



SCHWERPUNKTE DER TAUCHFORSCHUNG

— ENTSTEHUNG KLASSISCHER AUSTAUCH-
TABELLEN Christoph Hofmann

— ENTWICKLUNG NEUER TAUCHFORMEN
BEIM MODERNEN TIEFSEETAUCHEN ZUR
VERMEIDUNG VON KOMPRESSIONS- UND
DEKOMPRESSIENSERSCHEINUNGEN IM
MENSCHLICHEN KÖRPER Christoph Hofmann





ISSN 0178-1669
ISBN 3 925 342-30-3

Walter-Druck GmbH
St. Pöltener Straße 70 · 7000 Stuttgart 30
Telefon (07 11) 85 08 96

Verlag Stephanie Naglschmid

Albrecht Salm
D-72660 Eisingen
Tel 07141 6111145

AS
11.24
netto!

7/87



VORWORT

Viele wissenschaftliche Arbeiten sind meist nur einem kleinen Kreis von Wissenschaftlern zugänglich, obwohl die veröffentlichten Untersuchungen Ergebnisse oder Reports weitreichende Einblicke in besondere Fachgebiete vermitteln. Mit dieser Reihe, die wir mit diesem, mittlerweile in 2. Auflage erschienenen Band 1982 gestartet haben, möchten wir versuchen, solche Arbeiten auch außerhalb der Universitäten und Forschungsinstitute zugänglich zu machen. Wir haben dabei bewußt auf aufwendige Druckweisen verzichtet, um die Reihe trotz geringer Auflagenzahlen so preiswert wie möglich zu gestalten.

Die vorliegende Arbeit wurde an der Universität Regensburg im Institut für Sportwissenschaft als Zulassungsarbeit für das Fach Sport für das Lehramt an Gymnasien angefertigt. Die Arbeit wurde von Herrn Akademischen Direktor Dr. Wolfgang Usinger betreut.

Stuttgart 1982, 1986
Dr. Friedrich Naglschmid

VERLAG STEPHANIE NAGLSCHMID STUTTGART

SCHWERPUNKTE DER TAUCHFORSCHUNG

Wissenschaftliche Beiträge aus allen Bereichen
der Erforschung der Meere und Binnengewässer,
des Tauchens und des Gewässerschutzes

-Entstehung klassischer Austauschtabellen
Christoph Hofmann

-Entwicklung neuer Tauchformen beim modernen
Tiefseetauchen zur Vermeidung von Kompres-
sions- und Dekompressionserscheinungen im
menschlichen Körper. Christoph Hofmann

Albrecht Salm
Dipl. Phys.
Hindenburgstraße 51
D-7300 Esslingen
Tel. 0711/3180548

EDITION FREIZEIT UND WISSEN
Herausgeber: Dr. Friedrich Naglschmid

Christoph Hofmann
über Verlag
Stephanie Naglschmid
D- 7000 Stuttgart 1
Augustenstr.50

Titelgestaltung: Stephanie Naglschmid
Titellitho : Dr. Friedrich Naglschmid

Schwerpunkte Bd 1/1982

2.Auflage 1986 Stuttgart - S. Naglschmid

Geschützte Warennamen (Warenzeichen) werden nicht besonders gekennzeichnet. Aus dem Fehlen solcher Hinweise kann also nicht geschlossen werden, daß es sich um einen freien Warennamen handelt.

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert werden oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

COPYRIGHT 1986 Verlag Stephanie Naglschmid
Augustenstr. 50, D- 7000 Stuttgart.

Printed in Germany. Walter Druck GmbH,
Stuttgart 30.

Die Verfasser sind für den Inhalt ihrer Beiträge selbst verantwortlich.
Für unverlangt eingesandte Manuskripte wird keine Haftung übernommen.

ISSN 0178 - 1669
ISBN 3 925 342 - 30 - 3

Inhaltsverzeichnis

	Seite
0. Vorbemerkung	1
1. Definitionen und Begriffserklärungen	1
1.1. Austauschen	1
1.2. Dekompression	1
1.3. Druckeinheiten	2
1.4. Dekompressionserscheinungen	2
1.5. Synonyme für Dekompressionserscheinungen	4
2. Theorien über die Dekompressionserkrankungen bis HALDANE	5
3. HALDANEs Vorgehen zur Entstehung der Aus- tauchtabeln	9
3.1. Voraussetzungen	9
3.2. Kalkulation des Sättigungsprozesses	11
3.2.1. Berechnung der Kreisläufe bis zur Sättigung	11
3.2.2. Berechnung der Sättigungszeit	14
3.3. Halbwertszeiten und theoretisches Gewebe	15
3.4. Auswahl der Versuchstiere	16
3.5. Verfahren zur Bestimmung der längsten Halb- wertszeit	17
3.6. Entsättigungsvorgang	17
3.6.1. Entstehung von Gasbläschen	18
3.6.2. Gefahren und Schädigungen durch Gasblasen	19
3.6.3. Berechnung der Gewebsspannung bei gleich- mäßiger Dekompression	20
3.6.4. Beschleunigung der Entsättigung	21
3.7. HALDANEs "2:1 - Theorie"	22
3.8. Tauchzeitberechnung und Austauschvorgang mit stufenweiser Dekompression	24
3.9. Überlegungen für kurze Aufenthalte in der Tiefe	27
3.10. Mehrere Tauchgänge hintereinander	30
3.11. Untersuchte Variablen zur Evaluierung der Austauchtabellen	31

	Seite	
3.12.	Die Austauschtabellen von HALDANE	34
3.13.	Zusammengefaßte Ergebnisse aus HALDANES Untersuchungen	40
4.	Entwicklungen und Neuerungen des Tauchens seit HALDANE	43
4.1.	Verbesserungen und Unterschiede der ein- zelnen Austauschtabellen	44
4.2.	Sauerstoffatmung und künstliche Gasge- mische	47
4.2.1.	Toxische Wirkungen des Sauerstoffs	47
4.2.2.	Zusatz von Inertgasen	50
4.2.2.1.	Narkotische Wirkung und Löslichkeit	51
4.2.2.2.	Helium - Sauerstoff Gemische	53
5.	Sättigungstauchen	54
5.1.	Entstehung des Sättigungstauchens	55
5.2.	Unternehmungen und Vorversuche	55
5.3.	Ergebnisse	56
5.4.	Dekompression nach Sättigung	56
5.5.	Zusammenfassung	61
6.	Das Hochdruck - Nervensyndrom (HPNS)	62
6.1.	Erscheinungsformen des HPNS	62
6.2.	Zusammenhang zwischen HPNS und Kompres- sionsgeschwindigkeit	64
6.3.	Narkosetheorie zur Prävention des HPNS	67
6.4.	Zusammenfassung und Ergänzung der Theorie zur Prävention des HPNS	71
7.	Flüssigkeitsatmung	74
7.1.	Vorteile der Flüssigkeitsatmung	75
7.2.	Hindernisse und Probleme der Flüssigkeits- atmung	76
7.2.1.	Kohlendioxidretention und Strömungsge- schwindigkeit	76
7.2.2.	Lungenschäden	77
7.2.3.	Realisierung beim Menschen	77
8.	Gepanzerte Tauchanzüge	78

	Seite
9. Grenzen des Tauchens	80
9.1. Grenzen durch physiologische Druckauswirkungen im Körper	80
9.2. Grenzen aus ökonomischer Sicht	81
10. Zusammenfassung und Schluß	82
Anhang I	85
Anhang II	90
Anhang III	92

I. Teil

Die Entstehung der klassischen Austausch Tabellen nach HAIDANE zur Vermeidung von Dekompressionserscheinungen im menschlichen Körper.

0. Vorbemerkung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich in erster Linie mit der Entstehung der klassischen Austauschtabellen nach HALDANE, gibt einen Überblick über die heute angewandten Methoden des Tiefseetauchens und zeigt, mit welchen Mitteln man versucht, in extreme Tiefen vorzudringen und wieder davon herauszukommen.

1. Definitionen und Begriffserklärungen

Zum besseren Verständnis und aus Gründen der Vereinfachung seien einige oft gebrauchte Begriffe und Definitionen vorweggenommen, die später im Text nicht mehr näher erläutert werden.

1.1. Austauchen

Unter **A u s t a u c h e n** versteht man einen länger-dauernden, meist stufenweisen Auftauchvorgang aus der größten erreichten Tiefe an die Wasseroberfläche zur Vermeidung von charakteristischen Schädigungen oder Krankheiterscheinungen. Bei jeder aus den **A u s - t a u c h t a b e l l e n** zu entnehmenden Stufe (entspricht einer bestimmten Wassertiefe) muß man eine festgelegte Zeit (Austauchzeit) verweilen, bevor man die nächste Etappe empor tauchen darf. Die Gesamtaustauchzeit setzt sich aus den einzelnen Austauschzeiten und der Zeit zur Erreichung der einzelnen Stufen zusammen.

1.2. Dekompression

Unter **D e k o m p r e s s i o n** (abgekürzt: Deko.) versteht man allgemein die Verminderung des Drucks. Beim Tauchen geschieht dies automatisch mit dem Emportauchen zur Oberfläche, bei Druckkammerversuchen durch Ablassen

des komprimierten Atemgases. Die Dekompression kann unterschiedlich schnell erfolgen, je nachdem wie groß die **D e k o m p r e s s i o n s r a t e** (Deko.rate) ist. Diese wird in Einheiten von Zeit pro Druckeinheit oder im reziproken Wert angegeben, z.B. 1ata/20min.

1.3. Druckeinheiten

Obwohl die Berechnung der Austauschzeiten eine exakte Umrechnung von Wassertiefe in Druck erfordert, wird im folgenden zur bequemeren und leichteren Umrechnung die auch von Tauchern benutzte Näherung verwendet.¹⁾ Sie beinhaltet gleichzeitig einen gewissen Sicherheitsfaktor. Eine Atmosphäre (atm) ist der Druck, den eine 10m hohe Wassersäule ausübt und entspricht dem Luftdruck in Meereshöhe. In 10m Wassertiefe herrscht demnach ein Überdruck von einer Atmosphäre (atü) bzw. ein absoluter Druck von zwei Atmosphären (ata).

Beispiel:

Einer Wassertiefe von 61m entspricht ein Druck von 61msw (Meter Seewassersäule) bzw. von 6,1atü oder 7,1ata.

1.4. Dekompressionserscheinungen

Eine zu schnell ausgeführte Dekompression verursacht eine Reihe von Symptomen, die einer einzigen Ursache zuschreiben sind. Die Beschreibungen der pathologischen Effekte beinhalten Muskelschmerzen, allgemeine Gliederschmerzen, Schmerzen an Gelenken, besonders an der Schulter und an den Kniegelenken, rötliche Hautflecken und einen seltsamen Juckreiz auf der Haut. Die Gelenk-, Muskel- und Gliederschmerzen werden im Fachjargon mit "bends" bezeichnet. Dieser Ausdruck stammt von Caissonarbeitern und Tauchern, die um die Jahrhundertwende bei Brückenbauarbeiten eingesetzt wurden. Die Bezeichnung "bends" (engl. to bend = beugen) für diese schmerzhaften Erschei-

1) Die exakten Definitionen und Umrechnungen sind im Anhang I,9 nachzulesen.

nungen ist wohl aus der gebeugten Schonhaltung der befallenen Gliedmaßen entstanden.



Abb. 1

"Bends" im linken Vorderbein der Ziege. Die gebeugte Schonhaltung ist deutlich zu erkennen. (aus: HALDANE, 1922)

HALDANE benutzte für die oben beschriebenen Schmerzen meist den Ausdruck "symptoms", womit die zwar schmerzhaften aber weniger gefährlichen pathologischen Effekte gemeint sind (vgl. HALDANE et al., 1908). Im folgenden wird in Anlehnung an diese Arbeit der Begriff "Symptome" verallgemeinernd für alle sichtbaren und spürbaren Deko.-erscheinungen verwendet. Darunter fallen sowohl die oben aufgezählten als auch einige der folgenden, weniger un-gefährlichen Krankheitsmerkmale:

Erbrechen, Schwindelanfälle, Gefühllosigkeit der oberen Extremitäten, Lähmung oder Mattigkeit der Gliedmaßen, Kurzatmigkeit, Kopfschmerzen, Sehbeeinträchtigung, unre-

gelmäßiger Puls, Kollaps, Bewußtlosigkeit, Tod.
Chronische Spätschäden, wie Knochennekrose, wurden erst
später als schädliche Auswirkungen der Deko. erkannt und
fallen deshalb nicht unter diesen Begriff.

1.5. Synonyme für Dekompressionserscheinungen

Die vermutlich älteste Bezeichnung dafür dürfte "Caisson-
krankheit" sein - ein etwas irreführender Name für eine
Erkrankung, deren Ursache man damals nur im Zusammenhang
mit der Arbeit im Caisson sah. Der Ausdruck "Druckluft-
krankheit" (engl. compressed-air illness) sagt schon mehr
über die Herkunft der Erkrankung aus. Treffender scheinen
die Wörter "Dekompressionskrankheit" oder "Druckfaller-
krankung" (engl. decompression sickness) zu sein, da sie
den Kern der Sache am genauesten treffen, wie nachfol-
gend gezeigt wird.

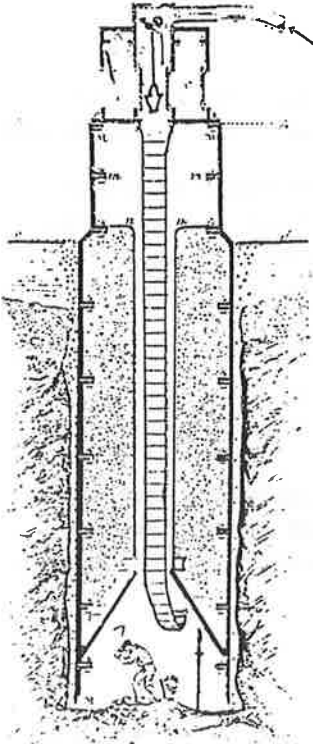


Abb.2 zeigt einen Caisson
(Senkkasten). Der Arbeiter
kann in trockener Umgebung
graben, da der hohe Luftdruck
das Eindringen des Wassers
verhindert.

Caissons dieser Art werden
nach Beendigung der Arbeiten
mit Beton gefüllt und bil-
den das Fundament von Brük-
kenpfeilern.

(aus: BERT, 1878)

2. Theorien über die Dekompressionserkrankungen bis HALDANE (1908)

Die ersten Beschreibungen der Krankheitserscheinungen stammen aus Arbeitsberichten von Ingenieuren, die mit der Errichtung von Brückenpfeilern oder der Befestigung von Pieranlagen beauftragt waren. Für diese Aufgaben wurden Senkkästen (siehe Abb. 2) verwendet, in denen die Arbeiter unter Wasser in trockener Umgebung Grabarbeiten verrichten konnten. Um das Eindringen von Wasser in diese technisch weiterentwickelte Taucherglocke zu verhindern, muß der Luftdruck im Caisson mindestens genauso groß sein wie der Wasserdruck am unten offenen Ende des Caissons. Aus diesem Grund ist es gleichgültig, ob die Beobachtungen der Deko.erscheinungen an Caissonarbeitern oder an Tauchern gemacht werden.

Erstmals erscheint in einem Bericht des französischen Ingenieurs TRIGER (1845) die Beschreibung von Symptomen von zwei Arbeitern, die nach einigen Stunden Arbeit bei einem Druck von drei Atmosphären - der Caisson endete also in 20m Tiefe - aus der Taucherglocke kamen. Eine halbe Stunde nachdem sie aus dem Caisson gestiegen waren, klagte einer über starke Schmerzen an den Gelenken des linken Armes, der andere über Schmerzen an den Knien und an den Schultern. Ähnliche Berichte über die unerklärlichen Merkmale der "Caissonkrankheit" häufen sich. Nicht selten werden auch Todesfälle von Tauchern oder Caissonarbeitern, die in entsprechenden Tiefen gearbeitet hatten, geschildert.

Man sucht nach einer Ursache für diese Erkrankungen. Zuallererst glaubt man, daß die komprimierte Luft, der sowohl Taucher als auch Caissonarbeiter ausgesetzt sind, schuld an den Schmerzen sei. HERVIER/LAGER (1849) vertreten die These, daß wegen des hohen Luftdrucks eine vermehrte organische Verbrennung im Körper stattfindet

und diese, kombiniert mit einem erhöhten Kohlendioxidgehalt in der Umgebungsluft als Folge schlechter Entlüftung, für die Schmerzen ursächlich in Frage kommt. Die ersten, die durch ihre Beobachtungen einen brauchbaren Beitrag zur Erforschung der Deko.symptome leisten, sind die beiden französischen Ärzte POL und WATELLE (1854). Sie machen bei der Ausschachtung von Steinkohlegruben zahlreiche Aufzeichnungen, aber ohne Plan, ohne System und Programm und nur in der Hoffnung, ihre Beobachtungen könnten bei ähnlichen Unternehmungen nützlich sein (vgl. POL/WATELLE, 1854). Die große Bedeutung ihrer Arbeit liegt in der Erkenntnis des Zeitpunkts, wann die Deko.erscheinungen einsetzen. "On ne paie qu'en sortant" (POL/WATELLE, 1854). 'Man zahlt erst, wenn man geht.' Dieser Satz drückt prägnant aus, wann die Symptome einzusetzen beginnen: mit dem Verlassen der Hochdruckatmosphäre. Sie deuten die Symptome als Folge einer zu schnellen Dekompression und machen deutlich, daß nicht der Druck an sich zu fürchten sei, sondern die Verminderung des Drucks. Weitere Feststellungen, die bis dahin unbekannt waren, finden sich in ihrem Artikel, so z.B., daß die Gefahr der Erkrankungen mit der Höhe des Drucks und der Schnelligkeit der Druckverminderung wächst. Die geringste Anfälligkeit für Symptome zeigen nicht Männer zwischen 30 und 50 Jahren, wenn die Kraft maximal entwickelt ist, sondern solche zwischen 18 und 26 Jahren. Diese Tatsache muß im Zusammenhang mit dem erhöhten Fettanteil ab einem gewissen Alter gesehen werden, was aber erst etwa 50 Jahre später nachgewiesen wurde.

Zur Prävention der "Caisson - Krankheit" empfehlen sie eine Verlängerung der Deko.zeit auf 30 Minuten aus einem Druck von $4 \frac{1}{4}$ Atmosphären, statt bisher 3 - 4 Minuten. Beim ersten Auftreten von Symptomen schreiben sie eine sofortige Rekompression vor bis die Schmerzen gelindert

sind und anschließend eine noch langsamere Druckverminderung.

Über die Ursachen der Schmerzen mutmaßen sie, daß das Blut bei der Deko. mit Sauerstoff übersättigt werde und dies eine schädigende Wirkung auf das Nervensystem hätte (vgl. POL/WATELLE, 1854).

GUERARD (1854) vertritt die Ansicht, daß die Schmerzen an den Gelenken rheumatischer Natur sind. Er begründet seine Hypothese damit, daß sich durch die schnelle Druckverminderung die Luft stark abkühlt und somit die Entstehung der rheumatischen Gelenk- und Muskelschmerzen fördert.

HOPPE (1857) kommt der tatsächlichen Ursache der Deko.-symptome schon näher. Bei Tieren, die durch plötzlichen Unterdruck getötet wurden, stellt er Luftbläschen in den Blutgefäßen fest und macht diese für den Tod verantwortlich. Dieselbe Erklärung überträgt er auf die Deko. aus einer Überdruckatmosphäre, ohne allerdings Versuche darüber gemacht zu haben. Seiner Meinung nach haben die Lungen keine Zeit, den Überschuß an freigesetztem Gas loszuwerden. Es muß sich folglich in den Blutgefäßen stauen und verursacht dadurch den Tod. (vgl. HOPPE, 1857). Diese Erklärung geht, wie HELLER zu berichten weiß, auf Beobachtungen von BOYLE zurück, der an verschiedenen Tieren, die sich in einer Unterdruckatmosphäre befunden hatten, Untersuchungen machte (vgl. BOYLE in HELLER et al., 1900, S. 388).

BERT, dessen Buch: *La Pression Barometrique* heute noch kaum an Aktualität eingebüßt hat, untersucht die Druckwirkungen sehr gewissenhaft und umfassend. Er unterscheidet zwischen Kompressions- und Dekompressionseffekten und zeigt als erster, daß die Deko.krankheit immer zusammen mit Stickstoffblasen im Blut und in verschiedenen Geweben auftritt. Obwohl er Versuche mit stufenweiser Deko. durchführt, empfiehlt er zur Vermeidung von Symp-

tomen eine langsame, gleichmäßige Dekompression, da er keine Vorteile an der stufenweisen finden kann (vgl. BERT, 1878, S. 961). Dies liegt aber offenbar an der falsch gewählten Abstufung der Druckdifferenzen und an den unzureichenden Pausen bei den einzelnen Etappen. Zur Behandlung der Symptome wendet er, wie schon vor ihm POL/WATELLE, sofortige Rekompresseion bis zum Verschwinden der Schmerzen an. Zusätzlich zu deren Erkenntnissen findet BERT, daß bis zu einem Druck von zwei Atmosphären keine Symptome nach schneller Deko. auftreten. Darüberhinaus gibt BERT den Rat, daß sich der Sauerstoffanteil der Einatemluft nur wenig ändern soll und daß deshalb in großen Tiefen der Sauerstoffanteil zu verringern ist (vgl. BERT, 1878, S. 1178). Diese gerade für das Tieftauchen wichtige Tatsache kam erst sehr viel später zur Anwendung.

Experimente an Hunden und Katzen bringen zu Tage, daß die Anfälligkeit für Symptome sowohl zwischen den einzelnen Individuen stark variiert als auch, daß das einzelne Individuum bei verschiedenen körperlichen Zuständen (Krankheit, Müdigkeit, Hunger etc.) unterschiedlich reagiert (vgl. BERT, 1878, S. 1033).

Trotz seiner großen Verdienste um die hyperbare und hypobare Medizin gibt BERT eine völlig unzureichende Anweisung für die Dekompression. Seiner Meinung nach genügt eine Rate von 12 Minuten pro Atmosphäre Überdruck, um Symptome der Deko. zu verhindern (vgl. BERT, 1878, S. 981). Deko.unfälle bleiben bei Tauch- bzw. Caissonarbeitern an der Tagesordnung. Daran ändert auch die etwas sicherere Deko.rate von HELLER nichts. Die Annahme, eine Deko.zeit von 20 Minuten pro Atmosphäre wäre in jedem Fall sicher (vgl. HELLER et al., 1900, S. 807), erweist sich für geringe Drücke zwar als richtig, aber auch als ausgesprochen langsam und unökonomisch, für höhere Drücke muß diese Rate m.E. als völlig unzureichend angesehen werden.

Erst die berühmt gewordenen A u s t a u c h t a b e l -
l e n von HALDANE leisteten den wichtigsten Beitrag
zur Verringerung des Risikos bei der Dekompression. Die
durchdachte und begründete Theorie wurde in Tier- und
Menschenexperimenten erprobt und endete mit der Anfertigung
der Tabellen. Der folgende Teil dieser Arbeit versucht
die Entstehung dieser Tabellen nachzuvollziehen.

