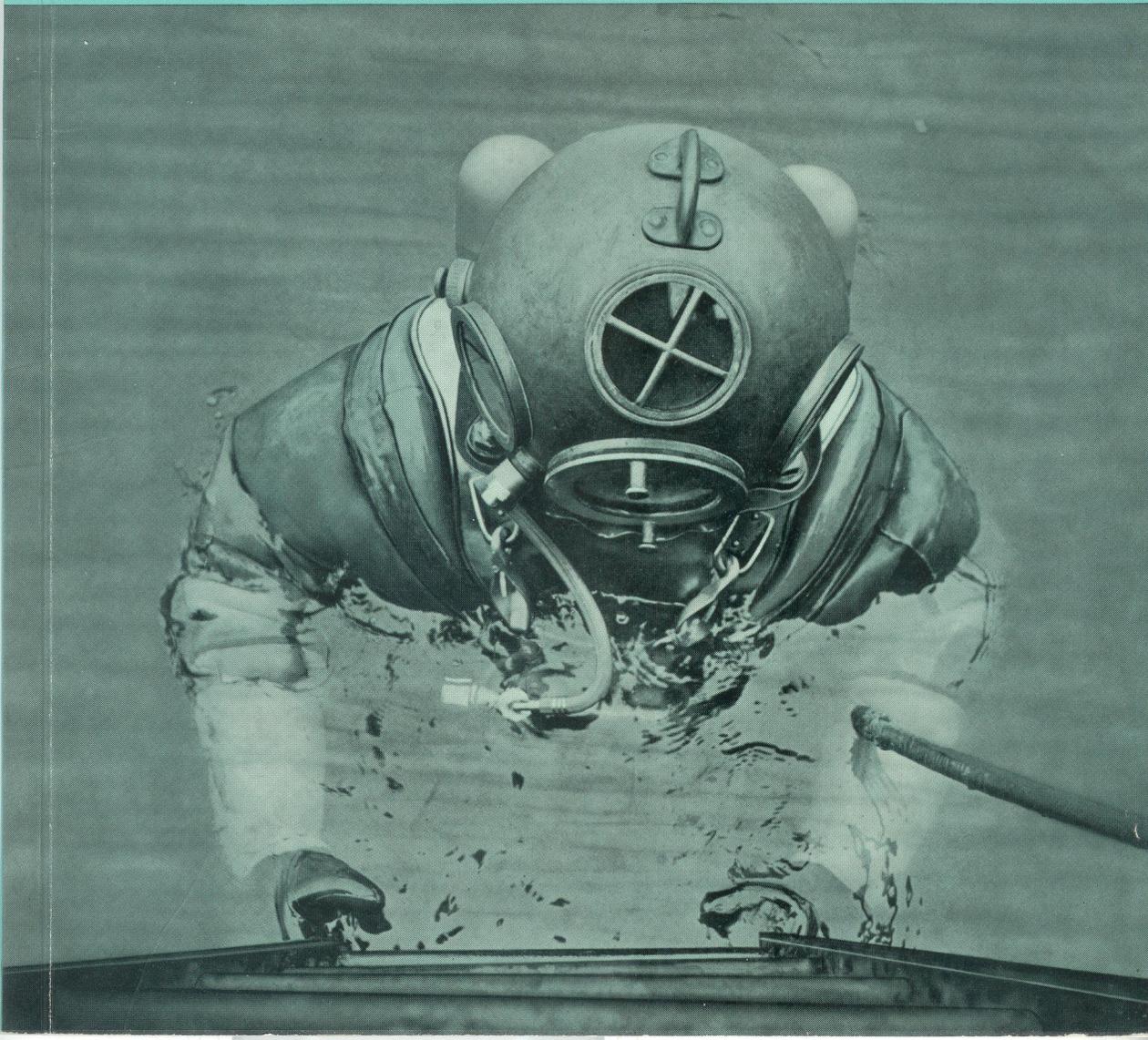


Physiologie des Tauchers

aus der »Tauchertechnik« von Hermann Stelzner





S

03/2003


Albrecht Salm
Master Scuba Diver Trainer
PADI MSDT # 138913

SSI SCUBA SCHOOL SINT.
Instructor No. 12353
© Albrecht Salm



Physiologie des Tauchers

aus der »Tauchertechnik«

von Hermann Stelzner

Dritte überarbeitete Auflage

Herausgeber Drägerwerk Lübeck • Verlag Charles Coleman, Lübeck

Alle Rechte, insbesondere das Übersetzungsrecht, vorbehalten.

Copyright 1962 by Drägerwerk Lübeck

Printed in Germany

Druck: Graphische Werkstätten GmbH Lübeck

INHALT

A. Druckwirkung	9
1. Atmung in atmosphärischer Luft unter atmosphärischem Druck	9
2. Wasserdruck	11
3. Druck als Krankheitsursache	14
4. Die Tiefengrenzen für Taucher	16
B. Einwirkung der Atemgase	22
1. Sauerstoff	22
a) Sauerstoff unter atmosphärischem und höherem Druck	22
b) Sauerstoffvergiftung	22
c) Sauerstoffatmung im Tauchretter	25
2. Stickstoff	29
a) Stickstoff unter Druck	29
b) Stickstoffkrankung	30
c) Verhütung der Stickstoffkrankung	34
d) Dekompressionsvorschriften und Austauschzeiten	45
e) Die Taucherdruckkammer	57
f) Tiefenrausch	66
3. Kohlensäure	66
a) Kohlensäure unter Druck	66
b) Kohlensäurevergiftung	69
4. Feuchtigkeit und Temperatur	71
5. Helium	73
a) Einfluß der Heliumatmung	73
b) Tiefengrenze beim Tauchen mit Helium	75
6. Wasserstoff	75

C. Der Abstieg	77
1. Allgemeines	77
2. Absturzerkrankung	78
a) Schröpfkopfwirkung des Helmes	78
b) Erscheinungen der Absturzerkrankung	79
3. Grenztiefen, abhängig vom elastischen Luftraum	80
a) Grenztiefe für Nackttaucher	80
b) Taucher im offenen Helm	80
c) Taucher im geschlossenen Anzug	80
4. Hochtreiben des Tauchers	86
a) Tauchen im Strom	86
b) Zulässige Tiefe für gefahrloses Hochtreiben	88
D. Luftbedarf des Tauchers	91
1. Einfluß der Arbeitsleistung	91
2. Einfluß der Wassertiefe	93

VORWORT

Die „Tauchertechnik“ von Stelzner hat sich seit ihrem Erscheinen zahlreiche Freunde erworben, insbesondere hat sich das Buch in der praktischen Taucherei seinen Platz gesichert.

Seit vielen Jahren ist die 2. Auflage vergriffen, und eine 3. Auflage ist seit Jahren notwendig. Mittlerweile sind jedoch auf dem Gebiet des Tauchens sowohl in technischer als auch in physiologischer Hinsicht so vielfältige Neuerungen zu berücksichtigen, daß eine nur überarbeitete 3. Auflage der Stelznerschen Fassung als nicht ausreichend anzusehen gewesen wäre.

Um dem dringendsten Bedarf der praktischen Taucherei abzuhelfen, haben wir uns entschlossen, jetzt lediglich das Kapitel „Physiologie des Tauchens“ zu veröffentlichen. Das Kapitel ist im Charakter dem der 2. Auflage der „Tauchertechnik“ gleichgeblieben, jedoch wurden neue Erkenntnisse berücksichtigt.

Es besteht nach wie vor die Absicht, eine vollständige Neubearbeitung der „Tauchertechnik“ herauszubringen; jedoch läßt sich der Erscheinungstermin im Augenblick noch nicht zuverlässig bestimmen.



PHYSIOLOGIE DES TAUCHERS

A. DRUCKWIRKUNG

Das Leben des Tauchers ist von zwei Bedingungen abhängig: von der Zusammensetzung der Atemluft und vom Druck, unter dem er atmet, also von der Wassertiefe.

1. Atmung in atmosphärischer Luft unter atmosphärischem Druck

An der Wasseroberfläche und auf dem Lande, abgesehen von Gebirgsgegenden, atmen wir atmosphärische Luft mit einem Druck von 1 Atmosphäre = rd. 1 kg/qcm.

Die atmosphärische Luft enthält in ungefähren Volumenprozenten:

21 % Sauerstoff (O₂)

79 % Stickstoff (N₂), davon etwa 1 % Edelgase (insbesondere Argon und wenig Wasserstoff, Neon, Helium, Krypton, Xenon).

0,03 % Kohlensäure (CO₂)

und fast stets einen größeren oder geringeren Prozentsatz (rd. 1 1/2 %) Wasserdampf in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Feuchtegrad.

Nur der Sauerstoff dient der Unterhaltung der Atmung, der Stickstoff und die Edelgase dagegen sind völlig unwirksame indifferente Gase, die unter atmosphärischem Druck gar keinen Einfluß auf den Körper ausüben und nur sozusagen sauerstoffverdünnend wirken. Die in freier Atmosphäre befindliche geringe Menge Kohlensäure hat ebenfalls keine Wirkung auf die Atemtätigkeit. Wie gesagt, gilt dieses aber nur, solange der Mensch sich unter atmosphärischem Druck befindet, also weder auf hohen Bergen, noch tief unter der Erde oder gar unter künstlich erzeugtem oder durch Wasser hervorgerufenem Druck, wie beim Tauchen.

Durch die Tätigkeit der Lungen wird dem Körper Sauerstoff zugeführt, das Herz pumpt das sauerstoffbeladene Blut zu allen Körperteilen und bringt es, beladen mit Kohlensäure, zurück zur Lunge. Es wird dem Volumen nach immer etwas weniger Kohlensäure ausgeatmet, als dem Sauerstoff entspricht, der von den Lungen aufgenommen wurde. Die kleinen Abweichungen dieses sogenannten Respirationsquotienten von der Zahl 1, veranlaßt durch die Art der Nahrung und deren Verdauung, Temperatur, Feuchtigkeit oder Anstrengung, sollen uns nicht interessieren.

Bei der Frage nach der Menge der in der Zeiteinheit geatmeten Luft bzw. der verbrauchten Sauerstoffmenge oder der ausgestoßenen Kohlensäuremenge usw. kommen wir zu einem wichtigen Faktor der Atmungsbeeinflussung: der *Arbeitsleistung* des Tauchers. Folgende ausführliche Tabelle gibt ein klares Bild vom Einfluß der Arbeit auf die Atemtätigkeit.

Arbeit der Versuchsperson	Versuchsperson	Atemzüge in der Minute	Lungenfüllung bei 1 Atemzug Liter	Aus- bzw. Einatemluftmenge Liter/min.	Bewegte Luftmenge in Liter/min	Verhältnis der Ein- zur Ausatemzeit
Liegen	St.	14	0,35	5	10	0,59
Sitzen	St.	18	0,4	7	14	0,65
Gehen 80 bis 90 Schr./min	St.	20	0,8	16	32	0,66
Marschieren 120 — 130 Schr./min	St. v. L.	23 23	1,3 1,6	30 36	60 72	0,86 0,86
Laufschritt 165 Schr./min	Go. v. L.	24 20	1,67 2,25	40 45	80 90	0,85 0,77
Schnellauf 220 Schr./min.	Go. v. L.	37 40	1,57 2,05	58 82	116 164	0,67 0,67
Treppenhinauflaufen 112 Stufen in 25 — 30 sek	St. v. L. Go.	35 32 28	2,4 2,62 2,14	84 84 60	168 168 120	0,88 0,90 0,87

Die bei den einzelnen Versuchspersonen etwas abweichenden Daten erklären sich aus der abweichenden Körperbeschaffenheit, und es ergibt sich daraus die Regel, daß die Lebensfunktionen individuell recht verschieden sind, so daß man schon jetzt schließen kann: auch die Eignung zum Tauchen ist bei verschiedenen Menschen, die alle an sich gesund sein mögen, recht verschieden. Einige für obige Tabelle interessierende Daten der Versuchspersonen sind:

Versuchsperson	Alter	Gewicht	Länge	Lungenvolumen	Beschaffenheit
St.	41 J.	76 kg	1,74 m	5 Liter	ungeübt
Go.	48 J.	80 kg	1,67 m	3 Liter	geübt
v. L.	23 J.	80 kg	1,65 m	6 Liter	geübt

Der Anstrengung entsprechend schwankt die Anzahl der Atemzüge je Minute zwischen 14 und 40. (Bei anderen Personen wurden auch nur 6 und als Maximum 50 gezählt.)

Die Lunge füllt sich mit jedem Atemzuge bei Ruhe nur um 7%, bei angestrengtester Arbeit (kurz nach der Arbeit gemessen) um 50% ihres Fassungsvermögens mit Luft, bei ausnehmend kleiner Lunge (3 Liter) um 70%.

Die der Lunge in einer Minute zugeführte Frischluftmenge beträgt bei vollständiger Ruhe nur 5 Liter, bei großer Anstrengung bis zu 84 l/min, also das 17fache.

Die bewegte Luftmenge, also die die Luftröhre passierende Luftmenge ist wegen der Ein- und Ausatmung doppelt so groß wie die Frischluftmenge, in Ruhe also 10, bei Anstrengung bis zu 168 Liter/min. Nimmt man an, daß die Luftwege bei allen Tauchern gleich weit sind, was allerdings nicht der Fall ist, so läßt sich aus diesen Zahlen die Luftgeschwindigkeit berechnen, über die später noch einiges zu sagen ist.

Das Verhältnis der Einatem- zur Ausatemzeit ist hier von geringerem Interesse, es ist klein bei Ruhe und nähert sich der 1 bei Anstrengung.

Die Menge der bei den verschiedenen Leistungen ausgestoßenen Kohlensäure in Liter/min gibt die folgende Tabelle. Sie wurde gewonnen durch Analyse der ausgeatmeten Luft. Die verbrauchte Sauerstoffmenge wurde errechnet unter Annahme eines Respirationsquotienten von etwa 0,9.

Liter/min	ruhig		gehend		Laufschrift 165 Schritt/min	Treppen- steigen 111 St./ 80 sek.	Laufen 220 Schritt/ min	Treppen- hinauf- laufen 111 St./ 28 sek.
	liegend	sitzend	85 Schritt/min	125 Schritt/min				
Kohlensäure	0,17	0,21	0,45	0,7	1,3	1,6	2,4	3,0
Sauerstoff	0,20	0,23	0,5	0,8	1,5	1,8	2,7	3,3

Bevor nun über die Atemtätigkeit unter höherem Atmosphärendruck gesprochen wird, muß die Wirkung des Wasserdrucks auf den Taucher erläutert werden.

2. Wasserdruck

Beim Tauchen erzeugt das Wasser durch seine Schwere einen Druck, der um so größer wird, je tiefer man geht. Der Druck wächst im gleichbleibenden Verhältnis mit der Tiefe, weil das Wasser immer die gleiche Dichte behält,

also nicht zusammendrückbar ist. Daß es in geringem Maße doch komprimierbar ist, der Wasserdruck also in Wirklichkeit doch schneller als linear zunimmt, kann uns bei diesen Betrachtungen nicht stören, da die Dichte-Zunahme zu gering ist und für Tauchen in Tiefen, die mit dem Taucheranzug zu erreichen sind, nicht merkbar in Erscheinung tritt. In Süßwasser beträgt der Druck für je 10 m Tiefe eine technische Atmosphäre, ein Kilogramm auf jeden Quadratcentimeter der Körperoberfläche eines Tauchers. In 10 m Tiefe also 1 kg/qcm, in 20 m Tiefe 2 kg/qcm usw. Da außerdem über dem Wasser noch der atmosphärische Druck lastet, den wir auch zu rd. 1 kg/qcm anrechnen wollen, müssen wir für 10 m Tiefe 2 at abs., für 20 m Tiefe 3 at abs. Druck rechnen. Wir brauchen diese „absoluten Drucke“, gemessen in ata (Atmosphäre absolut) zu allen Rechnungen, nicht die zuerst definierten, die den Überdruck angeben und nur als at (Atmosphäre) oder atü (Atm. Überdruck) bezeichnet seien. In Seewasser ist der Druck, je nach dem Salzgehalt, etwas höher, das kann aber im allgemeinen in der Taucherpraxis vernachlässigt werden.

Steht ein Taucher auf dem Grunde eines Gewässers und hat man Gelegenheit, ihn durch ein Glasfenster zu beobachten, so fällt einem sofort auf, daß der Gummianzug dem Körper fest in scharfen Falten anliegt, bis kurz unter dem Helm. Hier bauscht er sich zu einer Blase, die Luft enthält. Jeder Teil des Körpers eines Tauchers steht unter dem Druck einer Wassersäule, deren Höhe gleich ist dem Abstand dieses Körperteils von der Oberfläche. Die den Boden berührenden Beine haben also den stärksten Druck auszuhalten, der Helmfirst den geringsten, und der Druckunterschied zwischen Kopf- und Fußteil ist gleich dem Druck einer Wassersäule von der Länge des Tauchers. Ist der Taucher 1,7 m lang und steht er aufrecht, so wird der Fuß um 0,17 at stärker gedrückt als der Kopf. Dies ändert sich *nicht*, wenn der Taucher in größere Tiefen geht, da ja die 1,7-m-Wassersäule immer die gleiche Dichte und Schwere behält, eine für das Verstehen der physikalischen Wirkungen des Wassers auf den Taucher wichtige Erkenntnis. Diese Druckdifferenz zwischen Kopf und Fuß, die in der Praxis bei dem gewöhnlich gebückt gehenden Taucher nur etwa halb so groß ist, bringt dem Taucher keine Beschwerden. Das Herz muß etwas stärker arbeiten, um die Blutzirkulation in den Beinen aufrecht zu erhalten. Der Taucher muß sich gegen zu starke Abkühlung, bedingt durch verringerten Blutumlauf, schützen, indem er mehrere Paar wollene Strümpfe und Hosen anzieht, wodurch er auch erreicht, daß der durch Faltenbildung des Gummianzuges verursachte unregelmäßige Druck ausgeglichen wird und die Falten nicht kneifen.

Die dem Taucher zugepumpte Atemluft füllt den Helm und den oberen Teil des Anzuges aus. Die Luft steigt, weil sie leichter als Wasser ist, nach oben. Sie dient dem Taucher nicht allein zum Atmen, sondern auch zum

Tragen der Rüstung. Der Taucher darf, um sich bewegen und arbeiten zu können, im Wasser nicht zu schwer sein, er darf aber auch nicht zu leicht sein, um sicher stehen zu können und nicht versehentlich einmal an die Oberfläche getrieben zu werden. Das Tauchergerät ist nun immer so gebaut, daß es bei richtigen Auftriebsverhältnissen unter Wasser noch eine größere Luftmenge im Gummianzug hat. Diese Luftblase stellt für den Taucher die „Gegenlunge“ dar. Aus ihr atmet er ein, und in sie hinein atmet er aus. Unter welchem Druck nun steht der Inhalt dieser Luftblase? Offenbar unter dem des größten Abstandes von der Wasseroberfläche, also des Abstandes der untersten Stelle der Luftblase, in Abb. 1 mit B bezeichnet. Dieser Druck B herrscht in der ganzen den Körper umgebenden Luftmenge, da ja in der ganzen Luftmenge, von den Füßen bis in den Helmfirst, nur *ein* Druckmöglich ist. Äußerlich herrscht natürlich immer der jeweilige Wasserdruck, so daß am Helmventil außen ein Druck entsprechend dem Abstand h herrscht, während innen der größere Druck B besteht. Beim Off-

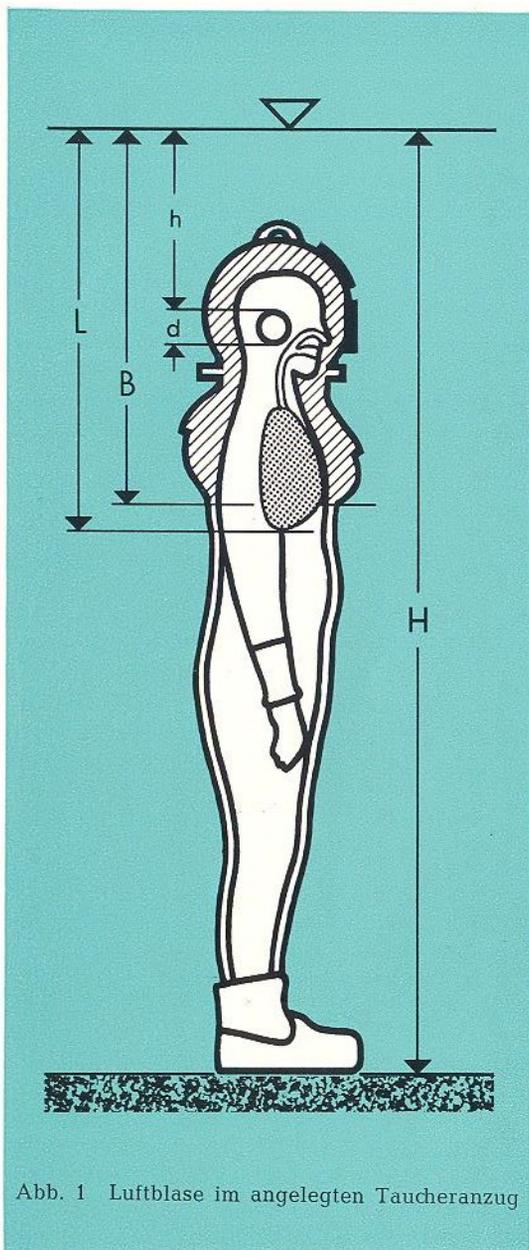


Abb. 1 Luftblase im angelegten Taucheranzug

nen des Ventils fließt also Luft aus, vorausgesetzt, daß der Taucher aufrecht steht. Liegt er etwa seitlich, mit dem Ventil nach unten, kann es vorkommen, daß die Unterkante der Luftblase höher liegt als das Ventil. Beim Öffnen würde also nicht Luft ausfließen, sondern Wasser eindringen.

Bei zu wenig Luft im Anzug ist das Tiefatmen behindert infolge des Wasserdruckes gegen die unteren Lungenteile und das Zwerchfell, selbst wenn die Luftblase im Anzug genügend Luft zur Füllung der Lungen enthalten sollte.

Einem Taucher müssen diese Druckverhältnisse durchaus klar sein, er muß sie besonders bei verschiedenen Körperlagen beachten.

Dem durch das Wasser erzeugten höheren Druck ist naturgemäß nicht nur der Wassertaucher, sondern auch der Arbeiter in der Taucherglocke oder im Druckraum ausgesetzt. Nur bei ersterem treffen die durch seine Körperdimensionen bedingten besonderen Druckverhältnisse zu, die aber physiologisch von geringem Einfluß sind.

3. Druck als Krankheitsursache

Menschen, die an *Blähungen* leiden, sollten nicht tief tauchen. Zwar schadet es nicht, wenn eine Gasblase im Darm durch den Wasserdruck verkleinert und beim Austauchen wieder zum ursprünglichen Volumen vergrößert wird, aber es können während des Tauchens weitere Zersetzungsgase entstehen, die vorläufig wegen zu geringer Ausdehnung nicht entweichen und erst beim Austauchen sich unangenehm bemerkbar machen, abgesehen davon, daß die chemisch nicht ungefährlichen Zersetzungsgase während des Aufenthaltes unter Druck von den Körpersäften absorbiert werden können.

Von störendem Einfluß sind mitunter diejenigen Gasmengen, die von starrem Knochengerüst umgeben sind, in *Körperhöhlen*, die eine starre oder elastische Verbindung mit der Außenluft haben. Die Stirnhöhle über der Nase gehört dazu und die Paukenhöhle, der Raum hinter dem Trommelfell des Ohres. Die Stirnhöhlen sind durch die Nasenkanäle mit der Atmosphäre verbunden. Die Nase des Tauchers muß also durchaus in Ordnung sein. Ist die Verbindung zur Stirnhöhle verstopft, so entsteht beim Tauchen ein unleidliches Druckgefühl an dieser Stelle. Der Raum hinter dem Trommelfell ist durch die schlauchartig-elastische „Eustachische Röhre“ mit dem Rachen und so mit der Außenluft verbunden. Bei Erkältung, Schnupfen und Katarrhen verstopft sich die Eustachische Röhre sehr leicht, oft, ohne daß der Taucher ein Anzeichen dafür hat. In solchem Falle entsteht beim Tauchen ein sehr unangenehmer Druck, sowohl gegen das Trommelfell als auch gegen die Eustachische Röhre, der so stark werden kann, daß der

Taucher gezwungen ist, wieder auszutauchen. Er pflegt den Druckausgleich zum Ohr zu unterstützen durch Schluckbewegungen, Herunterschlucken von Speichel, oder dadurch, daß er ein Stück Zucker in den Mund nimmt, — natürlich vor dem Abstieg, solange das Helmfenster noch offen ist —, Gähnen, Schnauben, oder durch Erzeugen eines geringen Überdrucks im Rachen, indem er bei heftigem Ausatmen durch „geschürzte“ Lippen die Nasenlöcher dichtzuhalten sucht.

Wer über einen einigermaßen nachgiebigen Gesichtsvorsprung verfügt, kann auch die Nase ans Helmfenster drücken und heftig durch die Nase ausatmen, der Widerstand in den verkleinerten Nasenlöchern erzeugt dann Druck in der Mundhöhle, der sich durch die Eustachische Röhre fortpflanzt. Ein Knacken im Ohr zeigt die Entspannung des Trommelfells an. Mitunter aber will es durchaus nicht „knacken“, die Eustachische Röhre bleibt dicht und der Druck wird, je tiefer man kommt, schließlich unterträglich, Ohrensausen, begleitet von einer Verminderung der Hörschärfe, stellt sich ein. In schweren Fällen kann das Trommelfell platzen und Mittelohrentzündung entstehen. Selbst dem geübten Taucher, der gelernt hat, sich zu beobachten, kann es passieren, daß er einmal außerstande ist, die Ohrverbindung zu öffnen. Die Anzeichen einer Erkältung machen sich so unter Druck bemerkbar, während sie unter atmosphärischem Druck noch nicht auftreten.

Mitunter ist allerdings die Ohrverbindung nicht ganz gestört, der Druckausgleich nur erschwert, so daß ein Taucher trotzdem imstande ist, langsam eine große Tiefe aufzusuchen. Da das Austauchen, wie später erörtert wird, sowieso langsam vonstatten gehen soll, und da die hinter dem Trommelfell befindliche Luft beim Austauchen expandiert und den alten Weg durch die Eustachische Röhre selbsttätig zurücklegt, wobei nur geringfügige Schmerzempfindung eintritt, so kommt schließlich nur ein Zeitverlust für den Abstieg zur Auswirkung. Werden in eine Druckkammer (Caisson) viele Leute gleichzeitig eingeschleust, so vermag ein einzelner, dessen Ohrverbindung nicht in Ordnung ist, natürlich alle anderen sehr aufzuhalten. Es müßte darum die Vorschrift bestehen, daß jeder Taucher vor Antritt der Arbeit seine Eignung durch eine Ohrprobe festzustellen hat. Besser natürlich wäre es, die Medizin würde ein einfaches Mittel ausfindig machen, durch das die gute Funktion der Ohrverbindung durch aufsichtführende Personen leicht und schnell feststellbar wäre.

Für Tiefen von acht bis zehn Metern bzw. 0,8 bis 1 at Überdruck kommen Bedenken aus den erörterten Gründen nicht in Frage. Erst bei mehr als zehn Meter Tiefe oder 1 at Überdruck können ernste Beschwerden eintreten. Nach dem Aufenthalt in größeren Tiefen oder unter hohen Drucken darf ein Ohrensausen, das vielleicht viele Stunden anhält, nicht eintreten, insbesondere nicht regelmäßig. Ein solcher Taucher wäre ungeeignet. Nach

wiederholtem Aufenthalt unter Druck scheint eine gewisse Gewöhnung einzutreten, die Ohrtrumpete scheint erweitert zu sein (Viverot).

Bei Lücken im Trommelfell treten die geschilderten Erscheinungen nicht ein.

Bei Druckabfall bzw. beim Austauschen zeigen sich Ohrenscherzen weniger oft als beim Abstieg bzw. beim Einschleusen.

Ein *guter Taucher soll überhaupt keine Ohrenbeschwerden haben*, oder jedenfalls nur ausnahmsweise bei einer Erkältung.

Bei $\frac{2}{3}$ at Überdruck ist das Pfeifen unmöglich, bis 1,5 atü läßt es sich nach kurzer Zeit schon wieder erlernen, die Lippen werden dabei aber durch die dichtere Luft unangenehm angestrengt. Die Stimme hat näselnden, metallischen, belegten Klang. Diese Angaben sind von Bedeutung für den Fernsprechverkehr mit Tauchern oder Druckluftarbeitern.

Wünsche und Laurence *) untersuchten den Einfluß der Herztätigkeit unter Druckatmung mit dem Elektrokardiographen. Es wurde die Einwirkung des Luftüberdruckes auf die Herztätigkeit geprüft. Bei allen Untersuchungen konnte eine deutliche Änderung der Herzschlagzahl festgestellt werden. Dabei konnte festgestellt werden, daß Kaninchen bei langsamem Ein- und Ausschleusen und einem mehrstündigen Verweilen unter 3,0 atü, aber auch erheblichen Druckschwankungen und plötzlichen Druckerniedrigungen nur selten caissonkrank werden. Mit Sicherheit wurde eine Änderung der Herzfrequenzen festgestellt, und zwar während der Kompression eine deutliche Abnahme, der Isopression eine annähernd gleichbleibende Verlangsamung und während der Dekompression eine beginnende Zunahme der Herzfrequenzen. Daß hierfür nicht nur der Druck an sich, sondern auch der Sauerstoff-Partialdruck verantwortlich ist, hat Dr. Seusing nachgewiesen.

