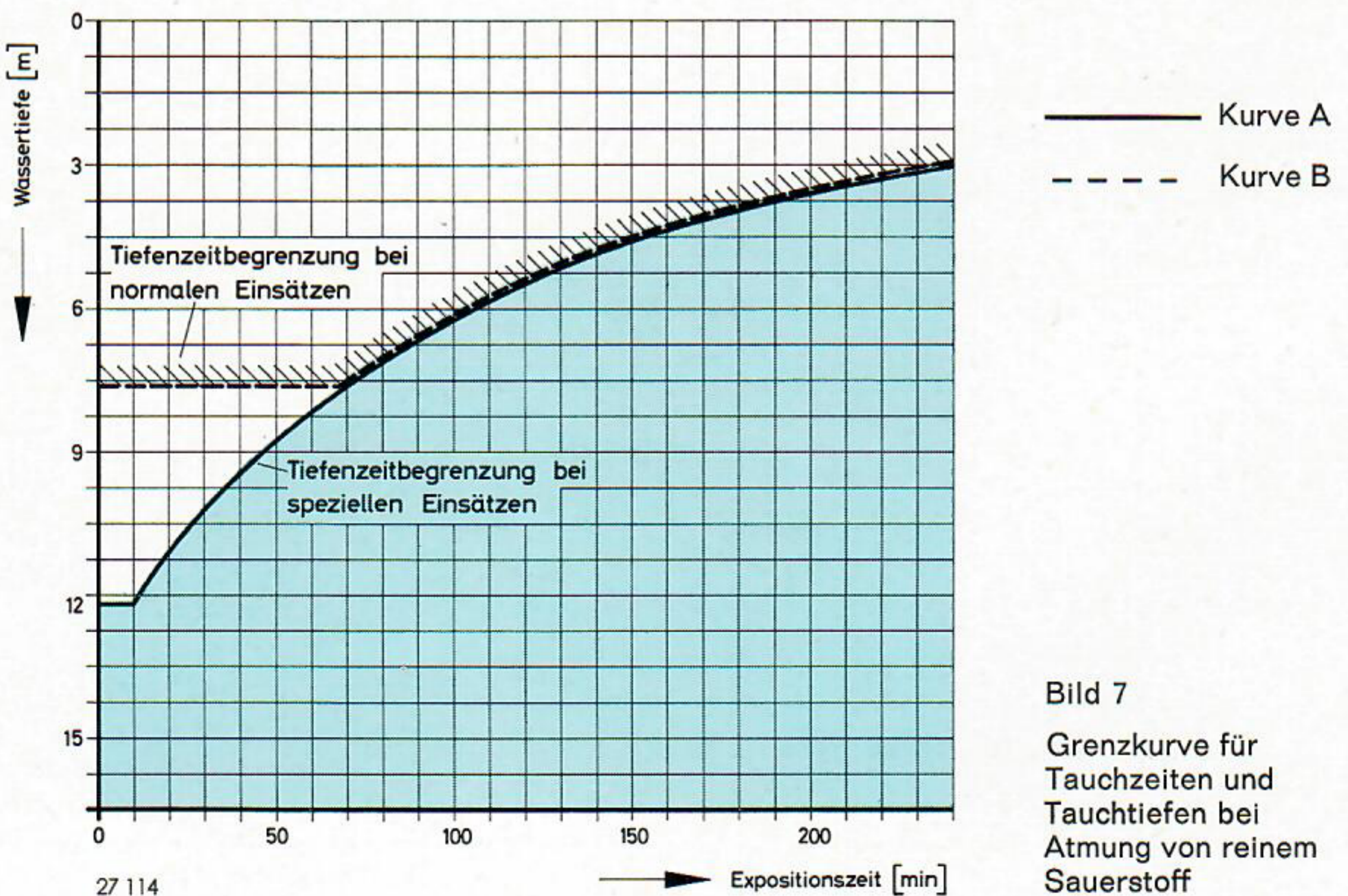
8.2. Tabellen für das Tauchen mit reinem Sauerstoff

Reiner Sauerstoff als Atemgas ist nur für Geräte mit geschlossenem Kreislauf vorteilhaft und stellt für diese Geräte das einzige in Betracht kommende Atem-gas dar. Außerdem kann reiner Sauerstoff bei der Dekompressionsbehandlung verwendet werden.

Nachteilig wirken sich beim Einsatz von Sauerstoff die bei höheren Drücken auftretenden Vergiftungserscheinungen aus. Dazu kommt noch die Tatsache, daß diese Auswirkungen von reinem Sauerstoff bei verschiedenen Personen in recht weiten Grenzen voneinander abweichen und sogar bei ein und derselben Person nicht unbeträchtlichen Schwankungen unterliegen können.

Die vielfältigen Untersuchungen haben gezeigt, daß folgende Regeln, die den Einsatz von Sauerstoffkreislaufgeräten betreffen, unbedingt einzuhalten sind:

- a) Als Tiefengrenze für normale Taucherarbeiten gilt eine Tauchtiefe von 7,6 m.
- b) Als äußerste Grenze für außergewöhnliche Arbeiten gilt eine Tauchtiefe von 12,2 m.
- c) Mit zunehmender Tauchtiefe nimmt die zulässige Tauchzeit ab. Als theoretisch und — mit gewissen Vorbehalten — auch praktisch zulässige Grenze gilt die Kurve A in Bild 7, deren Werte keinesfalls überschritten werden dürfen.
- d) Um wegen der individuellen Abweichungen der Giftigkeit des Drucksauerstoffes und wegen der Schwierigkeit bei Gerätetauchern die jeweiligen



Tauchtiefen genau festzustellen, wird empfohlen, anstatt A die Kurve B als Maßstab zu nehmen.

Eine Dekompressionsbehandlung ist bei reinem Sauerstoff als Atemgas wegen des Fortfalls der durch Stickstoff bedingten Symptome nicht erforderlich.

8.3. Tauchen mit Sauerstoff-Stickstoff-Gemischen

Die Verwendung von Sauerstoff-Stickstoff-Gemischen, die einen höheren Sauerstoffgehalt haben als die Luft, ist vielfach bei Kreislaufgeräten von Vorteil, die im halbgeschlossenen System arbeiten.

Solche Gemische haben zwar aus physiologischen Gründen in mancherlei Beziehung Vorteile, die Anwendung für Sauerstoff ist jedoch wegen seiner toxischen Eigenschaften unter Druck stärker eingeeengt als für Luft.

Da jedoch der Stickstoffanteil geringer ist als in der Luft, ergibt sich auch eine geringere Austauschzeit, bzw. eine Vergrößerung der Nullzeiten, falls man keine Austauschzeiten in Kauf nehmen will.

Weil die direkte Bestimmung der Austauschzeiten für die verschiedenen Mischungsverhältnisse eine Anzahl verschiedener Austauchtabelle erforderlich macht, die in der Praxis unbequem zu handhaben wären und Fehlerquellen einschließen, hat man Faktoren ermittelt, die für ein bestimmtes O₂-N₂-Gemisch und dessen Zusatzrate anstelle der wirklichen Tauchtiefe einen Äquivalentwert ergeben, mit dem man die Austauschzeiten aus der „Austauchtabelle für Luft“ entnehmen kann.

Zur Vereinfachung des Verfahrens für die Rechnung und die Taucherpraxis werden hauptsächlich drei Standardgemische verwendet, obwohl man grundsätzlich jedes beliebige Mischungsverhältnis verwenden könnte. Die Standardgemische sind:

Gemisch	Sauerstoffanteil [%]	Stickstoffanteil [%]
B	60	40
C	40	60
D	32,5	67,5

Diese Mischungen werden den folgenden Ausführungen zugrunde gelegt. Aus der Tabelle 10 sind die Verwendungsbereiche und die Zusatzraten (Dosierungen) für diese Standardgemische zu entnehmen. Jede dieser Mischungen kann selbstverständlich für alle Tiefen verwendet werden, die niedriger als die angegebenen Höchstgrenzen sind.

Betrachtet man die Verhältnisse bei der Verwendung von Gasgemischen, so muß streng unterschieden werden zwischen der Dosierung (Frischgaszusatz), angegeben in l/min, und der Gasmischung, die der Taucher atmet (Atemgas). Diese zwei Begriffe sind nur in offenen Geräten identisch, können jedoch in Geräten mit halbgeschlossenem oder geschlossenem Kreislauf erheblich voneinander abweichen.

Tabelle 10

Verwendungsbereiche der Standardgemische O₂-N₂

Gemisch	O ₂ [%]	N ₂ [%]	Zusatzrate [l/min]	Tauchtiefenbereich [m]
B	60	40	4	0—24
C	40	60	8	24—42
D	32,5	67,5	12,8	42—54

Um für das Austauchen mit Sauerstoff-Stickstoff-Gemischen trotzdem die Austauchtabellen für Luft benutzen zu können, ist es erforderlich, die äquivalente Stickstofftiefe zu ermitteln. Im halbgeschlossenen Kreislauf ist diese äquivalente Stickstofftiefe von der jeweiligen Arbeitsleistung des Tauchers und damit von seinem Sauerstoffverbrauch abhängig.

Für die Standardgemische B, C und D mit den Zusatzraten nach Tabelle 10 sind die äquivalenten Stickstofftauchtiefen in Abhängigkeit vom Sauerstoffverbrauch sofort aus den Kurven (Bild 8) abzulesen.

Das eingetragene Beispiel zeigt:

- Verwendetes Gemisch D
- Zusatzrate 12,8 l/min
- Tauchtiefe 51 m
- Sauerstoffverbrauch des Tauchers 1 l/min (leichte — mittlere Arbeit)
- Ergebnis: äquivalente Stickstofftiefe 46,5 m

Für andere Gasgemische lassen sich solche Diagramme ohne Mühe erstellen. Bei dieser Berechnung der Werte geht man dabei immer von dem jeweilig vorhandenen Sauerstoffpartialdruck im Atemgas aus und schließt von dort bei der gegebenen Tauchtiefe auf den Stickstoffpartialdruck.