3. HALDANES Vorgehen zur Entstehung der Austausch Tabellen
HALDANE und seine Mitarbeiter BOYCOTT und DAMANT (vgl. HAL-
DANE et al., 1908)¹ sind die ersten, die sich mit wissen-
schaftlicher Gründlichkeit darüber Gedanken machen, wie
und auf welchem Wege das eingeatmete Gas vom Körper auf-
genommen und wie es wieder abgegeben wird. Sie erstellen
eine Theorie mit mathematisch formulierten Vorgängen und
versuchen, die berechneten Werte für eine sichere Deko.
im Experiment zu bestätigen.

Die Theorie der Sättigung und Entsättigung des Gewebes
mit Stickstoff basiert auf Überlegungen und Annahmen, die
sie teilweise von anderen Autoren übernehmen.

3.1. Voraussetzungen

Zurückgreifend auf Untersuchungen von BERT, HILL/GREEN-
WOOD und auf eigene Untersuchungen wird angenommen, daß
sich der Kohlendioxidgehalt in der alveolären Luft und im
Blut auch bei steigendem Druck nicht ändert.

Der Sauerstoffpartialdruck steigt im arteriellen Blut im
gleichen Verhältnis wie der alveoläre Druck. Aber der da-
durch zuviel gelöste Sauerstoff ist nur ein kleiner Teil
des insgesamt im arteriellen Blut zur Verfügung stehenden
und wird größtenteils verbraucht oder chemisch gebunden,
so daß in den Geweben und im venösen Blut nur ein sehr

1) Im folgenden wird mit dem Namen HALDANE auf diese
Schrift Bezug genommen, sofern nichts anderes ange-
geben ist.

geringer Anstieg des Sauerstoffpartialdrucks zu verzeichnen ist, was man aber, wie den CO_2 -Partialdruck, vernachlässigen kann. Man braucht also bei der Sättigung und Ent-sättigung von Blut und Geweben nur den Stickstoff (N_2) in Betracht zu ziehen. Die Sättigung des Blutes und der Gewebe geschieht über die Aufnahme des Atemgases (Luft) in den Alveolen. Das Blut wird beim Durchfließen der Lungenkapillaren augenblicklich mit demselben Stickstoffdruck versehen, der in der Alveolarluft herrscht und setzt sich ins venöse Blut fort, wenn alle Gewebe bei dem momentanen Druck gesättigt sind. Steigt von einem bestimmten Zeitpunkt an der N_2 -Partialdruck an, z.B. indem der Gesamtluftdruck erhöht wird, dann wird nach dem Gesetz von HENRY vermehrte Stickstoff ins arterielle Blut aufgenommen und an die für diesen erhöhten Druck noch nicht gesättigten Gewebe durch Diffusion abgegeben. Bei jedem Kreislauf nimmt das Blut eine neue Ladung Stickstoff auf und gibt sie an das Gewebe ab. Auf diese Weise wird das Gewebe, und letztlich auch das venöse Blut, nach und nach auf den gleichen Stickstoffdruck gebracht, der in der Einatemluft herrscht. Die verschiedenen Gewebe weisen zwar eine unterschiedliche Kapillarisation auf und sättigen deshalb nicht gleich stark und gleich schnell, aber für die theoretische Überlegung genügt es anzunehmen, daß das Blut überall im Körper gleich verteilt ist und die Gewebe die gleichen Eigenschaften besitzen.

Zu diesen Eigenschaften zählt die Stickstofflöslichkeit - das ist die Fähigkeit, Stickstoff in diesem Gewebe physikalisch zu lösen -, die HALDANE für Blut und halbflüssige Gewebe als gleich annimmt. 1000cm^3 Blut oder halbflüssiges Gewebe nimmt pro Atmosphäre Druck etwa $8,7\text{cm}^3$ Stickstoff auf. Der Anteil von Blut und halbflüssigem Gewebe am Körpergewicht wird mit 85% angenommen. Die restlichen 15% bestehen aus Fettgewebe, welches sechsmal so viel Stickstoff aufnehmen kann als Blut. 1000cm^3 Fett lösen

also $52,2\text{cm}^3$ Stickstoff. Mit diesen Angaben kann man abschätzen, daß jede Gewichtseinheit des gesamten Körpers im Durchschnitt ca. 70% mehr Stickstoff löst, als die gleiche Menge an Blut. Bei einem Körpergewicht von 70kg beträgt die gelöste Stickstoffmenge etwa 1l pro Atmosphäre Druck. (Rechengang siehe Anhang I,1).

Mit diesen Werten läßt sich die Sättigung berechnen.

3.2. Kalkulation des Sättigungsprozesses

Bevor man beginnt, die Zeit zu berechnen, die für eine völlige Sättigung notwendig ist, muß man einige Vorüberlegungen machen.

3.2.1. Berechnung der Kreisläufe bis zur Sättigung

Man geht von der Annahme aus, daß der Körper bei einem bestimmten Druck völlig mit Stickstoff gesättigt ist. In diesem Fall ist die gelöste Stickstoffmenge im gesamten Körper ca. 26mal größer als die gelöste Menge im Blut, wenn die Blutmenge 6,5% des Körpergewichts beträgt. (Rechengang siehe Anhang I,2).

Wird der Körper plötzlich einem bestimmten hohen Druck ausgesetzt, dann erhält er nach einem vollständigen Blutkreislauf den 26sten Teil der Stickstoffmenge, die zur Sättigung bei diesem Druck nötig ist (vgl. Abb.3a).

Beim zweiten Kreislauf wird wieder $1/26$ des verbleibenden Defizits bis zur Sättigung hinzugefügt, das ist $(1/26 \times 25/26)$ (vgl. Abb.3b). Der dritte Kreislauf führt den Körpergeweben wieder $1/26$ der noch aufzufüllenden Stickstoffmenge zu, nämlich $1/26 \times (25/26 \times 25/26)$ und so fort. Dieses physikalische Sättigungsgesetz läßt sich auch so formulieren:

Die Änderung des Gasdrucks im Gewebe mit der Zeit ist proportional der Differenz zwischen dem Druck des eingeatmeten Gases und dem momentanen Wert des Gasdrucks im Gewebe.

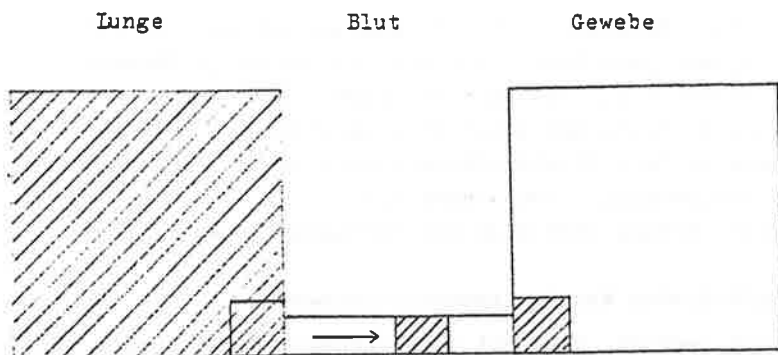


Abb.3a Der durch erhöhten Umgebungsdruck entstandene Stickstoffüberdruck wird vom Blut ins Gewebe übertragen. Das Gewebe hat nach einem Kreislauf $1/26$ des zur Sättigung nötigen Drucks erhalten.

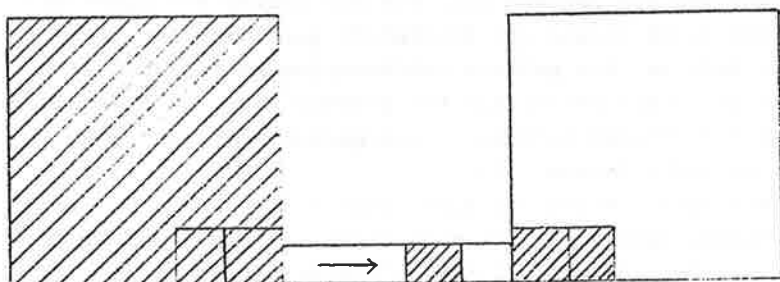


Abb.3b Nach dem zweiten Kreislauf hat das Gewebe wieder $1/26$ der zur Sättigung nötigen Stickstoffmenge erhalten.

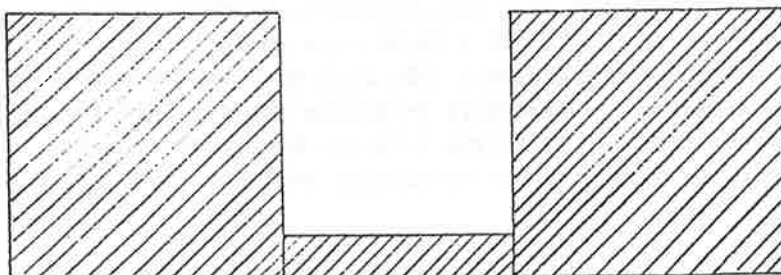


Abb.3c Der Transportvorgang (Sättigungsprozeß) ist beendet, wenn im Gewebe der gleiche N_2 -Druck herrscht wie in der Alveolarluft.

Die in der Formel

$$\frac{dP}{dt} = k(P_1 - P)$$

mit

P: Gewebsdruck (Gasdruck im Gewebe) nach der Zeit t

P₁: Umgebungsdruck nach der Zeit t

t: Zeit, nach der der Gewebsdruck berechnet wird

k: Konstante

ausgedrückte Differentialgleichung ergibt als grafische Darstellung eine logarithmische Kurve, wie sie in Abbildung 4 aufgezeichnet ist.

Der oben beschriebene Sättigungsverlauf wurde in der Weise erstmals von ZUNTZ (1897) für die Gewebssättigung formuliert und von HALDANE übernommen.

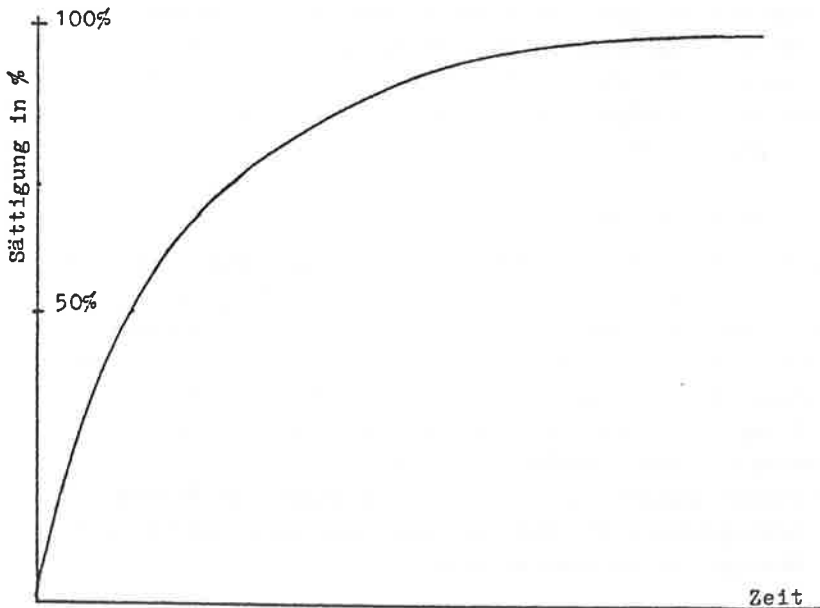


Abb.4 zeigt den logarithmischen Verlauf der Gewebssättigung bei konstant gehaltenem Überdruck.

Mit folgenden Formeln läßt sich die prozentuale Sättigung bzw. die Anzahl der Kreisläufe bis zu dieser Sättigung errechnen. (Rechenbeispiel siehe Anhang I,3).

$$a) \quad y = 1 - \left(\frac{a-1}{a}\right)^n$$

$$b) \quad n = \frac{\log(1-y)}{\log\left(\frac{a-1}{a}\right)}$$

mit

a: reziproke Sättigungsrate

n: Anzahl der Kreisläufe

y: Sättigung in % (100% = 1; 50% = 0,5; ...)

Nach etwa 18 Kreisläufen ist die Hälfte der Stickstoffmenge, die zur völligen Sättigung notwendig ist, bereits in den Körper eingedrungen; nach 35 Kreisläufen sind es 75%. Vollkommene Sättigung (100%) könnte erst nach unendlich langer Zeit erfolgen, jedoch spricht man ab etwa 95% von gesättigtem Gewebe.

3.2.2. Berechnung der Sättigungszeit

HALDANE nimmt die Blutmenge, die pro Minute durch die Lungen fließt, mit 3,5l an und die Gesamtblutmenge vereinfachend ebenfalls mit 3,5l. Somit durchläuft die gesamte Blutmenge einmal in der Minute die Lungen. Nach obiger Rechnung dauert es also 18 Minuten bis der Körper halb mit Stickstoff gesättigt ist, wenn er plötzlich einem bestimmten Überdruck ausgesetzt wurde.

Mit diesen Angaben läßt sich für ein einzelnes Gewebe der Sättigungszustand und die Dauer bis zu einem bestimmten Sättigungsgrad herausfinden.

3.3. Halbwertszeiten und theoretisches Gewebe

Da die Zeit bis zum Erreichen der völligen Sättigung nicht berechenbar und ebensowenig feststellbar ist, hat man das theoretische Gewebe eingeführt, das sich genau in der formelmäßig beschriebenen Weise sättigen soll. Mit dieser Eigenschaft läßt sich genau berechnen, wann ein Gewebe zu 50% gesättigt ist. Die Zeit bis zum Erreichen der halben Sättigung nennt man "Halbsättigungszeit" oder Halbwertszeit.

Zur Berechnung sicherer Austausch Tabellen ist es notwendig, Gewebe mit verschiedenen Halbwertszeiten zu berücksichtigen. Aus früheren Experimenten ist bekannt, daß sehr schnell sättigende Gewebe existieren. Nach Angaben von HILL/GREENWOOD (1907, zit. nach HALDANE et al., 1908) sind die Nieren nach 10 Minuten praktisch völlig gesättigt.

Die Vermutung, daß es auch Gewebe gibt, die sich nur extrem langsam sättigen, zog HALDANE aus der langjährigen Erfahrung von Brücken- und Tunnelbauingenieuren, die feststellten, daß nach der Deko. aus einem Überdruck von $2 \frac{1}{4}$ Atmosphären und einer Aufenthaltszeit von drei Stunden so gut wie keine Deko. symptome vorkamen. Folglich - so HALDANE - muß es Gewebe geben, die nach dieser Zeit noch nicht gesättigt sind, denn sonst müßten mehr bzw. schwerere Symptome auftreten.

Zur Berechnung der Austauschzeiten unterteilt HALDANE schließlich den Körper in unterschiedliche theoretische Gewebe mit Halbwertszeiten von 5, 10, 20, 40 und 75 Minuten. Da für die Berechnung der Deko.zeit nach längerem Aufenthalt gerade das sich am langsamsten sättigende Gewebe (langsames Gewebe) in Betracht gezogen werden muß, darf die Halbwertszeit für dieses nicht geraten werden, sondern muß bestimmt werden.

Wie dies bewerkstelligt wurde, sei nachfolgend dargestellt.

3.4. Auswahl der Versuchstiere

Der Austausch der Atemgase (respiratorischer Gaswechsel) hängt bei Säugetieren und bei Menschen grob gesprochen vom Verhältnis zwischen Körperoberfläche und Gewicht ab. Je kleiner ein Tier ist, desto größer ist der Gasaustausch pro Einheit Körpergewicht und desto schneller ist sein Kreislauf. Der Grundumsatz, der in engem Zusammenhang mit dem respiratorischen Gaswechsel steht, wächst damit auch mit dem Verhältnis von Oberfläche zu Gewicht. Er beträgt beispielsweise bei einer Maus zwölfmal so viel wie bei einem Menschen (vgl. LULLIES/TRINCKER, 1974, S.236). Infolge des schnelleren Kreislaufes sättigen sich die Gewebe von Kleintieren wesentlich schneller als die des Menschen. In gleicher Weise geht auch der Entsättigungsvorgang schneller vor sich. Aus diesem Grund können Kleintiere mit schnellem Kreislauf in sehr kurzer Zeit dekomprimiert werden. Dieser Umstand dürfte dafür verantwortlich sein, daß bei den Experimenten in der Zeit vor HALDANE (P.BERT, HELLER et al.,) trotz Deko.raten, die für Menschen viel zu schnell wären, keine Symptome an den Versuchstieren (Meerschweinchen, Ratten, Hunde, Katzen,...) hervorgerufen werden konnten. HALDANE verwendet deshalb für die Erprobung der berechneten Deko.zeiten Ziegen, weil sie die größten Versuchstiere sind, die bequem benutzt werden können. Ihr Durchschnittsgewicht liegt etwa bei einem Drittel bis einem Viertel des Gewichts eines erwachsenen Menschen. Verwendet man die Beziehung, daß der respiratorische Gaswechsel proportional dem Verhältnis aus Körperoberfläche und Gewicht ist und daß sich die Oberfläche (O) aus dem Gewicht (G) nach der Formel

$$O = G^{2/3}$$

berechnen läßt, dann ergibt sich, daß der respiratorische Gaswechsel von Ziegen etwa um $2/3$ größer ist als bei Menschen. (Rechengang siehe Anhang I,4).

3.5. Verfahren zur Bestimmung der längsten Halbwertszeit

Mit diesen Vorüberlegungen werden die Versuche gestartet, aus denen die längste Halbwertszeit bestimmt werden soll. HALDANE geht so vor, daß Druck und Deko.rate immer konstant gehalten werden, während die Dauer des Aufenthalts unter Druck variiert. Man beobachtet nun ab welcher Aussetzungsdauer die durch die Dekompression hervorgerufenen Symptome nicht mehr schlimmer werden, d.h., daß auch eine noch längere Aussetzung keinen Einfluß mehr auf die Anzahl und die Intensität der Symptome hat. Diese "Grenze" liegt für Ziegen bei ca. drei Stunden. Nach HALDANES Überlegung dauert es also drei Stunden bis das langsamste Gewebe gesättigt ist. Nimmt man die Sättigung zu etwa 94% an, dann ergibt sich nach Abbildung 4 (S.13) eine Halbwertszeit von 45 Minuten für das langsamste Gewebe. (Rechengang siehe Anhang I,5a). Auf den Menschen umgerechnet dauert es dann 75 Minuten bis das langsamste Gewebe gesättigt ist. (Anhang I,5b).

3.6. Entsättigungsvorgang

Wird ein Gewebe, das bei einem bestimmten hohen Druck völlig gesättigt ist, wieder dem Normaldruck ausgesetzt, dann entsättigt es sich in gleicher Weise wie es sich gesättigt hat. Das langsamste Gewebe braucht wiederum 75 Minuten bis es die Hälfte des N_2 -Überschusses losgeworden ist. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß sich keine Gasblasen bilden, denn in diesem Fall geht zwar die Gewebssättigung wesentlich schneller vor sich, aber die entstandenen Gasblasen stellen eine akute Gefahr für den menschlichen Organismus dar und sollen tunlichst verhindert werden.

3.6.1. Entstehung von Gasbläschen

Die genaue Entstehungsursache und der Entstehungsvorgang von Gasblasen im Gewebe und im Blut ist bis heute noch nicht vollkommen erforscht. Man vermutet, daß sich bei zu schneller Druckverminderung die Inertgasmoleküle (in der Regel Stickstoffmoleküle) an sog. Kondensationskeimen festsetzen und sich daran all-ählich vermehren bis sie zu einer Mikrogasblase werden, die sich dann rasch, durch Hineindiffundieren weiterer Moleküle und durch Volumenvergrößerung infolge Druckabnahme, vergrößert.

Die Herausbildung von Gasblasen beginnt allerdings erst, wenn ein bestimmter Übersättigungsgrad, der v.a. von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit abhängt, überschritten wird. Das bedeutet, daß bei Druckverminderung um einen bestimmten Wert das physikalisch gelöste Gas immer noch in Lösung gehalten wird, ohne daß Mikrobläschen entstehen. Erst nach Überschreiten dieses Übersättigungsdruckes, also bei stärkerer Druckverminderung, entstehen die Blasen. Die erlaubte Überspannung P_u muß immer kleiner sein als die Differenz zwischen der Gasspannung (= Gasdruck oder Sättigung) im Gewebe P_g und dem Umgebungsdruck P .

$$P_g - P < P_u$$

Die Werte für die Übersättigungstoleranzen werden heute in Druckkammerversuchen empirisch ermittelt. HALDANE fand sie auf andere Weise, wie in einem späteren Kapitel zu lesen sein wird (Pkt. 3.7.).

Die Größe und der Aufenthaltsort der Gasbläschen entscheiden, ob Dekompensationserscheinungen auftreten und welches Ausmaß sie annehmen.

grip

3.6.2. Gefahren und Schädigungen durch Gasblasen

In fast jeder Körperregion werden Gasblasen gefährlich und verursachen Schmerzen. Sie können Blutkapillaren verstopfen, was eine Versorgungsbeeinträchtigung des umliegenden Gewebes zur Folge hat. Wegen der hohen Fettlöslichkeit des Stickstoffs bilden sich Gasblasen bevorzugt im stark lipoidhaltigen Nervengewebe des Zentralnervensystems, im Rückenmark und in markhaltigen Nerven, was im harmlosesten Fall zu Gefühllosigkeit der betroffenen Körperregionen, aber auch zu Lähmungen und zum Tod führen kann.

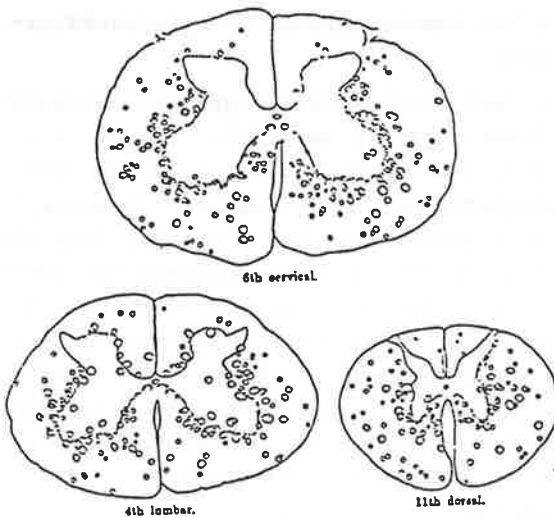


Abb.5 zeigt einen Ausschnitt aus dem Rückenmark einer Ziege, die drei Stunden nach schneller Deko. starb. Die Gasblasen konzentrieren sich in der weißen Substanz des Rückenmarks, wo die Durchblutung am geringsten ist und somit die Gasabgabe erschwert ist. (aus: HALDANE, 1922, S.342)

Deshalb muß unbedingt verhindert werden, daß sich Gasblasen herausbilden, zumal sie auch bei sofortiger Re-
kompresion nur schlecht wieder absorbiert werden und lan-
ge bestehen bleiben.

Zur Vermeidung der Gasblasenbildung hatte man bis 1907, als die Ergebnisse von HALDANEs Untersuchungen dem British Royal Committee of Admiralty vorgelegt wurden, eine langsame, möglichst gleichmäßige Druckverminderung empfohlen. Eine Rate von zwanzig Minuten pro Atmosphäre Überdruck galt in jedem Falle als sicher (vgl. HELLER et al., 1900, S.807). Die Unrichtigkeit dieser Annahme widerlegt HALDANE.