4. Die Tiefengrenzen für Taucher

„Wie tief kann der Mensch eigentlich tauchen?“ Diese Frage wird dem Taucher häufig gestellt, und er beantwortet sie gewöhnlich nach eigener Erfahrung mit: 30 bis 50 Meter; dann hört's auf, der *Druck* wird zu groß. Stellt man diese Frage einem Techniker, dessen Spezialgebiet nicht die Taucherei ist, so werden einem sicher lehrreiche Rechnungen vorgeführt, nach denen der Körper eines Tauchers in 10 oder 20 Meter Wassertiefe schon einem Druck ausgesetzt ist, der der Last einer Lokomotive mit einigen beladenen Güterwagen entspricht.

Bekanntlich ruht auf dem Körper eines Menschen von normalem Umfang unter Atmosphärendruck ein Druck von 15 000 kg, unter 10 m Wassertiefe 30 000 kg und bei einer Tiefe von etwa 90 Metern sind es gar 150 000 kg. In der Tat spürt aber der Taucher fast *nichts* vom Wasserdruck bzw. vom gleich großen Druck der ihn umgebenden Luft im Anzug, und er dürfte der reinen Druckwirkung wegen die größten Wassertiefen aufsuchen können, wenn dem nicht andere Faktoren entgegenstünden, die allerdings Folgen des Wasserdruckes sind.

Der menschliche Körper besteht zu 90% aus Wasser oder kolloidalen Lösungen. Wasser aber ist so gut wie gar nicht zusammendrückbar, also verändern sich die Ausmaße des Körpers nicht, wenn er selbst unter 1000 at Druck gebracht wird. Die Lufteinschlüsse des menschlichen Körpers stehen mit der ihn umgebenden Luft in Verbindung, das sind vor allem die Lunge und einige Körperhöhlen, die Stirnhöhle, Ohrtrompete usw. Der hier eingeschlossenen Luft teilt sich der Druck im Taucheranzug sofort mit. Die Verbindung solcher Hohlräume mit der Anzugluft darf nicht gestört sein. Ist z. B. infolge Erkältung des Tauchers die Eustachische Röhre verstopft, so braucht der Taucher nur wenige Meter unter Wasser zu gehen, und der durch Druck auf das Trommelfell erzeugte Schmerz zwingt ihn, wieder hochzukommen.

Es gibt nun aber noch eins zu bedenken, das die Behauptung der Taucher von der reinen Druckwirkung in gewissem Sinne wahr werden läßt, wenn man von Tiefen über 1000 Meter spricht. Bekanntlich bewirkt erhöhter Druck vielfach eine Beschleunigung chemischer Umwandlungen oder gar, er veranlaßt erst das Einsetzen einer chemischen Veränderung. Da der menschliche Körper aus einer Unzahl chemischer Verbindungen besteht, ist es denkbar, daß unter Druck eine Umlagerung der Moleküle, ein Zerfall der organischen Verbindungen stattfindet, so daß das Leben des Organismus zerstört wird. Das ist tatsächlich der Fall, wie an Tierexperimenten nachgewiesen wurde.

Ein Frosch wurde unter 500 at = 5000 Meter Tiefe gebracht; er starb nach 10 Minuten. Hatte man dem Frosch vorher die Haut abgezogen, so starb er unter 500 at sofort — die Haut ist also widerstandsfähiger, zerfällt langsamer als das Gewebe. Unter 400 at ist die mikroskopische Struktur der Gewebe bald zerstört, auch die Nerven haben ihre Reizbarkeit verloren. Unter 300 at blieben Froschmuskeln zwei Stunden lang normal. Schneckenlarven lebten zwei Stunden unter 700 at Druck, starben aber, als man sie unter 900 at brachte (L. E. Hill)*).

*) L. E. Hill: Compressed Air Illness and experim. Research. The British Medical Journal Nr. 2668, 1912.

Man kann daraus schließen, daß der Mensch vielleicht 2000 Meter tief tauchen könnte, sofern die bloße Druckwirkung des Wassers in Frage käme. Bekanntlich ist aber die maximal erreichbare Tauchtiefe für den Taucher, der dem Wasserdruck ausgesetzt ist, weit geringer. Schuld daran sind die menschlichen Atemwerkzeuge, die für Luft atmosphärischer Dichte eingerichtet sind. Bei diesen Betrachtungen wird hier vom Taucher im elastischen Gummianzug ausgegangen, nicht vom sogenannten Panzertaucher.

Die Lunge bedarf zur Ausscheidung von Kohlensäure, Wasserdampf usw. immer des gleichen Volumens Atemluft, wie dicht diese Luft auch sein möge, in welcher Tiefe auch der Taucher sich befinde — vorausgesetzt, daß seine Arbeitsleistung an der Oberfläche und in der Tiefe die gleiche ist. In beispielsweise 50 Meter Tiefe ist die Luft sechsmal so dicht, so schwer und so träge wie an der Oberfläche. Von dieser „dickflüssigen“ Luft muß der Taucher durch Nase und Bronchien ebensoviel einatmen wie an der Oberfläche, so daß wohl die Luftgeschwindigkeit nicht jedoch die Förderleistung dieselbe ist. Das macht sich nun aber recht unangenehm bemerkbar, weil die zu befördernde *Luftmasse* sechsmal größer, also auch die Arbeit der Brustmuskeln dann sechsfach größer ist, um die Masse durch die Luftwege zu treiben. Die größere Luftdichte verursacht größere Reibung an den Luftkanälen, die in der Nase befindlichen Borsten biegen sich unter dem hörbaren Ansturm der Luftmassen und verursachen unangenehmen Kitzel in den Nasenlöchern, kurz, man muß schon den Mund öffnen, um die „dicke“ Luft bequemer bewegen zu können. (Siehe auch „Lebensbedingungen unter einem Druck von 8 atü = 80 m Wassertiefe“.) Bedenkt man nun, daß der Taucher unter diesen Umständen auch praktische Arbeit verrichten soll, daß dabei aber die Luftgeschwindigkeit bei großer Anstrengung um den 17fachen Betrag steigen kann (nach Tabelle Seite 10), so begreift man, daß die Lungenmuskeln nicht zugleich noch den der Tiefe von 50 Metern entsprechenden sechsfachen Arbeitsbetrag zu leisten vermögen, da ja schon die 17fache Atemluftmenge das Äußerste der Lungen-Arbeitsfähigkeit an der Oberfläche darstellt. Die Arbeitsfähigkeit des Tauchers unter 50 Meter Wasserdruck ist also aus Anlaß der Luftdichte verringert.

Praktische Erfahrungen bestätigen dies. Taucher, die in 40 bis 50 Meter Tiefe verhältnismäßig leichte Arbeiten zu verrichten haben, können nur kurze Zeit wirkliche Muskelarbeit leisten, dann sind sie erschöpft. Strenge sie sich an, um die Arbeit zu beschleunigen, verbrauchen sie sehr schnell eine Energiereserve, die sie mit hinunterbrachten, *ohne zu bemerken*, daß sie dann völlig „ausgepumpt“ sind. Erst nach Rückkehr an die Oberfläche macht sich die außerordentliche Erschöpfung bemerkbar, mitunter durch Ohnmacht, oder sie hat langes Krankenlager zur Folge. Das Maß der verlangten natürlichen Muskelarbeit ist also ein anderer Faktor, der die Tiefengrenze für den Taucher bestimmt.

Die Möglichkeit der Leistungssteigerung der Lunge um den 17fachen Betrag gestattet nur einen Rückschluß auf die maximal erreichbare Tauchtiefe für den Fall, daß der Taucher in dieser Tiefe in äußerster Ruhe verharren soll, also jede CO₂-erzeugende Muskelbewegung, die Lungenmuskeln ausgenommen, unterläßt. Er hätte dann die Lunge mit einem Arbeitsaufwand zu betätigen, der in unserer Tabelle beim Treppenlaufen nötig ist, mit dem 17fachen gegenüber äußerster Ruhe. Die Masse der geförderten Luft dürfte also den 17fachen Betrag derjenigen in der Atmosphäre ausmachen. Rechnet man, daß vom ruhig stehenden Taucher in Meereshöhe 10 l/min Luft gebraucht wird, so wird das gleiche Volumen bei 17facher Masse erst unter 17 ata von der Lunge benötigt. Diese 17 ata entsprechen aber 160 Meter Wassertiefe. Bei dieser Förderleistung von 10 Liter zu 17 ata, entsprechend 220 g/min, muß der Mund stets geöffnet sein, weil die Nasenlöcher zu klein sind. Diese, in Abhängigkeit von der Lungenarbeit gefundene, maximale Tauchtiefe dürfte zwar nicht absolute Gültigkeit haben, weil alle Taucher physiologisch verschieden reagieren; weitab liegen kann der Wert aber keinesfalls, so daß man mit 140 bis 180 Meter sicher die Tiefen-Grenzen für verschiedene Individuen wird angeben können, immer aber unter der Voraussetzung, daß der Taucher keine Arbeit leistet, nur etwa zu Beobachtungszwecken taucht. Die Dauer des Aufenthaltes in dieser Tiefe wurde nicht berührt, sie kann nur kurz sein, wenige Minuten betragen, da die der Rechnung zugrunde liegende 17fache Luftmenge der äußersten körperlichen Anstrengung entspricht.

Aber selbst in 100 m Tiefe ist dem Taucher ein Arbeiten unter Zufuhr von Normal-Luft nicht lange möglich. Der Stickstoff der Luft wirkt bereits in Tiefen von mehr als 50 m auf den Organismus des Tauchers ein, etwa wie Alkohol, nämlich berauschend (siehe später). Der Sauerstoff der Luft wird ab 90 m Tiefe bei 0,5—1 Stunde Aufenthalt bereits gesundheitsschädlich. Es stellt sich eine Sauerstoffvergiftung ein. In dieser Tiefe aber ist der Einfluß des Stickstoffes nach kürzerer Zeit bereits so stark, daß der Taucher kaum noch konzentriert und folgerichtig handeln kann.

Für größere Tiefen wird die Verwendung einer wesentlich leichteren Kunstluft zwingend. Diese kann entweder aus einem Gemisch von Helium und Sauerstoff oder von Wasserstoff und Sauerstoff bestehen. Der Sauerstoffgehalt in dieser Kunstluft muß so gewählt werden, daß einerseits ein für die Atmung ausreichender Sauerstoffteildruck garantiert wird, andererseits aber bei Verwendung von Wasserstoff-Sauerstoff-Gemischen der Explosionsbereich mit Sicherheit vermieden wird.

Wir beantworten die Frage nach der Tiefengrenze zusammenfassend: 30 m dürfte die größte Tiefe betragen, die ein Schwimmer ohne Gerät erreichen kann (Abb. 2, S. 21).

40 m ist die Grenztiefe für Taucher, die mit Normal-Luft versorgt werden und von denen man verhältnismäßig schwere Arbeit verlangt.

90 m ist die Grenztiefe für das Tauchen mit Normal-Luft, wenn keine Arbeit zu leisten ist, also für Beobachtungszwecke.

Über 90 m muß dem Taucher Kunstluft zugeführt werden, wobei der Stickstoffanteil der Luft durch das leichtere Helium ersetzt wird und der Sauerstoffanteil der Tauchtiefe entsprechend zu bemessen ist. Dabei soll der Sauerstoffteildruck 2 ata möglichst nicht übersteigen. Mit einer Kunstluft aus Helium und Sauerstoff wird man etwa die 300-m-Grenze überschreiten können. Eine Kunstluft aus Wasserstoff und Sauerstoff gestattet, noch größere Tiefen zu erreichen.

Erreichbare Tauchtiefen und Tauchzeiten ohne Gerät und mit verschiedenen Tauchgeräten

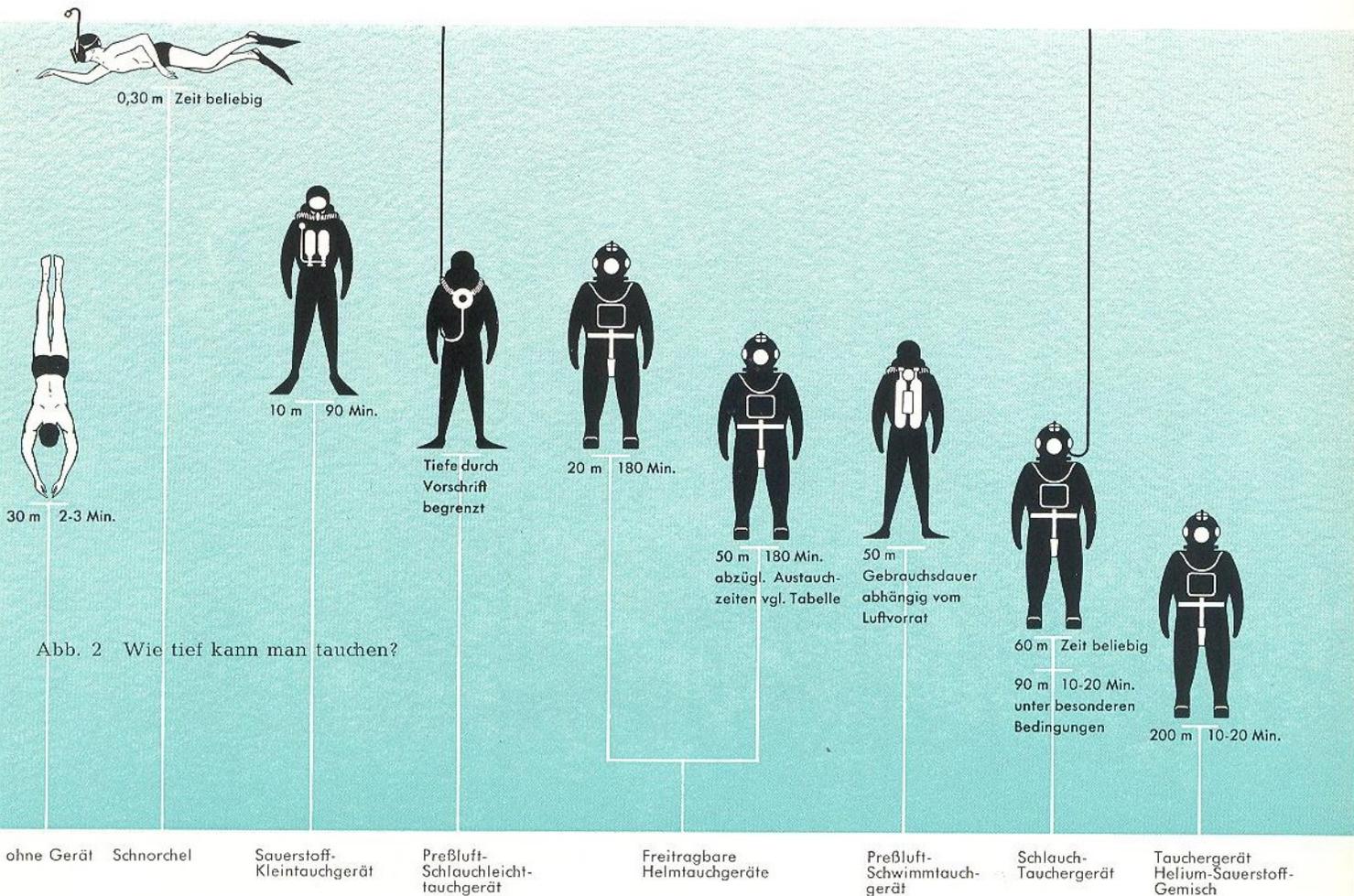


Abb. 2 Wie tief kann man tauchen?

B. EINWIRKUNG DER ATEMGASE

1. Sauerstoff

a) Sauerstoff unter atmosphärischem und höherem Druck

Bekanntlich hat selbst 100prozentiger Sauerstoff, unter atmosphärischem Druck einige Stunden geatmet, auf die Körperfunktionen des gesunden Menschen fast gar keinen Einfluß. Der Mediziner findet zwar nach derartiger Einwirkung geringe Veränderungen des Blutes, der Blutkörperchenzahl, die uns aber hier nicht interessieren.

Unter geringerem als Atmosphären-Druck übt Atmung reinen Sauerstoffs keinen schädlichen oder leicht erkennbaren Einfluß auf die Lebensfunktionen aus.

Unter *höherem* als Atmosphären-Druck aber darf 100prozentiger Sauerstoff nur unter gewissen Bedingungen — nicht zu hohem Druck und bei geringer Arbeit und während relativ kurzer Zeit — geatmet werden.

Wir haben es in den meisten Fällen mit atmosphärischer Luft zu tun, die nur zu 21% aus Sauerstoff besteht. Beträgt der Luftdruck nun $1 \text{ at} = 1 \text{ kg/qcm}$, so kommt ein Teildruck von $\frac{21}{100}$ davon auf Rechnung des Sauerstoffs. Wir werden in folgendem der Kürze halber gelegentlich von dieser Bezeichnungsweise des Partial- oder Teildruckes eines Gases Gebrauch machen.

b) Sauerstoffvergiftung

In der einschlägigen Literatur finden sich außerordentlich viele Angaben über das Verhalten von Tieren unter hohem Sauerstoffdruck, deren Kenntnis Rückschlüsse auf das Verhalten von Menschen unter solchen Bedingungen um so eher zuläßt, je verwandter der Organismus des betreffenden Tieres dem menschlichen ist. Für unsere Zwecke würden der Affe und das Schwein die zuverlässigsten Resultate ergeben. Beide waren aber wohl zu kostbar, so daß am häufigsten kleinere Säugetiere, wie Ratten, Hunde und Ziegen den Versuchen geopfert wurden. Wir erwähnen kurz einige der wichtigsten Ergebnisse aus Tierversuchen, da natürlich Beobachtungen am Menschen fast niemals bis zu demselben Grade durchgeführt werden durften.

Einem Druck von 0,6 ata (also weniger als Atmosphärendruck), was einer Höhe über dem Meer von 5000 m entspricht, wurden Hunde und Affen monatelang 100%igem Sauerstoff ausgesetzt. Es ließ sich nur geringe Blutarmut feststellen (Bornstein)*).

1,2 ata, 2 Meter Wassertiefe entsprechend, ertrugen Hunde und Katzen nur zwei bis drei Tage. Unter demselben Sauerstoffdruck befanden sich aber Hund und Affe wohl, wenn sie täglich nur sechs bis acht Stunden diesem Druck ausgesetzt waren (Bornstein). Die Giftigkeit des Sauerstoffs wächst also mit der Zeit.

3¹/₂ ata, 25 Meter Wassertiefe entsprechend, bewirken nach viertägiger Einwirkung Lungenentzündung bei Atmung unter ³/₄ at Sauerstoff-Teildruck (Lorrain-Smith).

Aus der deutschen Luftfahrtmedizin sind Versuche bekannt geworden, wonach reiner Sauerstoff bei Normaldruck 2 bis 3 Tage geatmet, Lungenkrankung hervorruft (Clamann und Becker-Freyseng).

6,7 ata, 57 Meter Wassertiefe entsprechend, wurden sieben Ziegen drei Stunden lang ausgesetzt in einer Luft, die 36¹/₂% Sauerstoff enthielt, Sauerstoff-Teildruck also 2,45 at. Eine Ziege verendete noch während des Experiments an Lungenentzündung, fünf zeigten leichte Krankheitserscheinungen, während bei einer anderen gar keine Symptome auftraten (Haldane). Das Maß der Giftigkeit komprimierten Sauerstoffs ist also individuell verschieden groß.

5 ata = 40 Meter Wassertiefe unter 100% Sauerstoff wurden Ratten und Hunde zwei bis sechs Stunden ausgesetzt, bis sie unter Lungenkrankung verendeten (Bornstein).

8 ata = 70 m Wassertiefe unter 100% Sauerstoffdruck ertrugen Ratten nur 10 bis 75 Minuten, bis sie unter Krämpfen verendeten (Bornstein).

Versuche der Drucksauerstoff-Einwirkung am Menschen sind naturgemäß nie bis zu gefährlicher Erkrankung ausgeführt worden. Man vermutet, daß größere Tiere bedeutend höheren Sauerstoffdruck vertragen als Menschen. Bei Ruhe oder ganz leichter Arbeit darf 100%iger Sauerstoff unter 2 ata = 10 Meter Wassertiefe vier Stunden lang geatmet werden (Hill).

Unter 3 ata = 20 Meter Wassertiefe in 100% Sauerstoff befand sich der Taucher nach 50 Minuten noch wohl, wenn er keine Arbeit verrichtete. Es traten aber nach 50 Minuten Krämpfe in den Beinen ein, wenn er sich während des Aufenthaltes im Sauerstoff mit Fahrradtretten beschäftigt hatte (Bornstein). Dies ist einer der wenigen Versuche, die zeigen, daß die Giftigkeit des Drucksauerstoffs auch abhängig ist von der geleisteten Arbeit.

*) Bornstein: „Die Absturzerkrankung der Taucher“ Berliner Klinische Wochenschrift Nr. 50, 1918.

In etwa 90 Meter Tiefe darf sich ein Taucher ruhend eine Stunde aufhalten, wenn er atmosphärische Luft atmet (21 % O₂).

Der Verfasser tauchte mit einem unabhängigen Dräger-Tauchergerät, das nur für 20 Meter Tiefe berechnet war, in 25 Meter Tiefe. Der Sauerstoffgehalt der Atemluft betrug nach 80 Minuten Tauchzeit etwa 70 %. Die Arbeit bestand nur im Umhergehen. Nach etwa 1 1/4 Stunden stellten sich im Ohr eigentümlich klopfende Geräusche ein, wie etwa der Taucher das schlagend-mahlende Geräusch einer Schiffsschraube hört. Vermutlich war dies der hörbar gewordene Puls einer Kopffader, da das Geräusch im Takte des Herzschlags erfolgte. Die dann in der Folge auftretenden Erscheinungen waren: krampfhaftes Zittern der Augenlider, dann des Unterkiefers, schließlich des ganzen Kopfes. Nach Hinaufgehen auf 10 Meter Tiefe und Ausspülen des Helminnern mit atmosphärischer Luft stellte sich nach 5 Minuten schon der normale Zustand wieder ein. Diese Erfahrung dürfte wertvoll sein, da sie erkennen läßt, daß die Anzeichen der Sauerstoffvergiftung deutlich erkennbar und warnend auftreten und man im allgemeinen Zeit hat, einer ernsten Erkrankung zu entgehen.

Wie spätere Feststellungen ergaben, tritt nicht bei jedem Menschen ein für die Sauerstoffvergiftung typisches Warnzeichen auf. Vielmehr kann die Sauerstoffvergiftung bei manchen Menschen zu einem plötzlichen Kollaps führen. Um ganz sicher zu gehen, wird in manchen Ländern reine Sauerstoffatmung nur bis zu 10 m Tiefe angewendet.

Außer den angeführten Symptomen aus Anlaß hoher Sauerstoffspannung nennt *Paul Bert* noch: Speichelfluß, Atemnot, Konvulsionen, Krämpfe epileptischer Art, tetanische Erscheinungen, Lungenentzündung.

Als Eigentümlichkeit sei noch erwähnt, daß eine Benzinflamme, wie sie in der Wetterlampe im Bergbau verwendet wird, in gewöhnlicher Luft brennend, zum Erlöschen gebracht wird, wenn die Luft mit CO₂ angereichert wird bis zu einem Sauerstoffgehalt von 18 %. Wird die Luft dagegen mit Stickstoff verdünnt, so erlischt die Flamme bei einem Sauerstoffgehalt von 16 %, während der Mensch bei Nichtarbeit noch in etwa 9 % Sauerstoff zu leben vermag.

Zusammenfassend kann gesagt werden: Sauerstoff, unter höherem als Atmosphärendruck geatmet, ist gesundheitsschädlich in Abhängigkeit von der *Dauer* der Einatmung, dem *Druck*, unter dem er geatmet wird, und der körperlichen *Arbeit*, die der Taucher leistet. Versucht man, nach den bisher gewonnenen Erfahrungen an Mensch und Tier eine Tabelle aufzustellen, die angibt, wie hoch der Sauerstoffgehalt der Luft sein darf, wenn der Taucher sich etwa zwei Stunden darin aufhält und unter der Voraussetzung, daß bei mittelschwerer Arbeit unter dieser Bedingung ein Sauerstoff-Teildruck von 2 ata genügt, so kommt man zu folgenden Daten:

Die Formel für die Berechnung lautet dann: x Volumen-%-Sauerstoffgehalt der Einatemluft = $100 \times 2 \text{ ata}$ Sauerstoff-Teildruck, dividiert durch den Gesamtdruck in ata.

$$x \% \text{ O}_2 = \frac{100 \cdot 2 \text{ ata}}{n \text{ ata}}$$

Zulässiger Sauerstoffgehalt bei mäßiger Arbeit und zwei Stunden Tauchzeit:

Wassertiefe	ata	% O ₂	Wassertiefe	ata	% O ₂
0 m	1	100	90 m	10	20
10 m	2	100	100 m	11	18,2
20 m	3	67	110 m	12	16,7
30 m	4	50	120 m	13	15,4
40 m	5	40	130 m	14	14,3
50 m	6	33 ¹ / ₃	140 m	15	13,3
60 m	7	28 ¹ / ₂	150 m	16	12,5
70 m	8	25	200 m	21	9,5
80 m	9	22,2	300 m	31	6,5

Nun muß allerdings bemerkt werden, daß die Sauerstoffgefahr für die Mehrzahl der Taucher heute nicht beunruhigend ist, weil sie mit Luft atmosphärischer Zusammensetzung tauchen, die nach obiger Tabelle bis 90 Meter Tiefe geatmet werden darf. Bis heute ist zwar nur ein Fall bekannt geworden, wo Taucher diese Grenze erreicht haben — bei Hawaii anlässlich der Hebearbeiten an einem gesunkenen amerikanischen U-Boot wurden 94 Meter erreicht —, es ist aber durchaus nicht ausgeschlossen, daß in Zukunft derartige Tiefen öfter aufgesucht werden, weil die Ursachen der bisher auftretenden Schwierigkeiten jetzt größtenteils erkannt und zu umgehen sind.

Für schlauchlose Tauchergeräte muß die Möglichkeit bestehen, die Sauerstoffkonzentration durch Spülen mit Luft herabzusetzen. Am Dräger-DM-40-Gerät ist deshalb ein großes Preßluft-Brustgewicht vorhanden.

c) Sauerstoffatmung im Tauchretter

Um die Frage zu klären, wie lange der Aufenthalt unter hohem Druck bei der Atmung hochprozentigen O₂-Gemisches sein darf, wurde eine Versuchsreihe unter 2,3 bis 6 atü bei verschiedenen Aufenthaltszeiten vorgenommen. Geatmet wurde mit dem Dräger-Tauchretter, dessen Atemsack 70 bis 90% O₂ enthält, in einer luftgefüllten Stahlkammer unter gen. Druck.

Wir berichten über Versuch Nr. 8:

Höchstdruck 3 atü, entsprechend 30 m Wassertiefe.

Dauer des Druckanstiegs bis zum Höchstdruck 3 Minuten.

Aufenthaltszeit unter Höchstdruck 29 Minuten.

Dauer des Druckabfalls bis auf 0 atü 6 Minuten.

Sauerstoffatemzeit unter Höchstdruck (unter Berücksichtigung der Zeit während des Druckanstiegs) 31,5 Minuten.

Sauerstoffgehalt im Atemsack im Mittel 90 Volumen-%.

Temperatur unter Höchstdruck 16 ° C.

Feuchte unter Höchstdruck 9,5 g/m³.

Temperatur zum Schluß 12,5 ° C.

Feuchte zum Schluß 8,2 g/m³.

Versuchspersonen: Kapltl. *Bräutigam* und Tauchermeister *Gottlebsen*.

Bei beiden Tauchern traten nach kurzer Zeit Müdigkeit, Unlustgefühle und Energielosigkeit, leichter Schwindel ein. Bei *Bräutigam* im Augenblick des Druckabfalls: Gesichtskrampf, Bewußtlosigkeit, röchelnder Atem, starke Schleimbildung im Munde. Etwa eine Stunde nach dem Ausschleusen ging die Bewußtlosigkeit in regelrechten Schlaf über. Vollständige Erholung nach 2 1/2 Stunden. Am andern Tag rotunterlaufene Augen.

Bei *Gottlebsen* übermäßige Ausatmung infolge Abgabe des im Körper gelösten Sauerstoffs durch die Lunge, verursacht durch sehr schnelles Ausschleusen.