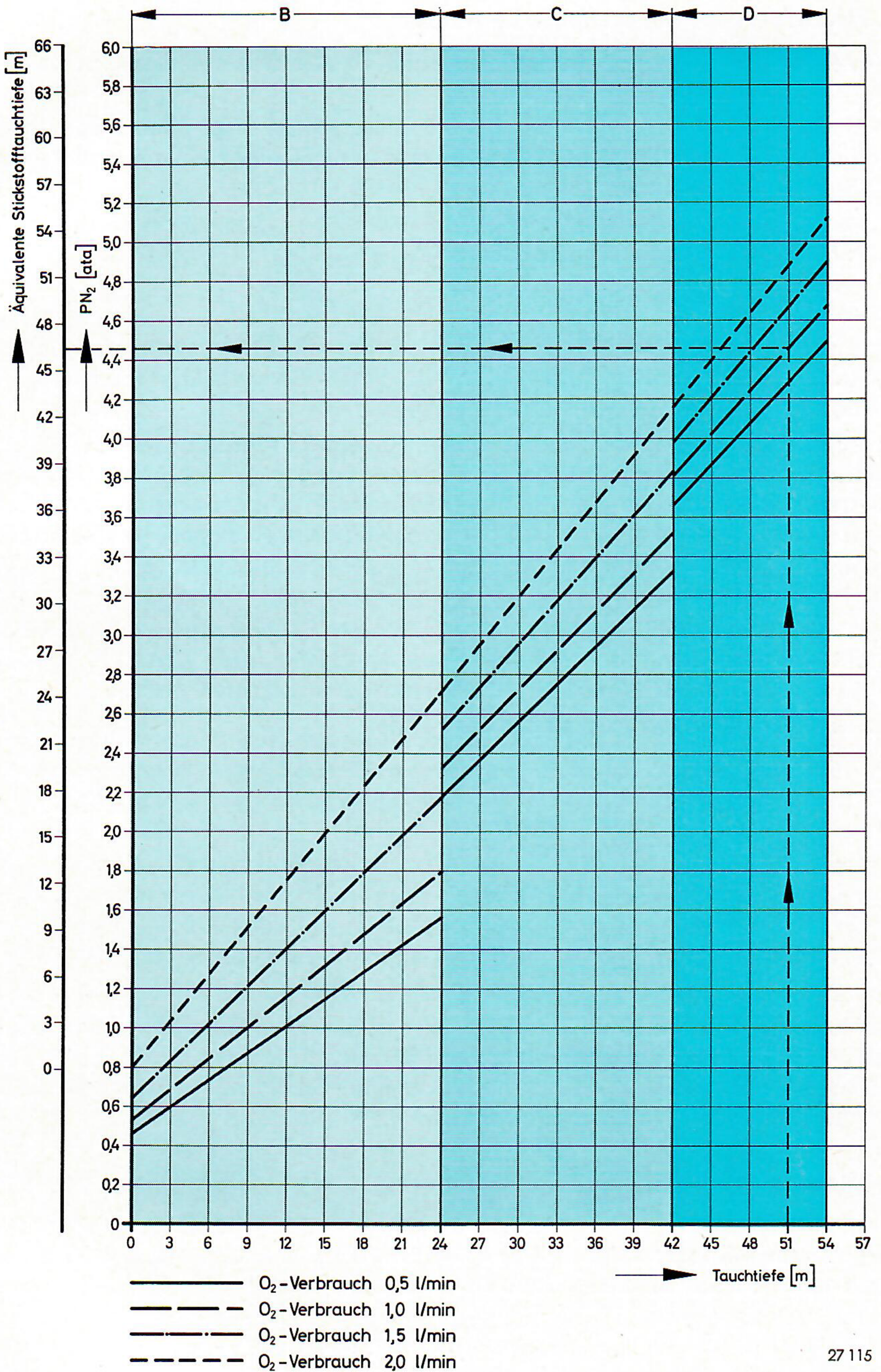
9. Physiologische Grundlagen

Obwohl im Rahmen dieses Buches physiologische Fragen nur dann behandelt werden, wenn es unumgänglich erscheint, zwingen die späteren Betrachtungen der Vorgänge beim Tauchen mit Kunstluftgemischen zu einer zusammenfassenden Darstellung der atemphysiologischen Verhältnisse.

Für die Zusammensetzung der Atemluft sollten die nachstehenden Grenzwerte unbedingt eingehalten werden:

- Höchstwert des Sauerstoffpartialdruckes 2,0 ata (kurzzeitig)
- Mindestwert des Sauerstoffpartialdruckes 0,15 ata
- Höchstwert des Stickstoffpartialdruckes 4,0 ata
- Höchstwert des Kohlendioxidpartialdruckes 0,02 ata

Diese Werte gelten insbesondere in bezug auf den maximalen Sauerstoffpartialdruck nur für kurzzeitiges Tauchen.



27 115

Bild 8 Äquivalente Stickstoff-Tauchtiefen in Abhängigkeit von der wirklichen Tauchtiefe bei verschiedenen Gasmischen und Sauerstoffverbräuchen

A) Höchstwert des Sauerstoffpartialdruckes

Die Meinungen über den höchstzulässigen Sauerstoffpartialdruck beim Tauchen sind noch etwas uneinheitlich.

Ein Sauerstoffpartialdruck von ca. 2,0 ata sollte jedoch nicht überschritten werden (kurzzeitiges Tauchen). Dieser Wert ist aber nicht allgemein gültig und unterliegt Schwankungen, die

- a) von der Einwirkungsdauer,
- b) von der geleisteten Arbeit,
- c) vom Gehalt der Einatemluft an CO₂ und
- d) von der Konstitution des Tauchers abhängen.

Geht man mit dem Wert $PO_2 = 2$ ata in die Formel (9) ein, so lassen sich die zulässigen Sauerstoffhöchstgehalte in bezug auf die jeweilige Tauchtiefe berechnen.

Bis zu 10 m Tiefe kann danach mit reinem Sauerstoff getaucht werden. Für das Tauchen mit Luft atmosphärischer Zusammensetzung liegt hinsichtlich des Sauerstoffpartialdruckes die Tiefengrenze bei ca. 90 m. Bei größeren Tiefen würde unter Verwendung von Luft der dem Körper noch zumutbare Sauerstoffpartialdruck überschritten; man müßte also zu Kunstluft-Gemischen mit weniger als 21% O₂ übergehen.

Beim Austauchen müßte aber in solchen Fällen der Sauerstoffpartialdruck wieder erhöht werden, damit der Mindest-Sauerstoffpartialdruck von 0,15 ata (15 Vol.% bei 1 ata an der Wasseroberfläche) nicht unterschritten wird.

Das Bild 8 zeigt die Kurve, die nach der Formel

$$(9) \quad O_{2\max} = \frac{PO_{2\max} \cdot 100}{P_T} \quad [\text{Vol.}\%]$$

berechnet wurde.

Darin bedeuten: $PO_{2\max}$ = max. zul. Sauerstoffpartialdruck [ata]
 P_T = Druck in Tauchtiefe [ata]

Man erkennt, daß bei 10 m Tiefe (der Grenze des Tauchens mit reinem Sauerstoff) die Kurve steil abfällt. In 40 m Tiefe dürfen es nur noch 40 Vol. % O₂ sein, und ab 90 m Tiefe kommen nur noch Kunstluft-Gemische mit weniger als 21 Vol. % O₂ in Frage.

B) Mindestwert des Sauerstoffpartialdruckes

Der minimal zulässige Sauerstoffpartialdruck liegt für die Atmung unter normalen atmosphärischen Verhältnissen bei 15 Vol.%, also 0,15 ata. Der Volumenanteil nimmt mit zunehmender Tauchtiefe nach der Formel

$$(10) \quad O_{2\min} = \frac{PO_{2\min} \cdot 100}{P_T} \quad [\text{Vol.}\%]$$

ab, er beträgt z. B. bei 20 m Tiefe nur noch 5 Vol.% und bei 150 m Tiefe ca. 1 Vol.%.

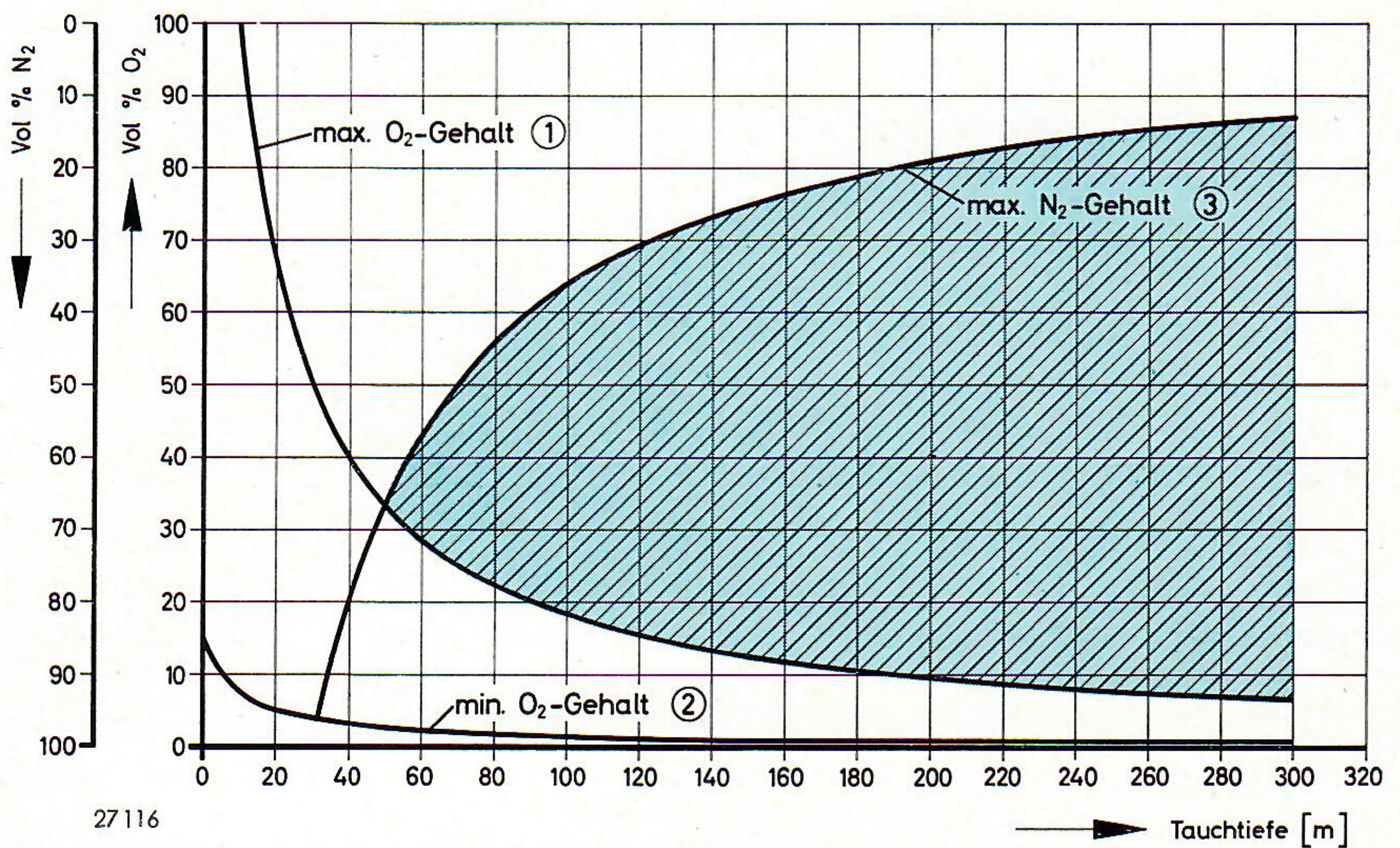


Bild 9 Grenzen des Sauerstoff- und Stickstoffgehaltes der Einatemluft in Abhängigkeit von der Tauchtiefe

C) Höchstwert des Stickstoffpartialdruckes

Der maximal zulässige Stickstoffpartialdruck liegt bei ca. 4 ata und wird bei Luft atmosphärischer Zusammensetzung in ungefähr 40 m Tiefe erreicht. Bei größeren Tiefen tritt jener dem Alkoholrausch ähnliche Zustand auf, bei dem der Taucher sein klares Denkvermögen und folgerichtiges Handeln einbüßen kann.