3.6.3. Berechnung der Gewebsspannung bei gleichmäßiger Dekompression

HALDANE berechnet nach einer einsichtigen aber aufwendigen Methode die Gewebsspannung beim Deko.vorgang, d.h., er bestimmt den Stickstoffpartialdruck im Gewebe nach einer beliebig angenommenen Zeit. (Beachte Anmerkung im Anhang II.) Als Anfangsbedingung wählt man der Bequemlichkeit halber die völlige Sättigung des Gewebes mit einem bestimmten Überdruck (z.B. 5atü) und eine durchschnittliche Halbwertszeit von 23 Minuten. Unter Verwendung der von HELLER et al. vorgeschlagenen Deko.rate von einer Atmosphäre pro 20 Minuten bleibt am Ende der Dekompression ein Überdruck von 1,3 Atmosphären, für das Gewebe mit der Halbwertszeit von 75 Minuten ein Überdruck von 3,15 Atmosphären (siehe Abb.6).

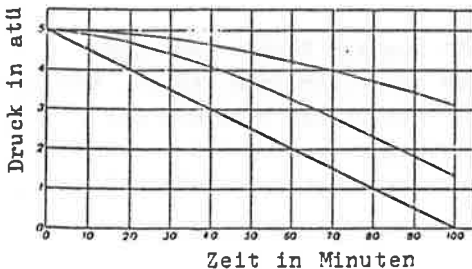


Abb.6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Gewebssättigung bei gleichmäßiger Deko. für zwei verschiedene theoretische Gewebe. Dicke Linie: Umgebungsdruck (aus: HALDANE et al., 1908)

Mit diesem Beispiel ist der Empfehlung von HELLER et al. deutlich widersprochen, daß eine Rate von 20 Minuten pro Atmosphäre immer sicher ist. Ein Gewebsüberdruck von 3,15 Atmosphären liegt mit Sicherheit nicht mehr innerhalb der möglichen Übersättigungstoleranz und dürfte durch starke Gasblasenbildung zu ernsthaften Symptomen führen.

3.6.4. Beschleunigung der Entsättigung

Es gibt zwei Möglichkeiten, um den Entsättigungsvorgang zu beschleunigen.

- 1.) Man vergrößert die Druckdifferenz zwischen dem im Körper gelösten Stickstoff und dem der Umgebungsluft, z.B. indem der Luftdruck rapide um einen großen Betrag gesenkt wird, oder
- 2.) man beschleunigt den Blutkreislauf.

Taucher und Caissonarbeiter leisten ständig unter erhöhtem Luftdruck Arbeit, so daß der Blutkreislauf auch schon während des Sättigungsprozesses beschleunigt ist und somit eine schnellere Sättigung der Gewebe gegenüber der Sättigung in Ruhe erfolgt.

Diese Tatsache stellen indirekt schon POL/WATELLE (1854) fest als sie schreiben, daß gerade in den am meisten beanspruchten Muskelgruppen nach der Dekompression Symptome auftreten.

HALDANE schlägt deshalb vor, daß auch während der Deko. bzw. während des Auftauchens Arme und Beine bewegt werden sollten, um die erhöhte Sättigung durch eine ebenfalls beschleunigte Entsättigung auszugleichen. Damit ist aber noch nichts gewonnen. Also muß man versuchen, durch Erhöhung der Druckdifferenz die Entsättigung zu verkürzen.

Die Methode, die Frischluftzufuhr zu drosseln, damit der erhöhte CO₂-Gehalt im Helm der Taucher die Atmung beschleunigt, wurde vorübergehend von der British Royal Navy angewandt, bald aber wieder fallen gelassen.

3.7. HALDANES "2:1 - Theorie"

Die Grundlage für HALDANES "2:1 - Theorie" bildet eine Erfahrungstatsache von Leuten, die ständig mit Arbeiten in Druckluft zu tun haben. Die Feststellung lautet, daß man aus einer Wassertiefe von 10m bzw. aus einem Druck von 2ata beliebig schnell dekomprimieren kann, gleichgültig wie lange der Aufenthalt war. Übersteigen die Druckwerte 1,25atü, dann beginnen bei zu schneller Dekompression Symptome aufzutreten. Aus dieser Tatsache läßt sich folgendes schließen: Wenn eine Übersättigung mit 1,25atü gerade noch möglich ist, ohne daß Symptome auftreten, dann kann man es so einrichten, daß gerade dieser Wert am Ende der Dekompression erreicht wird.¹ Damit ist Zeit eingespart, und die Deko. bleibt dennoch sicher.

Das Auftauchen aus 10m Wassertiefe entspricht einer Druckverminderung von 2ata auf 1ata. Das Gasvolumen, das dabei freigesetzt wird, läßt sich nach dem Boyle - Mariotte'schen Gesetz ($p \times V = \text{const.}$) berechnen und ist immer gleich groß, ob man von 2ata auf 1ata oder von 4ata auf 2ata usw. dekomprimiert.

"Hence it seemed probable that, if it is safe to decompress suddenly from two atmospheres of absolute pressure to one, it would be equally safe to decompress from four atmospheres absolute to two, from six atmospheres to three, etc." (HALDANE et al., 1908).

Dies ist HALDANES "2:1 - Theorie". Sie besagt, daß der anfangs herrschende Druck um die Hälfte (2:1) verringert werden darf, ohne daß Dekompressionserscheinungen zu befürchten sind.

- 1) Der Stickstoffpartialdruck im Gewebe beträgt in Wirklichkeit nur 80% des angegebenen Wertes, aber der Einfachheit halber rechnet man statt mit Stickstoffdruck mit Luftdruck. Siehe auch Anmerkung im Anhang II.

Durch die Verringerung des Drucks zu Beginn der Deko. um die Hälfte wird der Entsättigungsvorgang enorm beschleunigt und keine unnötige Zeit vergeudet.

Der Rest der Deko. läuft so ab, daß der Gasdruck in keinem Gewebe größer wird als das Doppelte des momentanen Umgebungsdrucks (=Luftdruck der Einatemluft), wobei die Berechnung wiederum nur mit Luftdruck oder nur mit Stickstoffpartialdruck ausgeführt wird. Üblicherweise rechnet man mit Luftdruck.

Lediglich für die letzte Etappe zum Erreichen des normalen Luftdrucks wird von dieser Regel geringfügig abgewichen, d.h., daß unmittelbar nach der Deko. die Gewebsübersättigung statt $1atü$ $1,25atü$ beträgt.

Damit dies bewerkstelligt werden kann, müssen den verschiedenen Geweben unterschiedliche Halbwertszeiten zugeordnet werden (theoretische Gewebe), und es muß für jedes Gewebe der momentane Sättigungsgrad berechnet werden. Nach diesen Werten richtet sich die Aufenthaltsdauer bei den einzelnen Austauschstufen. Nach der schnellen Druckverminderung auf die Hälfte des Maximaldrucks erfolgt eine etwas zeitraubendere, die in Abstufungen von jeweils $3m$ ($10 ft.$) ausgeführt wird. Davon wurde die Bezeichnung s t u f e n w e i s e Deko. (engl.: stage decompression) abgeleitet, die zur Unterscheidung von der g l e i c h m ä ß i g e n (engl.: uniform decompression) gebraucht wird.

Die Vorteile dieser stufenweisen Deko. liegen einmal in der enormen Zeitersparnis, die vor allem bei Tauchern eine große Rolle spielt, zum anderen in der Sicherheit, auch aus größeren Tiefen gefahrlos und zügig auftauchen zu können. Obwohl HALDANE von der Richtigkeit seiner Methode überzeugt war, fügt er dennoch die Warnung hinzu, daß das Gesetz der Druckverminderung um die Hälfte (2:1 - Gesetz) für Drucke, die $6atü$ übersteigen, möglicherweise nicht mehr gelten könne, da keine experimentellen Ergebnisse für größere Drucke vorliegen (vgl. HALDANE et al., 1908).

3.8. Tauchzeitberechnung und Austauschvorgang mit stufenweiser Dekompression

Um die Dekompressionsberechnung einfach und verständlich zu machen, sei angenommen, daß alle Gewebe in der Tiefe von beispielsweise 65m gesättigt sind. Die Deko. soll möglichst schnell und sicher erfolgen.

Der Tiefe von 65m entspricht ein Druck von 7,5ata. Dieser Druck wird nach dem 2:1 - Gesetz zu Beginn auf die Hälfte verringert. Bei einer Tiefe von 27,5m ($\hat{=}$ 3,75ata Druck) ist der erste Halt einzulegen. Er muß so lange dauern, bis der Druck in den Geweben nur noch doppelt so hoch ist als der absolute Druck der Atemluft (= Umgebungsdruck) beim nächsten Halt sein wird. Der nächste Halt ist nach 3m, also bei 24,5m Tiefe, was einem Druck von 3,45ata entspricht. Der Gewebedruck darf also in 27,5m Tiefe vor dem nächsten Aufstieg nicht größer sein, als der doppelte Betrag bei 24,5m, also 6,9ata. Es muß ein Druck von 0,6ata (7,5 - 6,9) entsättigt werden. Das sind 16% der Differenz zwischen dem Anfangsdruck des Gewebes (7,5ata) und dem ersten reduzierten Druck (3,75ata).

Bei der Kalkulation der Deko. nach einem Sättigungstauchgang wie er hier angenommen wird, braucht nur das langsamste Gewebe betrachtet zu werden. Das 75 - Minuten - Gewebe braucht 19 Minuten, um 16% der gelösten Gasmenge loszuwerden. (Rechengang siehe Anhang I,7).

In 27,5m Tiefe dauert der erste Aufenthalt also 19 Minuten, dann kann auf 24,5m aufgetaucht werden. Dort muß man wiederum so lange verweilen, bis der Gasdruck im Gewebe kleiner ist als das Doppelte des Umgebungsdrucks beim nächsten Halt (21,5m). Der Umgebungsdruck (= Druck der Einatemluft) wird 3,15ata sein. Die Gewebsspannung darf also vor dem nächsten Aufstieg nicht größer sein als 6,3ata. Es muß wiederum so viel freiwerdendes Gas abgeatmet werden,

daß der Druck im Gewebe um 0,6 ata (6,9 - 6,3) sinkt. 0,6ata sind 17,5% der Differenz zwischen dem anfangs herrschenden Gewebsdruck (6,9ata) und dem momentanen Umgebungsdruck (3,45ata). Die Entsättigung um 17,5% benötigt 21 Minuten. Diese Zeit muß bei der Marke von 24,5m zugebracht werden, ehe der nächste Aufstieg um 3m gewagt werden darf.

Die Berechnung wird so lange fortgeführt bis man bei normalem Atmosphärendruck angelangt ist. Nach dieser Methode dauert der Austauschvorgang aus 65m Tiefe 309 Minuten.

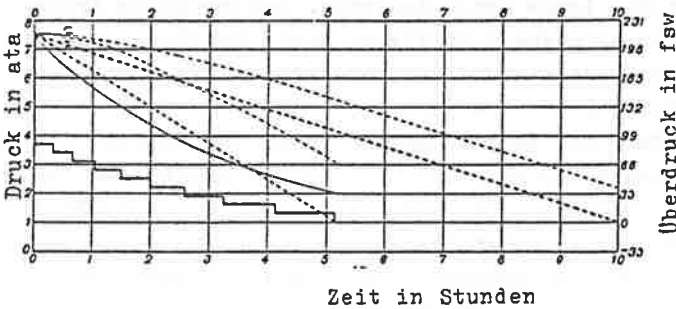


Abb.7 zeigt die stufenweise Deko. aus einem Druck von 7,5ata (entspricht einer Tiefe von 65m) verglichen mit der gleichmäßigen Deko. in der gleichen Zeit bzw. mit dem gleichen Sicherheitsfaktor. Durchgehende Linien: stufenweise Deko., gestrichelte Linien: gleichmäßige Deko., dicke Linien: Luftdruck (Umgebungsdruck), dünne Linien: Gewebsdruck. (aus: HALDANE et al., 1908)

Aus Abbildung 7 ist zu entnehmen, daß für eine gleichmäßige Dekompression, die am Ende genauso sicher sein soll wie die stufenweise, zehn Stunden erforderlich wären, eine unnötig vergeudete Zeit, in der die Taucher durch die Kälte über die Maßen ausgezehrt werden können.

Führt man im Gegensatz dazu eine gleichmäßige Druckverminderung in der gleichen Zeit durch, die für die stufenweise berechnet wurde, dann bleibt am Ende eine gefährlich hohe Übersättigung von 2,1atü übrig, die zweifellos schwere und schmerzhaft Dekompressionserscheinungen verursacht.

Vollkommene Sättigung aller Gewebe dürfte in der damaligen Zeit in solchen Tiefen nicht eingetreten sein, da die Tauchgänge nie lange genug dauerten. Andererseits drohen bei längerem Aufenthalt in dieser Tiefe Gefahren, die mit dem erhöhten Partialdruck des Sauerstoffs zusammenhängen (siehe Punkt 4.2.).

Die Bestimmung der Austauschzeiten geschieht deshalb mit anderen Anfangsbedingungen als mit völlig gesättigten Geweben. HALDANE beschäftigt sich wenig mit der Deko. nach Sättigung. Oben beschriebenes Gedankenexperiment mag für diese Tiefe noch zutreffen, für größere Tiefen darf die Deko. nach Sättigung nicht mehr nach dem 2:1 - Gesetz erfolgen (siehe Punkt 5.4.).

Die Berechnung der Art und der Dauer der Druckverminderung nach einem kurzen Aufenthalt in der Tiefe ist wesentlich komplizierter als am obigen Beispiel vorgeführt wurde, da für jedes theoretische Gewebe der Grad der Sättigung zu jedem Zeitpunkt berechnet werden muß und sich daraus erst die Aufenthaltsdauer bei der jeweiligen Tiefe ermitteln läßt. Aber mit den beschriebenen Grundsätzen ist es möglich. Für die damalige Zeit war es sicher recht mühsam, den Gewebsdruck für jedes Gewebe und für jeden Umgebungsdruck auszurechnen, heutige Rechenmaschinen erledigen diese Arbeit in wenigen Sekunden und liefern eine exakte Zeichnung dazu.

3.9. Überlegungen für kurze Aufenthalte in der Tiefe

Bei kurzen und sehr kurzen Vorstößen in die Tiefe darf nicht nur die Zeit berücksichtigt werden, die beim größten Druck zugebracht wird, sondern auch der größte Teil der Auf- und Abstiegszeit muß mit einkalkuliert werden, da sich auch noch während eines Teils des Aufstiegs die Gewebe mit Stickstoff sättigen. HALDANE rechnet deshalb zur Aufenthaltszeit beim größten Druck noch die Hälfte der Zeit hinzu, die für den Abstieg bzw. für den Druckaufbau benötigt wird. Diese zwei Zeiten zusammengerechnet ergeben die e i g e n t l i c h e Aufenthaltsdauer, nach der der Gewebsdruck berechnet wird.

Ein geübter Taucher kann eine Tiefe von 60m ohne weiteres in zwei Minuten erreichen. In jeder zusätzlich verbrauchten Zeit würde sich der Körper unnötig sättigen. HALDANE ist deshalb entgegen früherer Praxis der Meinung, daß bei nur sehr kurzen Aufenthaltszeiten (eine Minute) in großen Tiefen (40m bis 60m) sowohl ein schneller Abstieg als auch ein schneller, aber möglichst sicherer Aufstieg einem langsamen und stufenweisen vorzuziehen ist. Die Versuche zeigen, daß es relativ sicher ist, schnell aus 50m Tiefe zu dekomprimieren (eine Minute Deko.zeit), vorausgesetzt, die eigentliche Aufenthaltszeit ist nicht länger als vier bis sechs Minuten (vgl. HALDANE et al., 1908).

Für längere Aufenthaltszeiten muß jedoch nach dem sicheren 2:1 - Entsättigungsverfahren ausgetaucht werden.

Die kurzen Tauchgänge bis etwa 50m sind deshalb relativ ungefährlich, weil sie dem Apnoetauchen sehr ähnlich sind. In beiden Fällen spielt die ins Gewebe eindringende Stickstoffmenge wegen der Geringfügigkeit keine Rolle, obwohl physiologisch gesehen schon Unterschiede bestehen, die hier aber nicht näher ausgeführt werden.

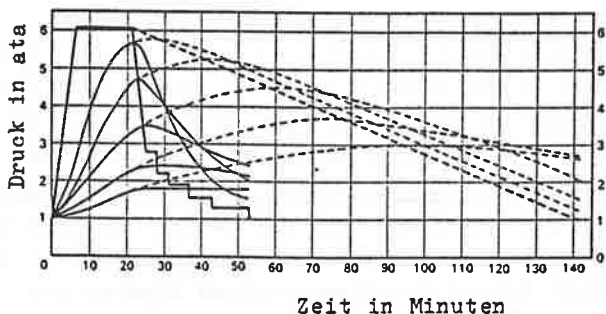
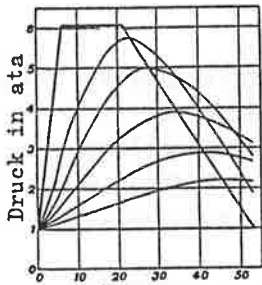


Abb.8 zeigt die Sättigung und Entsättigung von fünf verschiedenen Geweben während der stufenweisen Deko. und während der gleichmäßigen Deko., die mit der gleichen Sicherheit erfolgt wie die stufenweise. Durchgezogene Linien: stufenweise Deko., gestrichelte Linien: gleichmäßige Deko.

Die Kurven von oben nach unten zeigen die Gewebssättigung für Gewebe mit Halbwertszeiten von 5, 10, 20, 40 und 75 Minuten. (aus: HALDANE et al., 1908)

Obige Grafik (Abb.8) zeigt ein Dekompressionsprofil, das HALDANE bei zahlreichen Experimenten mit Ziegen verwendet hat. Die Kompression auf einen Druck von 6,1ata dauert sechs Minuten, die Aufenthaltsdauer 15 Minuten, so daß die eigentliche Aufenthaltsdauer bei 5,1atü 15 Minuten plus die Hälfte der Kompressionszeit, also 18 Minuten beträgt. Dadurch, daß man für die Berechnung des Sättigungsgrades den maximalen Druckwert und nicht einen gemittelten mit der eigentlichen Aufenthaltsdauer in Relation bringt, ist noch einmal eine gewisse Sicherheit mit einbezogen. Die Gewebssättigung wird nämlich dadurch etwas zu hoch berechnet, und die Aufenthaltszeiten bei den einzelnen Stufen werden länger.

Der gesamte Tauchvorgang dauert 52 Minuten. Am Ende beträgt die größte Übersättigung im Gewebe mit der Halbwertszeit von 20 Minuten 1,4atü, was in einigen Fällen leichte Symptome (bends) verursacht. Gleichmäßige Deko. in der gleichen Zeit ist wesentlich gefährlicher, da am Ende der höchste Gewebsdruck 2,1atü beträgt. Dieser enorme Überdruck verursacht bei Tierversuchen schwere Deko.erscheinungen, z.B. zahlreiche "bends", Lähmungen und sogar Tod.



Zeit in Minuten

Abb.9 zeigt den Sättigungsverlauf der fünf verschiedenen theoretischen Gewebe bei gleichmäßiger Deko. in 32 Minuten.

Nach gleichen Anfangsbedingungen wie bei Abb.8 beträgt am Ende der Deko. der höchste Gewebsdruck 2,1atü.

(aus: HALDANE et al., 1908)

Die ersten Austauschtabellen sind so kalkuliert, daß die gesamte Tauchdauer einschließlich der Deko.zeit etwa eine halbe Stunde in Anspruch nimmt. Deshalb verringert HALDANE die eigentliche Aufenthaltszeit in dieser Tiefe von 18 Minuten auf 15 Minuten (siehe Austausch-tabelle I).

Wie aus Abbildung 8 abzulesen ist, bleibt nach einer 140 Minuten dauernden gleichmäßigen Druckverminderung in zwei Geweben (mit 40 bzw. 75 Minuten Halbwertszeit) immer noch ein Überdruck von 1,7 Atmosphären zurück, obwohl diese Gewebe zu Beginn der Deko. lediglich mit 0,7 bzw. mit 1,3 Atmosphären Druck versehen waren, aber die Entsättigung der Gewebe beginnt erst dann, wenn der Umgebungsdruck gleich oder kleiner ist als der Gasdruck in den verschiedenen Geweben. (Anmerkung im Anhang II beachten.)

Dies ist der Fall, wenn sich die geraden Linien (Umgebungsdruck) mit den gebogenen Kurven (Gasdruck in den Geweben) schneiden (siehe Abb.8).

Gerade diese Gegenüberstellung wie sie in den letzten beiden Abbildungen zum Ausdruck kommt, beweist klar die Überlegenheit der stufenweisen Dekompression gegenüber der gleichförmigen, was HALDANE immer wieder herauszustellen versucht.

3.10. Mehrere Tauchgänge hintereinander

Es ist einleuchtend, daß sich nach einem Tauchgang die langsamen Gewebe während eines kurzen Aufenthalts bei Atmosphärendruck nicht völlig entsättigen. Bei mehrmaligen Tauchgängen kurz hintereinander reichern sich diese Gewebe mehr und mehr mit Stickstoff an und werden schließlich zu einer ernststen Gefahrenquelle.

Um auch dieser Gefahr einigermaßen sicher zu begegnen, schlägt HALDANE vor, daß die Zeiten der eigentlichen Aussetzung bei Maximaldruck addiert werden und für diese Zeit die entsprechenden Austauschstufen und -zeiten aus der Tabelle entnommen werden sollen.

Genauere Berechnungen, Angaben und Tabellen dazu liegen allerdings nicht vor. HALDANE gibt lediglich an, daß bei einem Intervall von einer Stunde die zusätzlichen Vorkehrungen halbiert werden können, nach zwei bis drei Stunden Aufenthalt kann man sie vernachlässigen.

Diese Regelung gilt heute in ähnlicher Form. Man zählt zu den Zeiten der Tauchgänge, die innerhalb von zwölf Stunden gemacht werden, eine in Tabellen festgelegte Zeit hinzu und sucht sich mit dieser zusammengezählten Zeit die entsprechende Deko.zeit aus der Tabelle. Der Zeitzuschlag wird bei längeren Aufenthalten an der Oberfläche natürlich immer geringer, aber ganz vernachlässigt werden die zusätzlichen Maßnahmen auch nach zwei bis drei Stunden Aufenthalt nicht.

3.11. Untersuchte Variablen zur Evaluierung der Austausch- tabellen

Um zu zeigen, wieviele Gesichtspunkte berücksichtigt werden müssen und welcher ungeheurer Aufwand dahintersteckt, um als Endresultat die Austausch Tabellen zu erhalten, sei hier ein kurzer Überblick über die verschiedenartigen Experimente gegeben, die HALDANE und seine Mitarbeiter BOYCOTT und DAMANT innerhalb von zwei Jahren durchführten.

Aus einigen Experimenten läßt sich ersehen, daß ein bestimmter Mindestdruck notwendig ist, um Symptome an Ziegen zu erzeugen und, daß die Symptome vom Druck abhängen. Damit ist gemeint, daß die Dekompressionserscheinungen an Häufigkeit und Schwere zunehmen, je höher der Druck vor der Dekompression war. Das Ergebnis dieser Experimente ist leicht vorauszusehen, wenn man sich die Gewebssättigung vorstellt. Bei einem geringen Druck löst sich wenig Gas, und es kann folglich während oder nach der Deko. auch wenig Gas freigesetzt werden. Höherer Druck veranlaßt größere Gasmengen ins Gewebe einzudringen, so daß bei zu schneller Deko. diese größere Menge sich aus dem Gewebe unter Blasenbildung entfernt.