Mit den vorhergehenden Versuchen 1 bis 4 und 8 war beabsichtigt festzustellen, nach welcher Zeit sich unter verschiedenen Drucken deutliche Anzei-

Abb. 3
Bräutigam und
Gottlebsen
unter
4 atü Sauerstoff
atmend



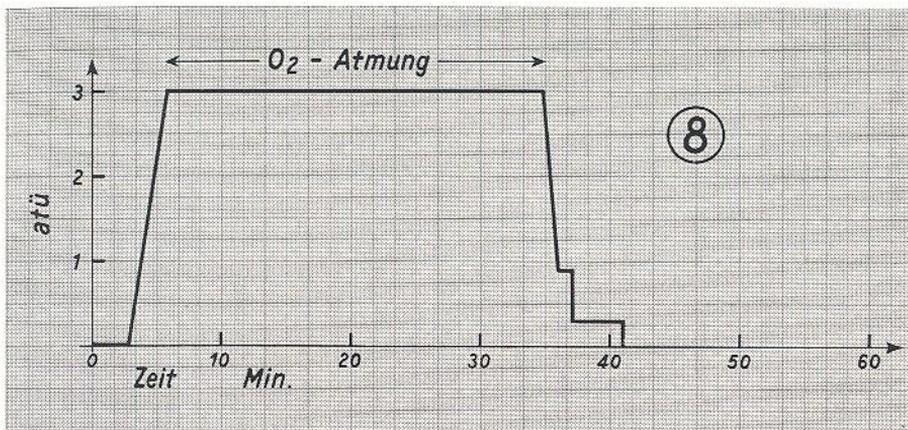


Abb. 4 Druck-Zeit-Diagramm des O₂-Atemversuchs Nr. 8

chen von O₂-Vergiftung einstellten. Bei den (hier nicht beschriebenen) Versuchen 5, 6 und 7 wurde U-bootmäßiges Austauschen angenommen, d. h. nur kurzzeitiges Atmen in hochprozentigem Sauerstoff. Um ungünstige Verhältnisse zu haben, wurde der O₂-Gehalt im Atemgerät möglichst hoch gehalten, der verbrauchte O₂ wurde durch Nachfüllen immer wieder ersetzt.

Der *Druckabfall*, das Ausschleusen erfolgte bei Versuch 8 in nur 6 min, weil ein Taucher bewußtlos geworden war. Dieses Ausschleusetempo wäre gefährlich gewesen, wenn die Taucher atmosphärische Luft geatmet hätten, so daß der Körper anstatt Sauerstoff Stickstoff aufgenommen hätte. Der im Körper gasförmig gelöste O₂ entwich nach dem Ausschleusen so stürmisch, daß das *blubbernde Geräusch* der eigenen Lippen den Taucher trotz der ersten Situation zum Lachen reizte. Der im Körper freiwerdende Sauerstoff verursachte *nicht* die vom Stickstoff her bekannten Schmerzen (Abb. 4).

Die angegebenen Symptome der *Sauerstoffvergiftung* beziehen sich nur auf *nichtarbeitende* Taucher. Die Taucher gingen umher, saßen aber meist auf einem Hocker und beschäftigten sich mit Lektüre. Bei einem arbeitenden Taucher treten bekanntlich *schnell* deutlichere Anzeichen auf wie krampfartiges Zittern der Augenlider, der Lippen, dann des Kopfes.

Um die Taucher beim Ausschleusen gegen den starken Temperaturabfall, verbunden mit Nebelbildung, zu schützen, waren ihnen Wolldecken in den Kessel gegeben worden. Als Ergebnis dieser Versuche kann folgendes gesagt werden:

Das Atmen 85 % O₂-haltiger Luft ist unter 6 atü Druck ungefährlich, wenn die Atemzeit nicht mehr als 5 min beträgt.

Unter 4 atü darf 80 % O₂-haltige Luft 16 min geatmet werden.

Diese Regeln gelten aber nur für Taucher, die sich wenig bewegen, und keine Arbeit leisten. Für arbeitende Taucher müssen die Zeiten zweifellos verkürzt werden.

Aus dem Versuchsergebnis läßt sich eine Beziehung zwischen Sauerstoffteildruck und Tauchzeit ableiten. Sie lautet:

$$p \cdot \sqrt[3]{t} = 10$$

Darin ist: p der O₂-Teildruck in ata
t die Tauchzeit in min.

Für den Gebrauch der Tauchretter in großen Tiefen ergibt sich, daß das Gerät bedeutend länger benutzbar ist als angegeben, wenn der Sauerstoffgehalt gering gehalten wird, im Gegensatz zu diesen Versuchen, die schnell die Grenzen der Benutzbarkeit zeigen sollten. Grundsätzlich gilt für große Tiefen bis 100 m:

Die Atemzeit unter hohem Wasserdruck soll möglichst kurz sein, der Tauchretter ist also erst „im letzten Augenblick“ zur Atmung anzusetzen. Das Nachfüllen von Sauerstoff kommt nicht in Frage — nur ausnahmsweise, wenn infolge langer Atemzeit der Atemsack bei der Einatmung vollständig zusammenklappt.

Da das Nährgas im Atemsack während des Aufstiegs aus großer Tiefe expandiert, so hat der Taucher an der Wasseroberfläche noch einen vollen Atembeutel mit mindestens 5 l O₂ zur Verfügung. Innerhalb der folgenden 5 bis 10 min ist also ein Versagen nicht zu befürchten. Jedoch wird der Taucher in den allermeisten Fällen sofort bei Erreichen der Oberfläche zur freien Atmung übergehen und den Tauchretter nur noch als Schwimmsack benutzen.

Aus den Erfahrungen des zweiten Weltkrieges wird für das Aussteigen auf jedes Atemgerät verzichtet, da der Lungeninhalt ausreicht, während des Auftreibens infolge Expansion ausreichende Mengen von CO₂ auszutreiben. Eine Atmung ist deshalb nicht erforderlich.

Die hier beschriebenen Versuche sind nicht ganz ungefährlich. Sie waren aber notwendig, um praktisch zu zeigen, daß die Dräger-Tauchretter trotz ihrer einfachen Handhabung ein wirkliches U-Boot-Rettungsgerät für große Tiefen sind.

2. Stickstoff

a) Stickstoff unter Druck

Seit etwa 1880 (Paul Bert) wissen wir, daß Stickstoff trotz seines chemisch trägen Charakters der größte Feind des Tauchers ist. Seine Gefährlichkeit liegt im physikalischen Verhalten gegenüber den Körpersäften. Er ist völlig unschädlich während des Abstiegs und im allgemeinen auch während des Aufenthalts des Tauchers auf dem Grunde, erst während oder nach dem Aufstieg beginnt die schädliche Einwirkung. Stickstoff wird von den Körpersäften in einfacher Lösung aufgenommen, in um so größeren Mengen, je höher der Druck ist, dem der Taucher ausgesetzt ist.

Um sich diesen Vorgang klarzumachen, erinnere man sich des Selterwassers. Entfernt man den Verschuß einer Selterflasche, so entlastet man das Wasser vom Druck und setzt es dem geringeren Atmosphärendruck aus. Das Wasser vermag unter dem verminderten Druck nicht mehr die ursprüngliche Menge Gas zu halten und gibt eine entsprechende Gasmenge unter Aufsprudeln in großen Blasen wieder ab.

Ganz ähnlich verhalten sich das Blut und die anderen Körpersäfte des Tauchers, indem sie während des Aufenthalts in der Tiefe oder unter Druckluft Stickstoff aufnehmen und ihn beim Austausch, wenn der Druckabfall groß ist und schnell genug vonstatten geht, in Form größerer oder kleinerer Blasen wieder abscheiden. Neben Stickstoff werden natürlich auch alle anderen in der Atemluft befindlichen Gasarten von den Körpersäften in Lösung aufgenommen. Die Edelgase sind dabei dem Stickstoff gleich zu achten. Sauerstoff, der vom Lungenblut zum Teil in gelöstem Zustande fortgetragen wird, geht so schnell eine chemische Bindung ein, daß er als störendes Gas schon nicht mehr in Frage kommt, sobald er die Gewebe erreicht hat. Kohlensäure wird vom Blut vermutlich nur in sehr geringem Maße in Lösung aufgenommen, weil die Atemtätigkeit einen CO_2 -Teildruck von 0,056 ata in der Lunge aufrecht erhält, wie hoch auch der absolute Druck sein mag.

Blut von 37°C vermag beispielsweise bei 1 ata Druck etwas mehr als 1%, bei 2 ata 2% usw. des Taucher-Körpervolumens an Stickstoff aufzunehmen.

Das Blut trägt den Stickstoff von der Lunge fort durch den ganzen Körper, es gelangt zu den Geweben, zum Fett, zu den Organen usw. Überall hat es Gelegenheit, an diese bisher mit Stickstoff nicht gesättigten Körperteile Gas abzugeben, um so intensiver, je größer das Sättigungs-Gefälle ist. Dieses Sättigungs-Gefälle ist verschieden groß, erstens für verschiedene Tauchgeschwindigkeiten und zweitens für die verschiedenen

Organe. Taucht man schnell auf große Tiefen, so wird unter dem rasch steigenden Luftdruck das Lungenblut schnell große Mengen Stickstoff aufnehmen. Es transportiert diese großen Mengen zu Geweben und Organen, die noch gar keinen N_2 enthalten, also intensiv dem Blut einen großen Teil des mitgeführten Gases entreißen, solange, bis sie diejenige Sättigung erreicht haben, die dem Druck entspricht, der auf dem ganzen Körper lastet. Die Geschwindigkeit aber, mit der die verschiedenen Körperteile sich sättigen, ist verschieden groß, und auch die zur Sättigung erforderliche Gasmenge der einzelnen Körperteile ist recht verschieden. Aus diesem Grunde ist es leider nicht möglich, eine mathematische Formel zu geben, nach der dieses Maß der Stickstoffsättigung in Abhängigkeit von Druck und Zeit für den ganzen Körper auszudrücken wäre. Haldane verfährt nach folgender Überlegung: Das Volumen des die Lungen passierenden Blutes ist etwa gleich der Hälfte des eingeatmeten Luftvolumens. In Ruhe atmet ein Mann etwa 7 l/min Luft ein, also zirkulieren in seinem Körper rd. $3\frac{1}{2}$ l/min Blut. Wiegt der Mann 70 kg, so sind (5% davon) $3\frac{1}{2}$ kg Blut seine gesamte Blutmenge, die also in einer Minute den Kreislauf macht. Durch diese Blutmenge aber ist eine zwanzigmal größere Gewebemenge mit Gas zu sättigen. Da das Gefälle zwischen Blut und Gewebe immer geringer wird mit im Gewebe fortschreitender Sättigung, so findet die Gesamtsättigung des Körpers nach einer asymptotischen Kurve statt. Es ist hiernach in runden Zahlen anzunehmen, daß die Sättigung nach $\frac{1}{4}$ Stunde zur Hälfte, nach $\frac{1}{2}$ Stunde zu drei Viertel, nach $\frac{3}{4}$ Stunden zu sieben Achtel usw. fortgeschritten ist. Da das Blut aber nicht gleichmäßig im Körper verteilt ist, werden einige Organe reichlicher, andere mit geringerer Menge in der Zeiteinheit versorgt. So geht die Sättigung langsamer vor sich. Zellgewebe, Fett, Haut, Gelenke, weiße Nervensubstanz haben weniger Blutzufluß als die graue Substanz des zentralen Nervensystems, die Muskeln und Drüsen. Nach Erfahrungen bei Caissonarbeitern ist anzunehmen, daß selbst nach drei Stunden (nach v. Schrötter vier Stunden) noch keine vollständige Sättigung des Körpers eingetreten ist. Bornstein nimmt an, daß beispielsweise Fett sechs bis sieben Stunden zur vollen Sättigung benötigt. Nach Mauntz und Heydrich sind sieben bis zehn Stunden erforderlich. Da außerdem Fett sechsmal soviel Stickstoff aufzunehmen vermag wie Blut vom gleichen Volumen (Vernon), so ist für ersteres die doppelte Sättigungszeit anzunehmen.

b) Stickstoffkrankung

Eines der vielen in der Literatur beschriebenen Tierexperimente, die zu vorstehender Erkenntnis führten, wurde mit Ratten vorgenommen. Sie wurden bis zur vermutlichen Gassättigung unter 20 at Druck gehalten und

erhielten Gase mit 3 bis 10% Kohlensäure, 10% Sauerstoff und 80 bis 87% Stickstoff.

Greenwood und Hill stellten fest, daß zehn Minuten nach Einstellen eines bestimmten Druckes die diesem Druck entsprechende Stickstoffsättigung bereits vorhanden war.

Erst beim *Austauchen* aus größerer Tiefe oder beim Verlassen der Taucherglocke, der Druckluftarbeitsstätte, kann das im Körper in Lösung befindliche Gas die Ursache einer Taucherkrankheit werden. Bringt man die unter 20 at Druck gehaltene Ratte schnell wieder unter atmosphärischen Druck, so entstehen in ihren Organen und im Blut Gasblasen, der bisher in Lösung gewesene Stickstoff wird wieder frei, das Blut „schäumt auf“, die Ratte verendet. Holt man in der Tiefsee lebende Tiere an die Oberfläche, so „platzen“ sie.

Man hat einen Frosch mit einem Mikroskop vor dem Fenster einer Druckkammer beobachtet und sah bei plötzlichem Druckabfall deutlich in den Adern Gasblasen zirkulieren. Steigerte man den Druck wieder, so wurden die Blasen kleiner, bis sie ganz verschwanden. Wird ein Tier schnell unter verminderten Druck gebracht, so kann man sogar im Herzen das Gurgeln der Gasblasen hören. Bei größeren Tieren, die plötzlicher Dekompression ausgesetzt waren, zeigte sich, daß Gasblasen Gewebszellen der Leber und der Nieren gesprengt hatten.

Tierversuche sind nun, wie schon früher ausgeführt wurde, nicht ohne weiteres auf den Menschen anwendbar. Der Pulsschlag einer Maus beträgt z. B. 700, der des Menschen nur etwa 60 in der Minute. Bei der Maus zirkuliert das Blut also bedeutend schneller als beim Menschen, so daß diese sich von Stickstoff auch viel schneller entsättigen kann.

Im menschlichen Körper kann eine erbsengroße Gasblase, wenn sie ins Herz gelangt, schon den Tod herbeiführen. Andererseits können Gasblasen im Arteriensystem die Gefäße des Hirns und Rückenmarks verstopfen, dadurch die Sauerstoffversorgung hemmen, Lähmung und Tod herbeiführen. Große Stickstoffmengen im Knochenmark führen zu Höhlenbildung. Das Nervengewebe kann direkt durch den Druck der freiwerdenden Stickstoffblasen zerstört werden. Störungen der Blutzirkulation durch freiwerdende N_2 -Blasen führen zu Erstickungsanfällen. Seltener und meist flüchtiger Art sind Sprachstörungen, mimische Lähmungen, Augenmuskellähmung, Bewußtlosigkeit, Kopfschmerz, Schwindel, epileptische Krämpfe. Gasblasen in den Kranzgefäßen des Herzens verursachen Pulsverlangsamung (v. Schrötter), solche in den Mesenterialgefäßen (z. B. Bauchfell-) verursachen Schmerzen.

Aus den Körpersäften treten die N_2 -Blasen zuerst aus und gehen ins Blut über. Anzeichen für Gasblasenbildung sind Jucken der Haut wie unter

Brennesselberührung, verursacht durch Austritt von Gas durch die Hautporen. Sogenannte Bends, Gelenk- und Gliederschmerzen bedeuten lokale Gasentwicklung in den Gewebespalten und Höhlen, in der Synovia (Gelenkschmiere) und im Knochenmark (Vernon, Quincke).

Um diese Reihe von Übeln, die den Taucher aus Gründen des Stickstoffaustritts befallen können, zu vervollständigen, seien noch einige Symptomenkomplexe aufgeführt:

Rückenmarkslähmung, Bewegungsschwäche oder komplette Lähmung der Beine mit oder ohne Störungen der Blase, des Mastdarmes oder der Geschlechtsfunktionen. Die gelähmten Muskeln sind steif und unter Spannung, so daß der Körper zittert, wenn man ihn auf die gelähmten Beine stellt. Sehnenreflexe sind hochgradig gesteigert. Die Lähmungen schreiten aber nie vor, sie können sich nach Monaten noch zurückbilden. Man leidet unter Jucken, Kältegefühl, Empfindungslosigkeit.

Schwindel, Taubheit, Erbrechen (Menierescher Symptomenkomplex), langsamer Puls, Gehörstörung ein- oder beiderseitig, vorübergehend oder dauernd. Lunge: unmittlere Lebensgefahr. In günstigen Fällen nach drei Stunden Wiederherstellung. Brustbeklemmung, Hustenreiz, Durstgefühl. Atmung mühsam, beschleunigt. Gesicht bläulich, Haut kühl, schweißbedeckt. Bisweilen Marmorierung umschriebener, unregelmäßig begrenzter Hautflächen. Ausnahmsweise blutiger Auswurf, Bewußtlosigkeit, Lungenödem. Plötzlich eintretende Kurzatmigkeit und Bewußtlosigkeit sind zu erklären durch Auftreten von Embolie (Verstopfung von Blutgefäßen), verursacht durch kleine Gasbläschen.

Unter „Taucherschlag“ versteht man Lähmung der Füße und der Blase.

Treten erst viele Stunden nach der Dekompression Schmerzen auf, so sind mehrere kleine N₂-Blasen zu einer größeren zusammengelaufen.

„Bends“ und „screws“, eine Art rheumatischen Gliederreißen, sind vermutlich auf das Freiwerden von Stickstoff in den Zellgeweben, Gelenken und Nervenästen zurückzuführen, sie treten dann auf, wenn ein hoher Sättigungsgrad erreicht wurde.

Bends zeigen höchste Gefahr an, wenn die Druckeinwirkung nicht lang, das Dekompressionstempo aber kurz war. Mindere Bedeutung haben sie, wenn die Druckeinwirkung lang war und die Dekompression langsam vor sich ging. Mitunter entwickeln sich Gasblasen erst nach dem Austauchen bzw. Ausschleusen. $\frac{1}{4}$ bis 1 Stunde, selbst 24 Stunden später zeigen sich erst Symptome. Nur bei allerschwersten Fällen treten sie sofort nach dem Austauchen auf. Der Autor hatte der Marine in einem Druckkessel unter 5 at Überdruck ein neues Tauchergerät vorzuführen. Nach einstündigem Aufenthalt unter diesem Druck wurde das Ausschleusen in etwa 20 Minuten



bewerkstelligt. Die beiden mitgeschleusten Taucher spürten außer Hautjucken keine Symptome der körperlichen Entgasung und hatten auch später keine Nachwirkungen erlitten. Bei mir aber stellten sich $\frac{1}{2}$ Stunde später leichte Gelenkschmerzen in den Ellbogen ein, die in der darauffolgenden Nacht zu unerträglichen nadelstichartigen Schmerzen wurden und langsam abklingend etwa 14 Tage anhielten, ohne daß allerdings die Berufstätigkeit dadurch wesentlich beeinträchtigt wurde.

Unter Umständen halten sich Gasblasen im Körper des Tauchers recht lange. So fand z. B. v. *Schrötter* noch 48 Stunden nach der Ausschleusung freie Gasbläschen in den Venen, im Rückenmark noch mehrere Tage nachher. Andere Forscher fanden noch vier Tage nach der Dekompression Gasbläschen in den Gefäßen, in der Rückenmarksubstanz konnten sie noch nach 27 Tagen nachgewiesen werden.

Ein Caissonarbeiter wurde acht Stunden nach der Dekompression aus 2,3 at Überdruck tot im Bett gefunden. Das Herz war gasgefüllt, obgleich er die Arbeitsstätte anscheinend gesund verlassen hatte.

Der *arbeitende* Taucher hat eine schnellere Blutzirkulation als der ruhende, infolgedessen ist er natürlich auch schnellerer Stickstoffsättigung ausgesetzt, insbesondere sättigt sich auch die graue Substanz des zentralen Nervensystems stärker.

Eine weitere Erscheinung, die auf Einwirkung des Stickstoffes zurückgeführt werden muß, sind chronische Gelenkveränderungen bei Tauchern und Druckluftarbeitern (Dr. med. R. Herget).

c) Verhütung der Stickstoffkrankung

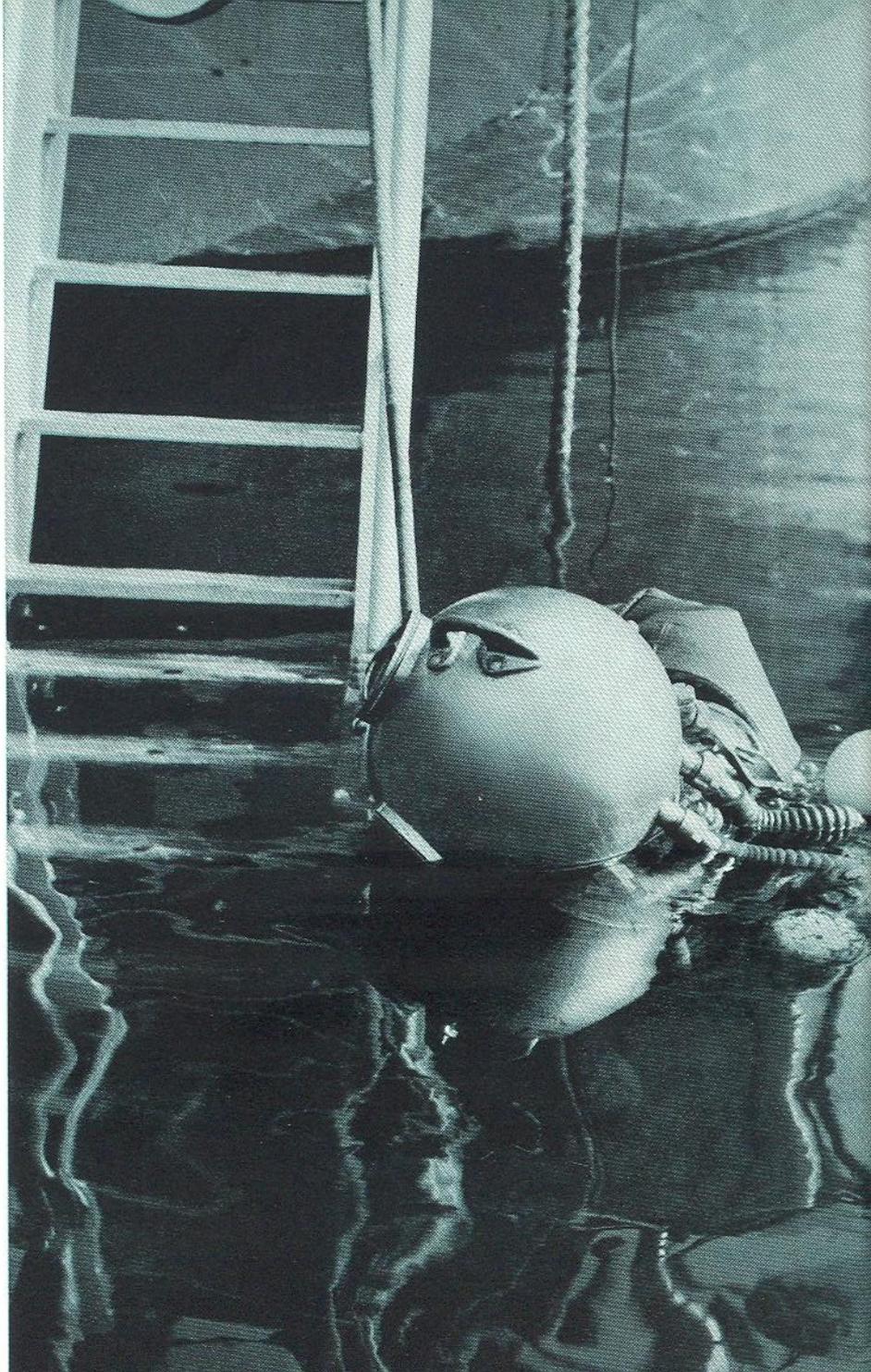
Nun gibt es aber glücklicherweise sehr einfache Mittel, diese durch Stickstoffaustritt verursachten Taucherkrankheiten zu verhüten bzw. schnell zu beseitigen. Man verhindert das Entstehen von Gasblasen, wenn man *langsam austaucht*, bzw. langsam von hohem zu Atmosphärendruck zurückgeht. Schon alte Taucherhandbücher wie die „Instruktion für Taucher“ der deutschen Marine vom Jahre 1872 empfehlen dies. Es heißt dort in dem Kapitel über „Ratschläge für Taucher“: „Ein langsames Steigen ist im allgemeinen und besonders bei großen Tiefen nicht genug zu empfehlen, weil der plötzliche Wechsel des Druckes schädlich ist. Oft ist sogar ein öfteres Anhalten beim Aufsteigen geboten. Das Außerachtlassen dieser Vorschrift kann dem Tauchenden sehr nachteilig werden und sogar sein Leben gefährden. — Der Erfinder des Apparates hält es für notwendig, daß zum Steigen für eine Höhe von ein bis zwei Meter mindestens eine Minute gebraucht wird, daß also das Steigen aus einer Tiefe von 20 Meter 10 bis 20 Minuten in Anspruch nimmt.“

Der Grund für das langsame Aufsteigen ist ohne weiteres klar. Es soll dem Stickstoff Zeit gegeben werden, aus der Lunge zu diffundieren, ohne Blasen zu bilden. Über die Wirkung des „öfteren Anhaltens beim Aufsteigen“ ist sich der Verfasser dieser Vorschrift vielleicht nicht ganz klar gewesen, aber gerade diese Art des Aufstiegs bietet große Vorteile, wie der englische Professor *Haldane* durch zahlreiche Versuche nachgewiesen hat. Den Grund hat man in der eigenartig zähen, leimartig-albuminösen Struktur des Blutes zu suchen, die es befähigt, Gase langsam aufzunehmen und insbesondere sie langsamer wieder abzugeben, als dem Diffusionsgesetz entspricht, wenn der Druck fällt, bedeutend langsamer jedenfalls als Wasser. Ein Taucher vermag z. B. aus zehn Meter Tiefe auszutauchen, indem er sich einfach hochtreiben läßt, sagen wir in wenigen Sekunden, obgleich er sich mehrere Stunden in dieser Tiefe aufgehalten hat, sein Körper also völlig mit dem einen Druck von 2,0 ata entsprechenden Stickstoffgehalt gesättigt ist. Es werden keine N_2 -Blasen frei, weil bei dem kolloidalen Charakter des Blutes und der Gewebeflüssigkeiten der Druckunterschied von 1 at, entsprechend 50% Druckabfall, dazu nicht genügt. Die Körpersäfte werden in diesem Zustande also Stickstoff in übersättigter Lösung halten.

Die 13-m-Tiefe bildet eine wichtige Grenze, weil nur bis zu dieser Tiefe für den Durchschnitt aller Taucher die übersättigte Lösung physikalisch bestehen bleibt. Zwar gibt es sicher Taucher, deren Blut sozusagen „dicker“ ist — abgesehen von anderen Einflüssen —, die also aus größeren Tiefen noch unmittelbar an die Oberfläche gehen dürfen. Im allgemeinen aber muß man 13 Meter als die Tiefengrenze bezeichnen, bis zu der ohne besondere Vorsichtsmaßregeln getaucht werden darf. Wir bezeichnen dieses darum als Tauchen in „seichtem Wasser“, das Tauchen in größerer Tiefe als 13 Meter als „Tieftauchen“.

Geht der Taucher aus mehr als 13 Meter Tiefe rasch an die Oberfläche, so läuft er Gefahr, an all den Übeln zu erkranken, die die Folge von Blasenbildung sind in den Muskeln und Gelenken, Haut und Unterhautzellgewebe, Brust- und Bauchorganen, im Nervensystem und den Sinneswerkzeugen. Diese können jedes für sich zum Sitz der Krankheitserscheinungen werden und beispielsweise zu Systemerkrankungen des Rückenmarks, akuter Geistesstörung, tromsitorischer Tobsucht usw. führen.

Verläßt man aber langsam genug die Stätte selbst sehr hohen Druckes, so läuft man keine Gefahr. Ein Taucher befand sich beispielsweise eine Stunde lang unter 5,3 atü, 53 Meter Tiefe entsprechend, und brauchte zum Ausschleusen 3 Stunden 3 Min., ohne daß sich irgendwelche üblen Folgen zeigten, obgleich die Sättigung mit Stickstoff nahezu vollständig gewesen sein muß.



Haldane empfiehlt nun, die verhaltende Eigenschaft der Körpersäfte, insbesondere des Blutes auszunutzen, und es ist sein besonderes Verdienst, hierfür zahlenmäßige Angaben gemacht zu haben, nach denen an Austauschzeit sehr gespart werden kann. Er hat Tabellen berechnet, nach denen aus verschiedenen Tiefen in möglichst kurzen Zeiten ausgetaucht werden darf. In der US-Marine wird eine ähnliche Austausch-tabelle verwendet, die erweitert wurde bis zu Tauchtiefen von 90 m. Die Austauschzeiten sind kürzer als die von Haldane empfohlenen. Die Tabelle gibt außerdem für jede Tiefe die günstigste Aufenthaltszeit am Grunde an, innerhalb der gebräuchliche Taucherarbeit geleistet werden kann. Das Überschreiten dieser Tauchzeit darf nur in Ausnahmefällen erfolgen. Es wurde schon gesagt, daß das Austauschen aus 13 Meter, 56% Druckabfall entsprechend, ungefährlich sei, da dann noch keine Bläschenbildung stattfindet, sondern der Stickstoff durch die Lunge ohne weiteres entweicht. Diese rund 50% raschen Druckabfalls gelten nun aber für jede Tiefe als zulässig, also beispielsweise auch für 50 Meter auf 20 Meter (6 ata auf 3 ata) oder für 100 Meter auf 45 Meter (11 ata auf 5,5 ata). Das Blut würde auch in diesen Fällen keine Neigung zur Blasenbildung zeigen. Haldane mißt aber der Bildung kleiner und weniger Bläschen im Blut keine Bedeutung bei und hält es für zweckmäßiger, den Druck auf etwas mehr als 50% jeweils zu ermäßigen, um die Spannungsdifferenz zwischen Blutstickstoff und Lungenluft recht hoch zu halten, wodurch die Stickstoffabgabe natürlich beschleunigt wird. Er schreibt beispielsweise ein Austauschen aus 50 Meter sofort auf 15 Meter vor, entsprechend einem Druckabfall von 6 auf 2,5 ata, also um 58%. Die Aufstiegsgeschwindigkeit soll dabei etwa 0,3 m/sec betragen, da der Körper bei langsamerem Aufstieg noch Stickstoff aufnehmen könnte, insbesondere, wenn man sich nur kurze Zeit unter hohem Druck befunden hat, so daß noch keine bedeutende Sättigung eingetreten war.