Mögen auch die Erscheinungen individuell verschieden sein und auch von der Tauchzeit abhängen, so sind doch durch das Auftreten dieses Stickstoffrausches dem Tauchen mit Luft normaler Zusammensetzung hinsichtlich der Tiefe Grenzen gesetzt.

Man kann die störende Einwirkung des Stickstoffes in Tiefen über 40 m vermeiden, wenn man dafür sorgt, daß sein Partialdruck unter 4 ata bleibt, indem man den Stickstoff ganz oder teilweise durch Helium oder Wasserstoff ersetzt. Der Verwendung von Wasserstoff sind aber zunächst wegen der möglichen Bildung hochexplosiver Gemische in der praktischen Anwendung Grenzen gesetzt.

Das maximal zulässige Stickstoffvolumen wird nach der Formel

$$(11) \quad N_{2 \max} = \frac{PN_{2 \max} \cdot 100}{P_T} \quad [\text{Vol.}\%]$$

berechnet. Die zugehörige Kurve ist in Bild 9 eingezeichnet.

Aus diesem Kurvenschaubild kann man z. B. entnehmen, daß in 40 m Tiefe der Sauerstoffgehalt der Atemluft nicht über 40 % betragen darf, der Stickstoffgehalt hingegen nicht über 80 Volumen %. Preßluft normaler Zusammensetzung genügt in bezug auf den maximalen Stickstoffgehalt gerade noch dieser Forderung.

Der Schnittpunkt der Kurven 1 und 3 liegt bei 50 m Tiefe und gibt die größtzulässige Tauchtiefe beim Tauchen mit O₂-N₂-Gemischen an, bei der die physiologischen Bedingungen (Sauerstoffpartialdruck nicht über 2,0 ata, Stickstoffpartialdruck nicht über 4 ata) noch erfüllt werden.

Für diesen Schnittpunkt besteht das Gemisch aus 33 Vol.% O₂ und 67 Vol.% N₂. Bei geringerem Sauerstoffgehalt wird die zulässige Tauchtiefe geringer, weil dann der Stickstoffanteil größer werden muß und dieser die Tauchtiefe bereits eher einschränkt.

D) Höchstwerte des Kohlendioxidgehaltes

Der Kohlendioxidgehalt soll bei Normaldruck 2 % (entsprechend 0,02 ata) nicht übersteigen; grundsätzlich sollte ein niedrigerer Anteil angestrebt werden. Infolgedessen nimmt der zulässige Gehalt mit zunehmender Tiefe ab. Dem an der Wasseroberfläche zulässigen Gehalt entsprechen mit zunehmender Tiefe niedrigere CO₂-Gehalte, da deren Partialdruck niemals 0,02 ata übersteigen darf. Ein Kohlendioxidgehalt von z. B. 0,125 Vol.% in 150 m Tiefe hat einen Partialdruck von $\frac{0.125 \cdot 16}{100} = 0,02$ ata, stellt also für diese Tiefe den höchstzulässigen

Kohlendioxidanteil im Atemgas dar. Die Werte können mit Hilfe der Formel

$$(12) \quad \text{CO}_2_{\max} = \frac{\text{PCO}_2_{\max} \cdot 100}{P_T} \quad [\text{Vol.}\%]$$

errechnet werden. Die graphische Darstellung der PCO_{2 max}-Werte zeigt das Bild 10.

PCO_{2 max} = max zul. CO₂-Partialdruck [ata]

P_T = Druck in Tauchtiefe [ata]

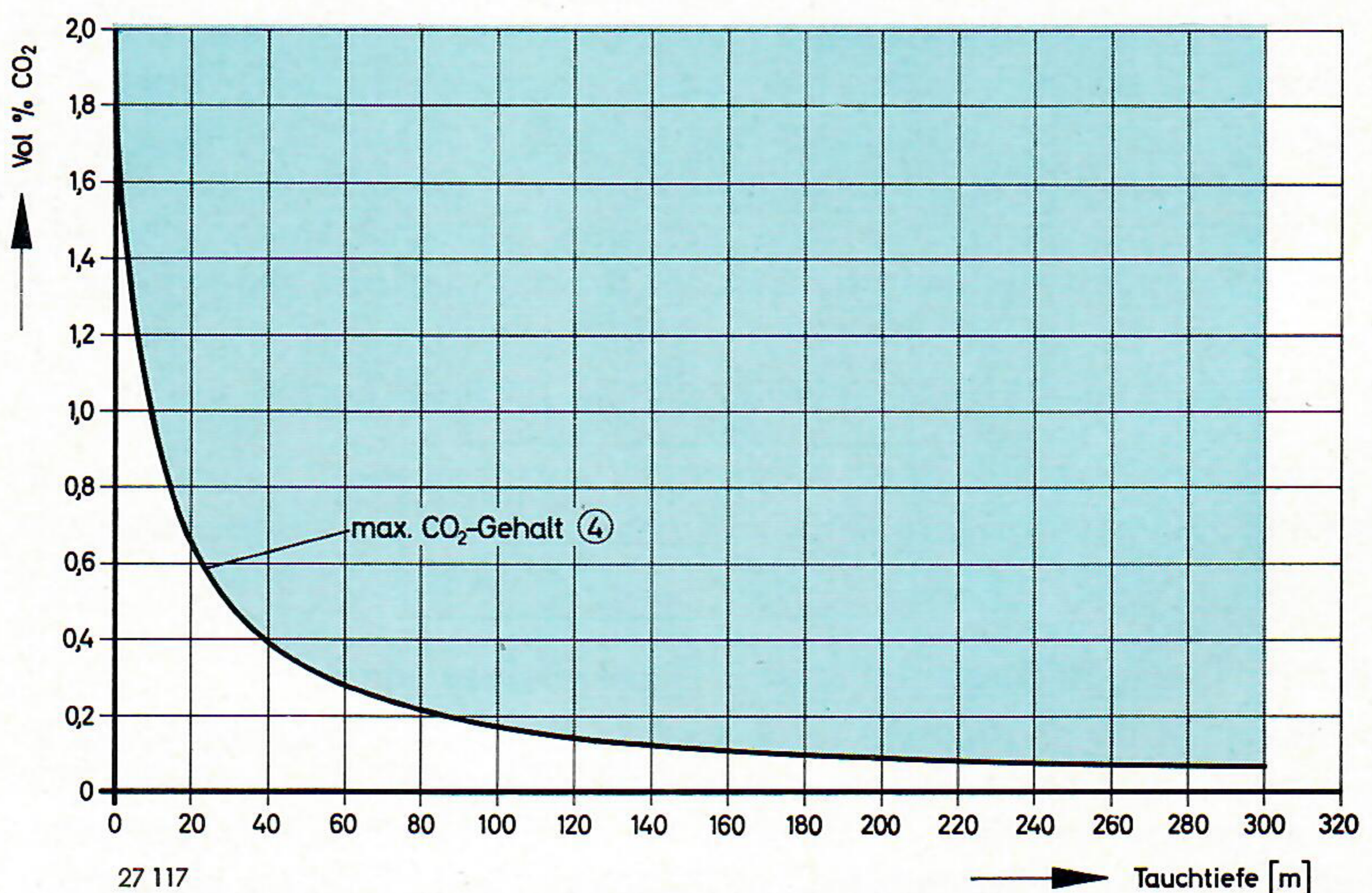


Bild 10 Grenze des CO₂-Gehaltes in der Einatemluft in Abhängigkeit von der Tauchtiefe

Tabelle 11

Zahlenwerte für Sauerstoff-, Stickstoff- und Kohlendioxidgrenzen in der Atemluft in Abhängigkeit von der Tauchtiefe

Tauchtiefe [m]	O _{2max} * [Vol. %]	O _{2min} [Vol. %]	N _{2max} [Vol. %]	CO _{2max} [Vol. %]
0	100	15		2
5	100	10		1,3
10	100	7,5		1
15	80	6,0		0,8
20	66,6	5,0		0,7
30	50	3,8		0,5
40	40	3,0	80	0,4
50	33,3	2,5	66,7	0,3
60	28,6	2,2	57,1	0,28
70	25	1,9	50,0	0,25
80	22,2	1,7	44,4	0,22
90	20	1,5	40,0	0,2
100	18,2	1,4	36,4	0,18
110	16,7	1,3	33,3	0,16
120	15,4	1,2	30,8	0,15
130	14,3	1,1	28,6	0,14
140	13,3	1,0	26,6	0,13
150	12,5	0,9	25,0	0,12
160	11,8	0,9	23,6	0,11
180	10,5	0,8	21,0	0,10
200	9,5	0,7	19,0	0,09
220	8,7	0,7	17,4	0,08
240	8,0	0,6	16,0	0,08
260	7,4	0,6	14,8	0,07
280	6,9	0,5	13,8	0,06
300	6,5	0,5	13,0	0,05

* Die Werte für O_{2max} gelten nur für kurzzeitiges Tauchen.

Zusammenfassung

Aus der graphischen Darstellung des Bildes 9 geht hervor, daß mit einem Gemisch aus Sauerstoff und Stickstoff bestenfalls bis 50 m Tiefe getaucht werden kann, wenn allen oben genannten physiologischen Grenzwerten vollauf Genüge getan werden soll.

Diese Tiefe ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Kurven 1 und 3. Die rechts von diesem Punkt liegende schraffierte Fläche stellt denjenigen Anteil des Einatemgases dar, der weder aus Stickstoff noch aus Sauerstoff bestehen darf. Dieses Tiefengebiet erfordert also eine Kunstluft für den Taucher, wenn man nicht die Überschreitung eines der Grenzwerte bewußt zuläßt. Aus der Tatsache, daß die normalen Austauschtabellen für Luft bis 61 m Tiefe aufgestellt sind, ersieht man, daß für bestimmte Einsatzfälle ein erhöhter Stickstoffpartialdruck in Kauf genommen werden muß. Bei größeren Tauchtiefen als 61 m empfiehlt es sich auf jeden Fall, den in die schraffierte Fläche fallenden Volumenanteil durch Helium auszufüllen.