Allerdings spielt ein weiterer Faktor dabei eine Rolle. In einer anderen Gruppe von Experimenten wird gezeigt, daß die Verweildauer bei hohem Druck von großer Wichtigkeit ist. Bei einer Aufenthaltsdauer von weniger als zehn Minuten in einer mit 5,1atü versehenen Druckkammer stellen sich trotz sehr kurzer Deko.zeit keine Symptome bei den Versuchstieren ein. Erst eine längere Aussetzungsdauer bei gleichem Druck und gleicher Deko.zeit führt zu Symptomen.

Auch dieses Ergebnis ist einsichtig, da die Gewebssättigung eine Funktion der Zeit ist, d.h., daß sich nach längerer Zeit die Gewebe immer mehr mit Stickstoff anreichern, der bei der Deko. wieder freigesetzt wird.

Eine weitere Versuchsreihe zeigt, daß nicht die absolute Druckdifferenz für das Entstehen von Symptomen verantwortlich zu machen ist, sondern das Verhältnis der Druckwerte zueinander, gemessen in absolutem Atmosphärendruck (ata). Die aus diesen Versuchen gewonnenen Ergebnisse sind mit dem Gesetz von Boyle - Mariotte zu erklären. Eine Druckverminderung von beispielsweise 7ata auf 5ata, also um zwei Atmosphären, ist weitaus weniger gefährlich als eine Verminderung von 3ata auf 1ata, da sich im zweiten Fall das Volumen des freiwerdenden Gases verdreifacht, während es sich im ersten Fall nur auf das 1,4fache ausdehnt. In beiden Fällen beträgt die Differenz jedoch zwei Atmosphären.

Einige Versuche beschäftigen sich mit dem Einfluß der Dekompressionsdauer auf das Entstehen von Symptomen. Man stellt fest, daß umso weniger Deko. erscheinungen vorkommen, je länger die Druckverminderung dauert, unabhängig davon, welche Art der Dekompression verwendet wird. Die Gewebsentsättigung geht bei langer Deko.zeit so langsam vor sich, daß der gelöste Stickstoff nach und nach abgeatmet werden kann und sich folglich keine Blasen bilden können.

HALDANES Hauptaugenmerk liegt auf Experimenten, die die Unterschiede der beiden Deko.arten (stufenweise und gleichmäßige) aufdecken. Bei der direkten Gegenüberstellung erweist sich die stufenweise Deko. als wesentlich risikoärmer, wenn man den gleichen Zeitraum betrachtet (vgl. Abb.7, S.25). Andererseits erfordert eine ebenso sichere, aber gleichmäßige Deko. ein Vielfaches der Zeit, die eine stufenweise benötigt. Die Ursache dafür liegt darin, daß durch die schnelle Druckverminderung zu Beginn der stufenweisen Deko. die Entsättigung der Gewebe beschleunigt wird. Es steht mehr Stickstoff, der sich gerade noch nicht zu Gasblasen formiert hat, zum Abatmen bereit, so daß bei jedem Atemzug eine größere Gasmenge abgegeben werden kann. Dies ist bei der gleichmäßigen Deko. nicht der Fall.

HALDANE versucht auch zu ergründen, weshalb frühere Untersuchungen von anderen Wissenschaftlern (P.BERT, HELLER et al., SNELL u.a.) trotz sorgfältiger Ausführung der Experimente vollkommen unzureichende und unbefriedigende Ergebnisse lieferten. Ein direkter Vergleich von Kleintieren (Meerschweinchen, Mäuse, Ratten, Hasen etc.) mit größeren Versuchstieren (Ziegen) in derselben Druckkammer zeigt, daß an den kleinen Tieren nur sehr schwer Deko.symptome hervorgerufen werden können, während bei größeren, v.a. bei den Ziegen durch den selben Deko.prozeß fatale Folgeerscheinungen auftreten. HALDANE erklärt dies mit dem schnelleren Kreislauf und der schnelleren Atmung der Kleintiere und mit deren geringerem Fettanteil bezogen auf eine Einheit Körpergewicht. Obwohl aus jeder zusammengehörenden Gruppe von Experimenten ein genaues Ergebnis oder zumindest eine eindeutige und aussagekräftige Tendenz feststellbar ist, kann nicht übersehen werden, daß die Anfälligkeit für Deko.erscheinungen innerhalb der Versuchsobjekte sehr variiert. Während an dem einen Tier, bei ein und demselben Experiment, keine Auswirkungen zu erkennen sind, zeigt ein anderes schwere Symptome (vgl. Tabelle 1, 2. Zeile).

Tabelle 1

Die Ergebnisse der untenstehenden Tabelle zeigen einerseits die starke Streuung der individuellen Anfälligkeit, andererseits, daß die Aussetzungsdauer auf hohe Drucke (5,1atü) großen Einfluß auf die Entstehung von Symptomen hat. (aus: HALDANE et al., 1908).

Exposure in minutes	Deko. pressure in minutes	No. of guinea	No symptoms	Deaths	Severe symptoms	Death
1	1	6	6	0	0	0
3	1	5	4	0	1	0
6	1	6	6	0	0	0
10	1	7	6	0	1	0
15	10 uniform	7	2	3	1	1
15	31 stages	34	21	3	0	0
30	31 ..	23	12	8	3	0
60	31 ..	22	13	4	3	0
120	31 ..	9	0	7	1	1
240	31 ..	8	2	4	1	1

Die Ursache für diese unterschiedliche Neigung zu Dekompressionserscheinungen sind verschiedenartig. Weibliche Tiere neigen vor allem während der Schwangerschaft mehr zu Symptomen als Männchen. Dies stellen BOYCOTT/DAMANT (1908) bei Untersuchungen über den Einfluß von Fett auf die Anfälligkeit von Symptomen fest. Durch einen erhöhten Fettanteil, der bei weiblichen Tieren während der Tragezeit noch weiter zunimmt, kann mehr Stickstoff in den Körper aufgenommen werden und bei der Deko. wieder freigesetzt werden. Ein weiterer Faktor, der für die unterschiedliche Ausprägung der Symptomanfälligkeit verantwortlich ist, stellt die Bewegung während des Aufenthalts unter Druck dar. Je intensiver die körperliche Betätigung vor der Deko. ist, desto eher treten hinterher Symptome auf, weil die Gewebssättigung gegenüber der in Ruhe erhöht ist (vgl. Punkt 3.6.4.). Nach Angaben von HALDANE begünstigt ein geringer respiratorischer Gaswechsel das Erscheinen von Symptomen, während Alter, Geschlecht, Größe und Blutvolumen keinen direkten Einfluß darauf haben. Die eben aufgezählten und die schon von P.BERT festgestellten Faktoren (siehe 3.8) erschweren die Forschungsarbeit dadurch, daß Versuchsobjekte der gleichen Art bei ein und demselben Experiment weit gestreute Ergebnisse liefern.

3.12. Die Austausch Tabellen von HALDANE

Die beiden abgebildeten Tabellen stammen aus der Publikation von HALDANE aus dem Jahre 1922. Sie sind jedoch mit denen aus dem Jahre 1908 identisch und sind die ersten dieser Art. Erst nachdem sie bereits ein Jahr vorher (1907) vom British Committee of Admiralty geprüft und von der British Royal Navy in die Dienstvorschriften übernommen wurden, veröffentlichte sie HALDANE 1908.

TABLE I
STOPPAGES DURING THE ASCENT OF A DIVER AFTER ORDINARY
LIMITS OF TIME FROM SURFACE

Depth		Pressure	Time from surface to beginning of ascent	Approximate time to first stop	Stoppages in minutes at different depths ¹						Total time for ascent in mins.			
Feet	Fathoms	Pounds per square inch			60ft.	50ft.	40ft.	30ft.	20ft.	10ft.				
0-36	0-6	0-16	No limit	1	—	—	—	—	—	0-1				
36-42	6-7	16-18½	Over 3 hours	1	—	—	—	—	5	6				
42-48	7-8	18½-21	Up to 1 hour	—	—	—	—	—	—	1½				
			1-3 hours	1½	—	—	—	—	5	6½				
			Over 3 hours	1½	—	—	—	—	10	11½				
48-54	8-9	21-24	Up to ½ hour	—	—	—	—	—	—	2				
			½-1½ hours	2	—	—	—	—	5	7				
			1½-3 hours	2	—	—	—	—	10	12				
			Over 3 hours	2	—	—	—	—	20	22				
54-60	9-10	24-26½	Up to 20 mins.	—	—	—	—	—	—	2				
			20-45 mins.	2	—	—	—	—	5	7				
			¼-1½ hours	2	—	—	—	—	10	12				
			1½-3 hours	2	—	—	—	—	5	15	22			
			Over 3 hours	2	—	—	—	—	10	20	32			
60-66	10-11	26½-29½	Up to ¼ hour	2	—	—	—	—	—	2				
			¼-½ hour	2	—	—	—	—	5	7				
			½-1 hour	2	—	—	—	—	3	10	15			
			1-2 hours	2	—	—	—	—	5	15	22			
			2-3 hours	2	—	—	—	—	10	20	32			
66-72	11-12	29½-32	Up to ¼ hour	2	—	—	—	—	—	2	4			
			¼-½ hour	2	—	—	—	—	3	5	10			
			½-1 hour	2	—	—	—	—	5	12	19			
			1-2 hours	2	—	—	—	—	10	20	32			
72-78	12-13	32-34½	Up to 20 mins.	2	—	—	—	—	—	5	7			
			20-45 mins.	2	—	—	—	—	5	10	17			
			¼-1½ hours	2	—	—	—	—	10	20	32			
78-84	13-14	34½-37	Up to 20 mins.	2	—	—	—	—	—	5	7			
			20-45 mins.	2	—	—	—	—	5	15	22			
			¼-1¼ hours	2	—	—	—	—	10	20	32			
84-90	14-15	37-40	Up to 10 mins.	2	—	—	—	—	—	3	5			
			10-20 mins.	2	—	—	—	—	3	5	10			
			20-40 mins.	2	—	—	—	—	5	15	22			
			40-60 mins.	2	—	—	—	—	3	10	15	30		
90-96	15-16	40-42½	Up to 10 mins.	3	—	—	—	—	—	3	6			
			10-20 mins.	2	—	—	—	—	—	3	5	10		
			20-35 mins.	2	—	—	—	—	—	5	15	22		
			35-55 mins.	2	—	—	—	—	3	10	15	30		
96-108	16-18	42½-48	Up to 15 mins.	3	—	—	—	—	—	3	5	11		
			15-30 mins.	3	—	—	—	—	3	7	10	23		
			30-40 mins.	3	—	—	—	—	5	10	15	33		
108-120	18-20	48-53½	Up to 15 mins.	3	—	—	—	—	2	3	7	15		
			15-25 mins.	3	—	—	—	—	5	10	23			
			25-35 mins.	3	—	—	—	—	5	10	15	33		
120-132	20-22	53½-59	Up to 15 mins.	3	—	—	—	—	2	5	7	17		
			15-30 mins.	3	—	—	—	—	5	10	15	33		
132-144	22-24	59-64½	Up to 12 mins.	3	—	—	—	—	3	5	5	16		
			12-25 mins.	3	—	—	—	—	2	5	10	12	32	
144-156	24-26	64½-70	Up to 10 mins.	3	—	—	—	—	3	5	5	16		
			10-20 mins.	3	—	—	—	—	2	5	10	12	32	
156-168	26-28	70-75	Up to 10 mins.	3	—	—	—	—	2	3	5	5	18	
			10-16 mins.	3	—	—	—	—	2	3	5	7	10	30
168-180	28-30	75-80½	Up to 9 mins.	3	—	—	—	—	2	3	5	5	18	
			9-14 mins.	3	—	—	—	—	2	3	5	7	10	30
180-192	30-32	80½-86	Up to 13 mins.	3	—	—	—	—	2	3	5	7	10	30
192-204	32-34	86-91½	Up to 12 mins.	3	2	2	3	5	7	10	32			

¹ During each stoppage the diver should continue to move his arms and legs.

TABLE II
STOPPAGES DURING THE ASCENT OF A DIVER AFTER DELAY
BEYOND THE ORDINARY LIMITS OF TIME FROM SURFACE

Depth		Pressure	Time from surface to beginning of ascent	Approximate time to first stop	Stoppages in minutes at different depths								Total time for ascent in mins.				
Feet	Fathoms	Pounds per square inch			80 ft.	70 ft.	60 ft.	50 ft.	40 ft.	30 ft.	20 ft.	10 ft.					
60-66	10-11	26½-29½	Over 3 hours	2	—	—	—	—	—	—	15	30	42				
66-72	11-12	27½-32	2-3 hours	2	—	—	—	—	—	—	10	30	42				
			Over 3 hours	2	—	—	—	—	—	—	20	30	52				
72-78	12-13	32-34½	1½-2½ hours	2	—	—	—	—	—	—	20	25	47				
			Over 2½ hours	2	—	—	—	—	—	—	20	30	62				
78-84	13-14	34½-37	1½-2 hours	2	—	—	—	—	—	—	15	30	47				
			2-3 hours	2	—	—	—	—	—	—	5	30	67				
84-90	14-15	37-40	Over 3 hours	2	—	—	—	—	—	—	10	30	77				
			1-1½ hours	2	—	—	—	—	—	—	5	15	25	47			
90-96	15-16	40-42½	1½-2½ hours	2	—	—	—	—	—	—	5	30	72				
			Over 2½ hours	2	—	—	—	—	—	—	20	35	92				
96-108	16-18	42½-48	1-1½ hours	2	—	—	—	—	—	—	5	15	30	52			
			Over 2½ hours	2	—	—	—	—	—	—	10	30	35	77			
108-120	18-20	48-53½	40-60 minutes	2	—	—	—	—	—	—	10	15	20	47			
			Over 2 hours	2	—	—	—	—	—	—	15	30	35	82			
120-132	20-22	53½-59	35-60 minutes	2	—	—	—	—	—	—	5	10	15	25	57		
			Over 2 hours	2	—	—	—	—	—	—	30	35	40	142			
132-144	22-24	59-64½	¼-¾ hours	3	—	—	—	—	—	—	5	10	15	20	53		
			Over 1½ hours	3	—	—	—	—	—	—	5	10	20	30	98		
144-156	24-26	64½-70	Over 1½ hours	3	—	—	—	—	—	—	15	30	35	40	163		
			25-45 minutes	3	—	—	—	—	—	—	3	5	10	15	25	61	
156-168	26-28	70-75	¾-1½ hours	3	—	—	—	—	—	—	10	10	20	30	108		
			Over 1½ hours	3	—	—	—	—	—	—	30	30	35	40	178		
168-182	28-30	75-80½	20-35 minutes	3	—	—	—	—	—	—	3	5	10	15	20	56	
			Over 1 hour	3	—	—	—	—	—	—	7	10	15	30	95		
182-194	30-32	80½-86	16-30 minutes	3	—	—	—	—	—	—	3	5	10	15	20	56	
			Over 1 hour	3	—	—	—	—	—	—	3	5	10	15	30	101	
194-206	32-34	86-91½	½-1 hour	3	—	—	—	—	—	—	5	25	25	30	35	40	203
			14-20 minutes	3	—	—	—	—	—	—	3	3	7	10	15	41	
206-218	34-36	91½-98	20-30 minutes	3	—	—	—	—	—	—	2	2	3	10	15	25	60
			Over 1 hour	3	—	—	—	—	—	—	15	25	30	35	40	218	
218-230	36-38	98-104	13-20 minutes	3	—	—	—	—	—	—	3	3	7	15	15	46	
			Over 1 hour	3	—	—	—	—	—	—	3	3	5	10	15	25	64
230-242	38-40	104-110	½-1 hour	3	—	—	—	—	—	—	3	5	10	15	25	118	
			Over 1 hour	3	5	20	25	30	30	35	40	40	40	228			
242-254	40-42	110-116	12-20 minutes	3	—	—	—	—	—	—	3	3	5	7	10	20	51
			Over 1 hour	3	—	—	—	—	—	—	3	3	3	5	10	20	67
254-266	42-44	116-122	20-30 minutes	3	—	—	—	—	—	—	3	3	5	10	20	30	124
			Over 1 hour	3	15	20	25	30	30	30	35	40	40	238			

Überschriften zu den Tabellen Seite 35 und 36.

Tabelle 2 (S.35)

Die Aufenthaltszeiten dieser Tabelle sind für jede Tiefe beschränkt und werden mit zunehmender Tiefe kürzer, weil die Gesamtauftauchtzeit auf etwa eine halbe Stunde berechnet ist.

Tabelle 3 (S.36)

Überschreiten die Aufenthaltszeiten die in vorstehender Tabelle angegebenen Werte, dann muß nach dieser Tabelle verfahren werden. Die Gesamtauftauchtzeit wird dadurch um ein Vielfaches länger.

(Beide Tabellen aus: HALDANE, 1922, S. 350ff).

Die Aufenthaltszeiten bei den einzelnen Stationen sind so berechnet, daß der Stickstoffdruck in keinem Teil des Körpers das Doppelte des momentanen Stickstoffumgebungsdrucks (= Stickstoffpartialdruck der Einatemluft) überschreitet. Nur der letzte Schritt weicht von dieser Regel geringfügig ab. Beim Erreichen der Oberfläche nach dem letzten Aufenthalt beträgt der Stickstoffdruck in einem bestimmten Gewebe höchstens $2 \frac{1}{4}$ mal so viel wie der atmosphärische Stickstoffdruck ausmacht.

HALDANes erste Tabelle (S.35) ist so ausgelegt, daß der Taucher nach einer halben Stunde Gesamtdeko.zeit zur Oberfläche zurückkehren kann, vom Verlassen der Aufenthaltstiefe aus gerechnet. Die angegebene Aufenthaltsdauer ("Time from surface to beginning of ascent") betrifft demnach die eigentliche Aufenthaltszeit im bereits erwähnten Sinne (siehe Punkt 3.9., S.27).

Die Dekompressionszeiten der anderen Tabelle sind für längere Aufenthaltszeiten in der jeweils größten Tiefe berechnet, so daß die Gesamtaustauchzeit mindestens eine halbe Stunde überschreitet.

Wie aus der Anmerkung am unteren Ende der ersten Tabelle zu entnehmen ist, wird der Taucher aufgefordert, während der Aufenthaltszeit an den einzelnen Stationen Arme und Beine zu bewegen, um die Entsättigung zu beschleunigen.

Die Festlegung der Gesamtaustauchzeit auf eine halbe Stunde bewirkt zwangsläufig, daß in einer bestimmten Tiefe nur eine ganz bestimmte Zeit zugebracht werden darf. In einem gewissen Sinne ist diese Zeit eine Vorstufe der heute bekannten Nullzeit. Die Nullzeit steht in enger Beziehung mit einer ihr zugeordneten Tauchtiefe. Sie gibt an, wie lange der Aufenthalt in einer bestimmten Tiefe dauern darf, ohne daß beim Auftauchen Deko.zeiten eingehalten werden müssen, wobei die Aufstiegsgeschwindigkeit 18 m/min nicht überschreiten darf.

Wird diese Zeit dennoch überzogen, dann ist ein Austauchen ohne Einhalten der vorgeschriebenen Deko.zeiten nicht mehr gefahrlos möglich.

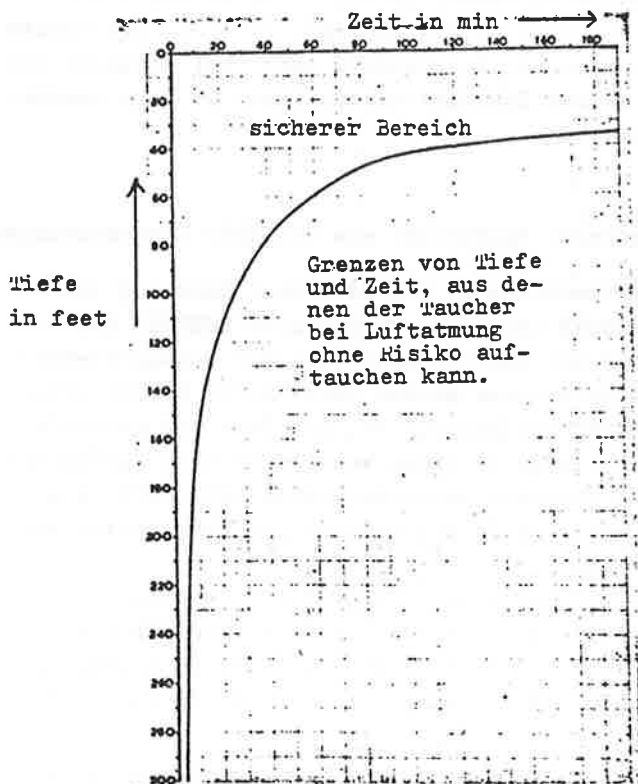


Abb.10 zeigt eine Nullzeitkurve, wie sie heute verwendet wird.(nach: MILES/MACKAY, 1976, S.152).

Ein Vergleich mit der von HALDANE gefundenen Austauschzeiten zeigt, daß heutzutage mit weniger Sicherheitsspielraum getaucht wird. Während HALDANE die "Nullzeit" in 60 ft Tiefe auf zwanzig Minuten begrenzt, lassen MILES/MACKAY einen Aufenthalt bis zu einer Stunde zu (vgl. Abb.10). Aus diesem Beispiel ist zu ersehen, daß HALDANE sehr viel Vorsicht bei der Erstellung seiner Tabellen walten ließ, um kein unnötiges Risiko einzugehen.

3.13. Zusammengefaßte Ergebnisse aus HALDANES Untersuchungen

Nach einer Experimentierzeit von etwa zwei Jahren (1906 - 1907) bieten HALDANE und seine Mitarbeiter BOYCOTT und DAMANT die ersten und einigermaßen sicheren Austausch Tabellen an. Sie bedeuten einen großen Fortschritt in der Prävention von Dekompressionsunfällen. Die Idee der gefahrlosen Gewebsübersättigung um einen bestimmten Wert war im Experiment auch an Menschen bewiesen worden und stellt die Basis für alle weiteren Untersuchungen und Verbesserungen an Austausch Tabellen dar.

Neben den Tabellen liegen eine Reihe von Ergebnissen vor, die auch heute noch nichts von ihrer Bedeutung für die Tauchforschung eingebüßt haben. Die wichtigsten Ergebnisse aus der ersten Veröffentlichung von HALDANE (1908) seien hier aufgezählt.

1. Die Zeit, in der ein Mensch bei erhöhtem Luftdruck mit Stickstoff gesättigt wird, variiert in den verschiedenen Bestandteilen des Körpers von wenigen Minuten bis zu mehreren Stunden. Der Sättigungsvorgang folgt im allgemeinen einer logarithmischen Kurve und ist nahezu vollständig nach fünf Stunden. (Diese Zeit gilt heute bei weitem nicht mehr. Anm. d. Verf.).