Ist der Taucher von 50 Meter zur 15-Meter-Tiefe emporgekommen; so soll er hier eine kurze Pause von fünf Minuten machen, damit ein großer Teil des gelösten Stickstoffs entweicht. Dann steigt er zur 10-Meter-Tiefe herauf — er darf nun nicht schon wieder einen 58%igen Druckabfall vornehmen, da viele Körperteile noch sehr wenig entsättigt wurden — und macht hier eine Pause von zehn Minuten. Jetzt geht er auf 6 Meter Tiefe und macht hier wieder eine Aufstiegs-pause von etwa fünfzehn Minuten Dauer. Die längste Pause soll er dicht unter der Oberfläche (3 Meter) einschalten, da hier die größte Gefahr besteht. So etwa verläuft Haldanes „stage decompression“, die natürlich auch auf Druckluft-arbeiter anwendbar ist, wenn man an Stelle der Tiefen die zugehörigen Drucke in atü setzt. Niemals soll dabei die relative Gasdruckdifferenz zwischen Luft und irgendeinem Teil der Gewebe die als sicher erkannte Grenze von 50 bis 60% überschreiten. Die Zeitersparnis gegenüber gleichmäßigem Austauschen mit z. B. 1 m/min ergibt, daß dann 50 Minuten ge-

braucht werden müßten gegenüber 35 Minuten bei Haldane, wobei in solchem Fall aber der Taucher durchaus nicht vor üblen Folgen geschützt wäre.

Haldane hat wegen der ungleichmäßigen Blutverteilung im Körper die Austauschzeiten viermal größer angenommen, als sie sich für die Annahme gleichförmiger Blutverteilung im Körper berechnen würden.

Tierversuche ergaben die Ungefährlichkeit eines raschen Druckabfalles von 70%, während erst bei 78% schneller Dekompression gefährliche Krankheitserscheinungen auftraten. Tiere können also auch in dieser Beziehung mehr vertragen als der Mensch.

Eine Dekompression aus 6,4 ata in 22 Minuten hatte nur geringe Bends zur Folge.

Die Bildung kleiner und weniger Gasblasen läßt Haldane zu, infolgedessen treten erfahrungsgemäß beim Austauschen nach seinen Tabellen auch leichte Erkrankungen ein, die zwar niemals lebensgefährlich werden, wohl aber, wie der Autor am eigenen Leibe erfuhr, recht unangenehme Zustände bereiten können. Insbesondere gilt dies von größeren Tiefen als in Haldanes Tabellen aufgeführt sind.

Der *arbeitende* Körper sättigt sich schneller mit Stickstoff als der ruhende, und deshalb soll auch der austauchende Taucher während des Aufstiegs zur ersten Etappe nicht arbeiten, er soll möglichst mühelos hochschweben, weil er sonst noch N₂ aufnehmen könnte. Erst in den letzten Aufstiegsstufen ist leichte Arbeit, wie Arm- und Beinbewegung, *tiefe Atemholen*, angebracht, um Stickstoffausscheidung zu beschleunigen. Die Haldaneschen Austauschzeiten sollen sogar um ein Drittel verlängert werden, wenn keine gymnastischen Übungen gemacht werden. Anstrengende Arbeit, abrupte Bewegungen aber sollten durchaus vermieden werden, um Erschütterungen zu vermeiden, die Bläschenbildung begünstigen, indem sie das labile Gleichgewicht der übersättigten Blut-Stickstofflösung stören. *Quincke* definiert eine Gasblase im stickstoffübersättigten Blut als Fremdkörper, der in erhöhtem Maße Anlaß zur Gasabscheidung gibt. Bläschenbildung sollte demnach — im Gegensatz zu Haldane — überhaupt vermieden werden, da die Ausscheidung des N₂ viel langsamer erfolgt, wenn erst eine Blase entstanden ist.

Aus Anlaß der verschieden schnellen N₂-Aufnahme der Körperteile, z. B. des *Fettes*, können korpulente Taucher leichter auf kurze Zeit in großen Tiefen tauchen als magere. Bei länger dauerndem Tauchen aber wird es umgekehrt, da Fette wohl langsamer gesättigt werden, aber auch den N₂ bedeutend langsamer wieder abgeben als andere Körperteile.

Schon von alten Physiologen wurde *Sauerstoffatmung* während des Austauschens empfohlen, weil in der Lunge ein Gas anderer Art als das in Lösung befindliche das Diffusionsgefälle sehr vermehrt. Wenn der Lunge des Tauchers anstatt Luft mit nur 21% Sauerstoff, solcher von 100% zu-

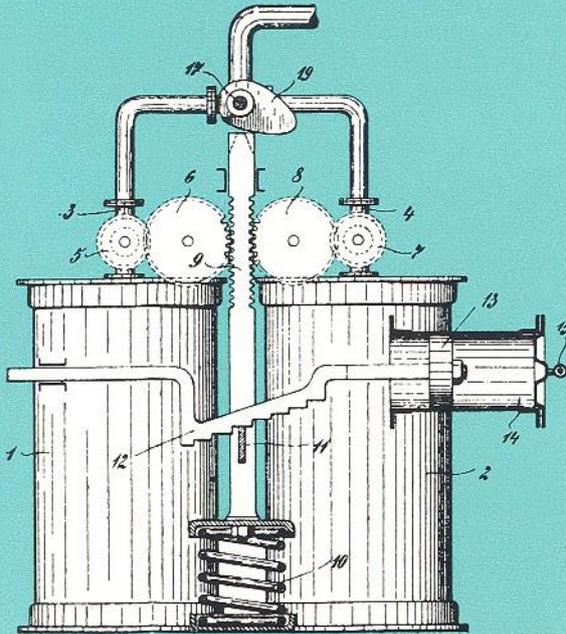


Abb. 5 Methan-Austauschgerät von v. Schrötter, 1909

geführt werden kann, so ist das Gefälle fast fünfmal größer. Wie bereits erwähnt, dürfte man reinen Sauerstoff aber nur in etwa 10 bis 20 Meter Tiefe geben, je nach der Dauer. Bei Sauerstoffatmung während des Aufstiegs können die letzten Haldaneschen Dekompressionsstufen von 12 bis 9 Meter ab um die Hälfte vermindert werden. Von v. Schrötter wurde *Methan* oder *Wasserstoff* vorgeschlagen als Ersatz für den Stickstoff der Atemluft während des Austauschens. Das Diffusionsgefälle würde größer sein als bei Verwendung von Sauerstoff, und man dürfte Wasserstoff-Sauerstoff in jeder Tiefe, also schon bei Beginn des Aufstiegs aus großer Tiefe benutzen. Die große Explosionsgefahr dieses Knallgasgemisches aber machte wohl eine Benutzung des genial erdachten Apparates unratsam (Abb. 5).

Da heute der Taucher mit elektrischem Telefon und elektrischen Lampen hoher Leistung arbeiten muß, ist die Bildung eines Funkens, der zur Ex-

plosion Anlaß geben könnte, nicht ausgeschlossen. *Helium* als Ersatz des Wasserstoffs, zuerst von Professor *Gärtner* 1919 vorgeschlagen, würde fast dieselben guten Dienste leisten, wenn es nicht, außer in den Vereinigten Staaten von Amerika, zu teuer wäre. Die Entwicklung drängt jedenfalls dahin, unter allen Umständen ein Mittel zu schnellerem Austauschen zu finden. Andere Vorschläge für zweckmäßiges Austauschen stammen von *Bornstein*. Er schlägt vor, nur die erste Hälfte des Überdruckes schnell abzulassen, den Restdruck aber langsam und gleichmäßig. *Silberstein* empfiehlt, $\frac{3}{4}$ Minute für jeden Meter bis zur ersten Hälfte der Wassertiefe und 3 Minuten für jeden weiteren Meter Aufstieg anzusetzen. Diese Vorschriften mögen für einige besondere Tiefen zutreffend sein, jedenfalls aber nicht für alle, dazu sind die Regeln sozusagen zu grob.

Wir können das richtige Austauschtempo als das vorbeugende Mittel zur Verhütung von Taucherkrankheiten bezeichnen. Ist der Taucher durch Stromdruck oder aus Unvorsichtigkeit zu schnell an die Oberfläche gekommen, so ist das einfachste Mittel, ihn zu schützen oder vor dem Tode zu bewahren, ihn wieder hinabzulassen bis etwa zur Hälfte des verlassenen absoluten Druckes (entsprechend etwa einem Drittel der verlassenen Tiefe) und seinen Aufstieg dann nach den Regeln der Austauschabelle vorzunehmen. Hat man ihn vorsätzlich zu schnell hochkommen lassen oder mußte man ihn wegen aufkommenden Sturmes oder aus sonstigen Ursachen zu rasch hochholen, so gibt es ein anderes Mittel: man bringt ihn so schnell wie möglich in eine *Taucher-Druckkammer* (Abb. 6 u. 7) und komprimiert die Luft darin in entsprechendem Grade. Der Zweck dieser Behandlung dürfte ohne weiteres klar sein: Die vielleicht schon freigewordenen Stickstoffbläschen werden verkleinert und teilweise wohl gänzlich wieder von den Körpersäften gelöst, womit die Ursache plötzlicher Erkrankung beseitigt ist.

Eine *Rekompression* in der Taucherdruckkammer ist besonders angebracht, wenn die an sich wenig schädlichen kleinen Bläschen Zeit hatten, sich zu größeren Blasen zusammenzufinden und die Blutzirkulation zu hemmen. Das Bein, der Arm „schläft“. Durch Verkleinern der N_2 -Blasen kommt die Blutzirkulation wieder in Gang. Diese größeren Blasen auf ein gewünschtes Maß zu verkleinern, wird natürlich mehr Druck kosten, als wenn nur ganz kleine Blasen, wenn auch in größerer Anzahl, vorhanden gewesen wären. Rechnet man beispielsweise Blasen von 0,1 mm Durchmesser zu den unschädlichen und solche vom doppelten Durchmesser, also 0,2 mm, zu den schädlichen, so hätten letztere bereits das achtfache Volumen der ersteren, und es bedürfte eines achtfach größeren absoluten Druckes, um sie auf das Maß der unschädlichen kleinen Blasen zurückzuführen.

Bei der Rekompression in der Taucherdruckkammer soll nur in den seltensten Fällen der alte Druck wieder erreicht werden. Gewöhnlich nur die Hälfte

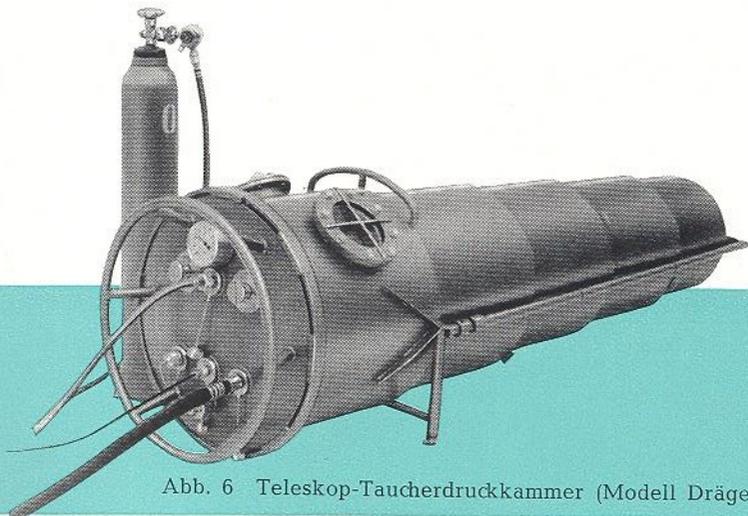


Abb. 6 Teleskop-Taucherdruckkammer (Modell Dräger)

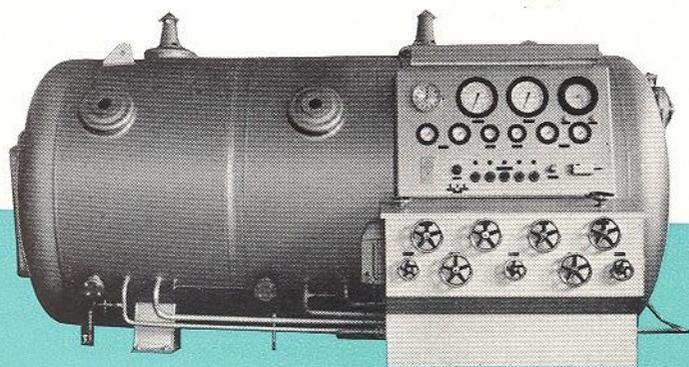


Abb. 7 Stationäre Taucherdruckkammer (Modell Dräger, stark verkleinert)

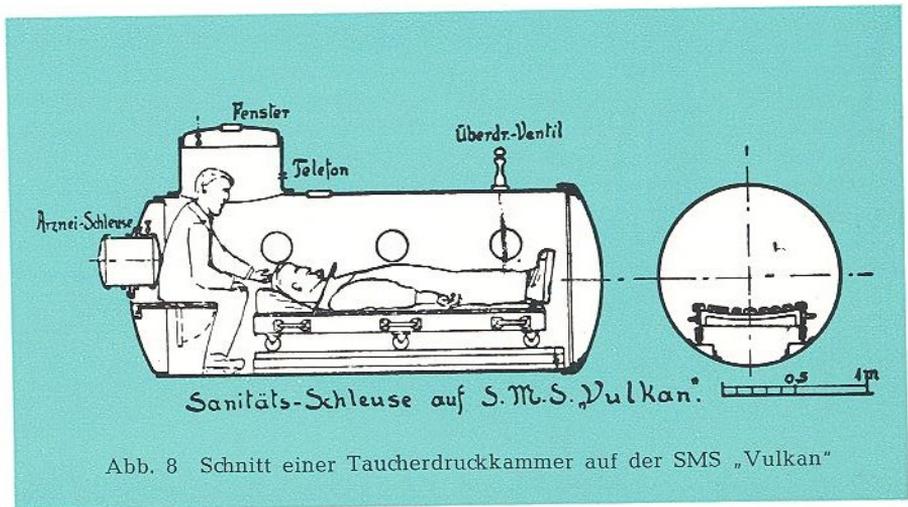


Abb. 8 Schnitt einer Taucherdruckkammer auf der SMS „Vulkan“

dessen oder weniger, wenn sich der Taucher dann wohl fühlt. Der höchste Druck soll nicht länger als eine Stunde konstant erhalten bleiben. Die Druckverminderung soll etwa *dreimal so langsam* als sonst nach den Regeln für das Austauchen vor sich gehen.

Beispielsweise ging bei Rekompensation Blindheit (Embol. art. centr. retinae) in fünf Minuten, Sprachlähmung in zehn Minuten zurück. Halsseitenlähmung nach drei bis fünf Stunden, Kribbeln in den Beinen ging ohne Rekompensation zurück.

Trotz schwerer Symptome — vollständige motorische Lähmung beider Beine, sehr geringe Empfindung, aber keine Krämpfe und Schmerzen, kein Brechreiz, nicht anormaler Puls — trat nach einer Stunde unter 2,18 ata in der Taucherdruckkammer vollständige Heilung ein. Der Arbeiter hatte unter nur 2,39 atü gearbeitet.

Es soll mit der Wiedereinschleusung unter Druck nicht gezögert werden, da bei zu später Rekompensation mitunter bleibende Störungen eintreten wie Taubheit, spastischer Gang, Sensibilitätsstörung. Bei Fehlen einer Druckkammer sollte der Taucher den Helm noch zehn Minuten aufbehalten, den Anzug noch 20 Minuten tragen, um gegebenenfalls sofort wieder auf 10 bis 20 Meter hinabgehen zu können.

Mitunter stellen sich Symptome der Stickstoffvergiftung erst viele Stunden nach Verlassen der Druckluft ein, weshalb Druckluftarbeiter stets in der Nähe der Sanitätsschleuse wohnen sollten. Je später aber rekomprimiert wird, um so höher muß dann der Druck sein.

Bei schweren Fällen soll wiederholt die Taucherdruckkammer aufgesucht werden.

Trotz der Rekompensation kann eine Heilung ausbleiben, wenn die Sauerstoffzufuhr zu Teilen des Zentral-Nervensystems längere Zeit unterbrochen war durch Unterbindung der Blutzufuhr durch N_2 -Blasen.

Auch in der Taucherdruckkammer ist *Sauerstoffatmung von Nutzen*. Das Hämoglobin wird stärker mit O_2 gesättigt, die durch Zirkulationsstörung an O_2 verarmten Partien werden schneller wieder aufgefrischt, und es tritt auch O_2 gelöst ins Blut, den N_2 mechanisch verdrängend (Daltons Gesetz). Durch O_2 -Inhalation wird jedoch nicht die Entbindung von Stickstoff bewirkt, der sich in Blasenform im Körper befindet. Auch ohne erhöhten Druck, also unter bloßem Atmosphärendruck übt Sauerstoff die geschilderte Wirkung aus.

Bei Atemstillstand soll der Arzt auch in der Taucherdruckkammer *künstliche Atmung* anwenden, Herzmassage im Rhythmus des Herzschlages.

Treten nur Gliederschmerzen auf (bends, screws, moutons) — sie sind Anzeichen größerer Gefahr nur, wenn sie nach kurzem Aufenthalt in geringer Tiefe auftreten —, so genügt palliative Behandlung wie örtliche Reibungen, heiße oder einen Gegenreiz ausübende Applikationen oder subkutane Einspritzungen einer geringen Dosis Morphium. Sicherer und bedeutend angenehmer ist aber doch sofortige Benutzung der Taucherdruckkammer, da derartige Schmerzen tage- bis wochenlang anhalten können. Werden sie nicht rechtzeitig behandelt, so können chronische Gelenkaffektionen zurückbleiben. Morphiuminjektionen, Bäder von 37 bis 40 °C, trockene Wärme, antineuralgische Medikamente, Massage, aktive und passive Bewegung sind angebrachte Gegenmittel.

Manchmal kann die rechte Herzkammer punktiert und durch feinen Trocar mit der Saugflasche die Luft abgesaugt werden. Ein verzweifeltes Mittel, das aber wohl lebensrettend sein kann.

Man könnte der Meinung sein, daß durch langjährige Übung vielleicht eine gewisse Immunität gegen Stickstoffvergiftung erlangt wird. Das ist nicht der Fall, wohl aber stellt sich bei Tauchern und Caissonarbeitern mit der Zeit eine gewisse Gewöhnung ein, so daß geübte Taucher weniger leicht erkranken und schnelleren Druckabfall vertragen als ungeübte. Jedoch ist die Neigung zu solchen Erkrankungen auch individuell recht verschieden.

Vergleicht man das Verhalten des Körpers eines „Gelegenheitstauchers“ mit dem eines Berufstauchers, so treten die Unterschiede klar hervor. Bei den auf Seite 32f beschriebenen Versuchen hatte der nur gelegentlich tauchende Autor sehr zu leiden, während bei den Berufstauchern nur Hautjucken oder andere leichte Erscheinungen auftraten. Was aber ein geübter Taucher

zu leisten vermag, sei an folgendem Beispiel erläutert: Der Taucher A. Briggs der Firma Siebe, Gorman & Co. tauchte bei der Bergung nach gemünztem Gold zwölfmal nacheinander in 50 Meter Tiefe und brachte jedesmal etwa 15 Minuten in dem Wrack zu. Er brauchte zehn Minuten für den Abstieg und zwölf Minuten zum Austauchen, ohne daß sich Anzeichen einer Stickstoffvergiftung zeigten.

Aus dem ausgezeichneten Buch von *Gerbis* und *König* (1939): „*Druckluft-erkrankungen* (Caissonkrankheit)“ zitiere ich einige für den Taucher wichtige Sätze:

„Die Heilung in der Krankenschleuse wird um so unsicherer, je mehr Zeit zwischen Ausbruch der Erkrankung und Wiedereinschleusung in die Krankenkammer verstrichen ist.

Bei Kranken, die nur leichte Gelenk- und Muskelschmerzen hatten, verzichtete ich auf eine Wiedereinschleusung, ließ sie zwei Tabletten Novalgin in der Dosis von 0,5 auf einmal nehmen und erzielte damit eine schnelle Linderung der Schmerzen. Gleichzeitig veranlaßte ich die Betroffenen, im Aufenthaltsraum und an heißen Tagen auch im Freien herumzulaufen. Überaus angenehm empfanden die Kranken die Wärmebehandlung in Form von Einreibungen mit einem Medikament, ebenso die Anwendung von Streich- und Kunstmassagen. Manche hielten ihre schmerzenden Glieder ganz dicht an den Ofen des Aufenthaltsraumes.

Wenn der Vasalvasche Versuch nicht zum Ziel führt, muß versucht werden, durch Katheterismus der Ohrtrompete jenen Druckausgleich herbeizuführen, der das Trommelfell wieder frei macht und einen weiteren Druckanstieg ermöglicht. Für einen solchen Eingriff sollten die nötigen Instrumente an der Baustelle vorhanden sein.

Bei starkem Hautjucken werden feuchtwarme Einpackungen zum Schweißausbruch führen, der rasch Erleichterung bringt. Gegen Gelenk- und Muskelschmerzen bewähren sich Einreibungen und örtliche Wärmeanwendung neben schonender Massage. Oftmals können anti-neuralgische Medikamente hinreichen, um neben den anderen Maßnahmen die Schmerzen zu mildern oder zu beheben.

Bei kariösen Zähnen treten sowohl beim Ein- als auch beim Ausschleusen bisweilen sehr heftige Schmerzen auf. Leichte Körperprellungen durch Gegenstoßen werden unter Druckluft viel schmerzlicher empfunden als bei normalem Druck.“

Nicht berührt ist die Frage nach der Geschwindigkeit der Stickstoffaufnahme in Abhängigkeit von der mehr oder minder großen Arbeitsleistung des Druckluftarbeiters. In Anbetracht der immer verhältnismäßig langen Aufent-

haltsdauer unter Druck ist diese Frage wohl von geringerer Bedeutung, da immer eine hohe N₂-Sättigung vorliegen wird. Dieser Zustand rechtfertigt dann auch z. T. die Forderung der Verordnung für Arbeiten in Druckluft, daß in Krankenkammern mindestens immer der Arbeitsdruck wieder erreicht werden soll. Haldane wünscht die Behandlung des Tauchers nur in *seltener* Fällen bei dem Druck der verlassenen Tiefe.

d) Dekompressionsvorschriften und Austauschzeiten

Normales Austauschen, Dekompression unter Wasser

Unter normalen Arbeits- und Wetterverhältnissen steigt der Taucher an der Grundleine hinab und nach Beendigung der Taucherarbeit an dieser wieder nach oben. Dabei müssen die in der Austauschtable angegebene Haltezeiten in den betreffenden Haltestufen eingehalten werden. Die Haltezeiten sind so bemessen, daß ernste Erkrankungen nicht zu erwarten sind. Wohl aber muß mit geringen Gelenkschmerzen oder dgl. gerechnet werden.

Die *Haldaneschen* Vorschriften werden vielfach verwendet oder bilden die Grundlage von Austauschvorschriften. In manchen Ländern haben sie eine gewisse Abwandlung erfahren.

In einer Anzahl von Ländern, z. B. USA, Norwegen und Schweden, verwendet man die amerikanische „Navy Standard Decompression Table“ (Using Compressed Air).

Die Tabelle beginnt bei 12 m Wassertiefe und reicht bis 90 m Wassertiefe. Die Werte sind genauer als die der „Haldane-Tabelle“, weil die Tiefe und die Tauchzeit präzise und nicht als Bereich angegeben sind. Sie zeigt im allgemeinen geringere Austauschzeiten als die letztgenannte.

In der Bundesrepublik wird eine Tauchertabelle verwendet, deren Werte auf den oben genannten Tabellen basieren, jedoch geringe Abwandlungen erfahren haben (siehe Seite 46).

AUSTAUCHTABELLE FÜR DAS TAUCHEN MIT PRESSLUFT

Tauchtiefe (Meter)	Tauchzeit (Minuten)	Haltezeiten in Minuten während des Austauchens in			Gesamtzeit f. d. Aufstieg (Minuten)
		9 m	6 m	3 m	
0 - 10	Keine Beschränkung				1
10 - 12	bis 135				1
	135 - 165			4	5
	165 - 195			9	10
	195 - 225			14	15
	225 - 255			19	20
	255 - 330			24	25
	330 - 390			29	30
	390 - 11 Std.			34	35
	üb. 11 Std.			39	40
12 - 15	bis 85				1
	85 - 105			4	5
	105 - 120			9	10
	120 - 135			14	15
	135 - 145			19	20
	145 - 160			24	25
	160 - 170		4	25	30
	170 - 190		4	30	35
	190 - 240		9	40	50
	240 - 360		29	40	70
	360 - 450		34	40	75
	über 450		34	45	80

Tauchtiefe (Meter)	Tauchzeit (Minuten)	Haltezeiten in Minuten während des Austauchens in			Gesamtzeit f. d. Aufstieg (Minuten)
		9 m	6 m	3 m	
15-18	bis 60				1
	60 - 70			4	5
	70 - 80		4	5	10
	80 - 90		4	10	15
	90 - 100		4	15	20
	100 - 110		4	20	25
	110 - 120		4	25	30
	120 - 130		4	30	35
	130 - 140		9	30	40
	140 - 150		9	40	50
	150 - 160		14	40	55
	160 - 180		19	40	60
	170 - 200	4	30	40	75
	200 - 255	9	35	45	90
	255 - 325	19	40	45	105
	325 - 495	34	40	45	120
	über 495	34	40	50	125

18-21	bis 40				2
	40 - 55			4	5
	55 - 60		4	5	10
	60 - 70		4	10	15
	70 - 75		4	15	20
	75 - 85		4	20	25
	85 - 90		4	25	30
	90 - 95	4	5	25	35
	95 - 105	4	5	35	45
	105 - 120	4	10	40	55
	120 - 135	4	20	45	70
	135 - 150	4	30	45	80
	150 - 165	9	30	50	90
	165 - 180	14	35	50	100
	180 - 210	24	40	50	115
	210 - 240	4	30	40	125

Tauchtiefe (Meter)	Tauchzeit (Minuten)	Haltezeiten in Minuten während des Austauchens in			Gesamtzeit f. d. Aufstieg (Minuten)
		9 m	6 m	3 m	
21—24	bis 30				2
	30 - 40				5
	40 - 50				10
	50 - 55			4	15
	55 - 60			4	20
	60 - 70			4	25
	70 - 75			4	30
	75 - 80			4	40
	80 - 90			4	50
	90 - 105			4	65
	105 - 120		4	5	85
	120 - 140		4	10	100
	140 - 160		9	30	130

24 - 27	bis 25				2
	25 - 30				5
	30 - 40				10
	40 - 45				15
	45 - 50				20
	50 - 55				25
	55 - 60			4	30
	60 - 65			4	35
	65 - 70			4	45
	70 - 75			4	50
	75 - 80			4	60
	80 - 90			4	70
	90 - 100			4	80
	100 - 110		4	15	95
	110 - 120		4	20	110
	120 - 135		4	5	125
	135 - 150		4	10	140

Tauchtiefe (Meter)	Tauchzeit (Meter)	Haltezeiten in Minuten während des Austauchens in			Gesamtzeit f. d. Aufstieg (Minuten)
		9 m	6 m	3 m	
27-30	bis 20				2
	20-25				5
	25-30			3	10
	30-35			3	15
	35-40			3	20
	40-45			3	25
	45-50			3	30
	50-55			3	35
	55-60			3	45
	60-70			3	60
	70-75			4	70
	75-80			4	80
	80-90			4	95
	90-105			4	115
	105-120		4	10	135

30-33	bis 17				2
	17-20				5
	20-25			3	10
	25-30			3	15
	30-35			3	20
	35-40			3	25
	40-45			3	30
	45-50			3	40
	50-55			3	50
	55-60			3	60
	60-65			3	70
	65-70			3	80
	70-75			3	90
	75-80			3	100
	80-90		4	5	115
	90-100		4	10	130
	100-110		4	20	150
110-120		4	5	170	