Für eine Tauchtiefe von beispielsweise 100 m kann dann eine physiologisch einwandfreie Kunstluftzusammensetzung so aussehen:

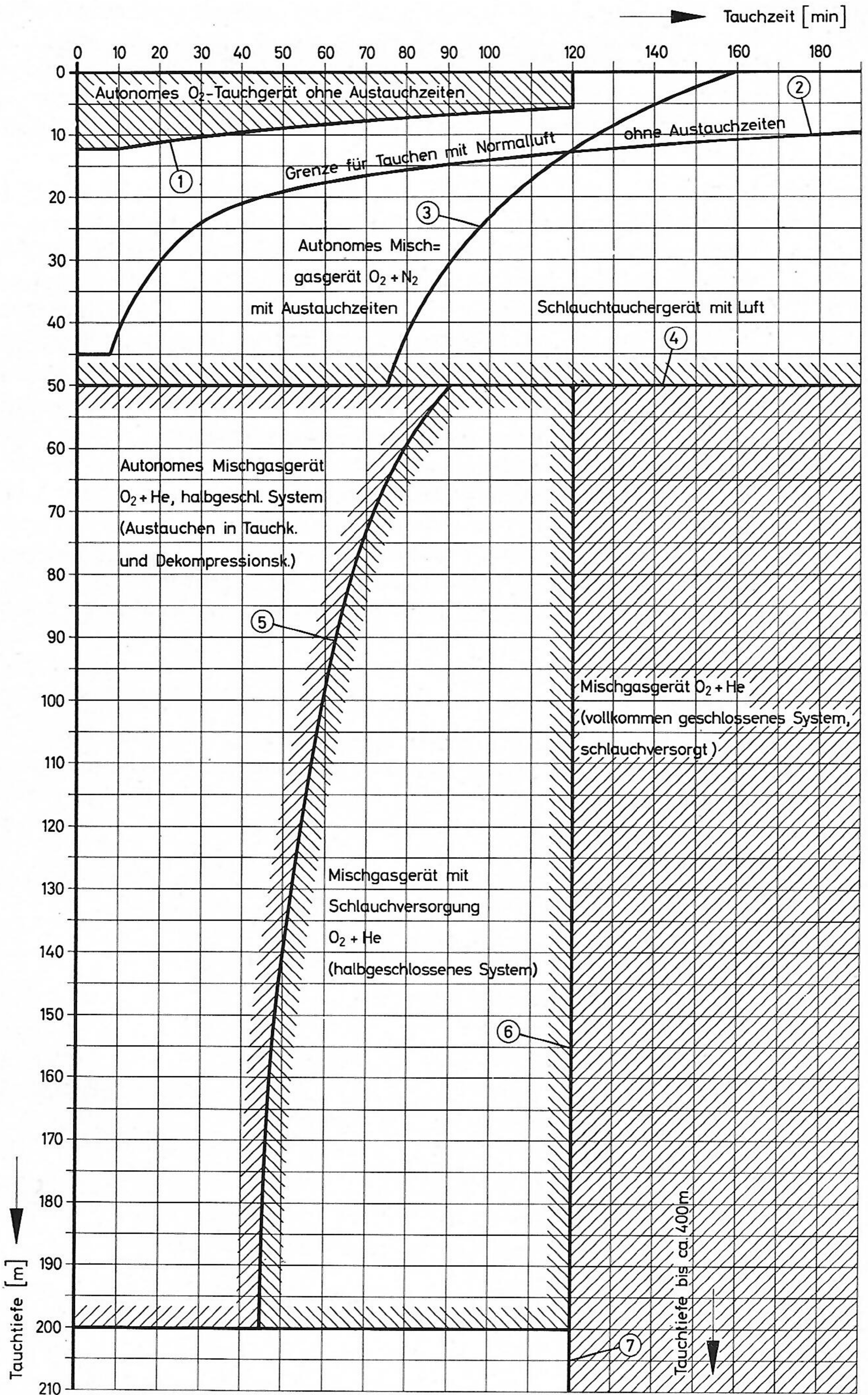
O ₂ -Gehalt	18 Vol.‰
N ₂ -Gehalt	36 Vol.‰
He-Gehalt	46 Vol.‰

Mit diesem Gemisch ist auch noch an der Wasseroberfläche ein ausreichend hoher Sauerstoffpartialdruck gewährleistet.

Aus einer Zusammenfassung der vorstehenden Betrachtung kann ein Schaubild aufgezeichnet werden, aus dem die Grenzgebiete für die Anwendung verschiedener Atemgase und Gerätesysteme übersichtlich hervorgeht.

Das Bild 11 zeigt in der:

- Kurve 1 den Grenzbereich für den Einsatz von Geräten, die mit reinem Sauerstoff betrieben werden. Für normale Einsätze sollte allerdings die Tiefe von 10 m nicht überschritten werden.
- Kurve 2 ist die Grenzkurve für das Tauchen mit Normalluft, wobei keine Austauschzeiten eingehalten werden müssen. Es handelt sich also hier um die sog. „Nullzeitkurve“ für Luft.
- Kurve 3 ist keine exakte, durch rechnerische Ermittlung festgelegte Grenze, sondern stellt ein Grenzgebiet dar, das sich aus der Tatsache ergibt, daß ein freitragbares Gerät nur eine gewisse Größe haben darf, wenn es nicht für den Taucher zu unhandlich und unbequem werden soll. Die Kurve ist ein guter Anhalt. Die Neigung zur Abszisse ergibt sich deshalb, weil mit steigender Tiefe ein zunehmender Inertgasverbrauch und eine längere Austauschzeit berücksichtigt werden müssen.
- Kurve 4 ist eine waagerechte Linie; sie stellt die normale Tiefengrenze für das Tauchen mit freitragbaren Preßluftgeräten dar. Auch mit Schlauchtauchgeräten sollte bei der Verwendung von Normalluft nur in Ausnahmefällen diese Grenze überschritten werden. Unterhalb dieser Linie ist der Stickstoff ganz oder teilweise durch andere Inertgase, z. B. Helium, zu ersetzen.



27 118

Bild 11 Grenzgebiete für die Anwendung verschiedener Atemgase und Gerätesysteme

- Kurve 5 stellt eine Grenzkurve für freitragbare Mischgastauchgeräte dar, die autonom arbeiten. Die Gasversorgung dieser Geräte wird mit O_2 und He durchgeführt. Infolge der beschränkten Gaskapazität sind die Tauchzeiten größenordnungsmäßig nach dieser Kurve begrenzt. Die Austauschzeiten werden in der Tauchkammer und Deckdekompressionskammer vorgenommen.
- Grenze 6: In diesem Gebiet können besonders Mischgastauchgeräte, die schlauchversorgt sind und im halbgeschlossenen System arbeiten, eingesetzt werden. Als Versorgungsgas werden O_2 -He-Gemische verwendet. Die Tauchtiefe ist auf ca. 200 m begrenzt, da bei größeren Tiefen der Inertgasverbrauch sehr stark ansteigt. Die Tauchzeitbegrenzung auf ca. 120 m hängt mit der begrenzten Leistungsfähigkeit der CO_2 -Absorption zusammen.
- Grenze 7: In diesem Gebiet werden am besten Mischgastauchgeräte eingesetzt, die im vollkommen geschlossenen Kreislauf arbeiten. In der Regel sind diese Geräte schlauchversorgt, und es werden O_2 -He-Gemische verwendet. Die theoretisch mögliche max. Tauchtiefe liegt bei 500 m. Bei Kreislaufversorgung und Überwachung aus einer Tauchkammer heraus ist die Tauchzeit praktisch unbegrenzt und wird meist durch die physische Beanspruchung des Tauchers begrenzt.

10. Formeln, Tabellen und Diagramme für die Berechnung von Atemgasgemischen in der Tauchtechnik

10.1. Allgemeines

Um einen optimalen Einsatz von Mischgastauchgeräten in der Tieftauchtechnik zu gewährleisten, ist es erforderlich, den jeweils festgelegten Tauchtiefenbereichen die günstigsten Gasgemische zuzuordnen.

Dabei sind eine Reihe von Annahmen zu machen, die aber nach den neuesten Erkenntnissen der Tieftauchtechnik ausreichend fundiert sind. Selbstverständlich müssen grundsätzliche Unterschiede bei der Berechnung von Gasgemischen für das Sättigungstauchen im Vergleich zum Kurzzeittauchen gemacht werden. Hinweise befinden sich an den entsprechenden Stellen. Gegenüber den Angaben im Abschnitt 9 über den zulässigen Sauerstoffpartialdruck von 2,0 ata wird aus Sicherheitsgründen hier der Sauerstoffpartialdruck auf 1,8 ata reduziert und beim Sättigungstauchen noch weiter eingeschränkt.

10.2. Tauchzeiten

Beim Kurzzeittauchen mit Mischgastauchgeräten, die mit Sauerstoff-Helium-Gemischen versorgt werden, hängt die Einsatzdauer nicht nur von dem Gasvorrat ab, sondern wird auch maßgeblich vom Sauerstoffpartialdruck PO_2 des eingeatmeten Mischgases bestimmt.

Bereits in der „Physiologie des Tauchers“ (Stelzner) wurde eine Formel angegeben, die die Berechnung der Tauchzeit in Abhängigkeit vom Sauerstoffpartialdruck ermöglicht. Dieser Formel liegen Versuche zugrunde, die mit reinem Sauerstoff, beziehungsweise Sauerstoff-Stickstoffgemischen gemacht wurden.

Die Formel lautet:

$$(13) \quad PO_2 \cdot \sqrt[3]{t} = 10$$

daraus ergibt sich:

$$(14) \quad t = \left(\frac{10}{PO_2} \right)^3 \quad [\text{min}]$$

PO_2 = O_2 -Partialdruck [ata] t = Tauchzeit [min]

Das Diagramm nach Bild 12 zeigt die zulässigen Tauchzeiten t in reinen Sauerstoffkreisläufen beziehungsweise in O_2 - N_2 -Gasgemischen, die nach der Formel 14 berechnet wurden. Diese Zeiten gelten jedoch nur für Taucher, die sich wenig bewegen und keine Arbeit leisten.