2. Die Entsättigungskurve nach der Dekompression ist die gleiche wie die der Sättigung, vorausgesetzt, daß sich keine Blasen bilden.
3. Für die Entstehung von Symptomen sind diejenigen Körpergewebe am wichtigsten, die sich langsam sättigen und entsättigen.
4. Bei schneller Dekompression von 2ata auf 1ata werden keine Symptome erzeugt. Ebenso ist es sicher, wenn man den absoluten Druck schnell auf die Hälfte reduziert, z.B. von 6ata auf 3ata oder von vier Atmosphären auf zwei. Dies gilt bis zu einem Druck von etwa sieben Atmosphären.
5. Die Dekompression ist nicht sicher, wenn der Stickstoffdruck im Körper (nach der Deko., Anm. d. Verf.) mehr als doppelt so groß ist wie der atmosphärische Stickstoffdruck.
6. Der erste Teil der Dekompression sollte aus der Halbierung des absoluten Drucks bestehen. Daran anschließend wird die Deko.rate immer langsamer, so daß der Stickstoffdruck in keinem Teil des Körpers größer wird als das Doppelte des Stickstoffdrucks der Einatemluft. Eine sichere Dekompression kann mit beträchtlicher Genauigkeit errechnet werden.
7. Gleichmäßige Dekompression muß extrem langsam sein, wenn man damit die gleichen Ergebnisse erreichen will. Sie ist ungeeignet, weil sie die Aussetzungsdauer bei hohem Druck verlängert und keinen Gebrauch von der Möglichkeit macht, eine schnellere Gewebsentsättigung zu erreichen durch eine Vergrößerung der Differenz des Partialdrucks von Stickstoff innerhalb und außerhalb des Körpers. Sie ist zu Beginn unnütz langsam, am Ende gefährlich schnell.

8. Wenn die Gewebe eines Menschen bei sehr hohem Druck völlig gesättigt sind, dauert die Dekompression in jedem Falle sehr lange. Um diese lange Deko.zeit zu vermeiden, muß die Aussetzung zu solchen Drucken streng begrenzt werden. Die angegebenen Tabellen zeigen die geeignete Art und Dauer der Dekompression für verschiedene Zeiten der Aussetzung an. Sie gelten bis zu Drucken von etwa 6,3atü. Dies wurde in zahlreichen Experimenten an Tieren und Menschen bewiesen.
9. Der Tod von Ziegen erfolgt fast immer durch pulmonale Luftembolie oder durch Lähmung infolge Verstopfung von Gefäßen am Rückenmarksstrang durch Stickstoff. Die Ursache von "bends" bleibt ungewiß. In vielen Fällen entstehen sie durch Blasen in der Synovialflüssigkeit der Gelenke.
10. Nach dem Tod von Tieren wurden freie Blasen meistens im Blut, im Fett und in der Synovialflüssigkeit gefunden, aber auch in der Substanz des Rückenmarksstranges.

Die Würdigung von HALDANEs stufenweiser Dekompression im U.S. NAVY DIVING MANUAL (1978,S.2) beweist, daß sie großen Einfluß auf die weitere Entwicklung der Austausch Tabellen genommen hat.

"Haldane also composed a set of diving tables which establishes a stage method of decompression. Though they have been re-studied and improved over the years, these tables remain the basis of the accepted method for bringing a diver to the surface."

4. Entwicklungen und Neuerungen des Tauchens seit HALDANE

Die Entwicklung auf dem Gebiet des Tauchens erfuhr durch HALDANES Tabellen einen entscheidenden Aufschwung. In den folgenden Jahren wurden erhebliche Fortschritte auf vielen Gebieten gemacht.

Für das konventionelle Tauchen bis ca. 70m - auch Flachwaserttauchen genannt -, das heute hauptsächlich nur noch von Sport- und Hobbytauchern betrieben wird, erfolgten einige, jedoch keine grundsätzlichen Änderungen bezüglich der Austauchtabelle. Durch die Einführung der Nullzeit bekamen die Taucher eine wichtige Hilfe für kurze und gefahrlose Tauchgänge an die Hand. Technische Verbesserungen der Apparaturen führten zu einer Expansion des Unterwassersports. Das zunehmende Interesse von Industrie und Wirtschaft machte Vorstöße in immer größere Tiefen notwendig (Ölbohrungen). Um diese zu ermöglichen, mußten neue, bisher unbekannte Wege und Methoden des Tauchens gefunden werden. Die Erforschung der Tiefen des Kontinentalschelfes brachte die Einführung von künstlichen Atemgasgemischen mit sich, deren Zusammensetzung heute noch erforscht, erprobt und für verschiedene Tiefen optimiert wird.

Die unökonomischen, langen Austauschzeiten aus größeren Tiefen führten zu einer weiteren Neuerung, die den Inbegriff des modernen Tauchens darstellt: Das Sättigungstauchen.

Mit zunehmender Tiefe wurden die Wissenschaftler vor neue, bis dahin unbekannte Probleme gestellt (HPNS), die von verschiedenen Forschungsunternehmen und Forschungsstätten untersucht werden. Im Gegensatz zu früheren Problemen muß zur Vermeidung dieser "Taucherkrankheit" besonders die Kompressionsmethode in Betracht gezogen werden.

Seit jüngster Zeit ist man dabei zu erforschen, ob die Dekompression nicht völlig umgangen werden kann, indem man statt Gas Flüssigkeit als Sauerstoffüberträger zur Beatmung verwendet.

Schließlich arbeiten Tauchtechnikunternehmen an einer rein mechanischen Lösung des Problems der Deko.auswirkungen. Die Verwendung eines gepanzerten Tauchanzuges würde fast sämtliche Probleme der Kompression und der Dekompression lösen.

Da jeder dieser vorgestellten Bereiche eine fast unüberschaubare Zahl von Einzelheiten in sich birgt, werden hier nur die wichtigsten und interessantesten herausgegriffen und näher erläutert.

4.1. Verbesserungen und Unterschiede der einzelnen Austausch- tabellen

Die Dekompression aus Tiefen bis ca. 60m bereitet heute keine Probleme mehr. Die verschiedenen Austausch Tabellen (amerikanische, britische, französische, deutsche etc.) unterscheiden sich vom Prinzip her nicht. Sie basieren fast ausnahmslos auf dem HALDANE - Modell der erlaubten Übersättigung.

Die Austausch Tabelle der U.S. Navy stützt sich auf dieses Modell (vgl. US NAVY DIVING MANUAL, 1978, S.7). Es ist dahingehend abgewandelt, daß die Übersättigungstoleranz nicht für alle Gewebe als konstant angenommen wird (2:1 nach HALDANE), sondern daß sie eine charakteristische Größe für jedes Gewebe darstellt und von der jeweiligen Tiefe abhängt. Mit dieser Theorie und dazugehörigen experimentell ermittelten Werten wurden neue Austausch Tabellen berechnet, die auch für größere Tiefen gelten und darüberhinaus einen Sicherheits-spielraum aufweisen. Als zusätzliche Vorschrift gegenüber den HALDANE - Tabellen ist eine Aufstiegsgeschwindigkeit von mehr als 18 m/min verboten (vgl. US NAVY DIVING MANUAL, 1978, S.342).

Die in Deutschland von SEEMANN und RENEMANN eingeführten

Tabellen geben auf Berechnungen und Experimente von CROCKER/TAYLOR (1952) zurück. Deren anfangs aufgestellte Theorie basiert auf der Stickstoffdiffusionstheorie von HEMPLEMAN.

Sie unterscheidet sich von der HALDANE - Theorie insofern, als die Anreicherung des Fettgewebes mit Stickstoff nicht als gleichmäßig angenommen wird. Die Sättigung erfolgt vielmehr von dem versorgenden Blutgefäß aus und nimmt deshalb von diesem aus radial nach außen hin ab (siehe Abb. 11a).

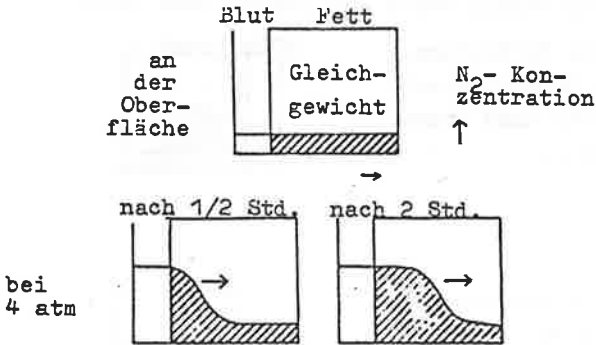


Abb. 11a

Abb. 11b

Abbildung 11a,b,c zeigt die Verteilung des Stickstoffs unter Druck in fetthaltigem Gewebe. (nach: MILES/MACKAY, 1976, S. 149).

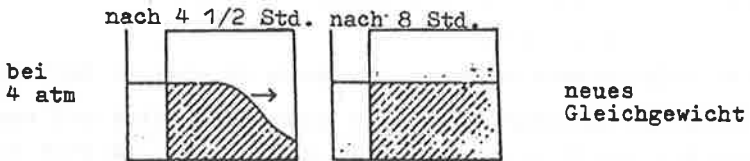
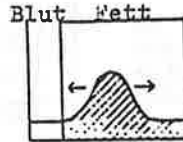


Abb. 11c

Das Fettgewebe ist nach dieser Theorie nach zwei Stunden halb gesättigt, nach acht Stunden völlig (Abb.11c). Die Halbsättigung sieht jedoch ungleichmäßig aus (Abb.11b) und nicht wie bei HALDANE, der eine durchschnittliche, gleichmäßige Sättigung annimmt.

Wird nach dieser neuen Theorie der Umgebungsdruck plötzlich gesenkt, dann endet die Sättigung nicht sofort wie nach der HALDANE - Theorie, sondern breitet sich noch etwas von der größten Sättigung nach außen hin weiter aus (Abb.12a). Auch bei nur geringer Druckverminderung diffundiert das aufgenommene Inertgas weiterhin durch das Gewebe (Abb.12b).

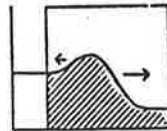
Abb.12a zeigt die Verteilung des Stickstoffs in teilweise gesättigtem Gewebe nach Rückkehr zu Normaldruck.



»

Abb.12b zeigt die Sättigungsausbreitung nach einer geringen Druckverminderung.

(nach: MILES/MACKAY, 1976, S.150)



»

Mit dieser Theorie und der ebenfalls von HEMPLEMAN (1952) gefundenen Formel für die aufgenommene Stickstoffmenge:

$$M = P \times \sqrt{t}$$

(M: aufgenommene N_2 -Menge; P: Druck in ata; t: Zeit in Minuten)

berechnen CROCKER/TAYLOR neue Austausch Tabellen und erproben sie zuerst an Ziegen, dann an Menschen. Da sich diese Tabellen aber als unsicher erweisen, macht sich CROCKER (1957a und 1957b) daran, nach dem "Versuch - Irrtum" Prinzip vorzu-

gehen. Die praktische Anwendbarkeit ist das Hauptkriterium, die theoretische Begründung steht im Hintergrund. Erneute Versuche mit Ziegen führen schließlich zu Tabellen, die für Tiefen bis zu 60m sicher sind (vgl. CROCKER, 1958). Sie sind von der British Royal Navy anerkannt worden und finden in etwas übersichtlicherer Form neben den Tabellen der U.S. Navy auch in Deutschland Anwendung.

Hauptmerkmal der meisten Tabellen ist, daß der Druck zu Beginn der Deko. nicht nur um die Hälfte (2:1), sondern um mehr vermindert wird. Dies hat seine Ursache darin, daß einige schnellsättigende Gewebe eine Übersättigungstoleranz bis zu 5:1 aufweisen. Demnach kann der Druck nach kurzen Aufenthaltszeiten um mehr als die Hälfte verringert werden, ohne daß Deko.erscheinungen zu befürchten sind (vgl. EHM, 1974, S.235f). Aus den unterschiedlichen Übersättigungstoleranzen ergeben sich auch großzügigere Nullzeiten als früher angenommen wurde (siehe Punkt 3.12., S.38/39).

Zusammenfassend kann man sagen, daß sich die einzelnen Tabellen in Nullzeiten und in der Gesamtauftauchtzeit nicht wesentlich unterscheiden, lediglich durch andere Tauchstufen und Aufenthaltszeiten bei diesen (vgl. EHM/SEEMANN, 1965, S.139).

4.2. Sauerstoffatmung und künstliche Gasgemische

Zur Vermeidung der durch Stickstoff entstehenden Deko.erscheinungen bietet sich theoretisch die Verwendung von reinem Sauerstoff als Atemgas an. Damit ergeben sich aber erneut Schwierigkeiten.

4.2.1. Toxische Wirkungen des Sauerstoffs

Der Sauerstoff (O_2), unentbehrlich für alle Lebensvorgänge, besitzt die paradoxe Eigenschaft, daß er schädlich wirkt, wenn er zu lange bzw. bei zu hohem Partialdruck eingeatmet wird.

Als erster untersuchte PAUL BERT (1878) die Auswirkungen des Sauerstoffs unter erhöhtem Partialdruck sehr eingehend. Die H y p e r o x i e (= Überversorgung mit Sauerstoff) beginnt sich durch Übelkeit, Schwindel, Sehstörungen, allgemeine Unruhe, Angstgefühle und Müdigkeit anzukündigen. Es folgen kleine, kurze Zuckungen um den Mund und an den Augenlidern, begleitet von Kurzatmigkeit und Erstickungsgefühlen. Die Zuckungen verstärken sich und setzen sich in alle Gliedmaßen fort bis Bewußtlosigkeit eintritt. Nach einem kurzen Erwachen erfolgt nochmaliger Bewußtseinsverlust und schließlich der Tod. Diese zuerst an Tieren beobachtete toxische Auswirkung des erhöhten Sauerstoffpartialdrucks wird nach dem Erforscher PAUL - BERT - E f f e k t genannt.

Diese krampfartigen Muskelzuckungen stellen später auch BORNSTEIN/STROINK (1912) bei Menschen fest. Nach 50-minütiger Aussetzung auf 3ata Sauerstoffdruck und gleichzeitig geleisteter Arbeit zeigen sich Muskelkrämpfe an den Beinen. Über die Ursachen darüber gibt es noch nicht mehr als die Vermutung, daß eine direkte Einwirkung des Sauerstoffs auf den nervus vagus die Krämpfe auslöst. Entscheidend dafür ist jedoch der erhöhte Sauerstoffpartialdruck. Je höher er ist, desto schneller und stärker erfolgen die Krämpfe und Zuckungen.

Völlig andere, jedoch nicht weniger gefährliche Symptome erzeugt der Sauerstoff, wenn er bei einem Teildruck von etwa 1ata geatmet wird. Zunächst läßt sich dies einige Stunden schadlos durchführen. Nach acht bis zwölf Stunden deuten sich erste Anzeichen einer Lungenschädigung durch trockenen Husten und Beklemmungsgefühle in der Brust an. Weitere Sauerstoffatmung verursacht Bronchitis und Lungenödeme. Schließlich erfolgt ebenfalls der Tod als Folge von Atemnot. Die Todesursache ist paradoxerweise eine Unterversorgung der Gewebe mit Sauerstoff (Hypoxie). Als Grund für diese Hypoxie lassen sich spezifische Lungenschädigungen bei der Obduktion

feststellen. Durch Verdickung des Gewebes der Alveolen ist die Sauerstoffdiffusion erschwert und somit ist eine ausreichende Sauerstoffversorgung des Organismus nicht mehr möglich. Die Schädigungen durch Atmung reinen Sauerstoffs bei atmosphärischem Druck nennt man ebenfalls nach dem Erforscher LORRAIN-SMITH - E f f e k t (vgl. SMITH, 1999). Den Hinweis auf eine Verbindung zwischen den beide toxischen Effekten des Sauerstoffs trotz unterschiedlicher Symptome geben die Untersuchungen von HILL (1912), der bei Tieren, die erhöhtem Sauerstoffdruck ausgesetzt waren, zunächst Atemnot und Kurzatmigkeit beobachtet, dann aber die gleichen Lungenschädigungen diagnostiziert, die für den LORRAIN-SMITH - Effekt charakteristisch sind.

Reiner Sauerstoff darf beim Tauchen deshalb nur bis zu 10m Tiefe verwendet werden, 50% Sauerstoffzusatz zur Preßluft nur bis zu ca. 30m und Preßluft bis höchstens 90m, da der Teildruck des Sauerstoffs für eine bestimmte Zeit 2ata nicht übersteigen soll. Bei Tauchunternehmungen in größere Tiefen versucht man deshalb, den Partialdruck des Sauerstoffs zwischen 0,4 und 0,6ata zu halten, was in allgemeinen über lange Zeit ohne Schädigungen vertragen wird.

Lediglich während der letzten Phase der Dekompression nach Sättigungstauchgängen kann der Sauerstoffdruck für kurze Zeit 2ata überschreiten, um die Entsättigung der Gewebe von Stickstoff oder Helium zu beschleunigen.

Für diesen Prozeß sowie für die oben erwähnten künstlichen Gemische sind eigens dafür berechnete Austauschtabellen zu benutzen.

Dank der durch die Forschungsarbeit der genannten Persönlichkeiten gewonnenen Erkenntnisse ereignen sich heutzutage keine Unfälle durch zu hohen Sauerstoffdruck mehr, außer wenn technische Defekte zuviel Sauerstoff ins Gasgemisch strömen lassen.

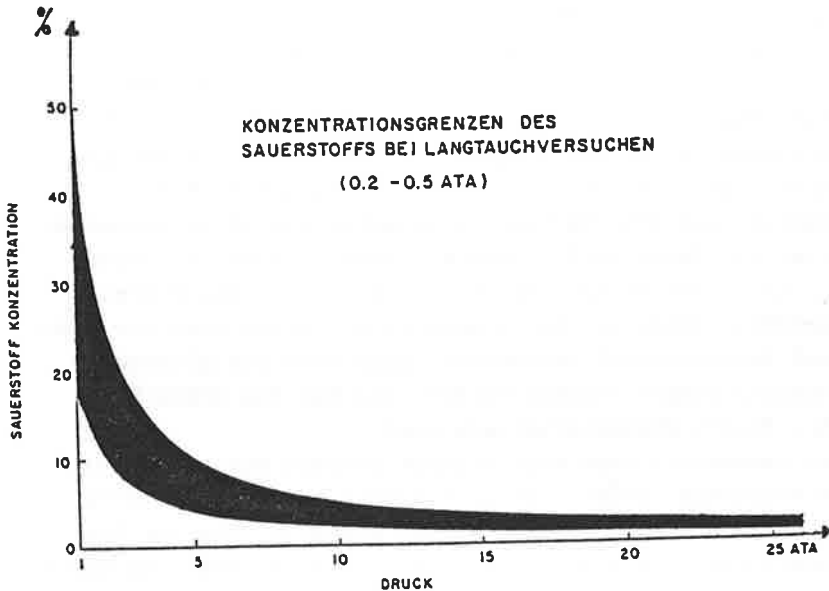


Abb.13 zeigt die Konzentrationsgrenzen des Sauerstoffs bei langen Tauchversuchen zur Vermeidung des LORRAIN-SMITH - Effekts in Abhängigkeit vom Druck. (nach: Überleben auf See, 1968, S.84).

4.2.2. Zusatz von Inertgasen

Als Inertgase bezeichnet man solche Gase, die nicht an Stoffwechselprozessen teilnehmen. Sie werden in der gleichen Konzentration ausgeatmet wie sie mit dem Atemgasgemisch eingeatmet werden. Das bekannteste und am meisten verwendete ist der Stickstoff, der zu ca. 80% in der Luft enthalten ist. Stickstoff besitzt jedoch die Eigenschaft, daß er schon bei einem mäßig hohen Teildruck (3 - 4ata) narkotische Wirkungen zeigt und Verursacher des bekannten Tiefenrausches ist.

Wegen der steigenden Ansprüche der Taucher - längere Aufenthaltszeiten in größeren Tiefen, kürzere Deko.zeiten bei möglichst geringem Risiko - ergeben sich erneut Probleme mit dem Stickstoff. Mit zunehmender Tiefe kann Stickstoff als Füllgas (Inertgas) nicht weiter verwendet werden, erstens, wegen des Tiefenrausches, zweitens, wegen des erhöhten Atemwiderstandes als Folge der größeren Dichte, drittens, wegen der langen Deko.zeit infolge langsamer Entsättigung. Als Ersatz bieten sich eine Reihe von Inertgasen, insbesondere Edelgase, an, die auf Dichte, narkotische Wirkung und Löslichkeit in den einzelnen Geweben untersucht werden.

4.2.2.1. Narkotische Wirkung und Löslichkeit

Ein Inertgas hat einen umso größeren narkotischen Wert, je höher sein Molekulargewicht ist und je größer seine Lipidlöslichkeit ist (= Löslichkeit in Fett und fetthaltigen Geweben). Nach dieser Faustregel besäße Wasserstoff (H_2) die geringste, Xenon die größte narkotische Wirksamkeit, was für Xenon auch zutrifft. Ein Gemisch aus 80% Xenon und 20% Sauerstoff wird bei Normaldruck zur chirurgischen Anästhesie verwendet. Die gleiche prozentuale Verteilung mit Stickstoff/Sauerstoff wirkt erst bei 18ata narkotisch (vgl. SEEMANN, 1968, S.107). Zur genaueren Bestimmung des Narkosegrades der Inertgase reicht diese Faustformel nicht aus. In Wirklichkeit erzeugt Helium (He) die geringsten narkotischen Erscheinungen, gefolgt von Wasserstoff und Neon (Ne). Wasserstoff wäre leicht und billig herzustellen, aber bei Gemischen von mehr als 3% Sauerstoffgehalt und Wasserstoff entsteht das leicht entzündliche Knallgas, weshalb Wasserstoff im allgemeinen als Füllgas ausscheidet und erst bei Tiefen wieder in Frage kommt, für die der Sauerstoffgehalt unter 2% liegt.

Tabelle 4 zeigt einen Vergleich der Eigenschaften von Inertgasen, die als Füllgas in Frage kommen. (Überleben auf See, 1968, S.106).

	Wasserstoff H	Helium He	Neon Ne	Stickstoff N ₂	Argon Ar	Krypton Kr	Xenon Xe
Löslichkeits- koeffizient Öl / Wasser	3,0	1,7	2,07	5,25	5,32	9,6	20,0
Fetllöslichkeit	0,01	0,015	0,019	0,09	0,19	1,0	7,1
Molekular- gewicht	2	4	20,18	28	40	83,7	131,3
Viskosität	88	194	298	178	222	246	226
Dichte (i. V. z. Luft)	0,07	0,138	0,696	0,967	1,38	2,89	4,51

Tabelle 5. Hieraus ist besonders gut die narkotische Wirksamkeit der Gase abzulesen. (nach: STRAUSS, 1976, S.163).