Tauchtiefe (Meter)	Tauchzeit (Minuten)	Haltezeiten in Minuten während des Austauchens in						Gesamtzeit f. d. Aufstieg (Minuten)	
						9 m	6 m		3 m
33-36	bis 14								2
	14-20								5
	20-25							3	10
	25-30							3	15
	30-35							3	20
	35-40						3	5	25
	40-45						3	10	25
	45-50						3	15	30
	50-55					3	5	20	35
	55-60					3	10	25	40
	60-70					3	20	30	45
	70-75				3	5	20	35	45
	75-80				3	10	25	35	45
	80-90				3	15	30	40	50
	90-100		4	5	20	35	45	50	160
	100-110		4	15	25	40	45	50	180
	110-120		4	20	35	40	45	50	195
36-39	bis 11								3
	11-15								5
	15-20							3	10
	20-25							3	15
	25-30							3	20
	30-35						3	5	20
	35-40						3	10	25
	40-45					3	5	15	30
	45-50					3	5	20	35
	50-55					3	10	25	40
	55-60					3	15	30	45
	60-70				3	10	20	30	50
	70-75				3	15	25	40	50
	75-80				3	20	30	45	50
	80-90			3	5	25	40	45	50
	90-100		3	5	15	30	40	45	50
	100-110		3	10	25	30	45	45	50
110-120		3	15	30	40	45	45	50	

Tauchtiefe (Meter)	Tauchzeit (Minuten)	Haltezeiten in Minuten während des Austauchens in						Gesamtzeit f. d. Aufstieg (Minuten)	
						9 m	6 m		3 m
39 - 42	bis 9								3
	9 - 10							2	5
	10 - 15						3	5	10
	15 - 20						3	10	15
	20 - 25						3	15	20
	25 - 30					3	5	20	30
	30 - 35					3	10	25	40
	35 - 40				3	5	15	30	55
	40 - 45				3	10	15	35	65
	45 - 50				3	15	20	40	80
	50 - 55			3	5	15	25	45	95
	55 - 60			3	5	20	35	45	110
	60 - 65			3	10	25	40	45	125
	65 - 70			3	15	30	40	50	140
	70 - 75			3	5	20	30	45	155
	75 - 80			3	10	20	35	45	165
	80 - 85			3	15	25	40	45	180
	85 - 95	3	5	20	35	40	45	50	200
	95 - 105	3	15	25	35	45	45	50	220
	105 - 115	3	20	35	40	45	45	50	240
42 - 45	bis 8								3
	8 - 10							2	5
	10 - 15						2	5	10
	15 - 20						2	15	20
	20 - 25					3	5	20	30
	25 - 30					3	10	25	40
	30 - 35				3	5	10	30	50
	35 - 40				3	10	15	35	65
	40 - 45				3	15	20	40	80
	45 - 50			3	5	15	25	45	95
	50 - 55			3	10	20	30	50	115
	55 - 60			3	15	25	35	50	130
	60 - 65		3	5	15	30	40	50	145
	65 - 70		3	10	20	30	45	50	160
	70 - 75		3	15	25	35	45	50	175
75 - 80	3	5	20	30	40	45	50	195	
80 - 85	3	10	25	35	40	45	50	210	
85 - 90	3	15	30	40	45	45	50	230	

Tauchtiefe (Meter)	Tauchzeit (Minuten)	Haltezeiten in Minuten während des Austauchens in						Gesamtzeit f. d. Aufstieg (Minuten)		
						9 m	6 m		3 m	
45 - 48	bis 10						2	5	10	
	10 - 15						2	10	15	
	15 - 20					2	5	15	25	
	20 - 25					2	10	20	35	
	25 - 30					3	5	10	25	45
	30 - 35					3	10	15	30	60
	35 - 40					3	10	20	40	75
	40 - 45			3	5	15	25	45	95	
	45 - 50			3	10	20	30	45	110	
	50 - 55			3	15	25	40	45	130	
	55 - 60		3	5	20	25	40	50	145	
	60 - 65		3	10	20	35	45	50	165	
	65 - 70		3	15	25	40	45	50	180	
	70 - 75	3	5	20	30	40	45	50	195	
	75 - 80	3	10	25	35	40	45	50	210	
	80 - 85	3	15	30	40	45	45	50	230	
48 - 51	bis 10						2	5	10	
	10 - 15						2	10	15	
	15 - 20					2	5	15	25	
	20 - 25					2	10	25	40	
	25 - 30					2	5	15	30	55
	30 - 35					2	10	20	35	70
	35 - 40				3	5	15	25	35	85
	40 - 45			3	10	20	30	40	105	
	45 - 50		3	5	10	25	35	45	125	
	50 - 55		3	5	15	30	40	50	145	
	55 - 60		3	10	20	35	45	50	165	
	60 - 65	3	5	15	25	35	45	50	180	
	65 - 70	3	10	15	30	40	45	50	195	
70 - 75	3	15	20	35	45	45	50	215		
75 - 80	3	5	20	25	40	45	50	235		

Tauchtiefe (Meter)	Tauchzeit (Minuten)	Haltezeiten in Minuten während des Austauchens in						Gesamtzeit f. d. Aufstieg (Minuten)
						9 m	6 m	

51 - 54	bis 10						2	5	10
	10 - 15						2	5	10
	15 - 20						2	10	15
	20 - 25					2	5	10	25
	25 - 30					2	10	15	35
	30 - 35				2	5	15	20	40
	35 - 40				2	10	20	25	45
	40 - 45			3	5	10	25	35	45
	45 - 50			3	5	15	30	40	50
	50 - 55			3	10	20	35	45	50
	55 - 60		3	5	15	25	40	45	50
	60 - 65		3	10	20	30	40	45	50
	65 - 70		3	15	25	35	45	45	50
	70 - 75		3	5	20	30	40	45	50

54 - 57	bis 10						2	5	10
	10 - 15						2	5	15
	15 - 20						2	10	20
	20 - 25					2	5	15	25
	25 - 30				2	5	10	20	35
	30 - 35				2	5	15	30	45
	35 - 40			2	5	10	20	35	45
	40 - 45			2	5	15	25	40	50
	45 - 50			2	10	20	30	45	50
	50 - 55		3	5	15	25	35	45	50
	55 - 60		3	10	20	30	40	45	50
	60 - 65		3	5	10	25	35	45	50
	65 - 70		3	10	15	30	40	45	50

Tauchtiefe (Meter)	Tauchzeit (Minuten)	Haltezeiten in Minuten während des Austauschens in						Gesamtzeit f. d. Aufstieg (Minuten)	
					9 m	6 m	3 m		
57-61	bis 10						2	10	15
	10-15						2	5	15
	15-20				2	5	10	20	40
	20-25				2	10	15	30	60
	25-30			2	5	15	20	40	85
	30-35			2	10	20	30	45	110
	35-40			2	5	15	25	40	135
	40-45			2	10	20	30	45	160
	45-50		2	5	15	25	35	45	180
	50-55		2	10	20	30	40	45	200
	55-60	3	5	10	25	35	45	45	220
	60-65	3	10	15	30	40	45	45	240

- Die grünen Zahlen sollen beim Tauchen im Normalfall nie erreicht werden. Sie sind nur aufgeführt, weil im Notfall (z. B. bei Verschüttung bzw. Verklemmung des Tauchers, Verhaken von Schlauch und/oder Signalleine) derartige übermäßige lange Tauchzeiten auftreten können.
- Beim Tauchen sollte die durch den waagerechten 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).
- 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 min. 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. auskommt.

- 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,

5. 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 Austausch erfolgt nach der Austauschtablette (siehe 7). Die Tabellen gelten für mittlere Arbeit. Ist schwerere körperliche Arbeit geleistet, sind die nächst höheren Austauschzeiten zu wählen.
6. Während des Austauschs sollen keinerlei gymnastische Übungen gemacht werden.
7. Bereits erkrankte Taucher werden nach einer besonderen Behandlungstabelle (siehe Seite 55ff) in einer Taucherdruckkammer unter Druck gesetzt und dann dekomprimiert.

In der *dänischen Marine* ist eine *Austausch- und Dekompressionstabelle* in Gebrauch, die nach einmaliger Einstellung keinen Irrtum mehr zuläßt, weil alle nicht interessierenden Zahlen verdeckt sind (Abb. 9).

Auf Tabelle 1 (Austauschtablette) ist z. B. eingestellt: Tauchtiefe, Aufenthalt unter Wasser, Aufenthalt in 6 und 3 m, Tauchzeit, minutliche Anzahl der Pumpenumdrehungen und Anzahl der gleichzeitig verwendeten Pumpen. In Tabelle 2 ist ähnliches zu ersehen für den Fall, daß die Benutzung einer Druckkammer erforderlich ist.

Gerbis und *König* beziehen sich in ihrem Erfahrungsbericht „Drucklufterkrankungen“ auf § 23,2 der Verordnung für Arbeiten in Druckluft.

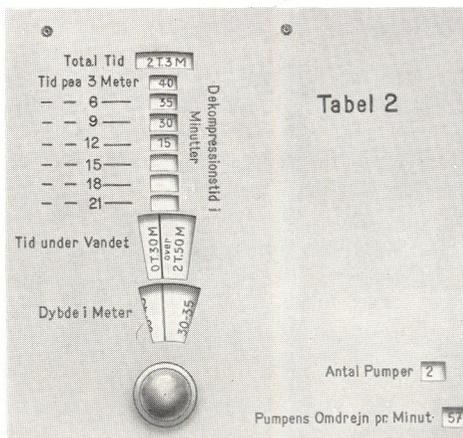
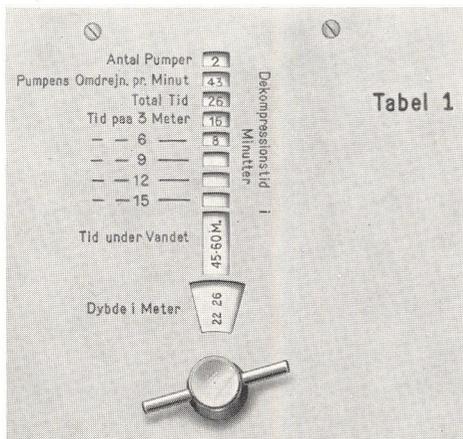


Abb. 9 Verstellbare dänische Dekompressionsskala

Die „Verordnung für Arbeiten in Druckluft“ vom 29. 5. 1935 bezieht sich zwar nicht auf den Anzugtaucher im Wasser, wohl aber auf den Aufenthalt in Taucherglocken und Krankenkammern. Wir bringen darum hier einige auch den Taucher interessierende Angaben daraus.

§ 1. Als Arbeiten in Druckluft gelten Arbeiten, bei denen eine oder mehrere Personen in Räumen (z. B. Senkkästen, Schächten, Tunnels, Taucherglocken) beschäftigt werden, in denen der innere Luftdruck den äußeren Luftdruck um mindestens $0,1 \text{ kg/cm}^2$ übersteigt.

§ 12. Die Lufttemperatur in der Arbeitskammer soll möglichst nicht unter 10° und nicht über 25° betragen. In der Arbeitskammer ist ein Thermometer anzubringen.

§ 15. Für jeden Arbeiter sind in die Arbeitskammer stündlich mindestens 30 m^3 Frischluft zu fördern. Für jede Arbeitskammer müssen eine Betriebspumpe und unabhängig davon mindestens eine Hilfspumpe solcher Größe vorhanden sein, daß jede Pumpe den erforderlichen Betriebsdruck erzeugen und erhalten kann.

§ 16. Die Druckluft ist jeder Arbeitskammer durch mindestens zwei getrennte Rohrleitungen zuzuführen. Jede Leitung ist an ihrem Ende in der Arbeitskammer mit einem Rückschlagventil zu versehen.

§ 23. (1) Beim Einschleusen von Personen ist der Druck so langsam zu steigern, daß bei niemand Beschwerden eintreten. Der Schleusenwärter hat sich darüber durch Nachfrage zu vergewissern.

(4) Arbeiten in Druckluft von mehr als $3,5 \text{ kg/cm}^2$ dürfen nicht ausgeführt werden.

(5) Das Ausschleusen muß langsam und vorsichtig unter Beobachtung des Druckmessers und der Uhr geschehen. Drücke über $1,3 \text{ kg/cm}^2$ sind rasch mit etwa $0,2 \text{ kg/cm}^2$ je Minute bis auf die Hälfte herabzusetzen. Die restliche Ausschleusungszeit muß zur besonders langsamen Verminderung des Druckes auf 0 dienen.

§ 24. (1) Der einzelne Arbeiter darf bei einem Überdruck
bis zu $2,0 \text{ kg/cm}^2$ täglich nicht mehr als 8 Stunden,
von mehr als $2,0$ bis $2,5 \text{ kg/cm}^2$ täglich nicht mehr als 6 Stunden,
von mehr als $2,5$ bis $3,0 \text{ kg/cm}^2$ täglich nicht mehr als 4 Stunden
beschäftigt werden.

(3) Zwischen je zwei Arbeitsschichten muß eine Arbeitsfreizeit von mindestens 12 Stunden liegen.

e) Die Taucher-Druckkammer

Schnelles Austauchen, unmittelbar folgende Dekompression an der Oberfläche in der Dräger-Taucherdruckkammer

Wenn der Taucher die in der Austauschtable vorgesehene Austauschzeit unter Wasser aus irgendeinem Grunde nicht einhalten kann, also schneller an die Oberfläche kommt, als nach der Tabelle zulässig ist, dann muß er unverzüglich wieder unter Druck gebracht werden. Das erfolgt in der Taucherdruckkammer. Das schnelle Austauchen darf aber nur geschehen, wenn Tauchtiefe und Tauchzeit die in nachstehender Tabelle 1 angegebenen Werte nicht übersteigen.

Tabelle 1

Tauhtiefe in m	27	30	33	36	39	42	45	48	51
Tauchzeit in min	110	85	70	60	50	45	40	35	30

Bei der Oberflächen-Dekompression ist zu beachten: Der Taucher darf nicht schneller als 7 m/min aufsteigen. In der ersten Haltestufe nach Tabelle muß er die vorgeschriebene Haltezeit einhalten. An der Oberfläche angekommen, wird der Taucher sofort von Helm, Gürtel und Gewichten befreit und schnellstens in die Druckkammer gebracht. Die Kammer muß schnell auf einen Druck gebracht werden entsprechend der ersten Haltestufe lt. Tabelle. Die Haltezeit dieser Stufe, die bereits unter Wasser eingehalten wurde, wird wiederholt und daran anschließend nach der Tabelle weiter dekomprimiert. Vom Erreichen der Oberfläche bis zum „Wiederunterdrucksetzen“ dürfen nicht mehr als 5 min vergangen sein. Der Taucher soll dabei möglichst keine Muskelarbeit leisten, um das im Blut übermäßig gelöste Gas nicht zu schnell frei werden zu lassen.

Die Druckkammer muß laufend ventiliert werden, damit sich kein schädlicher CO₂-Partialdruck aufbauen kann.

Oberflächen-Dekompression in der Dräger-Taucherdruckkammer bei Atmung von Sauerstoff

Wenn bei der Dekompression Sauerstoff geatmet wird, läßt sich die Stickstoffausscheidung aus dem Blut beschleunigen. Es kann deshalb die Austauschzeit verkürzt werden. Sauerstoff darf aber erst bei Erreichen der Austauschstufe 12 m verabreicht werden. Für höhere Drücke ist Sauerstoffatmung nicht zulässig. Wenn in den Haltestufen 12, 9 und 6 m Sauerstoff geatmet wurde, kann die Stufe 3 m ausgelassen werden. Wenn nur die 3-m-Haltestufe in der Austauschzeit vorkommt, darf bei Sauerstoffatmung diese Zeit jedoch nur halbiert werden.

Die Druckentlastung auf Normaldruck von Stufe 6 m bzw. 3 m darf nicht schneller als in 2 Minuten erfolgen.

Die Druckkammer muß laufend ventiliert werden, damit sich kein erhöhter CO_2 - oder feuergefährlicher O_2 -Partialdruck einstellt. Das Rauchen und der Gebrauch von offenem Feuer ist in und vor der Kammer unter allen Umständen zu vermeiden, da bei erhöhtem O_2 -Gehalt in der Kammer für Kleidungsstücke eine größere Entzündungsgefahr besteht.

Das Verkürzen der Austauschzeit ist nur zulässig, wenn reiner Sauerstoff geatmet wird. Es darf keine Mischung des Sauerstoffs mit der Kammerluft, etwa durch eine nicht dicht sitzende Atemmaske auftreten. Besteht der Verdacht einer undicht sitzenden Maske, dann muß die unverkürzte Austauschzeit eingehalten werden.

Nach dem Einbringen des Tauchers in die Kammer und dem Verschließen des Deckels wird der Druck im allgemeinen schnell gesteigert bis zu der aus der Tabelle ersichtlichen höchsten Druckstufe. (Die Deckeldichtung ist von Zeit zu Zeit mit Talkum zu behandeln, um ein leichtes Gleiten des Verschlusses zu erreichen.) Während der ersten Druckgabe aber den Taucher durch das Fenster beobachten oder die telefonische Verständigung aufnehmen. Gibt der Taucher zu verstehen, daß er Ohrenscherzen hat, den Druck etwas senken, warten, dann langsam wieder den Druck steigern, bis der gewünschte Druck erreicht ist.

Druckhöhe und Einwirkungsdauer nach der Tabelle regeln.

Lüftungsventil mit Manometer bei jeder Druckänderung gleichstellen. Das heißt: Es muß dauernd Luft durch die Kammer gespült werden, damit sich ein bestimmter, aber nicht zu hoher Kohlensäuregehalt in der Kammerluft einstellt. Die Spülluftmenge stellt sich bei richtiger Stellung des Spülhahnes selbsttätig ein, so daß 2 bis 1,5% CO_2 -Gehalt in der Kammerluft entsteht. Dieser CO_2 -Gehalt ist dem Taucher dienlich. *Spülung nicht vernachlässigen, da sonst Erstickungsgefahr für den Taucher besteht.*

Wenn beim Übergang auf eine niedrigere Druckstufe der Taucher Gelenkschmerzen usw. empfindet, Druck wieder erhöhen, bis die Schmerzen verschwinden, dann Druck langsamer als bisher weiter senken.

Der Druck wird also so lange erhöht, bis die Gliederschmerzen verschwinden. Dafür genügt gewöhnlich der in der Tabelle angegebene Druck, oder weniger. In seltensten Fällen wird es erforderlich sein, den Druck anzuwenden, in dem der Taucher sich unter Wasser befand, bevor er sich wieder schmerzfrei fühlt. Der höchste Druck soll in keinem Falle länger als 1 Stunde konstant erhalten werden, dann auf jeden Fall nach der Tabelle den Druck senken.

Taucher, die an einem Tag zweimal tief tauchen, sind das zweite Mal besonders gefährdet, wenn zwischen 1. und 2. Tauchen weniger als 2 Stunden Pause lagen. Für diesen Fall sind die Aufenthaltszeiten am Grunde zu addieren.

Für beleibte Taucher müssen die Ausschleusungszeiten verlängert werden, wenn sie längere Zeit in größeren Tiefen getaucht haben. Meistens treten in

Tiefen bis 13 m selbst nach vierstündigem Tauchen keine Beschwerden auf; jedoch besteht diese Möglichkeit, da die Veranlagung dazu individuell verschieden ist. Deshalb beginnt die Tabelle mit Tiefen von 11 bis 13 m. Am stärksten gefährdet sind Taucher, die in tiefem Wasser schwer und verhältnismäßig lange gearbeitet haben; sie müssen besonders langsam austauchen bzw. eiligst in die Druckkammer gebracht werden.

Der Taucher muß Wollzeug — wenn möglich doppelt — tragen (evtl. Wolldecke mitgeben). Er darf nicht unzureichend bekleidet in die Kammer gebracht werden. Der Grund ist folgender: Bei Drucken — zu Beginn der Behandlung — erwärmt sich zwar die Luft, bei nachfolgender wiederholter Drucksenkung aber sinkt die Temperatur der Kammerluft; es entsteht zeitweilig sogar Nebel, der den Taucher stark abkühlt und zu Erkältungen Anlaß gibt. Erfahrungsgemäß ist darum Wärmezufuhr dienlich. Nach der Behandlung heißen Tee, Kaffee oder Limonade geben und den Taucher mit trockener Kleidung versehen. — Der Taucher darf einer Untersuchung wegen nicht vorzeitig ausgeschleust werden.

Behandlung erkrankter Taucher in der Dekompressionskammer

Zeigen sich bei einem Taucher Symptome der Taucherkrankheit, muß er unverzüglich in der Dekompressionskammer unter Druck gesetzt werden. Die Behandlungszeiten sind auf leichte oder schwere Formen der Taucherkrankheit und Luftembolie abgestimmt und der im folgenden aufgeführten Tabelle zu entnehmen.

BEHANDLUNGSTABELLE

 Sauerstoff

 Luft

 Sauerstoff
oder Luft

Abstiegsgeschwindigkeit: 8 m/Min.

Aufstiegsgeschwindigkeit: 1 Min. von Stufe zu Stufe.

Wenn die Erscheinungen während der Behandlung wiederkehren, muß eine Drucksteigerung bis zum Verschwinden ausgeübt werden, niemals aber weniger als 10 Meter (= 2 ata). Dann Ausschleusung von dieser Tiefe nach Spalte 4.

Der Taucher muß nach der Behandlung mindestens 6 Stunden in der Nähe der Druckkammer bleiben (24 Stunden, wenn kein rascher Transport möglich ist).

Siehe: Submarine Medicine practice, Washington 1956, S. 105, sowie Diving Manual, Washington 1957, S. 131.

Stufen bei der Ausschleusung		Leichte Form der Taucher-Krankheit und Luftembolie				Schwere Form	
		z. B. lediglich Schmerzzustände wie Gelenkschmerzen (Wenn die Schmerzen innerhalb von 30 Minuten in 50 Meter (= 6 ata) nicht verschwunden sind, handelt es sich wahrscheinlich nicht um Taucherkrankheit. Ausschleusung nach Spalte 2.)				z. B. Bewußtlosigkeit, Krampfstände — Schwäche der Gliedmaßen oder Gebrauchsunfähigkeit — Luftembolie — alle Sehstörungen — Schwindelgefühl — Sprach- oder Hörverlust — schwere Atemnot (Kurzatmigkeit) Erstickungsgefühl — Gelenkschmerzen, die schon unter Druck aufgetreten sind.	
		Falls die Schmerzen				Falls die Erscheinungen	
Wassertiefe (Meter)	Druck ata (kg/cm ²)	in weniger als 20 Meter (= 3 ata) verschwinden		in mehr als 20 Meter (= 3 ata) verschwinden		innerhalb von 30 Min. in 50 Meter (= 6 ata) verschwinden	nicht innerhalb von 30 Min. in 50 Meter (= 6 ata) verschwinden
		1	2	3	4		
		oder		oder			
50	6	—	—	30 Min.	30 Min.	30 Min.	30 bis 120 Min.
42	5,2	—	—	12 Min.	12 Min.	12 Min.	30 Min.
36	4,6	—	—	12 Min.	12 Min.	12 Min.	30 Min.
30	4,0	30 Min.	30 Min.	12 Min.	12 Min.	12 Min.	30 Min.
24	3,4	12 Min.	12 Min.	12 Min.	12 Min.	12 Min.	30 Min.
18	2,8	30 Min.	30 Min.	30 Min.	30 Min.	30 Min.	6 Std.
15	2,5	30 Min.	30 Min.	30 Min.	30 Min.	30 Min.	6 Std.
12	2,2	30 Min.	30 Min.	30 Min.	30 Min.	30 Min.	6 Std.
9	1,9	5 Min.	60 Min.	60 Min.	2 Std.	12 Std.	11 Std., dann 1 Std.
6	1,6	5 Min.	60 Min.	5 Min.	2 Std.	2 Std.	1 Std., dann 1 Std.
3	1,3	5 Min.	2 Std.	5 Min.	4 Std.	2 Std.	1 Std., dann 1 Std.
	Wasser- oberfläche 1,0	5 Min.	1 Min.	5 Min.	1 Min.	1 Min.	1 Min.

HINWEISE FÜR DIE BEHANDLUNG IN DER TAUCHERDRUCKKAMMER

1. Allgemeines

- a) Die Zeiten und Tiefen der Tabelle müssen **genau** eingehalten werden.
- b) Abkürzungen oder andere Veränderungen der Tabelle sind **nur** auf Anweisung eines ausgebildeten San.-Offz. oder in dringenden Notfällen (z. B. Brand) erlaubt.

2. Abstiegs geschwindigkeit

- a) Normalerweise: 8 m/Min.
- b) Bei der schweren Form ist rascherer Abstieg wünschenswert.
- c) Wenn die Schmerzen beim Abstieg zunehmen: kurzes Anhalten und so weiterfahren, wie es der Patient verträgt.

3. Behandlungstiefe

- a) Die volle Tiefe der entsprechenden Spalte muß erreicht werden.
- b) 50 m (= 6 ata) dürfen nur auf Anweisung eines San.-Offz. überschritten werden.

4. Untersuchung des Patienten

- a) Wenn keine Zeichen der „schweren Form“ zu erkennen und die Schmerzen nicht stark sind, muß vor der Behandlung eine sorgfältige Untersuchung stattfinden.
- b) Bei irgendwelchen ernstesten Krankheitserscheinungen darf der Abstieg nicht zur Untersuchung oder Feststellung der Tiefe, bei der die Erscheinungen verschwinden, unterbrochen werden.
- c) Bei der „leichten Form“ (nur Schmerzen) müssen die Schmerzen in weniger als 20 m verschwunden sein, wenn das Ausschleusen nach Spalte 1 durchgeführt werden soll.
- d) Bei Erreichen der höchsten Behandlungstiefe in jedem Falle vollständige Untersuchung ob
 - Beschwerden gänzlich verschwunden sind,
 - Symptome übersehen wurden.(Der Patient muß dazu zumindest aufstehen und in der Kammer auf- und abgehen).
- e) Erneute Kontrolle, ehe die höchste Tiefe verlassen wird.
- f) Der Patient muß vor Verlassen und nach Erreichen jeder Stufe und gelegentlich in der Zwischenzeit nach seinem Befinden befragt werden.
- g) Der Patient darf während einer Tiefenänderung nicht schlafen, desgleichen nicht länger als 1 Std. beim Aufenthalt auf einer Stufe (Symptome können während des Schlafens ein- oder wieder auftreten).
- h) Erneute Untersuchung des Patienten vor dem Verlassen der letzten Stufe.

5. Verschlimmerung

- a) Kein weiteres Ausschleusen, wenn sich der Zustand des Patienten verschlimmert.
- b) Behandlung als „Rückfall“ (s. Ziff. 6).

6. Wiederauftreten der Symptome

- a) Während der Behandlung:
 1. Druckerhöhung bis zum Verschwinden. Mindestens 10 m, höchstens 50 m (bei ersten Beschwerden, die vorher nicht vorhanden waren, muß der Druck auf 50 m [= 6 ata] erhöht werden).
 2. Weitere Ausschleusung nach Spalte 4.
- b) Im Anschluß an die Behandlung:
 1. Abstieg bis zur Tiefe, in der die Beschwerden verschwinden.
 2. Wenn dies in **weniger** als 30 m der Fall ist:
 - a) Abstieg bis 30 m (= 4 ata).
 - b) Ab 30 m nach Spalte 3 ausschleusen.
 3. Wenn dies in **mehr** als 30 m der Fall ist:
 - a) 30 Minuten Aufenthalt in der Tiefe, in der die Beschwerden verschwunden sind,
 - b) von dieser Tiefe nach Spalte 3 ausschleusen.
(Wenn ursprünglich nach Spalte 3 behandelt wurde, muß dann Spalte 4 benutzt werden.)
 4. Sorgfältige Untersuchung, ob keine Zeichen der schweren Form vorliegen. Wenn die ursprüngliche Behandlung nach Spalte 1 oder 2 vorgenommen wurde, muß beim Auftreten ernster Beschwerden die volle Behandlung nach Spalte 3 oder 4 durchgeführt werden.

7. Anwendung von Sauerstoff

- a) Sauerstoff soll angewandt werden, wenn es die betr. Spalte vorschreibt, außer, wenn
 1. der Patient seinen Sauerstoff-Toleranztest nicht bestanden hat,
 2. bekannt ist, daß der Patient Sauerstoff schlecht verträgt.
- b) Guter Maskensitz ist wichtig.
- c) Alle Maßnahmen des Feuerschutzes müssen getroffen sein.
- d) Sorgfältige Beobachtung auf Zeichen der Sauerstoff-Vergiftung wie:
 1. Muskelzuckungen
 2. Schwindelgefühl
 3. Übelkeit
 4. Sehstörungen (verschwommenes Sehen).
- e) Kenntnis der Handgriffe bei Krämpfen, Mundsperrer o.Ä. muß vorhanden sein.
- f) Wenn Zeichen auftreten, sofort die Maske entfernen.

- g) Wenn die Sauerstoffatmung unterbrochen wird, muß die entsprechende (Luft-)Spalte benutzt werden.
- h) Auf Anweisung eines San.-Offz. kann die Sauerstoffatmung in 12 m wieder aufgenommen werden. Die Behandlung wird dann wie folgt fortgesetzt:
 - 1. Spalte 1 — 30 Min. in 12 m,
dann 1 Std. in 9 m.
 - 2. Spalte 2 — 30 Min. in 12 m,
dann 2 Std. in 9 m.
 - 3. In beiden Fällen dann innerhalb von 5 Minuten mit Sauerstoffatmung zur Oberfläche.
 - 4. Spalte 3 — 30 Min. in 12 m,
anschließend 1 Std. in 9 m,
dann weiter mit Luft.