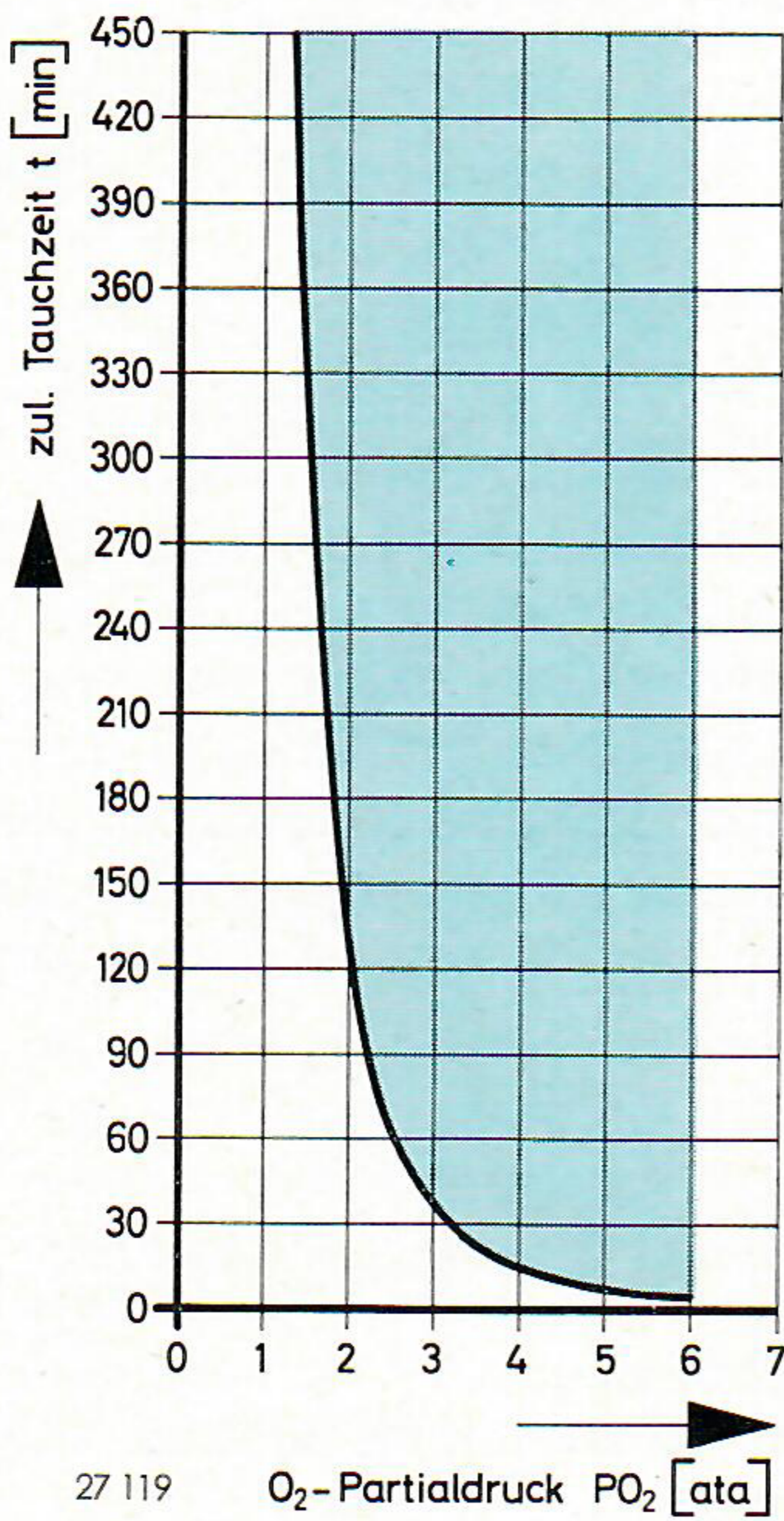


Bild 12

Zulässige Tauchzeiten in Abhängigkeit vom Sauerstoffpartialdruck

Für O₂-He-Gemische hat dagegen die Tabelle 12 Gültigkeit, die aus dem U.S. Navy Diving Manual entnommen wurde.

Tabelle 12

Abhängigkeit der zulässigen Tauchzeit vom Sauerstoffpartialdruck PO₂

Tauchzeit t [min]	max. Sauerstoffpartialdruck PO ₂ [ata]
30	2,0
40	1,9
60	1,8
80	1,7
100	1,6
120	1,5
180	1,4
240	1,3

10.3. Die Berechnung von Gasgemischen

Vor allen Dingen bei Mischgastauchgeräten und speziell bei solchen, die im halbgeschlossenen Kreislauf arbeiten, sind Berechnungen der Gasverhältnisse immer wieder erforderlich. Nicht nur die Abstimmung der Gaszusammensetzung auf den jeweiligen Tauchtiefenbereich und den zulässigen Sauerstoffpartialdruck ist wichtig, sondern auch die Größe der Gasdosierung selbst, um einen wirtschaftlichen Geräteinsatz zu gewährleisten.

10.3.1. Sauerstoffanteil eines Gasgemisches

Für die Berechnung des Sauerstoffanteils $O_{2\text{ ges.}}$ in einem Gasgemisch gilt die Formel 15.

$$(15) \quad O_{2\text{ ges.}} = Q \cdot O_{2\text{ ant.}} \cdot 0,01 \quad [\text{l/min}]$$

darin bedeuten: $O_{2\text{ ges.}}$ = Sauerstoffanteil der Gesamtdosierung [l/min]
 Q = Gesamtdosierung [l/min]
 $O_{2\text{ ant.}}$ = Sauerstoffanteil im Gemisch [%]

10.3.2. Sauerstoffpartialdruck

Der Sauerstoffpartialdruck in einem Gerät ist von verschiedenen Faktoren abhängig.

Bei dem reinen Sauerstoff-Kreislaufgerät mit $O_{2\text{ ant.}} = 100\%$ hat nur die Tauchtiefe einen Einfluß auf den Sauerstoffpartialdruck. Dann ist

$$(16) \quad PO_2 = P_T \quad [\text{ata}]$$

Die Verhältnisse ändern sich bei Tauchgeräten, die mit Mischgas versorgt werden.

Bei offenen Geräten, die beispielsweise eine lungenautomatische Gaszufuhr haben, hat außer der Tauchtiefe der Sauerstoffanteil des Gemisches natürlich einen Einfluß auf den PO_2 . Ohne Einfluß ist hier noch der Sauerstoffverbrauch des Tauchers. Der PO_2 bei dem offenen System berechnet sich nach der Formel 17:

$$(17) \quad PO_2 = O_{2\text{ ant.}} \cdot 0,01 \cdot P_T \quad [\text{ata}]$$

Im halbgeschlossenen Kreislauf, also in Geräten mit Überdosierung, muß dagegen auch noch der Verbrauch berücksichtigt werden. Für die Berechnung des Sauerstoffpartialdruckes ergibt sich dann die Formel 18:

$$(18) \quad PO_2 = \frac{(Q \cdot O_{2 \text{ ant.}} \cdot 0,01 - V)}{Q - V} \cdot P_T \quad [\text{ata}]$$

oder

$$(18a) \quad PO_2 = \frac{O_{2 \text{ ges}} - V}{Q - V} \cdot P_T \quad [\text{ata}]$$

Aus dieser wichtigen Grundformel (18) und der Formel (15) läßt sich eine Gleichung ableiten, die bei Gemischberechnungen vor allen Dingen dann gebraucht wird, wenn Gemischzusammensetzung und Tauchtiefenbereich bereits festgelegt sind.

$$(19) \quad Q = \frac{(O_{2 \text{ ges}} - V) \cdot P_T}{PO_2} + V \quad [\text{l/min}]$$

PO_2 = Sauerstoffpartialdruck [ata]
 V = Sauerstoffverbrauch [l/min]
 P_T = Druck auf Tauchtiefe [ata]

Durch Umstellung der Formel 18 nach P_T kann bei einem gegebenen Gemisch bekannter Dosierung und der Annahme von minimalem und maximalem Sauerstoffverbrauch die maximal und minimal zulässige Tauchtiefe berechnet werden.

Für kurzzeitiges Tauchen können als zulässige Sauerstoffpartialdruckgrenzen 1,8 ata und 0,2 ata angenommen werden. Für Sättigungstauchen sollte dagegen 0,5 ata nicht überschritten werden.

10.3.3. Sauerstoffverbrauch

Der Sauerstoffverbrauch eines Tauchers ist in erster Linie von seiner Arbeitsleistung abhängig. Abgesehen von der erhöhten Atemarbeit durch größere Dichte des Atemgases beeinflusst die Tauchtiefe den Sauerstoffverbrauch nicht.

Die Tabelle 13 zeigt den Sauerstoffverbrauch in Abhängigkeit von verschiedenen Arbeiten. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte und es können sich in der Praxis, wie bei allen physiologischen Messungen, Abweichungen ergeben. Die Unterwassertätigkeiten sind mit * gekennzeichnet.

Soweit die Ergebnisse nicht eigenen Messungen entstammen, sind sie in Anlehnung an das U.S. Navy Diving Manual und Veröffentlichungen von Neuhaus-Renner entnommen.

Tabelle 13

Sauerstoffverbrauch in Abhängigkeit von der ausgeführten Arbeit

Arbeit		Sauerstoff- Verbrauch [l/min]	Atem- minuten volumen [l]	Leistung [W]
Ruhe	Liegen	0,25	6	—
	Sitzen	0,30	7	—
	Stehen	0,40	9	—
Leichte Arbeit	* langsames Gehen auf hartem Grund	0,60	13	25
	Gehen 3,2 km/h	0,70	16	30
	* langsames Schwimmen 0,9 km/h	0,80	18	40
Mittlere Arbeit	* Gehen auf weichem Grund	1,1	23	70
	Gehen 6,5 km/h	1,2	27	80
	* Schwimmen 1,6 km/h	1,4	30	95
	* schnelles Gehen auf hartem Grund	1,5	34	105
Schwere Arbeit	* Schwimmen 1,85 km/h	1,8	40	130
	* schnelles Gehen auf weichem Grund	1,8	40	130
	Radfahren 21 km/h	1,85	45	140
	Laufen 13 km/h	2,0	50	145
Schwerst- arbeit	* Schwimmen 2,2 km/h	2,5	60	185
	Laufen 15 km/h	2,6	65	200
	Treppenlaufen 100 Stufen/min	3,2	80	250
	Bergauflaufen	4,0	95	290

* Unterwasserarbeiten

Bei dem Einsatz spezieller Sauerstoff-Kreislauf-Tauchgeräte ergaben sich Sauerstoffverbrauchswerte entsprechend dem Diagramm in Bild 13. Die Tauchzeiten betragen dabei jeweils 30 Minuten und die mittlere Tauchtiefe beträgt 1,5 m.

Die Wassertemperatur während der Versuche betrug ca. 25 °C, und die Taucher waren nur mit einer Badehose bekleidet. Die Verbrauchswerte über 3 l/min wurden mit hochtrainierten Tauchern ermittelt, die sich im Versuchszeitraum voll verausgabt haben.