Gas	Mol. Gew.	Löslich- keit	Mol. Vol.	Polari- sierbar- keit	narkot. wirkung
He	4	0.015	32.00	0.20	4.26
Ne	20	0.019	16.72	0.39	3.58
H ₂	2	0.036	28.3		1.83
N ₂	28	0.067	35.4	1.74	1
Ar	40	0.14	28.6	1.63	0.43
Kr	83.7	0.43	34.7	2.48	0.14
Xe	131.3	1.7	43.0	4.00	0.039
O ₂	32	0.11	27.9	1.58	
CO ₂	44	1.34	38.0	2.86	

4.2.2.2. Helium - Sauerstoff Gemische

Der erste größere Einsatz von Heliumgas als Zusatz zur Preßluft wurde 1939 in den USA bei der Hebung des Unterseebootes "Squalus" versuchsweise erprobt, nachdem bereits zwei Jahre vorher Edgar End und Max Nohl erfolgreich mit Heliumgemisch getaucht waren (vgl. KINDWALL, 1976). Lange Zeit blieb die US Navy die einzige Organisation, die Helium als Inertgaszusatz verwenden konnte, da nur in den USA Helium industriell hergestellt wurde. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß die USA führend in der Erforschung von Heliumgemischen waren. Während bei den ersten Anwendungen von künstlichen Tauchgasgemischen Helium noch zu Luft hinzugefügt wurde, verwendet man heute bei den meisten Tieftauchgängen ein Zweikomponentengemisch, das nur Helium und Sauerstoff enthält. Man nennt es häufig auch H e l i o x - Gemisch (Abkürzung für Helium/Oxygen). Manchmal wird ein sehr geringer Prozentsatz an Stickstoff beigemischt, wodurch dann das T r i m i x (Dreikomponentengemisch) entsteht (siehe Punkt 6.3.).

Die Entwicklung komplizierter elektronisch gesteuerter Apparaturen erlaubt es, daß der Sauerstoffanteil mit der Tiefe abnimmt, so daß er in jeder Tiefe zwischen den bekannten Toleranzgrenzen liegt.

Wegen der geringen Lipidlöslichkeit von Helium (siehe Tabellen S.52) geht die Dekompression im allgemeinen schneller vor sich und erfolgt nach eigens dafür angefertigten Tabellen, die auch auf der stufenweisen Deko.methode von HALDANE beruhen.

Die Vorteile, die durch die Verwendung von Heliumgemischen entstehen, erlauben den Vorstoß in extreme Tiefen, die ohne dieses Gas nicht erreichbar wären. Der Grundstein des Tiefseetauchens ist damit gelegt.

II. Teil

Die Entwicklung neuer Tauchformen und Forschungsschwerpunkte
im Tiefseetauchen zur Vermeidung von Kompressions- und
Dekompressionserscheinungen im menschlichen Körper.

5. Sättigungstauchen

Von Sättigungstauchen spricht man, wenn die Austauschzeit unabhängig von der Aufenthaltszeit unter Druck ist. Man kann praktisch beliebig lange bei einem bestimmten Druck verweilen, ohne daß dadurch der Deko.prozeß beeinflusst wird. Das ist dadurch zu erklären, daß alle Gewebe vollkommen mit dem verwendeten Inertgas gesättigt sind, was beim konventionellen Tauchen nicht der Fall ist.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ab welchem Zeitpunkt man von einem Sättigungstauchgang sprechen kann und was noch nicht dazugehört. Nach amerikanischer Auffassung kann man erst einen Aufenthalt von mehr als 20 Stunden als Sättigungstauchen bezeichnen (BOND), während man nach Meinung der französischen Unterwasserforscher (CHOUTEAU, COUSTEAU et al.) bereits ab 12 Stunden von Sättigungstauchen sprechen kann (vgl. Überleben auf See, 1968, S.162). An dieser Stelle sei an HALDANE erinnert, der aufgrund seiner Experimente mit Ziegen bereits nach 5 Stunden die Gewebe als gesättigt ansieht. Die unterschiedlichen Auffassungen resultieren aus verschiedenen Werten für das langsamste Gewebe. Die Rückrechnung auf die Halbwertszeiten zeigen, daß die amerikanischen Wissenschaftler von einer Halbwertszeit über 350 Minuten ausgehen, während die französischen mit ihrem Wert etwas über 220 Minuten liegen müssen (Rechengang siehe Anhang I,8), vorausgesetzt, man legt den Berechnungen eine gemeinsame Basis zugrunde, bei der die Sättigung als vollkommen angenommen wird (z.B. 90%). Da die Forschungen über das Sättigungstauchen im wesentlichen schon abgeschlossen sind und die schwierigsten Probleme (v.a. die Deko.) in zahlreichen simulierten und echten Tauchversuchen gelöst wurden, sei nur ein Überblick über die gesamte Thematik gegeben und der Verlauf der Entwicklung nachgezeichnet.

5.1. Entstehung des Sättigungstauchens

Als "Väter des Sättigungstauchens" können COUSTEAU, LINK und BOND bezeichnet werden. Die Idee entstand Ende der Dreißiger Jahre als sich die Notwendigkeit dieser Art zu tauchen immer deutlicher bemerkbar machte. Hintergrund dafür sind die extrem langen Austauchzeiten aus größeren Tiefen, die in keinem Verhältnis zur nutzbaren Zeit stehen. Zur Bergung des gesunkenen Unterseebootes "Squalus" waren über 600 Tauchgänge notwendig, da die Aufenthaltszeit in 73m Tiefe nur etwa zehn Minuten betragen durfte (nach den damaligen Deko.tabellen für Heliumgemische), um die Austauchzeiten nicht über die Maßen auszudehnen.

COUSTEAU führt den Begriff der T a u c h l e i s t u n g ein und definiert ihn so:

$$\text{Tauchleistung} = \frac{\text{Tauchzeit}}{\text{Tauchzeit} + \text{Deko.zeit}}$$

(vgl. CHOUTEAU et al., 1968).

Die Tauchleistung kann nur dann verbessert werden, wenn die Aufenthaltsdauer in der Arbeitstiefe so lange ist, daß die Deko.zeit kaum mehr ins Gewicht fällt und sich der Wert für die Tauchleistung dem Wert 1 nähert.

5.2. Unternehmungen und Vorversuche

Im Jahre 1957 beginnen die Vorbereitungen für größere Unterwasserforschungsunternehmen unter der Leitung von BOND am Submarine Medical Research Laboratory der US Navy in New London. Dieses Datum gilt als die Geburtsstunde des Sättigungstauchens. Nach vorhergehenden Tierversuchen entstehen Deko.-tabellen, die in bekannten Langzeittauchversuchen getestet werden. SeaLab I und II führen die Amerikaner 1964/65 im Anschluß an ihre Vorversuche durch, während unter der Leitung

von COUSTEAU und LINK die französischen Programme Precontinent und Conshelf schon 1962/63 abliefen. Diese mit ungeheuerem finanziellen und materiellen Aufwand ausgestatteten Unternehmungen testen unter anderem die optimale Gasmischung für Langzeittauchversuche, die Verwendung von beheizten Tauchanzügen gegen den starken Wärmeverlust durch die Heliumatmung und durch das Wasser und schließlich muß die Dekompression nach Sättigung an Menschen erprobt werden.

5.3. Ergebnisse

Der lange Aufenthalt unter Wasser, selbst über Wochen hin, bereitet heute dank der gründlichen Vorversuche keine Schwierigkeiten mehr. Die Taucher wohnen in einem Unterwasserhaus in der sog. Sättigungstiefe, von der aus sie Abstecher in die Arbeitstiefe unternehmen können. Die Rückkehr von einer größeren Tiefe aus in die Unterkunft erfordert meist nur eine kurze Deko.zeit, da die relativen Druckunterschiede gering sind. Auf diese Weise können kurzzeitig enorme Tiefen erreicht werden, ohne daß sich die Deko.zeit aus der Sättigungstiefe ändert. Die Atmosphäre im Unterwasserhaus besteht im allgemeinen aus einer Heliox - Mischung mit einem Sauerstoffpartialdruck von 0,3 bis 0,6 ata. Wegen des hohen Heliumanteils ergeben sich manchmal Verständigungsschwierigkeiten, da sich die Stimme in eine höhere, leicht quakende "Micky-Maus" - Stimme verändert.

5.4. Dekompression nach Sättigung

Die Deko. nach Sättigung stellt den schwierigsten Teil der Forschungen dar. Einerseits ist zwar die Deko.berechnung vereinfacht, da nur das langsamste Gewebe berücksichtigt zu werden braucht, andererseits muß dieses erst ermittelt werden. Für die Deko. nach Sättigung ist der größte von HALDANE ermittelte Wert von 75 Minuten für das langsamste Gewebe

völlig unzureichend, zumal dieser Wert aufgrund von relativ grober Bestimmung entstanden ist.

Nach langen Versuchen an Tieren und an Menschen gelangen die amerikanischen Forscher schließlich bei einem Wert von 310 Minuten für die Halbwertszeit des langsamsten Gewebes mit Heliumatmung an. Dieser Wert dient als Ausgangswert für die Berechnung der Deko.tabellen (vgl. BOND, 1968).

Die französischen Berechnungen von ALINAT basieren auf Ergebnissen der schweizer Forschungsgruppe um BÜHLMANN. Sie finden als langsamstes Gewebe eines mit 240 Minuten Halbwertszeit für die Verwendung von Helium und einen Wert von 420 bis 480 Minuten für Stickstoff als Füllgas (vgl. BÜHLMANN, 1971 und BÜHLMANN et al., 1967).

Offensichtlich kann man auch durch noch so komplexe und sorgfältige Berechnungen die im Körper ablaufenden Vorgänge bei der Deko. nicht genau nachvollziehen; denn die Deko.forschung ist heute mehr noch als zu früheren Zeiten eine rein empirische.

"Ueberdruckexpositionen, bei deren Dekompression Symptome einer ungenügenden Dekompression aufgetreten sind, werden analysiert und mit einem korrigierten Dekompressionsprofil wiederholt. Das Berechnungsmodell der Dekompression ist unwichtig." (BÜHLMANN, 1980).

Das bedeutet in der Praxis, daß bei Auftreten von Symptomen so lange rekomprimiert wird, bis die Schmerzen verschwunden sind. Anschließend wird die Deko. fortgesetzt, jedoch mit einer langsameren Rate. Dieses Vorgehen ist nicht ganz so gefährlich wie es auf den ersten Blick erscheinen mag, weil sich die Deko.symptome nach Sättigungstauchen fast ausschließlich in Schmerzen (bends) an den Knien manifestieren. Sie ähneln etwa den Schmerzen nach Überanstrengung und können durch geringfügige Rekompression sofort wieder beseitigt werden.

Tauchprofil: 10 Stunden bei 1500 feet

3 - 10 März 1970

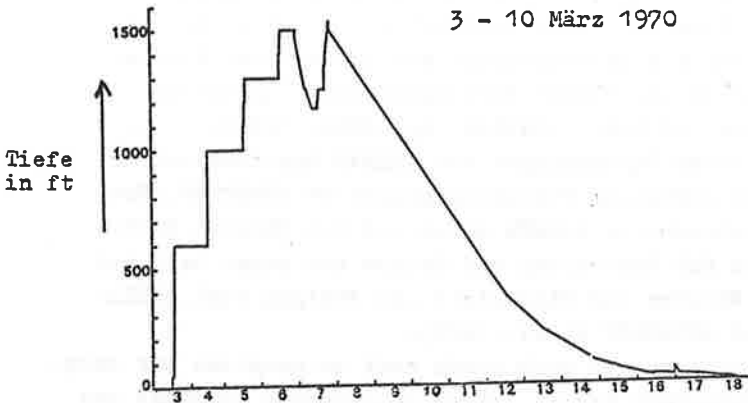


Abb.14 zeigt ein Druckprofil eines simulierten Heliox - Tauchganges bis zu einem Druck von 1500 Fuß (= 46ata). Die Korrektur der Deko.rate ist an den verschiedenen Steigungen des abwärts gerichteten Astes zu ersehen. (nach: BENNETT/ELLIOTT, 1975, S.251).

Der in Abbildung 14 dargestellte Deko.verlauf ist typisch für die oben beschriebene Verfahrensweise. Nach der stufenweisen Kompression und einer Aufenthaltsdauer von zehn Stunden bei einem Druck von 46ata beginnt die Dekompression. Sie wird wegen eines Deko.symptoms nochmals rückgängig gemacht, um dann mit wesentlich langsamerer Rate fortgeführt zu werden. Kurz vor Ende der Deko. erleidet ein anderer Proband Kniebends, die durch minimale Rekompensation beseitigt werden können (vgl. BENNETT/ELLIOTT, 1975, S.251).

Dieses Dekompressionsprofil ist, abgesehen von den beiden Rekompensationen, charakteristisch für die Deko. aus großen Tiefen. Sie erfolgt nicht mehr stufenweise wie bei den klassischen Austauschtabellen, sondern ist der logarithmischen Entsättigungskurve des langsamsten Gewebes angeglichen. Die Deko.rate beträgt demnach in etwa 1:1, d.h., daß der Druck

so langsam vermindert wird, daß das aus dem langsamsten Gewebe diffundierende Inertgas ohne Blasenbildung aus dem Körper austreten kann.

Für die Deko. nach Sättigungstauchen gibt es keine allgemein anerkannte und von allen Instituten und Organisationen verwendete Tabelle. Die Deko.profile sind ebenso zahlreich wie die einzelnen Gruppen, die sie verwenden. Aber es zeichnet sich eine Annäherung der einzelnen Tabellen ab. Die Gemeinsamkeiten liegen im logarithmischen Verlauf der Druckverminderung und in der langen Dauer des Deko.vorganges. Als gutes Beispiel für den Deko.verlauf nach Sättigung sei hier eine der am besten ausgearbeiteten Tabellen angegeben, die sich auf Berechnungen von WORKMAN stützt und auf die ersten Experimente des Sättigungstauchens zurückgeht (siehe Punkt 5.2.). Es ist die Dekompressionsvorschrift aus dem US NAVY DIVING MANUAL (1978, S.39).

Tabelle 6
Dekompressionstafel aus dem US DIVING MANUAL für
Sättigungstauchgänge bis zu einer Tiefe von 1000ft

Deko.rate in ft/h	Tiefe in ft	
	von	bis
6	1000	200
5	200	100
4	100	50
3	50	0

Der logarithmische Verlauf der Druckverminderung wird dadurch erreicht, daß in den Ruhezeiten von 24 Uhr bis 6 Uhr und von 14 Uhr bis 16 Uhr nicht dekomprimiert wird.

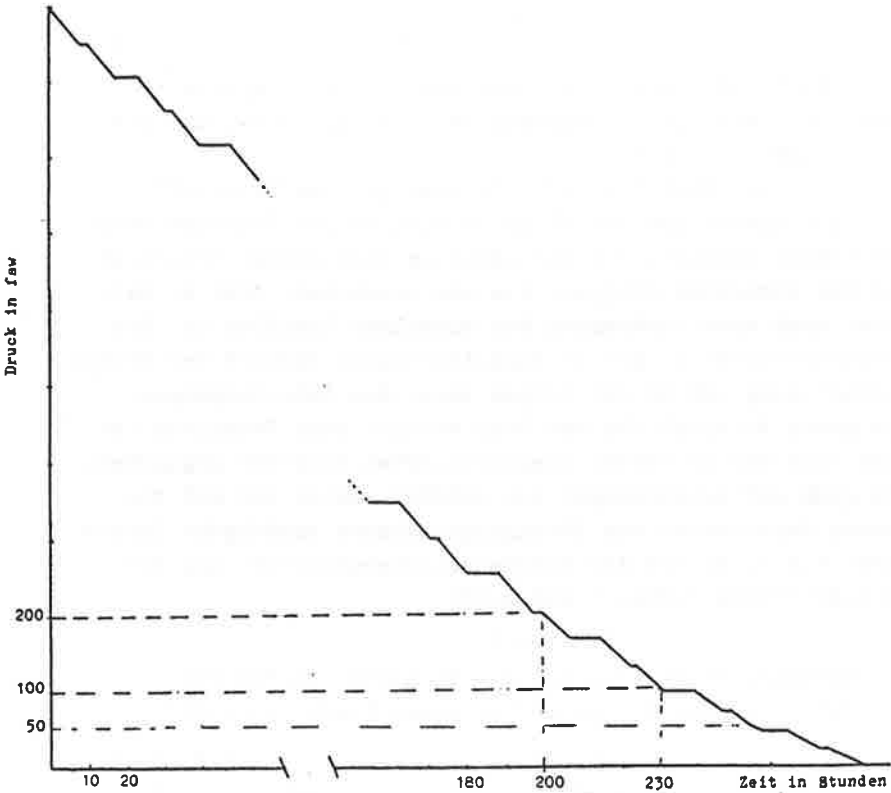


Abb.15 zeigt das in Tabelle 6 beschriebene Deko.verfahren aus dem US DIVING MANUAL 1978. Die einer logarithmischen Entsättigungskurve angenäherte Form ist erkennbar.

Sättigungstauchen wird neben wissenschaftlichen Instituten und militärischen Organisationen heute in steigendem Maße von kommerziellen Unternehmen wie den multinationalen Ölgesellschaften gefördert und vor allem bei Ölbohrungen, z.B. in der Nordsee, angewendet.

5.5. Zusammenfassung

Die Austauschzeiten aus immer größeren Tiefen führen zu einer graduellen Verschlechterung der Tauchleistung (siehe Punkt 5.1., S.55). Will man diese verbessern, dann ergibt sich zwangsläufig das Sättigungstauchen, bei dem man sich lange Zeit in der Sättigungstiefe aufhält und nur einmal nach Beendigung der Arbeiten dekomprimiert wird. Die Dekompressionsdauer ist nach einer bestimmten Zeit, der Sättigungszeit, unabhängig von der Gesamtaufenthaltszeit. Die Sättigungszeit liegt zwischen 12 und 20 Stunden. Die Dekompression verläuft im Gegensatz zum klassischen Austauschen nicht stufenweise und mit einer starken Druckverminderung zu Beginn der Deko., sondern kontinuierlich einer logarithmischen Entsättigungskurve folgend. Die Dekompression bereitet heute keine Probleme mehr. Sie findet in der Regel in einer Druckkammer statt, in die die Taucher in der Sättigungstiefe steigen und die dann an Land oder an Bord eines Schiffes gebracht wird.

Seit der technische Fortschritt es erlaubt, daß in Druckkammern, aber auch auf offener See, Tiefen von weit mehr als 300m erreicht bzw. simuliert werden können, sehen sich die Forschungsunternehmen mit einem Phänomen konfrontiert, das eine ernste Gefahr für die Gesundheit der Taucher bedeutet und das deshalb einen weiteren Schwerpunkt der heutigen Tieftauchforschung darstellt. Die vielfältigen Erscheinungsformen dieser "Tauchererkrankung" sind unter der Bezeichnung HPNS (engl.: high pressure nervous syndrom = Hochdruck - Nervensyndrom) zusammengefaßt.

6. Das Hochdruck - Nervensyndrom (HPNS)

Die seltsamen Symptome des Hochdruck - Nervensyndroms beschreibt als erster ein Leningrader Physiologe namens ZALTSMAN (1961) bei Experimenten an Tieren und später auch an Menschen. Allerdings werden die Aufzeichnungen darüber erst später im Westen veröffentlicht, nachdem 1965 auch in England am Royal Naval Physiological Laboratory (RNPL) in Alverstoke ähnliche Symptome festgestellt werden.

Die damals durchgeführten Versuche dienten eigentlich dazu, um die narkotische Wirkung von Inertgasen zu untersuchen, wobei vor allem Wasserstoff und Helium im Mittelpunkt des Interesses standen. Bei wesentlich geringeren Drucken als man Narkoseeffekte erwartet hätte, traten Begleiterscheinungen auf, die man zunächst als "Heliumzittern" bezeichnete. Dabei unterscheiden sich die Symptome deutlich von den erwarteten Narkoseanzeichen.

6.1. Erscheinungsformen des HPNS

Das HPNS beginnt bei Tiefen ab ca. 150m und betrifft hauptsächlich das Zentrale Nervensystem. Die Symptome beginnen mit motorischen Störungen neuromuskulären Ursprungs, die sich in Form von gesteigerten, regellosen und deshalb unkoordinierten Bewegungen, durch Zittern und Zuckungen kleiner Muskelgruppen (myoklonus) manifestieren. Sie sind am ehesten an den Händen und am Kopf zu registrieren. Die Versuchspersonen zeigen schon ab etwa 15ata Druck rhythmisches Zittern von 5 - 8 Hertz an den oberen Extremitäten, am Rumpf und am Unterkiefer (vgl. ZALTSMAN, 1961). Ähnliche Erscheinungen entdeckt auch BENNETT, der Protagonist auf diesem Gebiet (vgl. BENNETT, 1965).

Zur genaueren Untersuchung der Störungen, die auch höhere Gehirnfunktionen betreffen, werden neben einem Elektro-

enzephalogramm (EEG) auch zahlreiche andere Tests während der Kompression durchgeführt. Ab einem Druck von ca. 31ata können deutliche Veränderungen im EEG festgestellt werden. Im Theta - Band treten kurze Wellen von 4 - 6 Hertz auf, verbunden mit einer Verminderung der Alpha - Aktivität. Mit zunehmendem Druck verstärken sich die Veränderungen, teilweise werden die von Phasen der Schläfrigkeit und von Mikroschlafphasen (= Schlafphasen 1 und 2 auf dem EEG) unterbrochen. Auch die Tests - Reaktionszeitmessungen, Lösen von Mathematikaufgaben, Geschicklichkeitstests etc. - zeigen wesentlich schlechtere Ergebnisse als unter Normalbedingungen. Nicht selten werden diese Symptome von Schwindelgefühlen, Übelkeit, Benommenheit, Apathie und Schläfrigkeit begleitet. Auch Fälle von verringerter Aufnahme- und Wahrnehmungsfähigkeit, räumlicher und zeitlicher Desorientierung sind nicht selten. Tiere werden darüberhinaus von großräumigen, regellosen Zuckungen befallen.

Während einige der Symptome bei konstant gehaltenem Druck nach ein bis zwei Stunden nachlassen oder gar verschwinden, bleiben andere während der ganzen Zeit vorhanden (meist das Zittern und die kleinen Zuckungen), verbessern sich aber auch merklich (vgl. BENNETT, 1965, oder FRUCTUS et al., 1976). Die Druckschwellen, ab denen die Symptome einsetzen, sind individuell sehr weit gestreut, aber man kann damit rechnen, daß sie spätestens ab 30ata jeden befallen. Die starken Zuckungen bei Tieren setzen spätestens ab 60ata ein (vgl. BRAUER, 1975).

Die Tatsache, daß hohe Drucke Muskelzuckungen auslösen können, ist schon lange bekannt, allerdings nicht im Zusammenhang mit dem Tauchen.

EBBECKE (1944) stellt bei zahlreichen Untersuchungen an verschiedenen Tierpräparaten, unter anderem an dekapitierten Rückenmarksträngen, fest, daß bei Druckwerten von 100 bis 200ata die Beine in zuckende Bewegungen geraten, manchmal

in rhythmische, manchmal in unregelmäßige. Nach einiger Zeit bei konstantem Druck verlieren sich diese Bewegungen wieder. EBBECKE spricht dabei von einer "Anfangswirkung" (vgl. EBBECKE, 1944).