Die häufigsten Fehler bei der Behandlung:

- 1. Der Taucher meldet seine Beschwerden nicht frühzeitig.
- 2. Zweifelhafte Fälle werden nicht behandelt.
- 3. Die Behandlung setzt nicht sofort ein.
- 4. Ernste Beschwerden (= schwere Form) werden nicht erkannt.
- 5. Die Behandlung ist nicht ausreichend.
- 6. Der Patient hält sich nach beendeter Behandlung nicht in der Nähe der Druckkammer auf.

8. Helfer (möglichst ein ausgebildeter San.-Dienstgrad) in der Kammer

- a) Ein Helfer (möglichst ausgebildeter San.-Dienstgrad) muß mit eingeschleust werden, wenn
 - 1. der Patient ernste Beschwerden (= schwere Form) gehabt hat,
 - 2. der Patient Sauerstoff atmet,
 - 3. der Patient aus irgendwelchen Gründen besondere Aufsicht oder Betreuung benötigt.
- b) Der Helfer muß besonders auf alle Veränderungen beim Patienten achten, insbesondere wenn dieser Sauerstoff atmet.
- c) Der Helfer soll innerhalb der letzten 12 Stunden nicht unter erhöhtem Druck gewesen sein.
- d) Der Helfer **muß** selbst Sauerstoff atmen, wenn er bei einem Patienten nach Spalte 1 oder 2 **durchgehend** mit in der Kammer war:
 - 1. Spalte 1 — 30 Min. O₂ in 12 m,
 - 2. Spalte 2 — 1 Std. O₂ in 9 m.

- e) Der Helfer, der **nur während des Sauerstoffteils** der Spalten 1 oder 2 in der Kammer war, erlangt durch Sauerstoffatmung auf der letzten Stufe einen zusätzlichen Sicherheitsfaktor. Die Sauerstoffatmung ist jedoch nicht unbedingt erforderlich. Der Helfer **kann** während der Anwendung von Spalte 3 oder 4 ab 12 m und darunter Sauerstoff atmen.
- f) Jeder, der vor Beendigung der Behandlung die Kammer verläßt oder zusteigt, muß nach der normalen Austauschtafel austauschen.
- g) Der Aufsichtsführende außerhalb der Kammer muß die Austauschstufen derjenigen, die die Kammer verlassen, festsetzen und überwachen. Außerdem muß er alle Entscheidungen über Behandlung und Dekompression, die im Innern der Kammer gefällt werden (einschließlich der des San.-Offz.), überprüfen.

9. Spülen der Druckkammer

Regel 1: Benötigte Luftmenge (bezogen auf Volumen bei Kammerdruck — gilt für jede Tiefe).

- a) Grundsätzlich sind erforderlich:
 1. 10 l/Min. pro Mann.
 2. Zusätzlich 60 l/Min. für jeden, der **nicht** ruht (z. B. den behandelnden San.-Dienstgrad).
- b) Bei Anwendung von Sauerstoff:
120 l Luft für jeden, der Sauerstoff atmet, wenn dies höhere Werte ergibt als a).
(Nicht zu a) zuzählen!)

Regel 2: Höchstzulässiger Abstand zwischen 2 Spülungen:

a) ohne Sauerstoff:

Kammer- bzw. Schleusenvolumen (1)

Grundsätzlich erforderliche Menge
(l/Min.) (siehe Regel 1)
Lüftungsintervall (Min.)

b) Bei Anwendung von Sauerstoff:

Kammer- bzw. Schleusenvolumen (1)

Anzahl der O₂-Atmenden x 10
Lüftungsintervall (Min.)

c) Zeitpunkt des Spülens:

1. Jederzeit vor Ablauf eines kürzeren Zeitraums als Regel 2.
2. Ständige Dauerspülung ist ebenfalls ausreichend.

d) Benötigte Menge bei jeder Spülung:

Multipliziere die benötigte Menge (l/Min.) nach Regel 1 mit der Zahl der seit der letzten Spülung vergangenen Minuten.

e) Zum Erreichen der benötigten Spülmenge sind die (vorher festgelegten) Einstellungen des Luft-Abläßventils zu benutzen.

10. Erste Hilfe

- a) Zusätzlich zur Rekompensation können Erste Hilfe-Maßnahmen erforderlich werden. Sie dürfen nicht vernachlässigt werden.
- b) Siehe Tabelle „Erste Hilfe“ und ZDv 49/20.

11. Rekompensation im Wasser

- a) Rekompensation ohne Druckkammer ist schwierig und nicht ohne Gefahr. Außer bei allererststen Notfällen ist die nächstgelegene Druckkammer (selbst wenn sie weiter entfernt ist) aufzusuchen (s. Ziff. 12).
- b) Wenn die Rekompensation im Wasser angewandt werden muß, der Patient bei Bewußtsein ist und für sich selbst sorgen kann:
 1. Helmtauchergerät mit Schlauch benutzen.
 2. Der Behandlungstabelle so genau wie möglich folgen.
 3. Dauernde Telefonverbindung ist unerläßlich.
 4. Reservetaucher muß bereitstehen.
- c) Wenn der Taucher bewußtlos oder hilflos ist, muß ein anderer Taucher mit ihm absteigen, um seine Ventile zu bedienen und ihm sonst behilflich zu sein.
- d) Wenn leichtes Tauchergerät oder Schwimmtauchergerät benutzt werden, muß mindestens ein Taucher ständig bei dem Patienten sein. Sorgfältige Planung für Gerät- oder Flaschenwechsel ist notwendig. Eine ausreichende Zahl von Helfern muß an der Oberfläche und in verschiedenen Tiefen stationiert sein.
- e) Wenn die Tiefe für eine vollständige Behandlung nach der Tabelle nicht ausreicht:
 1. Lasse Patienten in die höchste verfügbare Tiefe hinab,
 2. belasse ihn dort für 30 Minuten,
 3. sodann Aufstieg nach Spalte 3, wenn es vertragen wird.(Wenn der Patient tiefer als 30 m war, dürfen die Stufen der Spalte 2 nicht unterschritten werden).

12. Notfälle

- a) Nächste Dienststelle mit Druckkammer telefonisch oder durch Funk verständigen.
- b) Überführung des Patienten mit dem schnellsten Transportmittel in Begleitung eines San.-Dienstgrades. Unterwegs soll Sauerstoff geatmet werden.
- c) Transport per Flugzeug oder Hubschrauber darf nur durchgeführt werden, wenn keine anderen Transportmittel verfügbar sind, da der herabgesetzte Luftdruck die Beschwerden verstärken könnte. Auf jeden Fall sollte das Flugzeug nicht höher als 300 m fliegen.
- d) Wenn möglich, soll der Tauchleiter den Patienten begleiten, andernfalls ist ein Taucher mitzusenden, der die gesamte Vorgeschichte des Patienten genau kennt.

f) Tiefenrausch

Der Stickstoff hat neben den in den vorhergegangenen Abschnitten besprochenen unangenehmen Eigenschaften noch eine weitere, erst in der Zeit des 2. Weltkrieges beobachtete und beschriebene. Die Eigenschaft selbst ist noch nicht restlos geklärt. Man hat beobachtet, daß in Tiefen von ca. 50 m und mehr der Taucher in eine Art Rauschzustand gerät. In leichten Fällen äußert sich der Zustand in einer erhöhten Stimmung, etwa wie im Alkoholrausch. In schweren Fällen verschwindet alle Initiative, und die Handlungen des Tauchers werden unkontrollierbar. Der Zustand hört auf ohne Nachwirkungen, wenn der Druck gemindert wird, d. h. wenn der Taucher eine gewisse Strecke auftaucht.

Aus den Beobachtungen geht hervor, daß mit Normal-Luft nur bis max. 90 m getaucht werden kann. Dabei ist aber das Arbeitsvermögen des Tauchers bereits stark herabgesetzt. Um tiefer zu tauchen, muß man den Stickstoff durch ein Gas ersetzen, das die Nachteile des Stickstoffes nicht hat. Man nimmt an, daß ein solches Gas nicht nur ein geringeres Molekulargewicht sondern auch eine geringere Löslichkeit im Blut und im Fett haben muß also der Stickstoff. Diese Eigenschaften haben aber nur der Wasserstoff und das Helium. Beide Gase wurden bereits für Tieftauchversuche bzw. Tieftaucharbeiten verwendet.

3. Kohlensäure

a) Kohlensäure unter Druck

Es wurde schon am Anfang der Broschüre erwähnt, daß unter atmosphärischem Druck etwa ebensoviel Kohlensäure (CO_2) ausgeatmet wird wie bei der Einatmung an Sauerstoff durch die Lungen gebunden wird. Dieses gilt dem Volumen nach, da die spezifischen Gewichte der beiden Gase recht verschieden sind. Je mehr Muskelarbeit geleistet wird und je kälter die umgebende Luft ist — es gibt noch einige andere Faktoren, die aber wenig Einfluß ausüben —, um so mehr CO_2 wird produziert. Eine Tabelle veranschaulicht das Verhältnis der abgegebenen CO_2 -Menge zu der geleisteten Arbeit. Kohlensäure gehört zu den atmungsfeindlichen Gasen, da es die Atmung nicht unterhält und in der Atemluft auch nicht nur verdünnend wirkt wie beispielsweise der Stickstoff.

Arbeit	Atemzüge/min	Lungenfüllung bei 1 Atemzug	Luftmenge ausgeatmet	Einatemzeit / Ausatemzeit	CO ₂ -Abgabe	O ₂ -Verbrauch	O ₂ -Verbrauch nach Haldane
	1	l/min	=	l/min	l/min	l/min	
Liegend	14	0,35	4,9	0,6	0,15	0,18	0,237
Sitzend	18	0,4	7,2	0,65	0,21	0,25	0,328
Marschieren 85 Schr./min	20	0,75	15	0,067	0,45	0,53	(stehend) 0,780
Marschieren 125 Schr./min	23	1,4	32	0,85	0,70	0,90	(2 Meilen/st) —
Laufschritt 165 Schr./min	24	1,7	41	0,85	1,3	1,5	2,005
Treppensteigen							(4 1/2
111 Stufen/80 sec	24	1,7	40	0,88	1,6	1,85	Meilen/st)
Laufen 220 Schr./min . .	40	2,05	82	0,67	2,4	2,7	2,543
Treppenlaufen							(5 Meilen/st)
111 Stufen/28 sec	40	2,6	84	0,90	3,2	3,2	—

Nun beträgt der CO₂-Gehalt in den Lungenbläschen bei gesunden Menschen und unter atmosphärischem Druck immer etwa 5,6 Volumenprozent. Dieser Prozentsatz bleibt bei demselben Menschen stets der gleiche. Nimmt der CO₂-Gehalt in der Einatemluft nur wenig zu, so erfolgt als Ausgleich sofort tieferes Atmen, stärkere Belüftung der Lungen, so daß doch der alte Gehalt von 5,6% gewahrt bleibt. Die CO₂-Erzeugung des Körpers kann fast auf den siebzehnfachen Betrag dessen, der bei Ruhe erzeugt wird, steigen, wenn äußerst anstrengende Arbeit geleistet wird. Um während dieser Zeit die Funktionen des Körpers in ungestörtem Gang zu erhalten, muß also eine siebzehnfache Belüftung der Lunge stattfinden — stärkere Füllung der Lungen, erhöhte Atemzug-Anzahl pro Minute.

Ist die Einatemluft schon von CO₂ verunreinigt, so muß eine Erhöhung der Atemtätigkeit eintreten.

Wenn mit V₀ die Ventilationsgröße der Lunge, mit b die abgegebene CO₂-Menge und mit c der mittlere CO₂-Gehalt in der Ausatemluft bezeichnet wird, so ergibt sich bei CO₂-freier Einatemluft die Beziehung:

$$V_0 \cdot c = b$$

Enthält die Einatemluft jedoch bereits einen CO_2 -Gehalt x , so lautet die Beziehung:

$$V_1 (c - x) = b$$

aus beiden Gleichungen ergibt sich

$$V_1 = V_0 \frac{1}{1 - \frac{x}{c}}$$

Wenn c zu 5,6% angenommen wird, ergibt sich bei 1% CO_2 in der Einatemluft eine Vergrößerung der Ventilationsmenge um $\sim 22\%$, bei 2% CO_2 um 55% und bei 3% CO_2 um 115%.

Die Verhältnisse ändern sich nun aber außerordentlich, wenn man es mit veränderten Luftdrücken zu tun hat, und zwar in recht ungünstiger Weise, wenn der Druck *höher* als 1 ata ist wie bei Tauchern und Druckluftarbeitern. In diesem Falle bleibt nicht der CO_2 -Gehalt der Lungenbläschenluft konstant, sondern nur der *Teildruck* der CO_2 , also der Prozentgehalt mal Druck in ata. Das heißt: es wird immer noch annähernd vom Körper die gleiche CO_2 -Menge abgegeben. Sie ist aber dem höheren Druck entsprechend verkleinert, nur dem *Gewicht* nach dieselbe geblieben. Geht also ein Taucher in 20 Meter Tiefe — 3 ata —, und atmet er reine Luft ein, so beträgt der Volumen-Prozentgehalt der CO_2 in den Lungenbläschen nur $5,6 : 3 = 1,9\%$, der CO_2 -Teildruck wäre wie immer $3 \times 1,9 = 5,6\%$ einer Atmosphäre. Das Störende ist nun, daß der Volumen-Prozentgehalt in dieser Tiefe nicht größer sein *darf* als 1,9%, daß also die vom Taucher geatmete Luft auch nicht so stark mit CO_2 verunreinigt sein darf, wie es an der Oberfläche noch zulässig wäre, sondern immer nur dem reziproken Werte des absoluten Druckes entsprechend. Eine Verdoppelung der Atemtätigkeit, um an obiges Beispiel anzuknüpfen, würde also schon bei $3 \times \frac{1}{3} = 1\%$ CO_2 in der auf 3 ata komprimierten Luft stattfinden. Diese Tatsachen sind insbesondere von Haldane und seinen Mitarbeitern eingehend untersucht und geklärt worden, und man weiß heute, daß eine große Anzahl von Taucherkrankheiten auf das Konto der Kohlensäureanhäufung im Taucherhelm kommt, daß meistens die Luftzufuhr und damit die Spülung im Helm so gering war, daß der Taucher an CO_2 -Vergiftung erkrankte. Wer einmal beobachtet hat, mit welcher verbrecherischer Langsamkeit mitunter die Hilfsleute des Tauchers die Pumpe bedienen, der weiß jetzt, daß entweder der Taucher in der Tiefe keine Arbeit leistete oder daß er seine Gesundheit aufs Spiel setzte, wenn er pflichttreu war.

Trotz der — dem Volumen nach — in der Tiefe geringeren CO_2 -Produktion muß nämlich die *Belüftung der Lunge dem Volumen nach dieselbe bleiben*

wie unter atmosphärischem Druck. Brauchte der Taucher an der Oberfläche 30 l/min, so bedarf er auch in 10 Meter Tiefe 30 l/min, aber dann natürlich von der Spannung 2 ata, entsprechend 60 l/min atmosphärischer Spannung. Zu 20 Meter Tiefe müßte ihm $3 \times 30 = 90$, zu 30 Meter $4 \times 30 = 120$ l/min usw. Luft atmosphärischer Spannung zugeführt werden, die am Taucherort dann immer nur 30 l/min ausmachen würden.

Man könnte einwenden, daß dem Taucher doch ganz reine Luft zugeführt werde, die nur 0,03% CO_2 enthalte. Das ist richtig, aber die vom Taucher produzierte CO_2 gelangt bei den normalen Tauchergeräten mit freier Helmatmung nicht ganz zur Ausstoßung durch das Helmventil. Der Taucher erhält zwar die Frischluft direkt zu Mund und Nase geführt, die Luftstromgeschwindigkeit ist aber geringer als diejenige der Einatemluft, wenigstens zu Beginn der Einatemphase, so daß dann stets etwas Helmluft mit eingeatmet wird. Umgekehrt wird während der Ausatmung stets eine größere oder geringere Menge CO_2 -haltiger Lungenluft in den Helm und die Anzugblase gelangen. Die Pumpenluft müßte mit einer Ansaugleistung von 200 l/min, das sind 1000 l/min bei beispielsweise 40 Meter Tiefe, hinabgedrückt werden, wenn der Taucher *nur* frische Luft atmen sollte. Eine für Handpumpenbetrieb ideale Forderung, der man in jüngster Zeit aber nahekommt, indem man maschinenerzeugte Preßluft verwendet.

Haldane empfahl eine Luftzufuhr für Taucher von $42\frac{1}{2}$ l/min bei 1 ata, 85 l/min (atmosphärischer Spannung, also angesaugte Luftmenge) bei 2 ata, entsprechend 10 Meter Tiefe, 127 l/min bei 20 Meter Tiefe usw. In der privaten Taucherpraxis unter Verwendung von Handpumpen wird selten mehr als 30 l/min bei 0 Meter Tiefe gegeben, meistens weniger, mitunter so wenig, daß man versteht, warum der Taucher seinen Beruf für so schwer hält.

b) Kohlensäurevergiftung

Kohlensäurebeimengung in geringem Prozentsatz bewirkt bei Nichtarbeit nur erhöhte Atemtätigkeit, je höher der Prozentsatz und je länger die Einwirkung bei auch geringerem Prozentsatz ist, um so eher stellt sich ein durch die erzwungene höhere Atemtätigkeit bewirktes Unbehagen ein. Der vielleicht gleichzeitig erhöhte Wassergehalt der Luft scheint dabei auch eine Rolle zu spielen. Dabei ist ein CO_2 -Gehalt von 1 bis 5% vorausgesetzt. Bei höherem CO_2 -Gehalt tritt bald Ohnmacht ein. Es dürfte bekannt sein, daß man 15 bis 25% CO_2 -haltige Luft vor Anwendung des Chloroforms als Narkotikum benutzte. CO_2 ist also nicht eigentlich im herkömmlichen Sinne ein Gift, wir bezeichnen es nur der Kürze halber und im Vergleich mit den anderen atemfeindlichen Gasen als solches, obgleich

auch sie nur unter gewissen, durch das Tauchen entstandene Bedingungen zu „Giften“ werden.

Hat der Taucher zu *arbeiten*, so stellen sich ernstere Erscheinungen ein. Bei 3% CO_2 in der Einatemluft ermüdet der arbeitende Taucher schon sehr bald, es stellt sich Kopfschmerz ein; bei 6% CO_2 -Gehalt besteht Hang zu Ohnmachten, aber noch nicht eigentliche Lebensgefahr. *Immer ist dabei für die jeweilige Tiefe auf den Teildruck umzurechnen.* Für genannte 6% also gelten auf zehn Meter Tiefe nur 3%. Um zu verstehen, daß schon 3% bei 1 ata unerträglich sind, wenn der Taucher mit äußerster Anstrengung arbeitet, braucht man sich nur zu erinnern, daß dieser CO_2 -Gehalt in Ruhestellung schon eine Verdoppelung der Atemtätigkeit verlangt. Nach Tabelle Seite 10 beträgt aber bei Anstrengung die Lungenventilation 168 l/min, sie müßte jetzt also 336 l/min betragen, was keine Lunge zu leisten vermag.

Im Taucheranzug soll der CO_2 -Gehalt 3% schon deswegen nicht übersteigen, weil Kohlensäure unter Druck die Stickstoffaufnahme fördert, da Atemtätigkeit und Blutzirkulation gesteigert sind. Um den aus großer Tiefe austauchenden Taucher schneller vom Stickstoff zu befreien, ist CO_2 -Atmung nicht über 2% angebracht, jedoch erst dicht unter der Oberfläche. Atmung und Blutzirkulation werden dadurch beschleunigt. Eingang in die Praxis hat dieser Vorschlag Haldanes nicht gefunden.

In der Taucherglocke, im Caisson usw. soll aus Rücksicht der CO_2 -Niedrighaltung die Luftventilation pro Mann und Stunde 30 cbm betragen, die Kompressoren sollen nicht mit Öl, sondern mit Seifenwasser, Glycerin oder Phosphorpentoxyd geschmiert werden, um Belästigung durch Öldunst und vor allem Explosionen zu verhüten. Für die Preßluft-Taucherstationen gilt das gleiche. Hier hilft man sich gewöhnlich durch Vorschalten von Ölabscheidern, obgleich die Vermeidung von Öl zweckmäßiger und sicherer wäre. Der Rauminhalt der Schleusen soll mindestens 3—4 cbm/Mann betragen, und es soll sowohl während des Einschleusens als auch während des Ausschleusens der Raum ventiliert werden, die Luft zugleich ein- und ausgelassen werden. Erste Folgeerscheinungen eines zu hohen CO_2 -Druckes sind Unwohlsein, Erbrechen, Benommenheit und Arbeitsunfähigkeit.

Bei 4,3% CO_2 -Gehalt war anstrengende Arbeit nur acht Minuten lang zu leisten.

Kohlensäurevergiftung, die nicht zu weit vorgeschritten ist, geht im allgemeinen leicht zurück, wenn der Kranke an die frische Luft kommt. Der Kopfschmerz kann allerdings noch längere Zeit anhalten. Sauerstoffatmung ist nützlich.

4. Feuchtigkeit und Temperatur

Der menschliche Körper scheidet durch Lunge und Haut ständig Wasserdampf aus, wodurch er seine Temperatur reguliert (Verdunstungskälte). Ist die Einatemluft zu feucht, so vermag sie kein Wasser mehr aus der Lunge aufzunehmen. Es tritt vermehrte Wasserausscheidung durch die Haut ein, der Körper schwitzt in solcher „Treibhausluft“. Zu trockene Luft wird darum sehr viel angenehmer empfunden als zu feuchte Luft, und feuchte Luft wird unerträglich, wenn darin gearbeitet werden muß, sie erzeugt Unbehagen und Müdigkeit. Überhaupt führen Änderungen in Temperatur und Feuchtigkeit, Nebelbildung, wenn sie öfters eintreten, zu Frösteln, Geräusch in den Ohren, Jucken der Haut und Schwindelanfällen.

Dagegen hat *Brüning*, Gießen, 1913 festgestellt, daß die *Gittigkeit des Sauerstoffs* für die Atmung auf die große Trockenheit dieses Gases zurückzuführen ist. Die gefürchteten Schädigungen in den Taucherapparaten können wahrscheinlich dadurch gemindert werden, daß man für eine genügende Feuchtigkeit (etwa 75%) der Atmungsluft sorgt. *Brüning* sagte: „Wenn bei meinen Versuchen mit Tieren die Atmungsluft mit 60 bis 80% Wasser angereichert war, blieben die Lungenveränderungen aus (Lungenödem).“

Während des Ausschleusens der *Druckluftarbeiter* expandiert die Luft, sie wird kälter, und wenn die Abkühlung groß genug ist, kann die jetzt kalte Luft nicht mehr den bisherigen Wassergehalt in Dampfform tragen, er wird zu Nebel, die Luft ist zu 100% mit Wasser gesättigt. Die Taucher oder Druckluftarbeiter, die sich bisher in recht warmer Luft befanden, erzeugt durch Kompressionswärme und Abgabe von Körperwärme zu etwa 100 WE/st von jeder Person, stehen schwitzend in der jetzt kalten Luft; sie sind Erkältungen sehr ausgesetzt. Aus diesem Grunde sollen stets Wolldecken vorhanden sein. Der Taucher, insbesondere der Tieftaucher, soll sich durch einfaches oder doppeltes Wollzeug schützen.

Die in den Druckraum geschickte Ventilationsluft soll getrocknet und gekühlt sein, die Temperatur im Arbeitsraum soll nicht über 22 °C betragen, die Schleuse und die anschließenden Räume sollen geheizt sein, während des Einschleusens aber soll die Schleuse durch Berieselung zu kühlen sein. Für den Taucher kommt insbesondere die Forderung nach trockener Luft in Frage, die sich beim Preßlufttaucher unschwer lösen läßt.

Ein anderer beachtenswerter Punkt ist die bei hohem Wassergehalt und hoher Temperatur gesteigerte Stickstoffaufnahme, da dann die Haut stärker durchblutet ist. Umgekehrt verzögert sich die Stickstoffabgabe, wenn durch kühle Luft bei der Dekompression Gefäßzusammenziehung eintritt, weil dann das Blut von der Haut fortgetrieben wird. Auch Erkältung und Verdauungsstörungen verzögern die N₂-Abscheidung.

Nach dem Ausschleusen soll warmer Tee oder Kaffee, im warmen Aufenthaltsraum eingenommen, von Vorteil sein.

Taucher und Druckluftarbeiter sollen einen regelmäßigen Lebenswandel führen, der Stuhlgang sei regelmäßig, der Schlaf gut. Sie sollen nicht viel Fett essen, die Einschleusung soll erst etwa 1 1/2 Stunden nach der Mahlzeit stattfinden. Erregungen und Trunkenheit sind schädlich.

Noch unbekannte toxische Stoffe der Ausatemluft scheint es trotz vieler Untersuchungen nicht zu geben.

Kälte des Wassers hat auf das Wohlbefinden des Tauchers direkten Einfluß, wenn ohne Handschuhe getaucht wird. Die Hände werden rot, blau, gefühllos und steif. Blaß sind sie nur, solange der Taucher sie unter Wasser tief hält, so daß der Wasserdruck das Blut aus der Haut verdrängt. Da der Zweck des Tauchens mit bloßen Händen in solchem Falle nicht mehr erreicht wird — der Taucher soll in unsichtigem Wasser durch Tasten Feststellungen machen —, so müssen die Hände wieder brauchbar gemacht werden. Ein Einreiben mit Spiritus, Vaseline, Fett oder Seife vor dem Tauchen hat nur sehr geringen Erfolg. Bewährt ist folgende Methode: Man läßt den Taucher heraufkommen, nimmt die Gummiringe von den Manschetten und streift die Manschetten etwas zurück. Dann bearbeitet man die Hände durch Kneten und Reiben so lange, bis sie recht warm geworden sind. Nach dieser Prozedur kann der Taucher seine Hände bedeutend länger gebrauchen als beim ersten Abstieg.

Kälte des Wassers stört den Nackttaucher. Er kann sich leicht eine allgemeine Erkältung zuziehen. Dringt kaltes Wasser ins Ohr, so kann Mittelohrentzündung entstehen. *Bräutigam* empfahl deshalb, vor jedem Tauchen mit Mundstück-Tauchrettern etwas Olivenöl in die Ohren zu träufeln.

Kälte der Luft, besonders im Winter, bei starkem Wind, wenn die Lufttemperatur weit unter dem Gefrierpunkt liegt, ist dem Taucher gefährlich, da die Metallteile seiner Rüstung schnell niedrige Temperaturen annehmen. Man soll deshalb den Taucher nicht lange frei an Deck halten, sondern ihn so schnell wie möglich ins verhältnismäßig warme Wasser hinschicken. Bezüglich des Aufenthalts in Senkkästen und deren Schleusen sowie Krankenkammern geben *Gerbis* und *König* einige wichtige Hinweise:

„Abkühlung und hohe Luftfeuchtigkeit müssen wegen der Erkrankungsgefahr beobachtet werden, ihre Einwirkungen sind sehr wichtig, denn von ihnen hängen peripherer Blutumlauf und Stickstoffabatumg ab. Die Erfahrung der mit Arbeiten in Druckluft vertrauten Senkkastenarbeiter geht dahin, daß der Nebel das Auftreten von „Pressionen“ stark begünstigt. Aus diesem Grunde fürchten die alten Senkkastenarbeiter den Nebel, und ihre Unruhe überträgt sich auch auf die Mannschaft.

Man kann bei der Einschleusung nach der Haldaneschen Methode zwar nicht das Auftreten von Nebel verhindern, aber man kann den Druck sofort nach Erreichen des zulässigen Tiefpunktes (oder nach dessen geringer Unterschreitung) *um 0,1 bis 0,2 kg/cm² ansteigen lassen, um den Nebel zu verjagen. Man erreicht hiermit eine nebellfreie Luft* während der Zeit des Wartens, die ja immer länger ist als die Zeit des Druckabfalles.

Mit Rücksicht auf die Nebelbildung wird als beste Methode empfohlen, daß der Druck jeweils rasch auf die Hälfte herabgesetzt wird.“

5. Helium

a) Einfluß der He-Atmung

Das einzige Gas, das ohne Komplikationen den Stickstoff vorteilhaft ersetzen könnte, um die geschilderten Gefahren zu vermeiden, scheint Helium zu sein. Helium kann für Taucherzwecke sehr wichtig werden, wenn es gelingt, dieses Edelgas entweder aus der Atmosphäre oder aus anderen Fundstätten mit nicht zu großen Unkosten zu gewinnen.

He ist farb-, geruch- und geschmacklos und nicht brennbar. Es verhält sich chemisch inaktiv, aber seine hervorstechendste Eigenschaft ist die sehr geringe Dichte, die nur noch vom Wasserstoff unterschritten wird. Es wurde aber schon an anderer Stelle erklärt, daß Wasserstoff (H₂) wegen Knallgasbildung nicht empfohlen werden kann.

He hat ein Gewicht von 0,1785 g/l. Denkt man sich den Stickstoff (N₂ mit 1,2506 g/l) der atmosphärischen Luft durch Helium ersetzt, so muß die Atmung sehr erleichtert sein, insbesondere in größeren Wassertiefen, weil die Lunge weit geringere Massen zu fördern hat, als wenn der schwere Stickstoff vorhanden wäre.