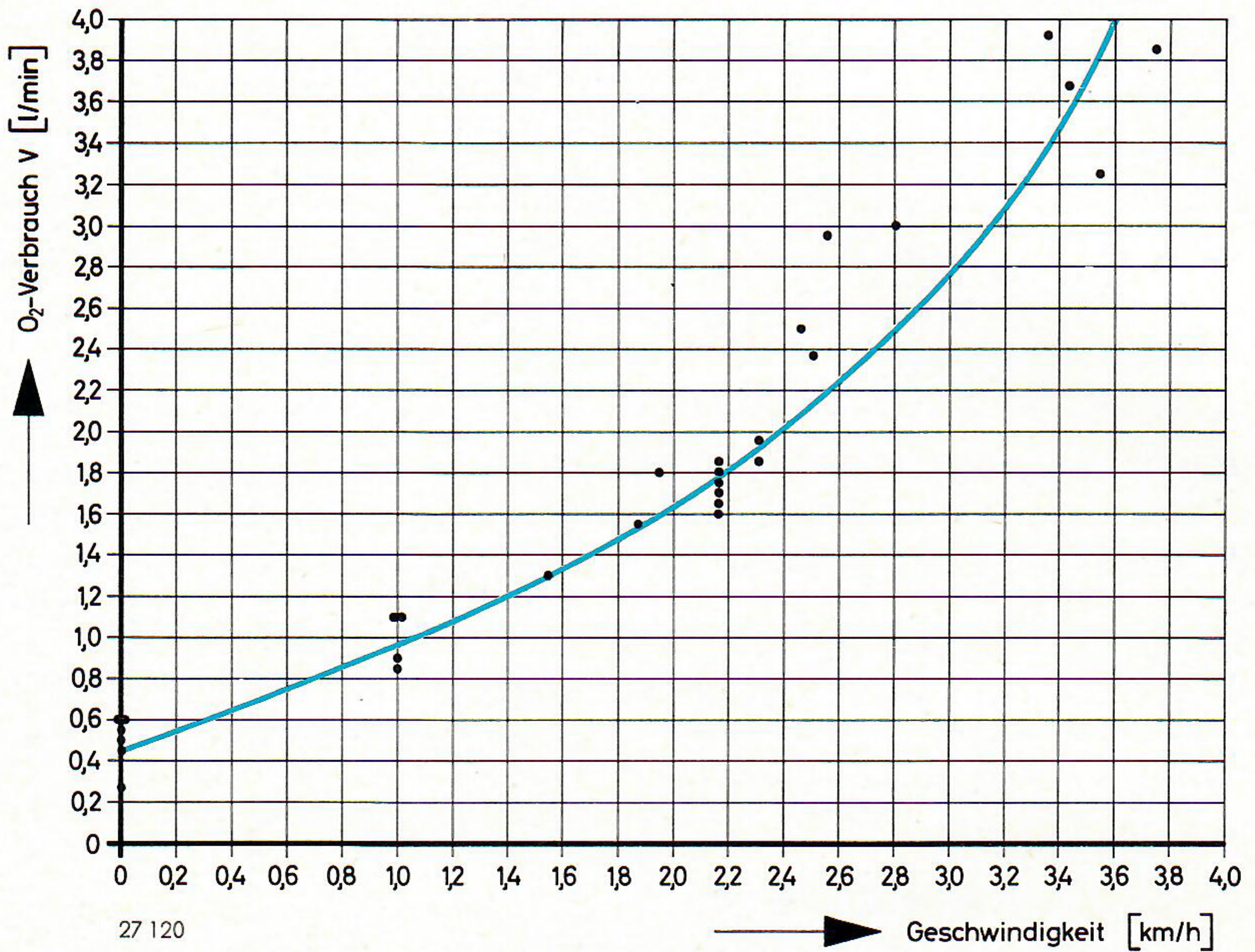


Bild 13 Sauerstoffverbrauch beim Streckentauchen

Aus verschiedenen Quellen ergibt sich die Tabelle 14 über den maximal möglichen Sauerstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Zeit.

Tabelle 14 Max. möglicher Sauerstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Zeit

Sauerstoffverbrauch [l/min]	Zeit
0,25	dauernd
1	einige Stunden
2	1-2 Stunden
4	15-30 Minuten
5	1-2 Minuten

Für die Berechnung der Gasverhältnisse in Tauchgeräten vor allen Dingen, in bezug auf die zulässigen O₂-Partialdrücke, erscheint ein maximaler Sauerstoffverbrauch von 2,5 l/min und ein minimaler Sauerstoffverbrauch von 0,5 l/min angemessen. Der durchschnittliche Sauerstoffverbrauch wird dagegen in der Größenordnung von 1,3 l/min liegen.

10.3.4. Gemischberechnung

Mit Hilfe des nachstehend aufgezeigten Verfahrensweges lassen sich Gasgemische bei gegebenem Sauerstoffverbrauch und für abgegrenzte Tauchtiefenbereiche berechnen.

- a) Zunächst wird für den jeweiligen Tauchtiefenbereich der maximale und minimale Sauerstoffgehalt im Atembeutel ermittelt.

Bei der max. Tauchtiefe P_{Tmax} und dem zulässigen PO_{2max} errechnet sich der max. Sauerstoffanteil $O_{2antmax}$ im Atembeutel nach der Formel (20)

$$(20) \quad O_{2antmax} = \frac{PO_{2max} \cdot 100}{P_{Tmax}} \quad [\text{Vol } \%]$$

und der minimale Sauerstoffanteil $O_{2antmin}$ im Atembeutel nach der Formel (21)

$$(21) \quad O_{2antmin} = \frac{PO_{2min} \cdot 100}{P_{Tmin}} \quad [\text{Vol } \%]$$

- b) Für die Festlegung der erforderlichen Gesamtdosierung Q können die Gleichungen (22) und (23) gleichgesetzt werden.

$$(22) \quad O_{2ges} = V_{min} + \frac{O_{2antmax}}{100}(Q - V_{min}) \quad [\text{l/min}]$$

$$(23) \quad O_{2ges} = V_{max} + \frac{O_{2antmin}}{100}(Q - V_{max}) \quad [\text{l/min}]$$

und wir erhalten die Formel (24)

$$(24) \quad Q = \frac{V_{max} (100 - O_{2antmin}) - V_{min} (100 - O_{2antmax})}{O_{2antmax} - O_{2antmin}} \quad [\text{l/min}]$$

- c) Zur Festlegung des Sauerstoffanteiles O_{2ges} im Gemisch wird Q in die Gleichung (22) oder (23) eingesetzt.

d) Der prozentuale Sauerstoffanteil im Gemisch wird schließlich nach der Formel (25) berechnet

$$(25) \quad O_{2\text{ant}} = \frac{O_{2\text{ges}} \cdot 100}{Q} \quad [\%]$$

Damit ist das Gemisch bezüglich seiner Dosierung und seines Sauerstoffanteiles eindeutig festgelegt.

Das Bild 14 zeigt graphisch die entscheidenden Sauerstoff-Partialdruckverhältnisse in einem Tieftauchergerät, das im halbgeschlossenen Kreislauf arbeitet. Die Gasgemischzusammensetzung wurde mit Hilfe der Formeln dieses Abschnittes berechnet.

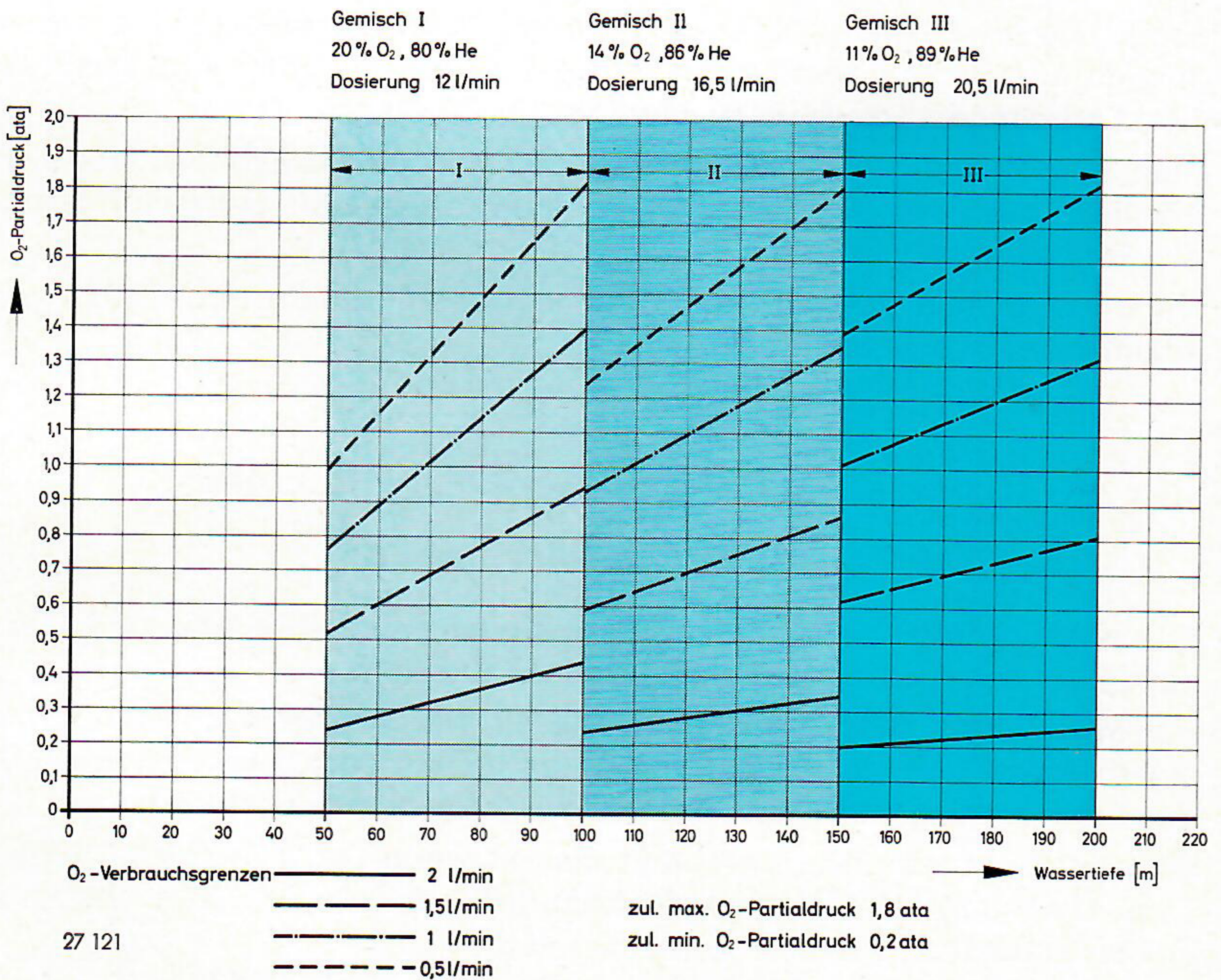


Bild 14
Sauerstoff-Partialdruckverhältnisse in einem Tieftauchergerät mit halbgeschlossenem Kreislauf

10.4. Austausch Tabellen für Tieftauchgänge

Nachstehend werden auszugsweise einige Austausch Tabellen für O₂-H₂-Tauchgänge aufgeführt. Es muß bemerkt werden, daß die Tabellenwerte vielfach nur rechnerisch ermittelt wurden und nur teilweise durch Versuche belegt sind. Besonders bei Arbeit scheinen manche Tabellenwerte nicht völlig auszureichen. Die Erarbeitung korrekter Austausch Tabellen, insbesondere auch für das Sätti-

gungstauchen, ist noch zu sehr im Fluß, so daß erst in einer späteren Auflage allgemein gültige Tabellen auf breiter Basis aufgeführt werden können.