6.2. Zusammenhang zwischen HPNS und Kompressionsgeschwindigkeit

Zahlreiche Versuche bestätigen die besonders deutliche Ausprägung des HPNS bei Kompressionsraten, die normalerweise bei Flachwassertauchgängen Anwendung finden. Kompressionsraten bis zu 30 m/min (genauer: 3ata/min) werden bei Druckkammerversuchen ausprobiert (vgl. WALDVOGEL/BÜHLMANN, 1968 oder BENNETT, 1965). Die versuchsweise Erprobung von sehr langsamen und deshalb unökonomischen Kompressionsgeschwindigkeiten bringt eine spürbare Verbesserung des HPNS. Bei einer Rate von 0,2 m/min tritt bis zu einer Tiefe von 300m kein HPNS auf, bei schnelleren Raten jedoch häufig (vgl. SUMMITT et al., 1971). Andere Autoren bestätigen diese Ergebnisse (vgl. OVERFIELD et al., 1969).

Aus neueren Versuchen ist zu ersehen, daß sich die langsamen Kompressionsraten gegenüber den früher verwendeten, sehr schnellen durchsetzen. Man hat offensichtlich die schnelle Kompression als eine der Ursachen für HPNS erkannt und daraus Konsequenzen gezogen.

Ein Beispiel für eine relativ langdauernde Kompression ist ein simulierter Tauchversuch, bei dem einige Probanden (Marinetaucher der US Navy) in etwas mehr als 12 Stunden auf einen Druck von 47ata komprimiert werden, was einer Rate von 0,62 m/min entspricht. Es tritt zwar HPNS in leichter Form in Erscheinung, aber nach einiger Zeit schwächen sich die Symptome ab, und die Tests zeigen gute Ergebnisse (vgl. BENNETT, 1979). Nachdem bereits 1972 ein französisches Forscherteam einen simulierten Tieftauchversuch mit s t u f e n -

w e i s e r K o m p r e s s i o n und veränderlicher Kompressionsrate mit positivem Ergebnis abgeschlossen hat, scheint sich diese Methode nun durchzusetzen. Bei einer der neuesten Tieftauchversuche wird die Kompressionsrate verlangsamt, je höher der Druck steigt. Die anfängliche Kompressionsgeschwindigkeit von 0,6 m/min wird graduell bis auf 0,08 m/min in der letzten Phase verringert (vgl. THALMAN et al., 1980).

Tabelle 7

Das von THALMAN et al. (1980) verwendete Kompressionsprofil für einen simulierten Tieftauchversuch auf einen Druck entsprechend einer Tiefe von 1800ft (= 548m).

Kompressionsrate in ft/b	Druck in fsw	
	von	bis
120	0	650
40	650	1000
30	1000	1600
15	1600	1800

Während der Schlafenszeit zwischen 22 Uhr und 6 Uhr findet keine Kompression statt, so daß sich auch diese stufenweise Kompression einem logarithmischen Verlauf angleicht.

Wie aus den beiden Abbildungen der nächsten Seite zu entnehmen ist, dauert allein schon die Kompression auf sehr hohe Drucke einige Tage, wodurch die Gesamttauchdauer auf einige Wochen ausgedehnt wird.

Da bei solchen Tauchversuchen auch die Kompression einen nicht unerheblichen Teil der Gesamtzeit verschlingt, mußte die Tauchleistung (siehe Punkt 5.1., S.55) neu definiert werden. Zur Dekozeit mußte noch die Zeit für die Kompression hinzugezählt werden. Dadurch würde allerdings die Tauchleistung noch um einiges verschlechtert.

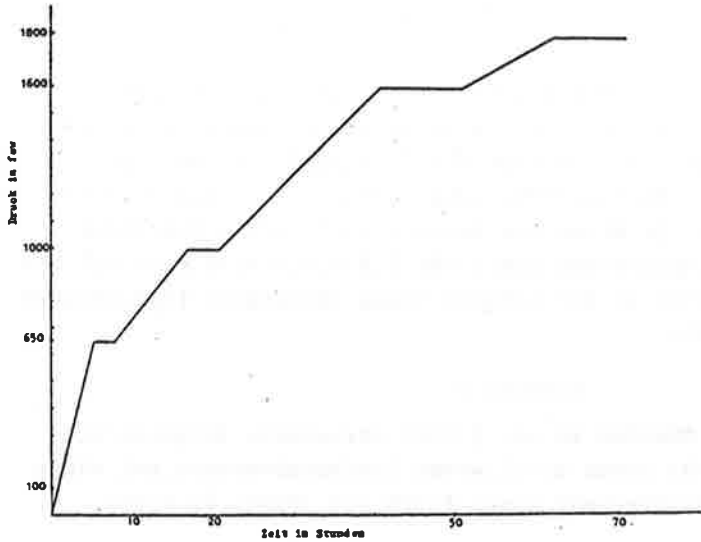


Abb.16 zeigt die grafische Darstellung der in Tabelle 7 beschriebenen Kompressionsweise. (Die Aussetzung der Druck-erhöhung ist gemittelt eingezeichnet.)

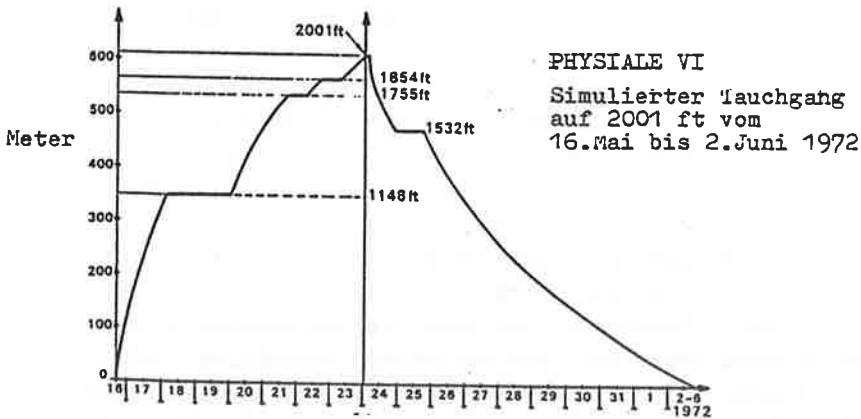


Abb.17 zeigt das Druckprofil für den 1972 von französischen Wissenschaftlern durchgeführten simulierten Tief-tauchversuch. Die mit zunehmendem Druck geringer werden-
de Kompressionsrate ist deutlich zu entnehmen.

(nach: FRUCTUS et al., 1976).

Bei den beiden neueren Tauchunternehmen (BENNETT, 1979 und THALMAN et al., 1980) wurde nicht nur der Einfluß einer langsamen und mit steigendem Druck abnehmenden Kompression auf das HPNS getestet, sondern auch der Zusatz von Stickstoff zum Atemgas. Nach einer Theorie von BENNETT soll die Zugabe von Stickstoff zur Heliox - Mischung ebenfalls dazu beitragen, die Symptome von HPNS abzuschwächen.

6.3. Narkosetheorie zur Prävention des HPNS

BENNETTs Theorie liegt bisher nur als hypothetische Annahme vor, doch scheint sie sich mehr und mehr zu bestätigen (vgl. HUNTER/BENNETT, 1974 und BENNETT, 1976).

Der Angriffspunkt von HPNS und von Narkose ist im Bereich der Synapsen zu lokalisieren, genauer gesagt in der postsynaptischen Membran, durch die die Ionen zur Nervenenerregung diffundieren. Die betroffenen Stellen sind wahrscheinlich mehrsynaptische Gebiete des Gehirns, die Pyramidenbahnen des motorischen Systems, der Rückenmarksstrang und die Nervenverbindungen zu den Muskelzellen.

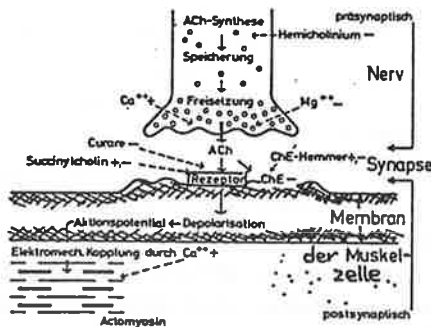


Abb.18 zeigt die Verbindung von Nervenfasern zu Muskelzelle (nach LULLIES/TRINCKER, 1973, S.176).

(ACh:Acetylcholin, ChE:Cholinesterase)

Sehr hoher Druck, repräsentiert durch Helium, bewirkt nach dieser Theorie ein Zusammendrücken dieser postsynaptischen Membran, was eine Abnahme des Ionenflusses durch die Membran zur Folge hat. Die Permeabilität für die Ionen ist stark verringert (siehe Abb.19 Mitte, rechte Darstellung).

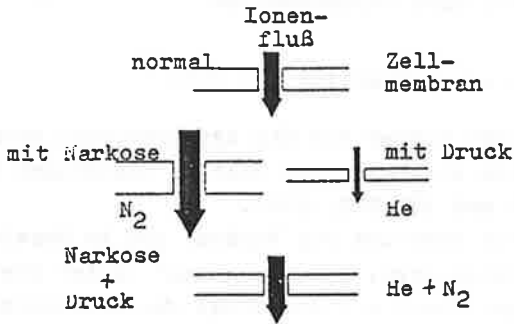


Abb.19 zeigt die Wirkungsweise von Stickstoff oder einem ähnlichen anästhetisch wirkenden Mittel auf eine Zellmembrane, verglichen mit Helium und einem He/N_2 - Gemisch. (nach: STRAUSS, 1976, S.164).

Bildlich kann man sich vielleicht vorstellen, daß sich die Ionen gleichsam vor der Membran stauen, weil sie infolge der Verengung nicht hindurchdiffundieren können. Dies dürfte zur Auslösung des HPNS führen.

EBBECKEs Untersuchungen, bei denen Muskelzuckungen durch hohen Druck stimuliert wurden, waren wohl wegweisend für diese Theorie (siehe Punkt 6.1., S.63).

"Die Erregbarkeit (der Nerven, Anm.d.Verf.) wird durch Druck gesteigert, so dass ein vorher eben unterschwelliger, für sich unwirksamer Reiz überschwellig wird und einen Aktionsstrom auslöst." (EBBECKE, 1944).

Der umgekehrte Fall tritt bei der Narkose ein (Abb.19 Mitte, linke Darstellung). Das Narkosegas, in diesem Fall Stick-

stoff, erweitert die Membran, weil die anästhetischen Moleküle von den Lipidbestandteilen der Membran stärker absorbiert werden als andere und dadurch die Eigenschaften der Membran verändern. Nach der MEYER - OVERTONE - Narkosetheorie vergrößert sich die Membran. Die Erweiterung der Membran läßt ihrem Inhalt größere Bewegungsfreiheit, d.h., daß der Durchtritt der Ionen schneller erfolgen kann. Bildlich kann man sich wiederum vorstellen, daß die höhere Permeabilität einen ständigen Mangel an Ionen verursacht. Es können nicht so viele zugeführt werden wie hindurchtreten.

Überschreitet die Membran das sog. k r i t i s c h e V o l u m e n , dann scheidet die Übertragung völlig und Narkose tritt ein, je nachdem wieviele Synapsen betroffen sind. Durch Druck kann die Anästhesie wieder rückgängig gemacht werden (vgl. JOHNSON/MILLER, 1970 oder LEVER et al., 1971). Diese bekannte Tatsache führt zu der Annahme, daß ein optimaler Kompromiß zwischen Membranverengung durch Druck und Membranerweiterung durch das Narkosegas den normalen Ionenfluß wiederherstellen könnte (siehe Abb. 19 untere Darstellung). Dies ist in groben Umrissen die Theorie von BENNETT.

Zur Herausfindung des bestmöglichen Verhältnisses zwischen Druck und Narkosewirkung muß die Fettlöslichkeit der in Frage kommenden Inertgase (= Narkosegase) als wichtiger Parameter berücksichtigt werden. Andere Eigenschaften wie Polarisierbarkeit, Molvolumen, Molekülgröße u.a. spielen ebenfalls eine Rolle, die wichtigste aber ist die Lipidlöslichkeit (siehe Tabellen 4 und 5, Seite 52).

Da Helium wegen des geringen Molekulargewichts auch bei hohem Druck noch eine wesentlich geringere Dichte aufweist als andere Inertgase und darüberhinaus die geringste narkotische Wirkung hat, wird es als das optimale Füllgas für Tieftauchversuche verwendet. Zu Helium muß nun ein anästhetisch wirkender Stoff beigegeben werden, um die gewünschte

Wirkung zu erreichen. Durch zahlreiche Versuche, vor allem von BENNETT, fand man den Kompromiß zwischen Druck- und Narkosewirkung durch den Zusatz von einigen Prozent Stickstoff zur Heliox - Mischung. Diese Mischung, bestehend aus Helium, Sauerstoff und Stickstoff nennt man Trimix.

Bereits zu Beginn der 70er Jahre fordert BENNETT, daß der Stickstoffanteil etwa um 10% liegen müsse, um HPNS zu vermindern (vgl. HUNTER/BENNETT, 1974). Er vermutet dies, nachdem die Untersuchungen von ZALTSMAN (1961) im Westen veröffentlicht wurden. ZALTSMAN benutzte bereits Dreifachmischungen mit unterschiedlichem Heliumanteil und konstant auf 4,5ata gehaltenem Stickstoffdruck. Dabei zeigten sich keine oder nur geringe Anzeichen von "Heliumzittern" (vgl. ZALTSMAN, 1961).

Ein eindrucksvoller simulierter Tauchgang von PROCTOR (et al., 1972) bestätigt die Druck - Narkose - Theorie. Während der Deko. aus einem Druck entsprechend 1000fsw atmen die Versuchspersonen bei einem Druck von 600fsw 10 Minuten lang Trimix mit 3,5ata Stickstoffdruck und 1ata Sauerstoffdruck, der Rest ist mit Helium aufgefüllt. Bei diesem Druck sind keine narkotischen Anzeichen oder Leistungsbeeinträchtigungen zu erkennen. Erst bei geringerem Umgebungsdruck, aber gleichem Stickstoffpartialdruck, verursacht der Stickstoff eine Narkose. Bei 600fsw konnte der Druck die Narkose noch kompensieren, während dies bei geringerem Druck nicht mehr möglich war.

Untersuchungen von LEMAIRE/MURPHY (1976) zeigen, daß bei schneller Kompression (9 m/min) 9 - 10% Stickstoff notwendig sind, um HPNS zu verringern, bei langsamer Rate (1,25 m/min) genügt schon die Hälfte, um die gleichen Verbesserungen des HPNS zu erzielen. Um möglichst objektive Werte aus den Tests zu erhalten, werden die Werte aus der schnellen und langsamen Kompression mit Stickstoffzusatz (10% bzw. 5%) mit

Werten aus schneller und langsamer Kompression ohne Stickstoffzusatz verglichen.

Bei dem bereits erwähnten simulierten Tieftauchversuch unter der Leitung von BENNETT (1979) wurde neben der langsamen Kompression ein Dreifachgemisch mit 5% Stickstoff verwendet, wodurch HPNS nur in sehr geringer Ausprägung in Erscheinung trat.

Offensichtlich läßt sich diese moderne "Taucherkrankheit" doch nicht völlig kompensieren, auch nicht durch die Anwendung kombinierter Methoden, was der neueste Rekordtauchgang von sechs Tauchern der US Navy beweist. Neben der druckabhängigen Kompressionsrate (siehe Tab. 7 und Abb. 16) wird ebenfalls eine Dreifachmischung verwendet. Man beobachtet zwar, daß das Zittern und andere Symptome weitaus weniger schlimm sind als bei anderen, vergleichbaren Versuchen, daß aber die Symptome von Person zu Person stark variieren. Während fünf Taucher die Arbeit und die Tests unbeeinträchtigt verrichten, ist einer wegen starker Schwindel- und Übelkeitsgefühle nicht dazu fähig. Daneben sind leichte Ermüdbarkeit, geringe Ansprechbarkeit und kleine Zuckungen auffallende Merkmale (vgl. THALMAN et al., 1980).

6.4. Zusammenfassung und Ergänzung der Theorie zur Prävention des HPNS

Das HPNS wird nach BENNETT in zwei von der Entstehung her unterscheidbare Syndrome differenziert: das Kompressions- und das Drucksyndrom (vgl. HUNTER/BENNETT, 1974).

a) Das Kompressionssyndrom

Durch die hohe Kompressionsgeschwindigkeit hat das Helium nicht genügend Zeit, um in die postsynaptische Membran zu diffundieren und von den Lipoidbestandteilen aufgenommen zu werden. Es entsteht dadurch ein sich allmählich ausgleichender osmotischer Druckgradient, der die Membran komprimiert.

Die ersten Symptome (Zittern, Zuckungen) entstehen wegen des mangelnden Ionenflusses.

Der von EBBECKE (1944) gefundene Zusammenhang zwischen Druck und den dadurch stimulierten Zuckungen bestätigt zwar nicht genau diese Theorie, weist aber durch auffallende Parallelen in die gleiche Richtung. Da bei gleichbleibendem Druck die Symptome mit der Zeit schwächer werden - nach EBBECKE verschwinden die Zuckungen ganz -, muß noch ein anderer Mechanismus vorhanden sein, der das Drucksyndrom aufrechterhält.

b) Das Drucksyndrom

Wie der Name sagt, ist der Druck der auslösende Faktor. Nach einiger Zeit bei konstantem Druck stellt sich ein Gleichgewicht des Gasaustausches ein, die Lipide werden mit Helium gesättigt, das Kompressionssyndrom schwächt sich ab, es bleiben nur noch die Symptome des Drucksyndroms vorhanden. Diese lassen sich mit der Theorie des kritischen Volumens erklären (siehe Punkt 6.3., S.69). Im Fall a) verursacht der Druck die Verengung der Membran. Dies erzeugt die ersten Symptome. Nachdem die Lipidbestandteile mehr und mehr mit Helium gesättigt werden (Fall b), ist die Membran, nach der Narkosetheorie der Inertgase, etwas erweitert. Jedoch ist diese Erweiterung ungenügend, so daß der Ionenfluß weiterhin erschwert bleibt. Die Kompressionssymptome sind jedoch schon abgeschwächt, die Drucksymptome noch nicht. Erst das Hinzufügen eines stärkeren Narkosegases veranlaßt die Membran sich so weit wieder zu vergrößern, daß der Ionenfluß normal vonstatten gehen kann. Die Richtigkeit dieser Annahme wird dadurch verstärkt, daß das stärkere Narkosegas (Stickstoff gegenüber Helium) während der Kompressionsphase leichter, d.h. schneller von den Lipidbestandteilen der Membran wegen der höheren Löslichkeit aufgenommen wird und somit zur Hemmung des HPNS schon während der Kompressionsphase beiträgt.

Die in verschiedenen Versuchen durchgeführten Änderungen beweisen, daß die Einteilung in Kompressions- und Drucksyndrom

sinnvoll ist. Langsame Kompression verbessert die Symptome des Kompressionssyndroms. Inertgasmoleküle haben mehr Zeit absorbiert zu werden, die Zellmembran verengt sich nicht so stark, und der Ionenfluß geschieht fast normal. Auf der anderen Seite verhindern pharmakologische Mittel das Auftreten von HPNS während der Isopressionsphase, weil sie wie Narkosegase eine Membranerweiterung bewirken (vgl. BENNETT, 1976). Auch KYLSTRAs Versuche erklären diese Theorie. An flüssigkeitsbeatmeten Mäusen werden bei hohen Drucken Symptome ähnlich denen des HPNS festgestellt, die während der gesamten Druckeinwirkung bestehen bleiben (vgl. KYLSTRA et al., 1967). Sie können nur durch den hydrostatischen Druck entstanden sein, der die Verengung der postsynaptischen Membran bewirkt hat.

Zur Prävention des Hochdruck - Nervensyndroms bieten sich derzeit nur die zwei Möglichkeiten an:

1. eine langsame, stufenweise Kompression, die mit zunehmendem Umgebungsdruck vermindert wird und
2. die Zugabe von Stickstoff als Narkosegas, das die Membranerweiterung bewirken soll.

Theoretisch könnten auch pharmakologische Mittel gegen das HPNS eingesetzt werden, aber anscheinend ist dies mit zu großen Risiken verbunden, da die Wirkung dieser Mittel bei hohen Drucken noch kaum erforscht ist.

Da der Stickstoffpartialdruck wegen der Gefahr des Tiefenrausches ein bestimmtes Maß nicht überschreiten darf, muß der prozentuale Anteil mit dem Umgebungsdruck abnehmen. Während BENNETT ursprünglich generell einen Anteil von 9 - 10% forderte, schien sich in den nachfolgenden Versuchen ein Verhältnis von 1:10 (N_2 zu He) als optimal herauszustellen (vgl. BENNETT et al., 1975).

Obwohl schon große Anstrengungen zur Prävention des HPNS gemacht wurden, sind die genauen Ursachen und Zusammenhänge

noch nicht enträtselt. Erst wenn diese aufgedeckt sind, können wirkungsvolle Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Bis dahin bleibt das HPNS eine ernste Gefahrenquelle beim extremen Tiefseetauchen.

Die vielfältigen Schwierigkeiten und Probleme des Tiefseetauchens versucht eine Gruppe von Forschern auf ganz andere, unkonventionelle Weise zu lösen. Sie arbeiten an der Realisierung der Flüssigkeitsatmung beim Menschen.

7. Flüssigkeitsatmung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit einem nicht ganz uninteressanten Randgebiet der modernen Tauchforschung, nämlich mit der Frage, ob es möglich ist, Menschen unter Wasser mit Flüssigkeit zu beatmen.

Der für Laien scheinbar widersprüchliche Zusammenhang zwischen Flüssigkeit und Atmung ist für den Mediziner nichts Außergewöhnliches. Physiologisch gesehen ist es kaum von Bedeutung, ob der für die Atmung dominierende Sauerstoff mit einem anderen Gas oder Gasgemisch (Luft, Helium) oder mit einer Flüssigkeit als Trägersubstanz zum Gasaustausch in die Lungen gelangt. Der ausschlaggebende Faktor ist dabei nur, daß Sauerstoff in ausreichender Menge in die Blutbahn gelangt, und daß das bei der Inneren Atmung entstandene Kohlendioxid (CO_2) wieder ausgeschieden wird. Technisch wird das bei Versuchen so realisiert, daß die Flüssigkeit durch die Lungen gepumpt wird. Die herausfließende Flüssigkeit wird vom Kohlendioxid befreit und wieder mit Sauerstoff neu versorgt, so daß sie zur Beatmung weiterverwendet werden kann.

Diese sehr einfach klingende Gegebenheit ermutigte einige Wissenschaftler, neue Wege der Beatmung zu suchen und zu erforschen.

Die Flüssigkeitsatmung würde mit einem Streich viele Schwierigkeiten des Tauchens lösen.

7.1. Vorteile der Flüssigkeitsatmung

Da der lebensnotwendige Sauerstoff nicht mit einem Inertgas zur Lunge gelangt, sondern in einer Flüssigkeit physikalisch gelöst ist, kann nur der Sauerstoff in die Blutbahn und in die Gewebe diffundieren. Das Gewebe wird mit Sauerstoff versorgt, kann sich aber nicht mit Inertgas sättigen, da keines vorhanden ist. Der Taucher könnte aus jeder Tiefe in kürzester Zeit auftauchen, ohne Deko.erscheinungen befürchten zu müssen. Daß keine Deko.symptome bei Flüssigkeitsbeatmung erzeugt werden können, zeigt KYLSTRA an Mäusen, die in einer Flüssigkeit untergetaucht werden und nach einer 10 Minuten dauernden Druckeinwirkung von 166 Atmosphären in wenigen Sekunden dekomprimiert werden (vgl.KYLSTRA et al.,1967).