Das ist der Grund, warum Helium für Taucherzwecke vorgeschlagen wurde.

He — ein einatomiges Gas — wurde erstmalig 1868 spektroskopisch in der Sonne entdeckt. 1895 wurde Helium durch Ramsey auf der Erde festgestellt, und zwar in zerspaltelem Gestein.

Im Jahre 1905 wurde He in USA in Erdgasquellen entdeckt (*Cady und McFarland*). Die Ausbeutung dieser Quellen geschah erst in den zwanziger Jahren zum Füllen von Luftschiffen. Erst ab 1937 konnte 98%iges He auch von Privatpersonen in USA gegen Vorausbezahlung gekauft werden. *Elihu Thomson* soll 1920 als erster den Vorschlag gemacht haben, He-O₂-Mischungen beim Tauchen zu verwenden (*Prof. Gaertner* 1920). *Sayers, Yant und Hildebrand* stellten 1922 fest, daß He im Blut weniger löslich ist als N₂, ferner, daß es größere Diffusionsgeschwindigkeit besitzt, also schnelleres Austauschen ermöglicht. 1926 stellte *Behnke* mit Caissonarbeitern diesbezügliche Versuche an.

Lovelace u.a. empfehlen die große Beweglichkeit des He-Atoms = 1204 m/sec, gegenüber nur 425 m/sec des Sauerstoffmoleküls, auszunutzen für die schnellere Durchdringung der Eustachischen Röhre, um bei Tauchern und Caissonarbeitern den „Ohr-Block“ zu verhindern.

Barach empfahl 1934 Helium als therapeutisches Gas zu verwenden bei Asthma, Herzfehlern und auch bei Hindernissen in der Luftröhre und im Kehlkopf.

Lovelace und andere beschreiben auch die Bedingungen, unter denen Fluggäste bei Abstieg aus größeren Höhen ein Helium-Sauerstoff-Gemisch mit Vorteil atmen können.

1937 wurde in USA mit Taucheranzügen getaucht, in denen die Luft vollständig durch ein He-O₂-Gemisch ersetzt wird. Es handelt sich hierbei um unabhängige Kreislaufgeräte, nicht um Schlauchgeräte. Vor dem Ausziehen des Taucheranzuges wird das gesamte im Anzug eingeschlossene Gasgemisch ausgepumpt und für den nächsten Abstieg aufbewahrt.

Taucher M. E. Nohl und John de Craig wollten 1937 am Wrack der „Lusitania“ in etwa 110 m Tiefe an der irischen Küste tauchen. Sie stellten in einer Druckkammer Vorversuche an mit einem 80/20% He-O₂-Gemisch. Bei 3 atü verblieben sie eine Stunde in der Druckkammer und ließen sich dann in zwei Minuten ausschleusen, wozu sonst 47 Minuten erforderlich gewesen wären.

1939 erreichte Max Nohl im Michigan-See 126 m Tiefe mit 80/20% He-O₂-Atemluft. Gleich darauf tauchte Nohl an der gleichen Stelle 140 m tief.

Einige Nachteile soll aber die Verwendung des Heliums beim Tauchen mit sich bringen: die gute Leitfähigkeit dieses Gases für Wärme veranlaßt in kaltem Wasser starken Wärmeentzug aus dem Körper des Tauchers. Es wurden deshalb *Taucheranzüge aus Glasgewebe* hergestellt, die zugleich mit elektrischer Heizung versehen waren.

Die größere Diffusionsgeschwindigkeit ergibt eine schnellere Sättigung des Blutes und der Gewebe. Daher ist die volle Sättigung schon bei kürzerer Tauchzeit erreicht als beim Stickstoff. Helium wird bereits bei einem geringeren Druckunterschied aus dem Blut frei als der Stickstoff. Während der Stickstoff erst bei einem Druckverhältnis 2,3 : 1 in Blasen aus dem Blut austritt, beträgt das Verhältnis bei Helium nur 1,7 : 1. Bei kürzerer Tauchzeit kann die Austauschzeit deshalb länger sein als beim Tauchen mit Normal-Luft. Ein wichtiger Vorteil des Heliums liegt aber darin, daß es physiologisch dem Stickstoff in Tiefen über 50 m überlegen ist. Der in Tiefen über 50 m sich einstellende Tiefenrausch, in dessen Folge der Taucher nicht mehr folgerichtig denken und zuverlässig arbeiten kann, bleibt aus, wenn Stickstoff durch Helium ersetzt wird.

b) Tiefengrenze beim Tauchen mit Helium

Um die Möglichkeit abzuschätzen, welche Tiefen mit Helium-Sauerstoff-Gemischen erreichbar sind, muß man wohl von der Überlegung ausgehen, daß Stickstoff in 50 m Tiefe beginnt, auf die Psyche des Tauchers nachteilig einzuwirken. Unterstellt man, daß das Gasgewicht an sich für diese Wirkung verantwortlich ist, so müßte mit Helium eine Tiefe erreichbar sein, bei der das Gasgewicht von Helium die gleiche Größe erreicht wie das von Stickstoff in 50 m Tiefe.

In der vermutlich erreichbaren Tiefe dürfte der zulässige Sauerstoffgehalt etwa 5% betragen, so daß mit einem Heliumgehalt von 95% zu rechnen wäre. Da bei Verwendung von normaler Luft der Stickstoffgehalt 79% ausmacht, ergibt sich mit den He-N₂-Werten die folgende Gleichung:

$$x \text{ ata} \times 0,95 \times 0,1785 = 6 \text{ ata} \times 0,79 \times 1,2506$$

und daraus:

$$x = \frac{6 \times 0,79 \times 1,2506}{0,95 \times 0,1785} = 35 \text{ ata}$$

Das bedeutet eine Tauchtiefe von 340 m.

Wir wissen aber nicht, ob dabei nicht andere uns bisher noch unbekanntere Erscheinungen auftreten werden. Selbst wenn keine Komplikationen auftreten, ist eine Tauchtiefe von 340 m im weichen Taucheranzug eine völlig neue Situation. Mit einem Schlauchtauchergerät ist diese Tiefe nicht mehr wirtschaftlich zu bestreiten, weil die erforderliche Menge Kunstluft viel zu teuer würde. Mit einem Regenerationsgerät ist der erforderliche Sauerstoffgehalt, der zwischen 0,6% und 6% liegen darf, auch nur verhältnismäßig schwierig einzuhalten. Die Regenerationspatrone zur Absorption der Kohlensäure muß einen Kohlensäuregehalt im Helium-Sauerstoff-Gemisch von weniger als 0,06% garantieren. Auch das dürfte keine einfache Aufgabe sein.

6. Wasserstoff

Helium allgemein in der Taucherei zu verwenden, würde in Europa sehr kostspielig sein. Um aber die physiologischen Nachteile des Stickstoffes bei Tieftauchen in 50 m und mehr zu vermeiden, wurde vorgeschlagen, statt Helium den billigen und noch leichteren Wasserstoff zu verwenden.

Umfangreiche Vorarbeiten und praktische Tauchungen wurden von dem schwedischen Technologen Arne Zetterström durchgeführt*. Er erreichte Tauchtiefen bis 160 m.

*) Teknisk Tidskrift vom 17. Februar 1945

Zu beachten ist, daß ein Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch erst dann nicht mehr explosibel ist, wenn der Sauerstoffgehalt unter 4% bleibt. 4% Sauerstoff erreichen aber den für die Atmung erforderlichen Teildruck erst in einer Tauchtiefe von 40 m. Bis dahin kann also nur mit normaler Luft getaucht werden. Zetterström entwickelte eine Methode, um mit Wasserstoff-Sauerstoffgemischen gefahrlos tauchen zu können. Dazu brauchte er ein besonderes Spülluftgemisch bestehend aus 96% Stickstoff und 4% Sauerstoff.

Der Taucher atmete beim Abstieg in 40 m Tiefe hinab Luft mit normaler Zusammensetzung. In 40 m Tiefe spülte er sein Gerät durch, mit der Kunstluft 96% Stickstoff und 4% Sauerstoff, um den Sauerstoffgehalt von 21% auf 4% herabzubringen. Dann erst wurde auf die eigentliche Taucherluft umgeschaltet und der Stickstoffanteil ausgespült, so daß nur noch 96% Wasserstoff mit 4% Sauerstoff im Gerät verblieben.

Mit diesem Kunstluftgemisch wurde in 110 m Tiefe schwere und komplizierte Arbeit geleistet. Der Taucher hatte einen sehr geringen Atemwiderstand, da seine Atemluft infolge des hohen Wasserstoffanteiles in dieser Tiefe nur ein Gewicht aufwies wie normale Luft in ~ 5 m Tiefe.

Beim Auftauchen müssen selbstverständlich auch Austauschzeiten eingehalten werden, die aber vermutlich geringer sind als beim Tauchen mit normaler Luft. In der Tiefe von 40 m muß jedoch wieder auf einen höheren Sauerstoffgehalt umgeschaltet werden, da sonst die Gefahr des Sauerstoffmangels für den Taucher besteht. Mit der Stickstoff-Sauerstoff-Kunstluft muß zunächst der Wasserstoff aus dem Gerät herausgespült werden. Erst dann wird auf normale Luft umgeschaltet.

Die Wasserstoff-Methode ist physiologisch sehr interessant. In der Praxis hat sie sich bisher nicht bewährt. Es dürfte nicht einfach sein, bei Verwendung von 3 verschiedenen Taucherluft-Arten die Luftversorgung und das ausreichende Ausspülen des Gerätes so durchzuführen, daß nicht doch irgendwann ein zündfähiges Gemisch entsteht. Auch weiß man nicht, ob das Umschalten von einer Luftart auf die andere irgendwelche Nachteile für den Organismus bringt. Wenn auch Zündungen im Gerät z. B. durch das stromgespeiste Telefon vermieden werden können, indem batterie lose Telefone verwendet werden, so bleiben bei der Handhabung der gesamten Anlage noch Unfallmöglichkeiten, die die Wasserstoffmethode zunächst als noch nicht sicher genug kennzeichnen.

C. DER ABSTIEG

1. Allgemeines

Vielleicht sind die „Ohrenscherzen“ der Grund, daß noch heute, nachdem das Wesen des Tauchens ziemlich geklärt ist, für viele Taucher und Druckluftarbeiter die Vorschrift besteht, *langsam* unter Druck zu gehen, während doch theoretisch und praktisch für den *gesunden* Taucher durchaus kein Grund dagegen vorliegt, so schnell wie nur irgend möglich unter Druck zu gehen, also auch so schnell wie möglich die größte Tauchtiefe aufzusuchen, in der gearbeitet werden soll. Die einzige Einschränkung, die verbietet, sich schnell wie ein Stein hinabgleiten zu lassen, ist dadurch gegeben, daß man nicht wissen kann, ob man gesund ist, ob die Ohrverbindung zum Rachen frei ist. Die Regel für das Unterdrukgehen im Caisson oder für das Hinabtauchen lautet also: *Der Taucher soll so schnell hinabgehen, wie es der Druckausgleich zum Ohr irgend zuläßt*. Tatsächlich lassen sich die Perl- und Schwammfischer wie ein Stein zum Meeresboden hinunterfallen. Der Taucher *Damant* erreichte 62 Meter Tiefe in zwei Minuten. Jede andere Taucherregel für den Abstieg bedeutet Zeitvergeudung, wie folgende Überlegung zeigt:

Die Tauchtiefe betrage 40 Meter, die Aufenthaltszeit am Grund betrage 90 Minuten, in welcher Zeit nahezu eine völlige Stickstoffsättigung eingetreten sei. In diesem Falle benötigt der Taucher 108 Minuten zum Austausch. Braucht er zum Abstieg nach Tabelle I nur zwei Minuten gegenüber 40 Minuten nach Tabelle II, so erspart er an Gesamt-Tauchzeit 38 Minuten. Dies gilt dann auch für jeden Aufenthalt am Grund, länger als 90 Minuten. Eine noch größere Zeitersparnis ergibt sich nach Tabelle III und IV, wenn der Aufenthalt am Grund kürzer ist, so daß keine völlige N_2 -Sättigung eintritt. Im Falle langsamen Abstiegs (1 m/min) hat man dann aber die Hälfte dieser Abstiegszeit dem Aufenthalt am Grunde hinzuzurechnen, so daß eine höhere Sättigung eintritt, die langsameren Aufstieg bedingt.

	I.	II.	III.	IV.
Abstieg	2 min	40 min	2 min	40 min
Aufenthalt in 40 m Tiefe .	90 min	90 min	45 min	45 min
Austauschzeit	108 min	108 min	63 min	90 min
Gesamt-Tauchzeit	200 min	238 min	110 min	175 min

Die Abstiegs geschwindigkeit des Schlauchtauchers ist aber noch abhängig von der Arbeit der Pumpenmannschaft. Da die im Anzug befindliche Luftmenge während des Abstiegs gleiches Volumen halten muß, um gleichbleibenden Auftrieb zu gewähren, so muß der durch den steigenden Wasserdruck eintretenden Volumenverminderung durch erhöhten Luftzufluß entgegengewirkt werden. Arbeiten die Pumpenleute zu langsam, so kann auch der Taucher nur langsam absteigen, will er sich nicht der Gefahr des Absturzes aussetzen.

Der am Grundtau hängende Taucher soll seinen Auftrieb auch während des Aufstiegs so einstellen, daß er nur wenige Kilogramm Untertrieb hat. Ist er zu leicht, so läuft er Gefahr, plötzlich aufzuschwimmen, er muß dann sofort wieder versenkt werden. Ist er zu schwer, und ist zufällig sein Signalgast nicht in guter Fühlung mit ihm, so kann er abstürzen. Die Folgeerscheinungen plötzlichen Hochtreibens betreffen die Stickstoffgefahr. Gegen unvorhergesehenen Absturz in größere Tiefe (über 5 Meter) hat man Sicherheitsmaßregeln erdacht, deren eine das Preßluft-Brustgewicht betrifft, während eine andere die Ursache besser erfaßt durch selbsttätige Vergrößerung der Luftzufuhr zum Schlauchtauchergerät (Dräger-Taucher-Automat).

2. Absturzerkrankung

a) Schröpfkopfwirkung des Helms

Erstmalig erwähnt das Drägerwerk die Absturzgefahr im Patent Nr. 276965, das das Preßluftbrustgewicht betrifft. Dieses Brustgewicht besteht nicht mehr wie bisher nur aus Blei, sondern aus einem Paar Stahlflaschen, die mit Preßluft unter 150 at Druck gefüllt sind. Stürzt der Taucher beispielsweise von der Oberfläche ab in zehn Meter Tiefe, so wird der Luftinhalt seines Anzuges um die Hälfte verkleinert. Hatte er bereits an der Oberfläche nur wenig Luft im Anzug, so kann die ganze Anzugblase während des Absturzes in den Helm hineingetrieben werden. Von diesem Moment ab besteht die eigentliche Gefahr für das Leben des Tauchers. Es steht nämlich jetzt jeder Teil des Körpers unter genau dem der Tiefe entsprechenden Wasserdruck. Fällt der Taucher noch tiefer, so schließt sich der Anzug seinem Körper fester an, nicht aber der Helm am Kopfe, da er starr ist. Der Kopf steht dann unter *geringerem* Druck als der übrige Körper. Die Folge ist, daß alle Flüssigkeit der elastischen Gefäße des Körpers zum Kopf gepreßt wird und dieser „Blutandrang zum Kopf“ das Ende des Tauchers bedeutet. Man hat es hier also mit einer Art Schröpfkopfwirkung zu tun. Der Blutabfluß von der Lunge ist behindert, die Brustmuskeln stehen unter dem Wasserdruck, das Herz erlahmt unter zu starkem Blutandrang. Leider kennt die Geschichte der Taucherei einige derartige Fälle.

b) Erscheinungen der Absturzerkrankung

In der deutschen Marine wurde erstmalig die Absturzerkrankung wie folgt definiert:

„Auf Grund des Sektionsprotokolles wurden folgende Feststellungen gemacht, die für einen reinen Erstickungstod nicht typisch sind:

1. Eine besonders in der oberen Körperhälfte hochgradige Dunsung und Blauverfärbung,
2. eine sehr starke Durchblutung aller Halsorgane, besonders von Gaumen und Zunge, die Zungenspitze zwischen den Zahnreihen, die Schilddrüsenlappen sehr blutreich,
3. umschriebene dunkelrote Blutungen im Lungengewebe, auffallend starker Blutreichtum der Lungen, die 760 und 660 g wiegen,
4. Erweiterung der rechten Herzkammer, Blutüberfüllung der großen Körpervene und Rückstauung des Blutes in die Organe.

Diese Erscheinungen sprechen dafür, daß wir es mit dem sogenannten Absturztod der Taucher zu tun haben.“

Prof. *Wiethold**) sagt über den Absturz der Taucher: „Taucher, die längere Zeit unter Wasser arbeiteten und dann erst abstürzten, sind häufiger dem Tod erlegen als andere, die sofort nach Beginn des Tauchens abstürzten.“ — M. E. ist der Grund darin zu suchen, daß zu Beginn des Tauchens die Decksleute am Schlauch und an der Leine besser aufpassen, als wenn längere Zeit vergangen ist, so daß der Absturz eines Tauchers durch den Signalmann in ersterem Falle sofort gemerkt und gemildert werden kann. Im allgemeinen ist nämlich der Absturz von der Oberfläche aus bedeutend gefährlicher als in größeren Tiefen.

Und weiter sagt *Wiethold*: „Natürlich ist es nicht richtig, wenn ein abgestürzter Taucher von seinen Arbeitskameraden sofort heraufgeholt wird, jedenfalls muß der Taucher, wenn irgend möglich, schnellstens wieder zur Dekompression bis zu einer bestimmten Tiefe ins Wasser hinabgelassen, oder in die Druckkammer gebracht werden. Nur wenn der Absturz im Bereiche von 0 bis 13 m erfolgte, ist es gestattet, den abgestürzten Taucher ohne weitere Druckbehandlung sofort herauszuholen.“

Wir klären in folgenden kurzen Abschnitten die physikalischen Ursachen für die Absturzerkrankung bei Nackttauchern, Anzugtauchern und Mundstücktauchern (Tauchretter). Es handelt sich immer um das Verhältnis zwischen der flexibel beweglichen und der starr umschlossenen Luftmenge im menschlichen Körper oder im Tauchergerät. Festgelegt wird die zulässige Absturztiefe in Abhängigkeit von der Aufenthaltstiefe.

*) F. *Wiethold* „Über den Absturztod der Taucher“ D. Zt. f. d. gesamte gerichtliche Medizin Bd. 26, 1—3.

3. Grenztiefen, abhängig vom elastischen Luftraum

a) Grenztiefe für Nackttaucher

Perlfischer und Sporttaucher geben als Grenztiefe, die sie ohne Gerät erreichen können, 18 bis 30 m an. Nehmen wir an, daß die Begründung dafür im Zusammenpressen des Brustkorbes durch den Wasserdruck zu suchen ist, so kommen wir zu folgender Überlegung:

Zusammendrückbar ist nur die Lunge im Ausmaß von etwa $V_L = 3$ bis 5 Liter, da der Taucher seine Lungen vor dem Abstieg mit dieser Luftmenge auffüllt. Nichtzusammendrückbar ist die sogenannte Residualluft der Lunge und die in Bronchien, Luftröhre, Kehlkopf, Rachen-, Mund- und Nasenhöhle befindliche Luftmenge, die $V_R = 1,67$ l betragen mag. Die Grenztiefe h ist erreicht, wenn V_L restlos in die Räume für V_R hineingepreßt ist. Auf der Wasseroberfläche lastet ein Druck von 10 m WS. Es ergibt sich dann aus $10 (V_L + V_R) = (h + 10) V_R$

$$h = \frac{10 \cdot V_L}{V_R}$$

Das ergibt für 3 l Vitalkapazität der Lunge 18 m Grenztiefe
und für 5 l Vitalkapazität der Lunge 30 m Grenztiefe.

Geht der Taucher tiefer hinab, so wird Blut in die Lunge gepreßt, das Trommelfell wird nach innen gedrückt und platzt.

Es ergibt sich ein einfaches Mittel für den Perl- und Schwammtaucher, seine Grenztiefe zu vergrößern, indem er einen kleinen *Luftsack* vor Mund und Nase nimmt. So kann

mit einem 2-l-Luftsack der 3-l-Mann 30 m, der 5-l-Mann 42 m,

mit einem 5-l-Luftsack der 3-l-Mann 48 m, der 5-l-Mann 60 m,

mit einem 10-l-Luftsack der 3-l-Mann 78 m, der 5-l-Mann 90 m

tauchen.

b) Taucher im offenen Helm

Die Gefahr der Absturzerkrankung besteht nicht, stattdessen kann der Taucher ertrinken, wenn sich die Luftblase unter dem Helm infolge schnellen Abstiegs bis über die Nase verkleinert und der Luftnachschub zu langsam erfolgt.

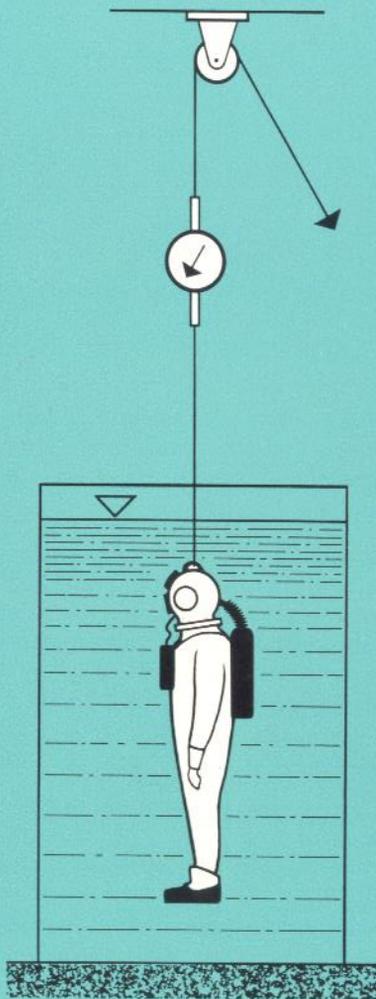
c) Taucher im geschlossenen Anzug

Der Gefahr der Absturzerkrankung muß besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Es gibt für jede Gerätetype eine bestimmte zulässige Absturztiefe h_z , deren Überschreitungsmöglichkeit vor dem Tauchen in

Betracht zu ziehen ist. Der Tauchleiter sollte immer wissen, ob schon die Tauchtiefe an sich oder die Unebenheit und Zerklüftung des Bodens, der Arbeitsplatz in Nähe einer abschüssigen Stelle, z. B. auf einem Wrack, die Möglichkeit gefährlichen Absturzes bieten. Die Ermittlung der zulässigen Absturztiefe geschieht wie folgt:

Den im Taucheranzug bis zum Helmrand reichenden Anteil der veränderlichen Luftmenge in der Taucherrüstung bezeichnen wir mit v_A . Er wird durch Wiegen des Tauchers, der für kurze Zeit alle Luft aus dem Anzug entlassen hat, festgestellt (Abb. 10). Das dadurch erhaltene Gewicht in kg gibt dann direkt an, wieviel Liter Luft — vom Druck der betreffenden Tiefe — der Taucher benötigt, um sich *schwebend* im Wasser halten zu können. Dieses v_A ist dann also die größtmögliche Luftmenge, die der Taucher anwenden kann, wenn er frei steht, sich nicht irgendwie festhält. Für das Schlauchgerät mit großem Helm wurden 41,4 Liter festgestellt. Da der am Grund arbeitende Taucher stets schwankende Luftmengen im Anzug hält, je nach Arbeits- und Stromverhältnissen, wurden die üblichen Luftmengen auf ähnliche Weise „gewogen“.

Abb. 10 Feststellen des Gewichtes des Tauchers unter Wasser



Es ergab sich zunächst als geringste Luftmenge, bei der die Atmung noch ungestört ist, 5 Liter Anzugluft. Wir geben in folgender Zusammenstellung auch die ungefähr gebräuchlichen Luftmengen bei „normaler“ Arbeit an, die sich entsprechend dem Gewicht und Volumen der Rüstung etwas unterscheiden.

T-Gerätetype	Anzug-Luftvolumen Liter (3 m WS)			Absol. Gewicht einschl. 80 kg für den Taucher kg	Größtes Volumen auf- geblasen l
	schwebend	normal	wenig		
Schlauch-T-Gerät mit großem Helm . .	41,5	16	5	173	217
Schlauch-T-Gerät mit kleinem Helm . .	40	15	5	171	216
Schlauchlos DM 40 mit großem Helm . .	42,5	17	5	187	233

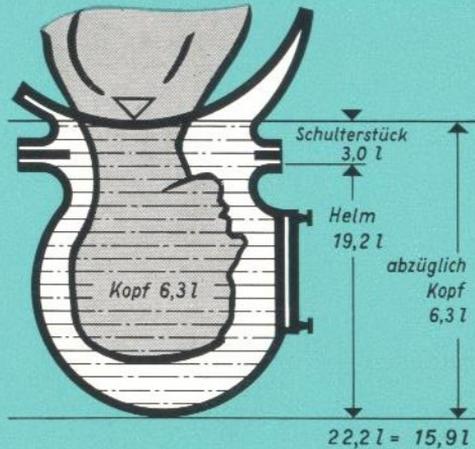
Die Spalte „wenig“ Luft gibt für jedes Gerät 5 Liter an, weil diese Luftmenge von der Atemluftfüllung der Lungen abhängig ist. Weniger als 5 Liter Anzugluft wird kein vernünftiger Taucher halten.

Als zweites ist die *starr umschlossene Luftmenge* v_H , die mit der Anzugluft in Verbindung steht, vor allem also die Helmluft, abzüglich Kopfvolumen des Tauchers, und für schlauchlose Geräte auch der Tornisterinhalt festzustellen. Das Innenvolumen des Taucherhelms wurde mit Wasser ausgemessen, in das der Taucher Kopf und Hals hineinsteckte (Abb. 11).

Es ergab sich:

T-Gerätetype	Helm-Luftvolumen abzüglich 6,3 l für Kopf des Tauchers
Schlauch-T-Gerät mit großem Helm + Halsteil .	15,9 Liter
Schlauch-T-Gerät mit kleinem Helm + Halsteil .	14,6 Liter
Schlauchloses T-Gerät DM 40 mit großem Helm + Halsteil	21,6 Liter

Abb. 11
Ausmessen
des Helmvolumens
mit Wasser



Und nun sind wir in der Lage, die Berechnung der *zulässigen Absturztiefe* h_z durchzuführen. Nach Mariotte gilt, wenn v_A = Anzugluft, v_H = Helmluft, h_1 = Tiefe, in der sich der Taucher aufhält, h_2 = Tiefe, zu der er abstürzt, h_z = zulässige Absturztiefe, 10 = Luftdruck in m Wassersäule (Abb. 304) ist:

$$(v_H + v_A) (h_1 + 10) = v_H (h_2 + 10)$$

$$h_z = h_2 - h_1$$

$$\text{allgemein } h_z = \frac{v_A}{v_H} (h_1 + 10)$$

und für $h_1 = 0$, also Absturz von der Oberfläche:

$$h_z = \frac{10 \cdot v_A}{v_H}$$

Setzt man die obengenannten Werte ein, so ergibt sich als

Absturztiefe h_z bei Absturz aus $h_1 = 0$ m (Oberfläche)

T-Gerättype	schwebend	normal	wenig Luft
Schlauch-T-Gerät mit großem Helm	26	10	3 Meter
Schlauch-T-Gerät mit kleinem Helm	27	10	3 Meter
Schlauchloses T-Gerät DM 40 mit großem Helm	20	8	2 Meter

Die zulässige Absturztiefe ist um so größer:

je größer die im Anzug gehaltene Luftmenge ist,
 je geringer das Helmvolumen ist,
 je geringer das Tornistervolumen bei schlauchlosen Geräten ist,
 je größer das absolute Gewicht der Rüstung ist.

Es ist noch zu prüfen, wie die Verhältnisse liegen bei einem Absturz aus verschiedenen Tiefen h_1 bezüglich der Werte h_z untereinander und für verschiedene Geräte. Wir untersuchen nur die Verhältnisse für normale und geringe Luftmengen.

Zulässige Absturztiefe von h_1 Meter
 normale Luftmenge im Anzug

Aufenthaltstiefe h_1 m	Schlauch-T-Gerät		Schlauchloses T-Gerät DM 40 mit großem Helm
	mit großem Helm	mit kleinem Helm	
0	10	10	8
10	20	20	16
20	30	31	24
30	40	41	32
50	60	62	47
100	111	113	87

wenig Luft im Anzug (5 l)

0	3	3	2
10	6	7	5
20	9	10	7
30	13	14	9
50	19	21	14
100	35	38	26

Die zulässige Absturztiefe ist um so größer:

je größer die Aufenthaltstiefe h_1 des Tauchers ist.

h_z wächst direkt proportional der Aufenthaltstiefe h_1 (Abb. 12).

Geringe Unterschiede im Helmvolumen (1,5 l) machen nichts aus.

Der Tornister-Luftinhalt bei schlauchlosen Geräten sollte möglichst gering sein.