Die für Helium ermittelten Austauschtabellen weichen von denen für Luft aus folgenden Gründen erheblich ab:

- a) Die zur Verwendung kommende Tabelle wird nicht nur durch die Tauchtiefe bestimmt, sondern auch durch den Teildruck der inerten Gase bei dieser Tiefe, da der Heliumgehalt im Atemgas nicht konstant ist.
- b) Die Aufstiegs geschwindigkeit vom Grund bis zum ersten Halt ändert sich je nach den Tauchbedingungen und ist jeweils in den einzelnen Austausch tabellen angegeben.
- c) Die Aufstiegs geschwindigkeit zwischen den Haltestufen ist nicht immer gleich.
- d) Die Aufstiegszeit von einem Halt zum nächsten ist in der Zeit des folgenden Haltes inbegriffen.
- e) Wiederholungstauchen ist grundsätzlich ausgeschlossen.

Folgender Rechnungsgang ist für die Festlegung der Einzelheiten des Austauschvorganges einzuhalten, wenn man berücksichtigt, daß im halbgeschlossenen Kreislauf arbeitende Schwimmtauchgeräte zum Einsatz kommen:

- a) Man bestimmt den Sauerstoffgehalt der Atemluft. Dieser ist jedoch nicht identisch mit dem der Zusatzluft, sondern durch den Sauerstoffverbrauch des Tauchers stets niedriger.
- b) Nach der Formel (26) wird dann der Inertgas-Partialdruck für die in Frage kommende Tauchtiefe berechnet:

$$(26) \quad PP_{(IG)} = P_T - PO_2 \quad [ata]$$

Wie bekannt, ergibt sich dabei PO_2 aus dem Sauerstoffgehalt der Atemluft, multipliziert mit dem absoluten Druck der Tauchtiefe.

Hat man jedoch vorher beispielsweise ein Kurvenblatt nach Bild 14 aufgestellt, lassen sich daraus der PO_2 -Wert für die verschiedenen Tauchtiefen und die verschiedenen Sauerstoffverbräuche sehr leicht entnehmen.

- c) Mit dem Wert von $PP_{(IG)}$ ermittelt man nun aus den Tabellen 16 diejenige Tafel, die dem Wert $PP_{(IG)}$ genau entspricht oder darüber liegt. Nach diesen Teiltafeln wird das Austauschen durchgeführt.

Hat man zum Beispiel für $PP_{(IG)}$ einen Wert von 9,15 ata ermittelt, so wendet man die Teiltafel b) für den Teildruck 9,15 ata an.

- d) Die Aufstiegs geschwindigkeit und die Haltezeit beim ersten Halt ergeben sich aus der nach Ziffer c) ermittelten und dem Austauschen zugrunde gelegten Teiltafel der „Austauchtafel Helium“.

Die Austauschgeschwindigkeiten zwischen den weiteren Haltestufen ermittelt man aus einer besonderen Tafel (nicht aufgenommen). Die Austauschzeiten nach dem ersten Halt sind immer in der folgenden Haltezeit enthalten.

- e) Bei dem Halt auf 15 m Tiefe geht man vom Sauerstoff-Helium-Gemisch auf reinen Sauerstoff über.

Austauschtabelle für Sauerstoff-Helium-Gemische (Auszug aus dem Taucherhandbuch der US-Marine)

a) Partialdruck 6,7 ata (220 feet)

Lfd. Nr.	Tauchdauer [min]	bis zum ersten Stop [min]	Halt in min bei m								Gesamtzeit [min]
			30	27	24	21	18	15	12		
1	10	4	0	0	7	0	0	0	10	28	50
2	20	4	0	7	0	1	6	6	10	57	85
3	30	4	0	7	0	6	9	10	10	79	113
4	40	4	0	7	3	9	11	17	13	90	133
5	60	4	7	0	9	15	20	23	16	98	159
6	80	4	7	3	11	19	23	23	16	99	172
7	100	4	7	6	14	18	23	23	16	99	188
8	120	4	7	8	18	23	23	23	16	99	198
9	140	4	7	11	18	18	23	23	16	99	201
10	160	4	7	14	19	20	23	23	16	99	205
11	180	4	7	15	20	20	23	23	16	99	207
12	200	4	7	16	20	20	23	23	16	99	208
13	220	4	8	17	20	20	23	23	16	99	210
14	240	4	9	19	20	20	23	23	16	99	213

b) Partialdruck 9,15 ata (300 feet)

Lfd. Nr.	Tauchdauer [min]	bis zum ersten Stop [min]	Halt in min bei m												Gesamtzeit [min]			
			46	43	40	37	34	30	27	24	21	18	15	12				
1	* 10	5	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	3	3	4	10	49	82
2	* 20	5	0	7	0	0	0	0	0	1	6	6	6	6	9	10	83	134
3	30	5	0	7	0	0	0	2	5	5	5	9	9	13	14	12	94	162
4	40	5	0	7	0	0	0	5	7	7	8	11	15	20	17	15	98	186
5	60	5	0	0	0	6	6	7	9	9	12	15	19	23	23	16	99	219
6	80	5	0	2	8	8	10	10	12	12	16	19	20	23	23	16	99	240
7	100	5	0	5	10	10	12	12	16	15	19	20	20	23	23	16	99	254
8	120	5	0	8	11	11	16	16	17	17	19	20	20	23	23	16	99	264
9	140	5	0	9	14	14	16	16	17	17	19	20	20	23	23	16	99	269
10	160	5	0	13	15	15	16	16	17	17	19	20	20	23	23	16	99	274
11	180	5	7	13	15	15	16	16	17	17	19	20	20	23	23	16	99	276
12	200	5	7	14	15	15	16	16	17	17	19	20	20	23	23	16	99	279
13	220	5	7	14	15	15	16	16	17	17	19	20	20	23	23	16	99	280
14	240	5	7	14	15	15	16	16	17	17	19	20	20	23	23	16	99	283

* vom ersten bis zum nächsten Stop eine zusätzliche Minute verwenden

c) Partialdruck 11,0 ata (360 feet)

Lfd. Nr.	Tauchdauer [min]	bis zum ersten Stop [min]	Halt in min bei m													Gesamtzeit [min]		
			55	52	49	46	43	40	37	34	30	27	24	21	18		15	12
1	* 10	5	0	0	0	7	0	0	0	1	2	3	3	5	7	10	64	108
2	* 20	5	0	0	7	0	0	3	4	5	5	7	5	9	13	10	94	163
3	30	5	0	0	7	0	0	4	5	7	7	11	8	13	14	14	99	196
4	40	5	0	0	7	0	1	5	7	8	8	14	16	17	16	16	99	222
5	60	5	0	0	7	0	5	8	11	12	12	19	23	23	16	16	99	257
6	80	5	0	0	7	2	7	10	13	17	17	20	23	23	16	16	99	279
7	100	5	7	0	6	8	8	11	16	17	17	20	23	23	16	16	99	294
8	120	5	7	1	7	9	9	14	16	17	17	20	23	23	16	16	99	303
9	140	5	7	3	9	11	11	14	16	17	17	20	23	23	16	16	99	310
10	160	5	7	4	10	12	12	14	16	17	17	20	23	23	16	16	99	313
11	180	5	7	5	11	12	12	14	16	17	17	20	23	23	16	16	99	315
12	200	5	7	7	11	12	12	14	16	17	17	20	23	23	16	16	99	317
13	220	5	7	9	11	12	12	14	16	17	17	20	23	23	16	16	99	319
14	240	5	7	11	11	12	12	14	16	17	17	20	23	23	16	16	99	321

* vom ersten bis zum nächsten Stop eine zusätzliche Minute verwenden

d) Partialdruck 12,5 ata (410 feet)

Lfd. Nr.	Tauchdauer [min]	bis zum ersten Stop [min]	Halt in min bei m												Gesamtzeit [min]						
			64	61	58	55	52	49	46	43	40	37	34	30		27	24	21	18	15	12
1	* 10	5	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	3	3	6	7	7	7	10	73	126
2	* 20	5	0	0	0	7	0	0	2	4	4	4	5	5	7	9	11	14	13	96	182
3	* 30	5	0	7	0	7	0	2	3	4	5	7	8	8	12	15	15	19	16	99	221
4	40	5	0	7	0	7	0	2	3	4	6	9	11	13	16	22	23	16	99	248	
5	60	5	0	7	0	7	0	5	6	7	10	13	15	19	20	23	23	16	99	285	
6	80	5	0	7	0	7	0	6	8	9	12	16	17	19	20	23	23	16	99	308	
7	100	5	0	7	3	6	6	7	8	11	14	16	17	19	20	23	23	16	99	322	
8	120	5	7	0	5	7	7	10	10	12	14	16	17	19	20	23	23	16	99	331	
9	140	5	7	0	7	9	9	10	11	12	14	16	17	19	20	23	23	16	99	336	
10	160	5	7	2	8	10	10	10	11	12	14	16	17	19	20	23	23	16	99	340	
11	180	5	7	3	9	10	10	10	11	12	14	16	17	19	20	23	23	16	99	342	
12	200	5	7	5	9	10	10	10	11	12	14	16	17	19	20	23	23	16	99	344	
13	220	5	7	7	9	10	10	10	11	12	14	16	17	19	20	23	23	16	99	346	
14	240	5	7	8	9	10	10	10	11	12	14	16	17	19	20	23	23	16	99	347	

* vom ersten bis zum nächsten Stop eine zusätzliche Minute verwenden

Wie einleitend bemerkt wurde, sind die Austausch Tabellen für das Tauchen mit Sauerstoff-Helium-Gemischen ihrem Aussagewert nach etwas zweifelhaft. Die Tabellen sind deshalb mit der gebotenen Vorsicht anzuwenden.

Das gleiche gilt für die Dekompressionstabellen nach Sättigungstauchgängen. Die bekannt gewordenen Unterlagen differieren so stark, daß auf eine Veröffentlichung an dieser Stelle noch verzichtet werden muß.