Die Wichtigkeit der Absturzfrage geht aus den recht geringen zulässigen Absturztiefen für das Tauchen in seichtem Wasser hervor. Einem aus dem Wasser gekommenen Taucher liegt der Anzug prall an, da bei Öffnen des

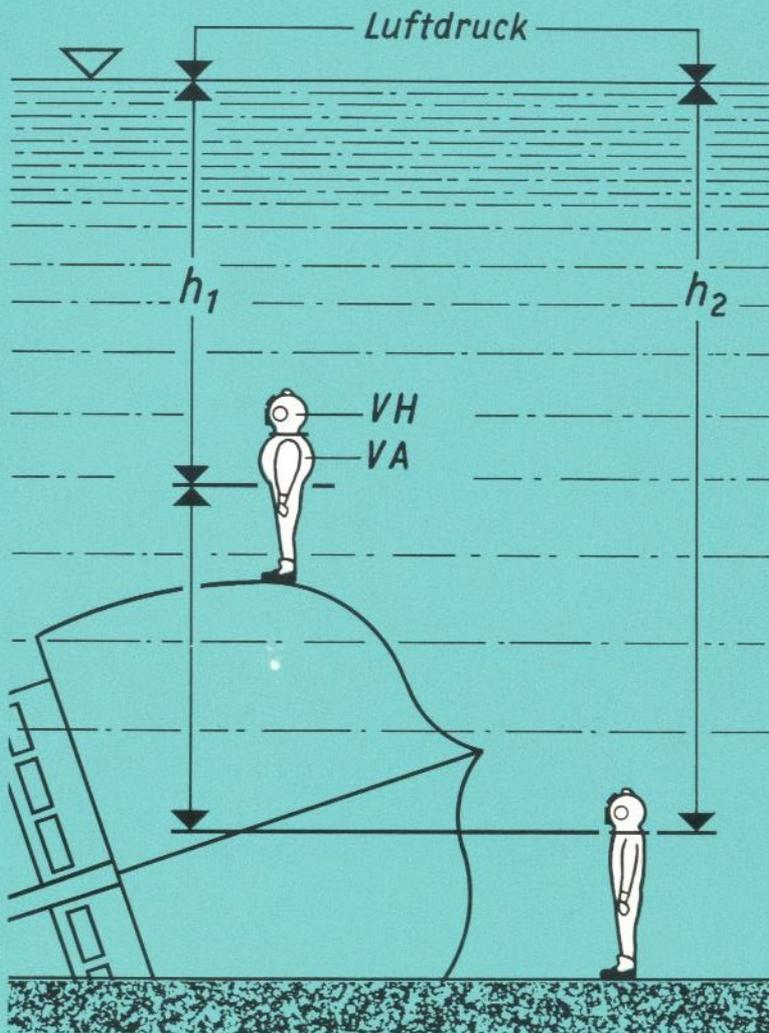


Abb. 12 Zulässige Absturztiefe des Tauchers

Helms fast alle Anzugluft entweicht, so daß der Taucher, wenn er sofort wieder hinabgeht, sehr wenig Luft im Anzug hat. Stürzt er jetzt ab, so genügen wenige Meter Wasserdruck, ihn zu zerdrücken. Diese Situation ist also die gefährlichste.

Es gibt zwar technische Einrichtungen, um dem Taucher bei jeder Druckerhöhung im Anzug sofort selbsttätig die erforderliche Zusatzluft zuzuführen (selbsttätiges Auftriebsregelventil), der Taucher liebt jedoch derartige Komplikationen an seiner Rüstung nicht. Er mag aber aus diesen Erörterungen erkennen, wie wichtig die Absturzfrage ist. Unglücksfälle — „Blaukommen“ oder Tod —, die ihre Ursache im Absturz haben, kommen leider verhältnismäßig häufig vor.

Der Träger-Taucherautomat liefert beim schnellen Abstieg selbsttätig die zum Auffüllen der Luftblase erforderliche Luftmenge in so kurzer Zeit, daß ein schnelles Absteigen des Tauchers nicht mehr die gefürchtete Absturzerkrankung oder gar den Absturztod bedeutet.

4. Hochtreiben des Tauchers

a) Tauchen im Strom

Der Taucher soll am Grundtau oder auf einer Leiter hochkommen. Durch Unvorsichtigkeit aber, besonders bei Arbeiten in schwebendem Zustand, kann sich bei stark gedrosseltem Helmventil zu viel Luft im Anzug ansammeln, und der Taucher treibt hoch bis zur Oberfläche. Es gibt viele Taucher, die behaupten, daß bei Strom von beiläufig 1 sm/st nicht zu tauchen sei, besonders, wenn es sich um größere Tiefen handelt. Mutige Taucher, die es verstehen, ihren Auftrieb sorgfältigst zu regeln, um nicht durch den Stromdruck unvermutet hochgetrieben zu werden, tauchen noch in 2¹/₂-sm-Strom. Jedenfalls sei auf die Gefahr des Hochtreibens durch Stromdruck hingewiesen, die um so größer ist, je mehr Leinen und Schläuche zum Taucher hinabreichen. Als Vorbeugungsmittel gegen das zufällige Hochtreiben im Strom nennen wir die Träger-Taucher-Grundrolle, durch die der Stromdruck gegen Schlauch oder Signalleine in eine horizontale Komponente umgewandelt wird.

Es muß beachtet werden, daß der Helmtaucher 150 bis 200 Liter Wasser verdrängt, also dem Strom eine bedeutend größere Fläche darbietet als der Nackttaucher, der nur etwa 75 Liter Volumen hat. Der voll aufgeblasene Taucher — an der Oberfläche schwimmend — hat etwa 200 Liter Volumen. Bei einem Strom von mehr als 1¹/₂ kn Geschwindigkeit (2,8 km/st) soll der Taucher größere Gewichte oder ein Extragewicht in Gestalt des *Gewichtgürtels* anlegen.

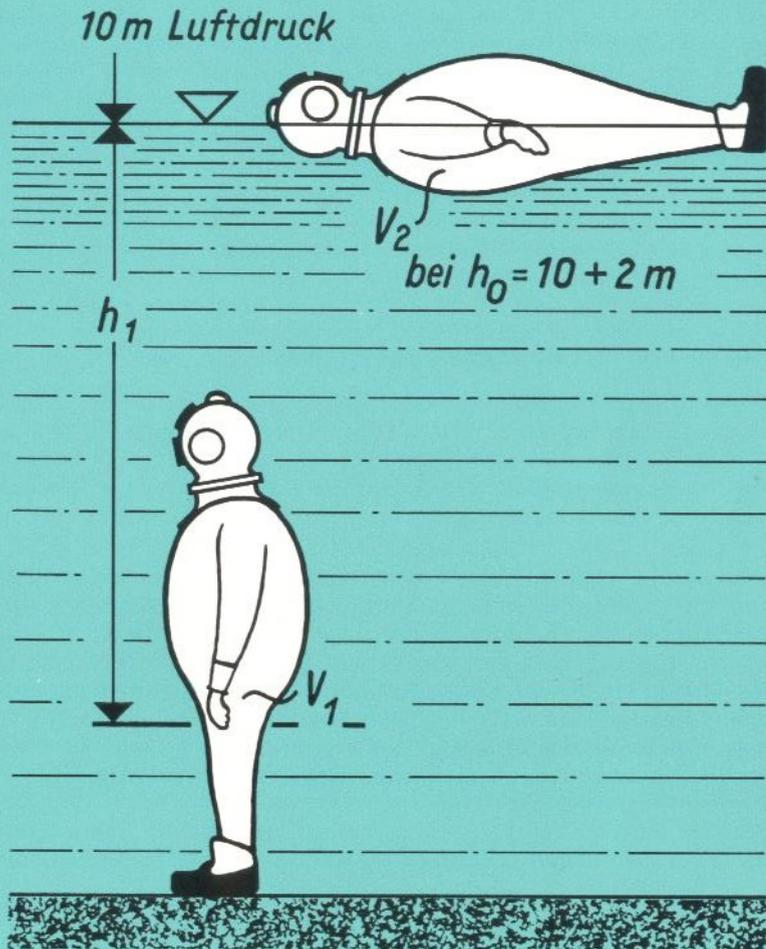


Abb. 13 Zulässige Tiefe für das Hochtreiben

Es kann z. B. vorkommen, daß die Signalleine oder der Luftzuführungsschlauch am Grund verhaken, der Taucher wird irgendwo zwischen Grund und Oberfläche festgehalten. Ein geschickter Taucher kann sich dann unter Auslassen von Luft an der Leine wieder bis zum Grund hinunterhanteln, Schlauch oder Leine klarieren und weiterarbeiten. In vielen Fällen, insbesondere in großen Tiefen, muß ein zweiter Taucher helfen. Der hochgetriebene Taucher wird, wenn er an die Oberfläche gekommen ist, entweder sofort in die Druckkammer gebracht, oder er muß zum Arbeitsort am Grund wieder hinabgehen. Zu prüfen ist in jedem Falle erst, ob der Taucher unverletzt und die Rüstung in Ordnung ist.

Bei Hochtreiben des Tauchers expandiert die Luft im Anzug, und der Innendruck kann so groß werden, daß der Anzug platzt und für den Taucher die Gefahr des Ertrinkens besteht.

b) Zulässige Tiefe für gefahrloses Hochtreiben

Es gibt nun für jede Tauchergerätetype eine Mindesttiefe, aus der beim Hochtreiben der Anzug noch nicht platzt. Diese Tiefe läßt sich leicht bestimmen, sie sollte für jede Gerätetype bekannt sein, damit Taucher und Bedienungspersonal immer wissen, wann der Gefahr des Hochtreibens besondere Beachtung geschenkt werden muß.

Wir nehmen den ungünstigsten Fall an, daß das Helmventil fest sitzt, also während des Hochtreibens keine Luft entläßt. Das Hochtreiben beginnt mit dem Augenblick, in welchem der Taucher schwebt, seine Wasserverdrängung also gleich dem Gewicht von Rüstung plus Taucher ist. Die gefahrlose Grenztiefe h_1 für das Hochtreiben bestimmt sich dann aus der Bedingung, daß bei Erreichen der Oberfläche der Druck im Anzug 2 m WS größer sein darf als der atmosphärische Druck, also 1,2 ata. 0,2 at Überdruck soll ein nicht zu stark verbrauchter Anzug aushalten (Abb. 13).

$$v_1 (h_1 + 10) = v_2 \cdot 12$$

$$h_1 = \frac{12 \cdot v_2}{v_1} - 10$$

v_1 , das Volumen der expansionsfähigen Luft in der im Wasser schwebenden Rüstung, setzt sich zusammen aus der Luftmenge im Helm (und evtl. Rückenapparat) und im Anzug einschließlich der im Wollzeug von Armen und Beinen befindlichen Luft. Es läßt sich z. T. ausmessen, z. T. aus den Gewichten von Rüstung und Taucher berechnen.

v_2 , das Volumen der Rüstungsluft nach dem Hochtreiben, setzt sich zusammen aus der Luftmenge im Helm (evtl. einschließlich Rückenapparat) und der Luft des voll aufgeblasenen Anzugs, abzüglich der Luftverdrängung des Taucherkörpers. Für drei Gerätetypen und zwei Anzüge verschiedener Größe ergeben sich folgende Größen für v_1 und v_2 :

	für ein	Dräger Schlauchgerät	Schlauchl. DM 20 und DM 40
	$v_1 =$	70	75
Normaler Anzug	$v_2 =$	113	119
Großer Anzug	$v_2 =$	122	128

Der Anzug Größe 2 (normal) faßt bei 10 cm WS etwa 171 l Luft. Hinzu kommt für das Schlauchgerät 22,2 l Helmluft, so daß nach Abzug von 80 l Volumen des Taucherkörpers für v_2 rd. 113 l Luft verbleiben. Der große Anzug faßt 180 l Luft, wodurch v_2 um 9 l größer wird.

Für h_1 , der Grenztiefe für gefahrloses Hochtreiben, ergeben sich nun folgende Werte:

Gerät	für Anzug	
	Größe 2 (normal)	Größe 1 (groß)
Schlauchgerät	$h_1 =$ 9,4 m	10,8 m
DM 20 und DM 40	$h_1 =$ 9,0 m	10,5 m

Alte brüchige Anzüge werden beim Hochtreiben aus den genannten Tiefen platzen. Die damit verbundene Gefahr für den Taucher verringert sich, wenn die angegebenen Tiefen nicht überschritten werden, da der größte Druck immer nur dicht unter der Oberfläche eintritt, der Taucher also leicht geborgen werden kann. Werden die angegebenen Tiefen aber überschritten, so platzt der Anzug unter Umständen viele Meter unter der Oberfläche, und der Taucher kann ertrinken, wenn der Leinenführer nicht aufpaßt.

Die Grenztiefe h_1 wird um so größer,
 je größer der Taucheranzug,
 je größer die Dehnbarkeit und Reißfestigkeit des Anzugs,
 je kleiner das Rüstungsgewicht,
 je kleiner der Körper des Tauchers ist.

Diese Bedingungen gestatten zugleich die Anwendung verhältnismäßig kleiner Luftmengen im Anzug. Günstige Verhältnisse bestehen also für Taucher von *kleinem Wuchs*, in *leichter Rüstung*, mit *dehnbarem Gummian-*

zug. Die Beschaffenheit eines Ventils ist sehr ausschlaggebend für die Sicherheit des Tauchers. Deshalb müssen Ventile, die vollständiges Schließen erlauben, verboten werden. Nimmt man an, das Helmventil wirke in *jeder Stellung* noch als Überdruckventil, so werden die angegebenen Grenztiefen viel günstiger. Als Sicherheitsventil wirken auch unter Umständen die Anzugmanschetten. Es ist z. B. ungerechtfertigt, wenn ein Taucher sich beim Anzughersteller aus folgendem Grunde beschwert: Er war aus 23 m Tiefe hochgetrieben, wodurch ihm unterwegs die Manschette eines Ärmels über die Handrutsche und Anzugluft ausließ. Wäre das nicht geschehen, so lebte der Mann heute wahrscheinlich nicht mehr.

Taucheranzüge mit fest angesetzten Handschuhen entbehren der Funktion eines Sicherheitsventils.

Für offene Taucherjacken, Taucherhelme ohne Anzug und Tauchretter mit Überdruckventil besteht die Gefahr des Platzens beim Hochtreiben nicht.

D. LUFTBEDARF DES TAUCHERS

Bestimmend für die dem Taucher zuzuführende Luftmenge ist die von ihm verlangte Arbeitsleistung und die Wassertiefe, in der er sich befindet. Die Aufrechterhaltung der Arbeitsfähigkeit bedingt die Zufuhr von Sauerstoff und das Ausscheiden der von den Lungen abgegebenen Kohlensäure. Bevor bei Zufuhr atmosphärischer Luft, die rd. 21 % Sauerstoff enthält, Sauerstoffmangel sich bemerkbar machen kann, tritt Kohlensäureüberladung ein.

1. Einfluß der Arbeitsleistung

Die Arbeitsfähigkeit des Tauchers ist abhängig vom Kohlensäuregehalt der Luft, in der er atmet. Je mehr Arbeit der Taucher leistet, um so mehr Kohlensäure atmet er aus, um so größer muß die den Helm durchspülende Frischluftmenge sein, damit der im Helm verbleibende CO_2 - (Kohlensäure) Rest kein unzulässiges Maß erreicht.

Bei Einatmung entnimmt der Taucher einen Teil seines Luftbedarfes dem Helm und dem Atemsack bzw. der Luftblase im Anzug, die einen bestimmten CO_2 -Gehalt hat, und einen anderen Teil dem Frischluftzustrom, der am Gesicht vorbeiströmt und fast keine (nur rd. 0,03%) CO_2 enthält. Bei der Ausatmung gelangt die mit etwa 5% CO_2 angereicherte Ausatemluft in den Helm bzw. die Anzugblase und wird während der Ausatmung nur zu einem geringen Teil direkt wieder hinausgespült. Es findet also in der Helmluft während der Ein- und Ausatmung ein sich immer wiederholendes Spiel von Verarmung und Anreicherung des CO_2 -Gehaltes statt. Wir können uns bei diesen Überlegungen mit einem Mittelwert des CO_2 -Gehaltes in der Helmluft begnügen, der durch den Quotienten $c = b/l$ gegeben ist, wenn b die vom Taucher ausgeatmete CO_2 und l die zugeführte Frischluftmenge ist.

Der Taucher verausgabt bei Ruhe	etwa 0,5 l/min
Der Taucher verausgabt bei leichter Arbeit	etwa 1 l/min
Der Taucher verausgabt bei schwerer Arbeit	etwa 2 l/min
Der Taucher verausgabt bei Notarbeit	etwa 3 l/min

Die angegebenen Zahlen sind natürlich nur als Mittelwerte aufzufassen, da der Begriff des Arbeitsgrades nicht festliegt und individuelle Unterschiede

bestehen. So kann man beispielsweise auch von einem Taucher in Ruhestellung reden, der einem beträchtlichen Strom ausgesetzt ist, dessen produktive Arbeit gleich 0 ist, während seine Muskelarbeit gegen den Strom sehr beträchtlich sein kann, so daß dann seine CO₂-Abgabe wohl das Doppelte des oben angegebenen Wertes ausmacht. Wer über ein gutes Tauchertelefon verfügt, kann oft am mehr oder minder starken Atemgeräusch des Tauchers seinen Arbeitsgrad feststellen.

Der CO₂-Gehalt (c) im Helm und die CO₂-Abgabe (b) des Tauchers sind die Rechnungsgrößen für die Bestimmung der dem Helm zuzuführenden Luftmenge (l). Über den Arbeitsgrad im Verhältnis zur Luftzufuhr zur Aufrechterhaltung der Arbeitsfähigkeit des Tauchers kann man verschiedener Meinung sein.

Bei Aufenthalt im Freien atmet man Luft mit nur 0,03% CO₂-Gehalt. Es könnte als wünschenswert bezeichnet werden, daß der Taucher im Helm auch diese CO₂-arme Luft zur Verfügung hätte. Das würde dann die Zufuhr folgender Luftmengen bedingen:

für c = 0,03% CO ₂ im Helm bei entspr. b für			
Ruhe 0,5	Leichtarbeit 1	Schwerarbeit 2	Notarbeit 3 l/min CO ₂
1 667	3 333	6 667	10 000 l/min

Der Taucher müßte in einem orkanartigen Luftstrom atmen, abgesehen davon, daß es praktisch fast unmöglich ist, dem Taucher diese riesigen Luftmengen zuzuführen.

Erfahrungsgemäß verträgt der ruhende Mensch ohne Beschwerden in 4% CO₂-haltiger Luft etwa zweistündigen Aufenthalt. Je größer aber die Arbeitsleistung ist, um so geringeren CO₂-Gehalt muß die zur Einatmung gelangende Luft haben, wenn gleiche Arbeitsdauer gefordert wird. Wir könnten also für Ruhe 4%, für leichte Arbeit 2%, für Schwerarbeit 1% und für Notarbeit 1/2% CO₂ in der Einatemluft zulassen, immer für die max. Zeit von zwei Stunden Schwerarbeit gerechnet. Notarbeit kann nur kurzzeitig ausgeübt werden. Bei allen Arbeitsbedingungen muß der Taucher so viel Luft erhalten, daß nicht mehr als 2% CO₂ im Helm sind.

Für bewegungsloses Verhalten des Tauchers, also z. B. bei ruhiger Beobachtung, beim Aufstieg und in ruhigem Wasser genügt 25 l/min Luftzufuhr, da dann der CO₂-Gehalt nicht über 2% ansteigen kann — beides auf 0 m Tiefe bezogen. Erfahrungsgemäß kann der Taucher viele Stunden diesen CO₂-Gehalt ertragen, ohne irgendwelche Beschwerden zu spüren.

Der leichte Arbeit verrichtende Taucher, z. B. bei langsamem Umhergehen auf festem Boden, Hantieren mit Tauwerk oder kleinerem Werkzeug bei geringem Strom, bedarf schon der doppelten Luftmenge von 50 l/min, um nur 2% CO₂, auf 0 m Tiefe bezogen, im Helm zu haben. Dieser CO₂-Gehalt gestattet aber doch noch stundenlange leichte Arbeit, ohne daß Beschwerden eintreten.

Unter schwerer Arbeit verstehen wir das Arbeiten im Strom, Sägen, Bohren, Kratzen als Dauerarbeit, das Hantieren mit schweren (massigen) Werkzeugen, z. B. Steinzangen, starken Stahlrossen usw. Dabei produziert der Taucher 2 l/min CO₂. Soll nun auch für diesen Arbeitsgrad 2% CO₂ im Helm zulässig sein, so ergibt sich dafür eine Belüftung mit 100 l/min Frischluft. Ein guter Taucher kann 1 bis 1 1/2 Stunden unter diesen Verhältnissen arbeiten, dann braucht er Erholung. Schwächere Männer ermüden schneller, brauchen also früher Erholung oder müssen mehr als 100 l/min Luft erhalten. (Notfalls vermag ein guter Taucher auch in 4% CO₂ noch 10 bis 20 Minuten lang schwere Arbeit zu leisten.)

Unter Notarbeit verstehen wir lebenswichtige schwere und schnelle Arbeit bei Gefahr, z. B. das Klarieren von Trossen und Tauwerk, in das der Taucher verstrickt ist, Befreiungsarbeit im tiefen Schlick oder auch irgendeine kurzfristige größte Anstrengung. Dabei gibt der Taucher 3 bis 3 1/3 l/min CO₂ ab. Und bei 100 l/min Luftzufuhr steigt dann der CO₂-Gehalt im Helm auf 3%. Dieser hohe CO₂-Gehalt beeinträchtigt die Leistungsfähigkeit des Tauchers derart, daß er nach zehn Minuten eine Pause einlegen muß. In größeren Tiefen bemerkt nun der Taucher eigentümlicherweise nicht rechtzeitig den übermäßigen Kräfteverbrauch, wahrscheinlich infolge des hohen Sauerstoffdruckes. Es ist mehrfach vorgekommen, daß ein Taucher nach längerer Überanstrengung erst an der Oberfläche zusammenbrach und dann monatelang krank war. Darum Vorsicht bei schwerer Arbeit in größeren Tiefen, wenn die Luftzufuhr zu gering ist.

2. Einfluß der Wassertiefe

Der Teildruck eines Gases in einem Gasgemisch ist das Produkt aus dem Volumenanteil dieses Gases und dem Druck des Gasgemisches. 2% CO₂ in der Helmluft ergeben z. B. in 0 m Tiefe (1 ata) den Teildruck $0,02 \times 1 = 0,02$ ata, in 10 m Tiefe (2 ata) den Teildruck $0,02 \times 2 = 0,04$ ata usw. Der CO₂-Teildruck aber ist entscheidend für das Befinden des Tauchers, nicht der volumetrische Anteil! Mit anderen Worten: Wenn in 0 m Tiefe 2% CO₂ zulässig sind, so ist in 10 m Tiefe nur 1% erlaubt, in 20 m Tiefe 0,67% usw., unter sonst gleichen Bedingungen. *Es muß also für die Bedingung gleicher Arbeitsfähigkeit des Tauchers in allen Wassertiefen der CO₂-Teildruck die*

gleiche Größe haben. Wir erweitern also unsere im vorigen Absatz aufgestellte Bedingung, daß der Taucher in 0 m Tiefe max. 2% CO₂-haltige Luft atmen soll, dahin, daß der Taucher in *jeder* Wassertiefe Luft mit max. 0,02 ata CO₂-Teildruck in der Helmluft atmen soll. Daraus ergeben sich folgende Werte (siehe Abb. 14).

Wünscht man ein günstigeres Verhältnis im Helm, so erhöht man die Luftzufuhr. Für nur 0,01 ata CO₂-Teildruck, entsprechend 1% CO₂ in der Helmluft bei 0 m müssen die Luftmengen verdoppelt werden.

Die Wassertiefe bezieht sich auf Süßwasser. Seewasser ist etwas schwerer, erzeugt also größeren Druck und würde eine etwas stärkere Lüftung bedingen.

Die für b angegebenen CO₂-Mengen, die der Taucher in der Minute abgibt, beziehen sich auf 0 m. Sie sind für andere Tiefen durch den absoluten Druck zu dividieren, um das dazugehörige Volumen zu erhalten.

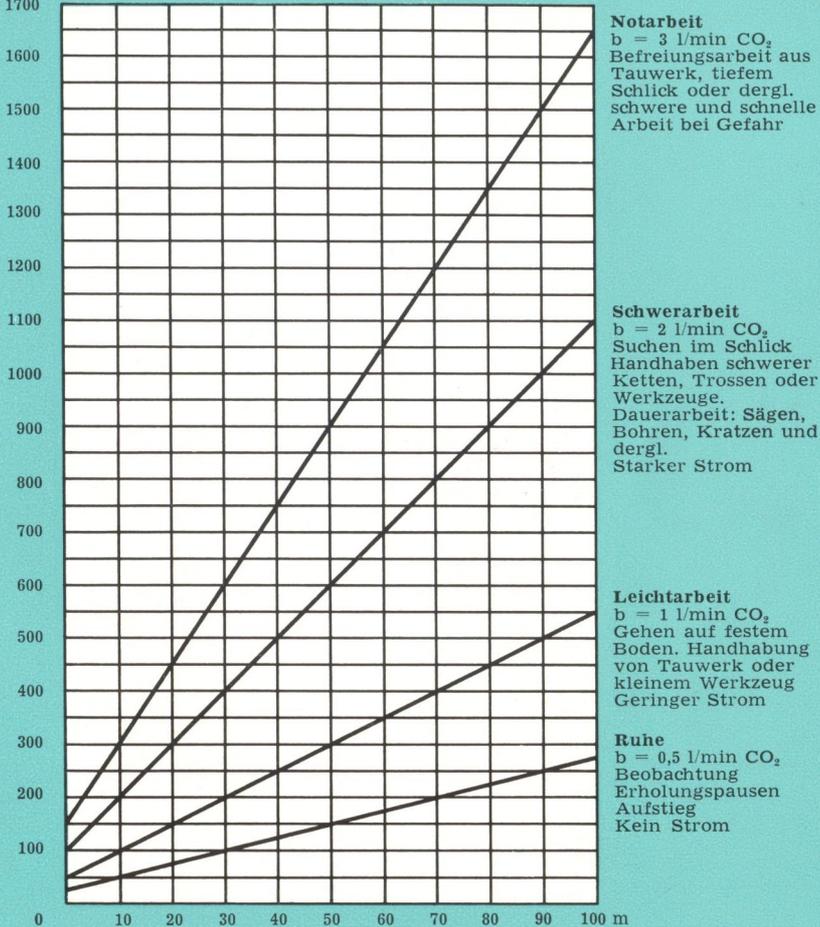
Die Lüftungsmenge ist in l/min von atmosphärischer Spannung angegeben. Das dem Taucher z. B. in 30 m Tiefe tatsächlich zufließende Luftvolumen beträgt anstatt 100 nur $100/4 \text{ ata} = 25 \text{ l/min}$.

Leicht zu merken ist folgende einfache Regel:

Der Taucher braucht	bei Ruhe in 0 m Wassertiefe 25 l/min und für je 10 m größere Tiefe 25 l/min mehr Luft, bei Leichtarbeit in 0 m Wassertiefe 50 l/min und für je 10 m größere Tiefe 50 l/min mehr Luft, bei Schwerarbeit in 0 m Wassertiefe 100 l/min und für je 10 m größere Tiefe 100 l/min mehr Luft, bei Notarbeit in 0 m Wassertiefe 150 l/min und für je 10 m größere Tiefe 150 l/min mehr Luft.
---------------------	---

Der Tauchervormann schätzt die anzunehmende Arbeitsstufe. Die zuzuführende Luftmenge läßt sich bei Handpumpen aus der minutlichen Hubzahl berechnen oder aus einer Tabelle ablesen. Bei Preßluftanlagen läßt sich die Luftmenge am Dräger-Taucherautomaten einstellen.

l/min
von
1 ata



Notarbeit
b = 3 l/min CO₂
Befreiungsarbeit aus
Tauwerk, tiefem
Schlick oder dergl.
schwere und schnelle
Arbeit bei Gefahr

Schwerarbeit
b = 2 l/min CO₂
Suchen im Schlick
Handhaben schwerer
Ketten, Trossen oder
Werkzeuge.
Dauerarbeit: Sägen,
Bohren, Kratzen und
dergl.
Starker Strom

Leichtarbeit
b = 1 l/min CO₂
Gehen auf festem
Boden. Handhabung
von Tauwerk oder
kleinem Werkzeug
Geringer Strom

Ruhe
b = 0,5 l/min CO₂
Beobachtung
Erholungspausen
Aufstieg
Kein Strom

Wassertiefe
1 ata ist 1 at absolut, also der Luftdruck an der Wasseroberfläche (Om Tiefe)
b = 0,5 bis 3 l/min CO₂ bedeutet das vom Taucher abgegebene CO₂-Volumen
bei 1 ata.
0,02 ata CO₂ bedeutet bei 1 ata Luftdruck 2%, bei 2 ata (10 m Tiefe) 1% CO₂-
Gehalt usw.

Abb. 14
Taucherluftbedarf in Tiefen von 0—100 m für verschiedene Arbeitsgrade
bei 0,02 ata CO₂-Teildruck im Helm

TAUCHSCHULE TAUCHSPORTCENTER

ESSLINGEN



TAUCHSCHULE

Haldenstr. 32

(07 11) 31 33 32