10.5 Berechnungsgrundlagen und Tabellen für die Druckkammerventilation

Die ausreichende Frischluftventilation von Druckkammern ist für die Einhaltung eines genügend niedrigen CO₂-Partialdruckes eine unbedingte Notwendigkeit. Eine Ausnahme bilden hier nur Anlagen, die mit CO₂-Absorptionseinrichtungen innerhalb des Kammersystems ausgerüstet sind. Diese werden in die nachfolgende Betrachtung nicht mit einbezogen.

Alle nachfolgenden Überlegungen gehen davon aus, daß die Kammern kontinuierlich mit Frischluft versorgt werden; aus Gründen der Sicherheit sollte das Verfahren der sporadischen Spülung nicht durchgeführt werden.

Für die Berechnung der Verhältnisse in unbelüfteten Kammern gelten die Formeln 27, 28 und 29:

$$(27) \quad \text{PCO}_2 = \frac{B}{v'} \cdot t \cdot P \quad [\text{ata}]$$

$$(28) \quad C' = \frac{\text{PCO}_2}{P} \cdot 100 \quad [\%]$$

Darin bedeuten:

PCO₂ = CO₂-Partialdruck [ata]
 B = CO₂-Produktion [l/min]
 v = Gasvolumen [NI]
 t = Zeit [min]

P = Atmosph. Druck [ata]
 P_T = Druckkammerdruck [ata]
 v' = Kammerinhalt [l]
 C' = CO₂-Anteil [%]
 F = Frischluftspülmenge [l/min]

Werden die Kammern jedoch während der Belegung mit Frischluft gespült, so wird der zeitliche PCO₂-Anstieg nach der Formel 29 berechnet;

$$(29) \quad \text{PCO}_2 = \frac{B}{F} \left(1 - e^{-\frac{F}{v'} \cdot t} \right) \quad [\text{ata}]$$

Unter der Annahme einer CO₂-Produktion B von 0,5 l/min und einer Frischluftspülung F von 33,3 l/min und Kammerinhalten v' von 1, 2, 3, 4 und 5 m³ erhält man die CO₂-Anstiegskurven nach Bild (15) für ventilierte und nichtventilierte Räume.

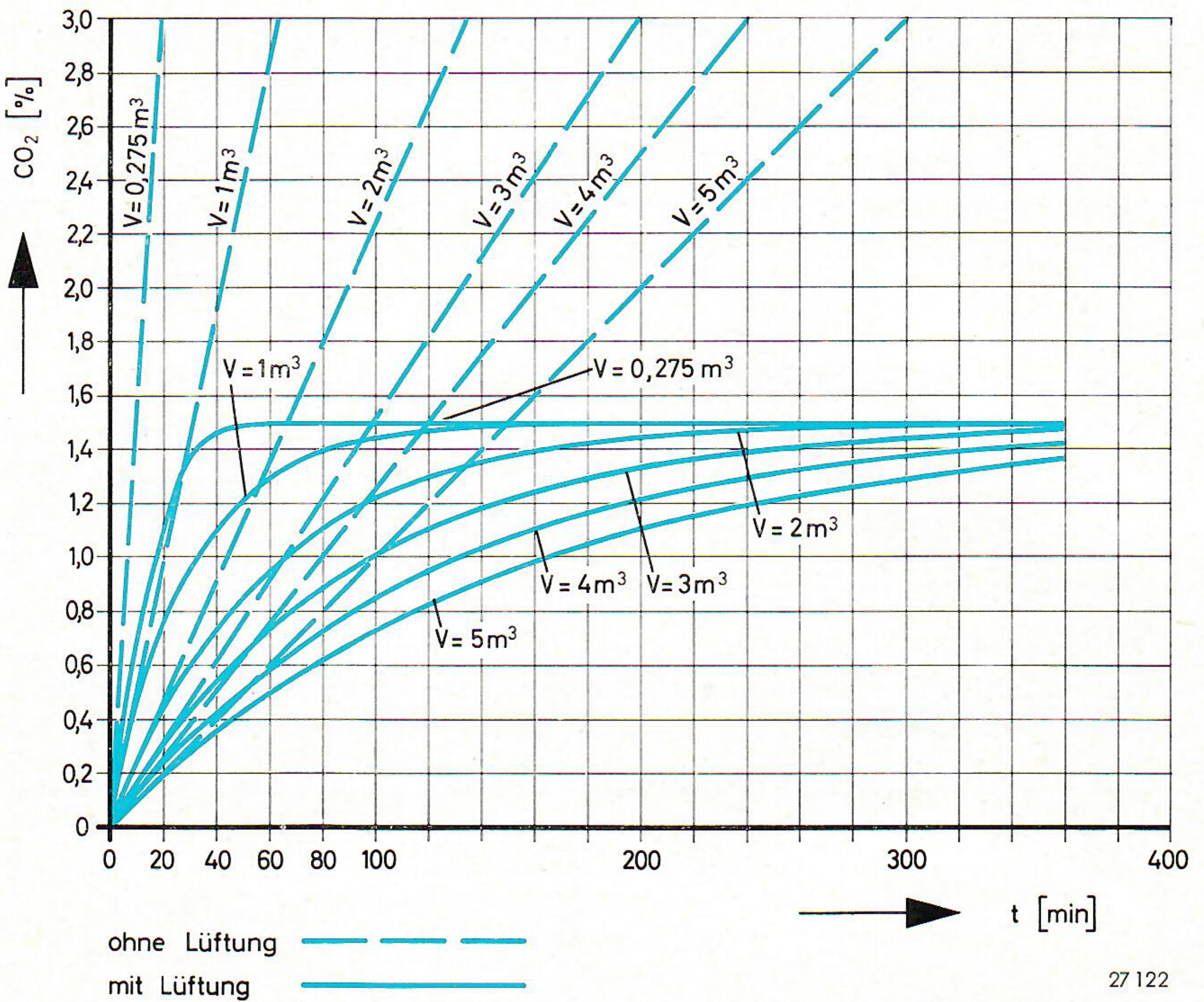


Bild 15 CO₂-Anstieg in ventilerten und nichtventilerten Räumen verschiedener Größen bei Normaldruck

Das Bild zeigt deutlich, daß das Erreichen eines stationären Zustandes bei ventilerten Räumen vom Kammerinhalt abhängt. Genauso hat die Größe der CO₂-Produktion einen Einfluß.

Für die Zeit ∞ vereinfacht sich die Formel 29 zu Formel 30:

(30)
$$PCO_2 = \frac{B}{F} \quad [ata]$$

Werden nun der Kammerdruck P_T und die Personenbelegung n eingeführt, erhält man

(31)
$$PCO_2 = \frac{B}{F} \cdot P_T \cdot n \quad [ata]$$

und durch Umstellung ergibt sich

(32)
$$F = \frac{B}{PCO_2} \cdot P_T \cdot n \quad [l/min]$$

Mit Hilfe der Formel 32 und unter Zugrundelegung eines PCO_2 von 0,015 ata und einer CO_2 -Produktion B von 0,5 l/min wurde die Tabelle (17) errechnet.

Tabelle 17

Frischluf tspülungen in Druckkammern (diese Tabelle gilt nicht bei O_2 -Atmung)

Kammerdruck [ata]	Frischluf- Spülmenge 1 Person [l/min]	Frischluf- Spülmenge 2 Personen [l/min]	Frischluf- Spülmenge 3 Personen [l/min]	Frischluf- Spülmenge 4 Personen [l/min]
1,3	43,5	87	130	174
1,6	53,5	107	160,5	214
1,9	63,5	127	190,5	254
2,2	73,5	147	220,5	294
2,5	83,5	167	250,5	334
2,8	93,5	187	280,5	374
3,1	103,5	207	310,5	414
3,4	113,5	227	340,5	454
4,0	133,5	267	400,5	534
4,6	153,5	307	460,5	614
5,2	173,5	347	520,5	694
6,0	200	400	600	800
7,0	233,5	467	700,5	934
8,0	266,5	535	799,5	1066
9,0	300	600	900	1200
10,0	333,5	667	1000,5	1334
11,0	366,5	733	1099,5	1466

p) Druck- und Spannungsmaße: Gegenüberstellung

Einheit	μb	mb	b	kg/m ² = mm WS	g/cm ²	kg/cm ² = at	kg/ mm ²	Torr = mm QS	Atm	lb.		long ton		sh. ton	
										sq.ft.	sq.in. (psi)	sq.in.	sq.in.		
1 μb = 1 dyn/cm ²	1	0,001	—	0,0102	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1 mb	1000	1	0,001	10,2	1,02	—	—	0,7501	—	2,089	0,0145	—	—	—	—
1 b (absolute Atmosphäre)	10 ⁶	1000	1	10197	1020	1,02	0,0102	750,1	0,9869	2089	14,5	0,006475	0,007252	—	—
1 kg/m ² = 1 mm WS															
bei 4 °C	98,07	—	—	1	0,1	0,0001	—	—	—	0,2048	—	—	—	—	—
1 g/cm ²	980,7	0,9807	—	10	1	0,001	—	0,7356	—	2,048	0,01422	—	—	—	—
1 kg/cm ² = 1 at ¹⁾															
(techn. Atmosphäre)	—	980,7	0,9807	10000	1000	1	0,01	735,6	0,9678	2048	14,22	—	—	—	—
1 kg/mm ²	—	98067	98,07	10 ⁶	10 ⁵	100	1	73556	96,78	—	1422	0,635	0,7112	—	—
1 Torr = 1 mm QS ²⁾															
bei 0 °C	1333	1,333	—	13,6	1,36	0,00136	—	1	—	2,785	0,01934	—	—	—	—
1 Atm (physikalische Atmosphäre)	—	1013	1,013	10332	1033	1,033	—	760	1	2116	14,7	—	—	—	—
1 lb./sq.ft.	478,8	0,4788	—	4,882	0,4882	—	—	0,3501	—	1	—	—	—	—	—
1 lb./sq.in. = 1 psi	68948	68,95	0,0689	703,1	70,31	0,07031	—	51,71	0,068	144	1	—	—	—	0,0005
1 long ton/sq. in. (GB)	—	—	154,4	—	—	157,5	1,575	—	152,4	—	2240	1	1,12	—	—
1 short ton/sq.in. (US)	—	—	137,9	—	—	140,6	1,406	—	136,1	—	2000	0,8929	1	—	—

1 piéze (franz.) = 1 sn/m² ≈ 102 kg/m², 1 Großdyn/m² = 10 μb

1 micron (Ver. St.) = 0,001 mm QS = 0,001 Torr. „inches Hg“ werden in den Ver.St. von oben gerechnet, also 0 inches Hg = 760 mm QS und 29,92 inches Hg = 0 mm QS = absol. Vakuum.

- 1) 1 ata = 1 at absoluter Druck } absoluter Druck = Überdruck + Luftdruck
 1 atü = 1 at Überdruck } Überdruck = absoluter Druck — Luftdruck
- 2) Die Wichte von Quecksilber ist angenommen zu 13,595 g/cm³