Durch das Wegfallen der langen Deko.zeiten aus großer Tiefe könnten sogar die Tauchleistungen des Sättigungstauchens noch erheblich gesteigert werden. Viele Unternehmen, die bisher nur mit Sättigungstauchen rentabel waren, könnten mit Flüssigkeitsatmung in wesentlich kürzerer Zeit durchgeführt werden.

Wegen der Abwesenheit von Inertgasen scheidet die Möglichkeit des Tiefenrausches bei Flüssigkeitsatmung von vorneherein aus.

Ein weiterer Vorteil ergäbe sich eventuell aus den mit Flüssigkeit gefüllten Atemwegen. Die normalerweise gasgefüllten Hohlräume wären mit Flüssigkeitsfüllung ebenso inkompressibel wie die Flüssigkeit selbst. Möglicherweise könnte man dadurch in beliebig große Tiefen vordringen, die bisher nur in Taucher kapseln und Unterseebooten erreicht werden können. Bevor es allerdings so weit ist, muß eine große Anzahl von erheblichen Schwierigkeiten überwunden werden.

7.2. Hindernisse und Probleme der Flüssigkeitsatmung

Die ersten Versuche von Flüssigkeitsbeatmung an Tieren wurden mit Kochsalzlösung durchgeführt. Die Sauerstoff- und Kohlendioxidaufnahmefähigkeit der Salzlösung begrenzt die Versuche jedoch auf wenige Minuten. Deshalb verwendet man heute eine F l u o r c a r b o n - Lösung (Perfluorobutyl-tetrahydrofuran) mit der Bezeichnung FC - 80 (vgl. KYLSTRA et al., 1967). Wegen der guten Sauerstofflöslichkeit von Fluorcarbon- Lösungen bereitet die Sauerstoffversorgung kaum mehr Probleme, dafür hat man gegen andere zu kämpfen.

7.2.1. Kohlendioxidretention und Strömungsgeschwindigkeit

Die Analyse der aus der Lunge abgeflossenen Flüssigkeit zeigt einen zu geringen CO_2 - Gehalt, d.h., daß zu viel von diesem Abfallprodukt im Körper zurückgehalten wird. Die Löslichkeit von CO_2 beträgt 3ml pro Liter Fluorcarbon- Lösung und pro Torr CO_2 - Partialdruck (vgl. KYLSTRA, 1968). Daraus folgt, daß bei einem arteriellen CO_2 - Druck von 40 Torr (= mmHg) 120ml Kohlendioxid in jedem Liter Lösung enthalten sind. Zur Aufrechterhaltung des arteriellen CO_2 - Drucks dürfte ein flüssigkeitsatmender Taucher nicht mehr als 120ml Kohlendioxid in der Minute produzieren, wenn die Strömungsgeschwindigkeit 1 l/min beträgt. Erzeugt er mehr CO_2 , dann kann es nicht mehr von der Lösung aufgenommen werden und bleibt im Körper zurück. Dieses Manko kann bis zu einem gewissen Grad dadurch ausgeglichen werden, daß die Strömungsgeschwindigkeit durch die Atemwege erhöht wird. Dem sind aber Grenzen gesetzt. Überschreitet die Strömungsgeschwindigkeit beim Ausatmen einen bestimmten Betrag, dann kollabieren die Bronchien und unterbinden jede weitere Atmung. Die maximale Lösungsventilation beträgt etwa 3,5 l/min (vgl. KYLSTRA, 1968). Somit stellt die Strömungsgeschwindigkeit der Fluorcarbon- Lösung einen begrenzenden Faktor dar. Es muß deshalb versucht

werden, daß die CO_2 - Aufnahmefähigkeit der verwendeten Flüssigkeiten verbessert wird. Mit dem Zusatz von NaOH zur Fluorcarbon- Lösung kann zwar eine erhebliche Steigerung der CO_2 - Aufnahmefähigkeit erreicht werden und die Zeit der Flüssigkeitsbeatmung verlängert werden (vgl. KYLSTRA, 1977), aber die CO_2 - Retention bleibt für die Arbeit eines Menschen unter Wasser ein limitierender Faktor, wenn sie nicht entscheidend verringert wird.

7.2.2. Lungenschäden

Neben der Kohlendioxidretention stellt die Gefahr einer Lungenschädigung ein großes Hindernis dar. Zum einen ist ungewiß, ob nicht die über längere Zeit durch die Lungen strömende Flüssigkeit mechanische Schädigungen in den Atemwegen und in den Alveolen hervorruft, zum anderen besteht nach der Flüssigkeitsatmung die große Gefahr einer Lungenentzündung. Bei vielen Tieren, die die Versuche unversehrt überstehen, wird nach einiger Zeit eine Lungenentzündung mit unterschiedlich starker Ausprägung diagnostiziert (vgl. KYLSTRA, 1968).

7.2.3. Realisierung beim Menschen

Für therapeutische Maßnahmen ist es möglich, einen Lungenflügel mit Flüssigkeit zu spülen, während der andere mit Luft beatmet wird. Versuchsweise wurde dies zur Bestimmung der Atemwerte an einem Freiwilligen erprobt, dessen Larynx und Trachea betäubt wurden. Der Versuch mit einseitiger Flüssigkeitsbeatmung verlief ohne Zwischenfälle und Nachwirkungen (vgl. SCHOENFISH et al., 1973).

Allerdings ist es schwer vorstellbar, wie ein Taucher mit Flüssigkeit beatmet werden soll, ohne daß Husten-, Würge- und Brechreize, verursacht durch die eingeführten Schläuche und die Flüssigkeit, ihn an der Arbeit hindern. Wahrscheinlich

wäre es nur durch örtliche Betäubung möglich, und diese könnte wiederum zu einem Gefahrenmoment werden.

Sollten auch diese Schwierigkeiten überwunden werden können und mit Flüssigkeitsatmung große Tiefen erreicht werden, dann lauert die Gefahr des bereits bekannten HPNS, das ja hauptsächlich durch den hydrostatischen Druck verursacht wird und das auch bei Flüssigkeitsatmung nicht auszuschließen ist (vgl. KYLSTRA et al., 1967).

Das Ziel, daß einmal Menschen unter Wasser Flüssigkeit atmen und die daraus resultierenden Vorteile für das Tauchen nutzen können, scheint noch in unerreichbarer Ferne zu liegen. Trotzdem stimmen einige Versuche zuversichtlich, bei denen Versuchstiere (Mäuse, Ratten, Katzen etc.) unter sehr hohen Drucken mit Flüssigkeit beatmet wurden und nach dem Übergang zur Luftatmung keine Erkrankungen zeigten und noch monatelang weiterlebten (vgl. KYLSTRA, 1977). Die Bemühungen um Fortschritte auf diesem Gebiet der Tauchforschung werden fortgesetzt, und man blickt gespannt in die Zukunft, ob sie Erfolg haben werden.

8. Gepanzerte Tauchanzüge

Der Vollständigkeit halber sei hier eine Möglichkeit zur Umgehung der gefährlichen Druckauswirkungen erwähnt.

Seit einiger Zeit arbeiten Herstellerfirmen für Tauchtechnik an der Entwicklung von gepanzerten Tauchanzügen. Mit dem auf der nächsten Seite abgebildeten Modell können Tiefen bis zu 400m erreicht werden, was kürzlich erst wieder auf offener See bewiesen wurde (vgl. SPIEGEL, 1980). Der Taucher ist dabei lediglich dem normalen Atmosphärendruck ausgesetzt, weil der starke Schutzpanzer den Umgebungsdruck von 40atü abhält. Den nötigen Sauerstoffvorrat trägt der Taucher auf dem Rücken mit sich, wodurch er von der Oberfläche unabhängig und frei beweglich ist. Vielleicht steigen in ein

paar Jahren alle Taucher in einem solchen "Astronautenan-
zug" in die Tiefe, womit alle bisherigen Forschungen zur
Lösung der durch den Druck entstehenden physikalisch- physio-
logischen Probleme umsonst gewesen wären.

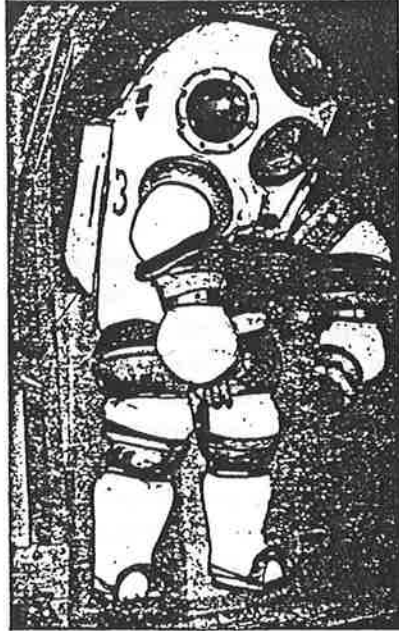


Abb.20 zeigt einen gepanzerten Tauchanzug mit der Bezeich-
nung "Jim", mit dem Tiefen bis zu 400m erreicht werden
können. (nach: BENNETT/ELLIOTT, 1975, S.9).

Die stark eingeschränkte Beweglichkeit, vor allem der Hände
und der Finger, dürfte dies jedoch verhindern. Außerdem
steckt der Taucher in einer tödlichen Falle, wenn nur ein
kleiner technischer Defekt die Dichtigkeit des Schutzpanzers
nicht mehr gewährleistet. Die dadurch erfolgende Implosion
würde den hilflosen Taucher augenblicklich zerquetschen.

9. Grenzen des Tauchens

Die Frage nach den Grenzen des Tauchens kann auf zwei verschiedene Arten beantwortet werden. Einmal von der physiologischen Seite her, wo die Grenzen der Belastbarkeit durch Druck, Narkosewirkungen, Dichtezunahme der Atemgase etc. anzusetzen sind, zum anderen vom ökonomischen Standpunkt aus, welche Tiefen überhaupt erstrebenswert sind, sei es aus wirtschaftlichen oder aus wissenschaftlichen Interessen heraus.

9.1. Grenzen durch physiologische Druckauswirkungen im Körper

Die Operationsfähigkeit des Menschen unter Wasser ist durch mehrere Faktoren eingeschränkt. Durch Tauchen mit Preßluft kann nicht einmal eine Tiefe von 100m erreicht werden. Die Grenze ist entweder durch die Tiefenrauschwirkung des Stickstoffs meist schon bei geringeren Tiefen gegeben oder durch die toxische Wirkung des Sauerstoffs ab einem bestimmten Partialdruck. Außerdem erschwert die Dichtezunahme der Preßluft mit zunehmender Tiefe die Atemarbeit. Diese Probleme werden durch die Benutzung von künstlichen Gasgemischen (z.B. Helium/Sauerstoff) beseitigt. Mit diesem Gemisch kann man vermutlich bis über 900m tief tauchen, da erst ab dieser Tiefe die Narkosewirkung von Helium einzusetzen beginnt (vgl. BOND, 1968). Durch Dichtezunahme des Heliox - Gemisches erfolgt bis zu einer Tiefe von 1500m (5000ft) keine Begrenzung, was LAMBERTSEN (1976) in Experimenten bewies.

Weit vor dieser Marke setzt der Druck selbst die Schranken der Aktionsfähigkeit des Menschen durch das Nervensyndrom HPNS. Dieses kann auch nicht durch Flüssigkeitsatmung umgangen werden, wenn nicht ähnliche Kompensationsmechanismen wie bei der Helium - Sauerstoffatmung gefunden werden (Stickstoffzusatz, langsame Kompression). Die übersteigerte Nervenreizfähigkeit (siehe EBBECKE - Zitat S.68) hängt nur vom

Druck ab und wirkt in flüssiger Umgebung ebenso (vgl. KYLSTRA et al., 1967) wie in gasförmiger.

Wahrscheinlich wird diese Funktionsbeeinträchtigung des Zentralen Nervensystems eine unüberwindliche Barriere sein, wenn keine entscheidende Verbesserung zur Prävention gefunden wird.

Darüberhinaus ist die Frage nach den Grenzen schwer zu beantworten. Die CO_2 -Retention, Hauptproblem bei der Flüssigkeitsatmung, bereitet auch bei der normalen Gasatmung gewisse Schwierigkeiten und darf als Gefahrenquelle nicht unterschätzt werden. Sie tritt erst ab Tiefen um 250m auf, scheint aber nicht ein zentrales Problem der Tieftauchforschung zu sein. Inwieweit andere physiologische Vorgänge (z.B. Eiweißbildung, Blutbildung etc.) unter Druck gestört werden, ist noch weitgehend unbekannt. Zwar stellt KIESOW (1974) fest, daß der Sauerstofftransport zu den Geweben wegen einer Veränderung der Hämoglobineigenschaften nicht mehr den Normalwerten entspricht, aber genauere Angaben und ausführliche Untersuchungen fehlen dazu noch.

9.2. Grenzen aus ökonomischer Sicht

Der Antrieb für das Weitertreiben der Forschungen hängt nicht allein von der Laune und dem Forscherdrang des einzelnen Wissenschaftlers ab, sondern auch von den Interessen und Erfordernissen der Organisationen und Gesellschaften, die die Tauchforschung durch finanzielle Unterstützung fördern.

In den vergangenen 10 Jahren bekundeten vor allem die multinationalen Erdölgesellschaften großes Interesse am Tiefseetauchen, da die Ausbeutung der Bodenschätze durch Tiefseebohrungen in den Kontinentalschelfen ihre Fortsetzung findet. Instandsetzungsarbeiten an Ölbohrtürmen machen Tauchereinsätze in Tiefen bis zu 500m erforderlich (vgl. BOODA, 1975). Aber auch staatliche und militärische Organisationen sind

an einer Weiterentwicklung des Tiefseetauchens interessiert. In den modernsten Druckkammern, z.B. bei COMEX in Marseilles, können Tiefen bis zu 1500m simuliert werden, was darauf hindeutet, daß hier entweder die Grenzen der technischen Realisierbarkeit für simulierte Tauchgänge liegen, oder daß das Interesse und die Notwendigkeit noch größere Tiefen zu erreichen, nicht vorhanden ist. Zur Erkundung der Kontinentalschelfe sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus wissenschaftlichen Interessen heraus müßte es vollauf genügen, wenn Tiefen dieser Größenordnung erreicht werden können. Daß man versuchen will, bis in solche Tiefen in der nächsten Zeit vorzudringen, beweist ein Treffen von Tieftauchspezialisten, die sich mit Problemen von sehr tiefen Tauchgängen zwischen 460m und 760m befassen (vgl. HALSEY, 1980).

Mit Tauchern zu den Abgründen der Tiefseeegräben vorstoßen zu wollen, scheint aus wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Gesichtspunkten weder erforderlich noch sinnvoll zu sein. Deshalb wird der Einsatz von Tauchern vielleicht bei den Grenzen des Kontinentalsockels enden.

10. Zusammenfassung und Schluß

In der vorliegenden Arbeit wurde darzustellen versucht, welche Anstrengungen unternommen werden und bereits unternommen wurden, um die durch den Druck und durch Druckänderung hervorgerufenen Kompressions- und Dekompressionserscheinungen beim Tauchen zu verhindern.

Der Weg von den ersten Theorien über die Caissonkrankheit bis zur Realisierung von HALDANEs Idee der konstanten, noch ungefährlichen Gewebsübersättigung, die in den Austauschtabellen ihre Vollendung fand, wurde den wichtigsten Stationen folgend nachgezeichnet.

Mit HALDANEs Tabellen ist der erste große Schritt zur Prävention der Dekompressionserkrankungen gemacht worden.

Die nachfolgenden Veränderungen der Tabellen rütteln nicht an dem Prinzip der stufenweisen Dekompression, sondern sie bedeuten lediglich Detailverbesserungen. Die Forschungen darüber gehören schon seit einigen Jahren der Vergangenheit der Tauchforschung an.

Die Weiterentwicklung der technischen Tauchgeräte erlaubt es, in immer größere Tiefen vorzudringen und sich dort längere Zeit aufzuhalten. Damit war das Tor zu neuen Problemen aufgestoßen, die im zweiten Teil der Arbeit angesprochen sind. Das sich zwangsläufig ergebende Sättigungstauchen wirft neue Probleme der Dekompression auf, die inzwischen aber beseitigt sind. Hier wird erstmals wieder von der stufenweisen Deko. Abstand genommen, da sich eine kontinuierlich langsamere werdende Deko. als geeigneter herausstellt. Auch dieses Kapitel der Tauchforschung ist bereits am Ende angelangt. Seit jüngster Zeit ist es nicht die Dekompression, an deren Optimierung gearbeitet wird; die Kompression und der hohe hydrostatische Druck bereiten den Tauchforschern neue Schwierigkeiten, die überwunden werden müssen, wenn Gesundheit und Wohlbefinden der Taucher nicht unnötig aufs Spiel gesetzt werden sollen. Zur Prävention des durch schnelle Drucksteigerung und durch hohen Druck verursachten Hochdruck-Nervensyndroms ist schon einiges getan worden, gänzlich beseitigt sind die Probleme jedoch noch nicht. Die Enträtse- lung dieser modernen "Caissonkrankheit" steht derzeit im Mittelpunkt des Forschungsinteresses.

Die schwierige und sicher noch lange dauernde Erforschung der Flüssigkeitsatmung beim Menschen wäre bei einem Erfolg der Bemühungen durch den völligen Wegfall der Dekompression und ihrer unliebsamen Begleiterscheinungen belohnt. Aber hier steht man noch am Anfang der Grundlagenforschung. Erst wenn die Tierexperimente erfolgversprechend abgeschlossen sind, kann man den nächsten Schritt, die Erprobung der

Flüssigkeitsatmung beim Menschen, wagen. Ob dieser Plan jemals realisiert werden kann? Zweifler und Verfechter dieser Idee müssen geduldig abwarten, was die Zukunft auf diesem Gebiet bringen wird.

Möglicherweise überholt der technische Fortschritt die bisherigen Forschungsbemühungen um die Lösung der beim Tiefsee-tauchen vorhandenen Probleme und macht sie durch die Benutzung von gepanzerten Tauchanzügen überflüssig.

Zum Schluß soll nicht unerwähnt bleiben, daß die Beschäftigung mit diesem reichhaltigen Thema ungeheuer interessant, aufschlußreich, teilweise faszinierend ist, daß jeder der gestreiften Teilbereiche für sich, bei größerer Ausführlichkeit, den Inhalt einer ähnlichen Arbeit darstellen könnte, und daß die Auseinandersetzung mit der Tauchforschung den kundigen Leser ebenso in seinen Bann zieht wie der Tauchsport den Taucher.

Anhang I

1) Angenommenes Körpergewicht: 70kg

Blut und halbflüssige Gewebe: 85%	=	59,5 kg	
Fett und fetthaltiges Gewebe: 15%	=	10,5 kg	
59,5 kg lösen ($8,7 \text{ cm}^3/\text{kg} \times 59,5 \text{ kg}$)	=	517 cm^3	N_2
<u>10,5 kg lösen</u> ($52,2 \text{ cm}^3/\text{kg} \times 10,5 \text{ kg}$)	=	<u>548 cm^3</u>	N_2
70 kg lösen		<u><u>1065 cm^3</u></u>	N_2

Es befindet sich etwa 1 Liter Stickstoff im Körper eines 70 kg schweren Menschen. *pro 1 bar Totdruck, T=?*

2) Blut und halbflüssige Gewebe machen 85% des Gewichts aus. Diese 85% der gesamten Körpremasse haben die gleiche Stickstofflöslichkeit wie Blut, also 100%. Die 15% Fettanteile des Gewichts haben 600% der N_2 - Löslichkeit des Blutes (Fett löst sechsmal so viel N_2 wie Blut), also hat 1 Gewichtsanteil des gesamten Körpers

$$\frac{100 \times 85 + 600 \times 15}{100} = 175 [\%]$$

der Stickstofflöslichkeit des Blutes.

Dieser Wert ist natürlich nur ein gemittelter. Offensichtlich korrigierte HALDANE seine Vermutung, daß die halbflüssigen Gewebe etwa genausoviel Stickstoff lösen wie Blut dadurch, daß er für die weitere Berechnung statt 175% nur 170% als durchschnittliche Stickstoffaufnahme-fähigkeit des übrigen Körpers im Verhältnis zu Blut annahm. Da das Blut 6,5% des Körpergewichts beträgt, befindet sich im übrigen Körper 26mal so viel Stickstoff wie im Blut:

$$\frac{170\%}{6,5\%} = 26$$

3) Sättigungsrate: $1/26$ pro Kreislauf

Gesucht: Anzahl der Kreisläufe, die nötig ist, um die Gewebe zur Hälfte mit dem nach Druckerhöhung herrschenden Stickstoffdruck zu versorgen.

$$y = 50\% = 0,5$$
$$a = 26 \implies n = \frac{\log(1 - 0,5)}{\log\left(\frac{25}{26}\right)} \cong 18$$

Nach 18 Kreisläufen ist der Körper zu 50% gesättigt.

- 4) Gewicht des Menschen: $G = 1$ Gewichtseinheit (GE)
Oberfläche " : $O = 1$ Flächeneinheit (FE)
Gewicht der Ziege : $G = 0,25$ bis $0,33$ (GE)
Oberfläche " : $O = 0,4$ bis $0,48$ (FE)

Respiratorischer Gaswechsel	Oberfläche Gewicht	(RG)
RG bei Mensch	= 1	
RG bei Ziege	= $\frac{0,4}{25} \cong 1,6$	$\cong 1 \frac{2}{3}$

Der respiratorische Gaswechsel von Ziegen ist also um $2/3$ größer als beim Menschen.

- 5a) Der logarithmische Verlauf der Kurve läßt sich auch so beschreiben:

$$(1) \quad y = 1 - (0,5)^{t/T_{1/2}}$$

mit t : betrachtete Zeit

$T_{1/2}$: Halbwertszeit des Gewebes

y : Sättigung nach der Zeit t in %

Formel (1) nach $T_{1/2}$ aufgelöst:

$$T_{1/2} = t \frac{\log 0,5}{\log(1 - y)}$$

Mit Zahlenwerten aus dem Beispiel ergibt sich:

$$t = 3 \text{ Stunden} = 180 \text{ Minuten}$$

$$y = 94\% = 0,94$$

$$T_{1/2} = 180 \frac{\log 0,5}{\log 0,06} = 44,34 \cong 45 \text{ Minuten}$$

5b) $45 \text{ Minuten} \times 1 \frac{2}{3} \cong 75 \text{ Minuten}$

Der respiratorische Gaswechsel ist bei Ziegen um $\frac{2}{3}$ größer, also dauert die Entsättigung bei Menschen um $\frac{2}{3}$ länger.

6a) Ausgehend von der Grundgleichung der Sättigung

$$\frac{dP}{dt} = k(P_1 - P)$$

läßt sich P berechnen:

$$P = P_0 + (P_1 - P_0)(1 - e^{-kt/T_{1/2}})$$

P: Gewebsdruck nach der Zeit t

P_1 : Umgebungsdruck nach der Zeit t

P_0 : Gewebsdruck zu Beginn

k: Konstante ($\ln 2$)

$T_{1/2}$: Halbwertszeit des Gewebes

t: Zeit, nach der der Gewebsdruck berechnet wird

Diese Formel gilt allgemein für die Sättigung und Entsättigung, wenn der Umgebungsdruck plötzlich steigt bzw. fällt und dann konstant bleibt.

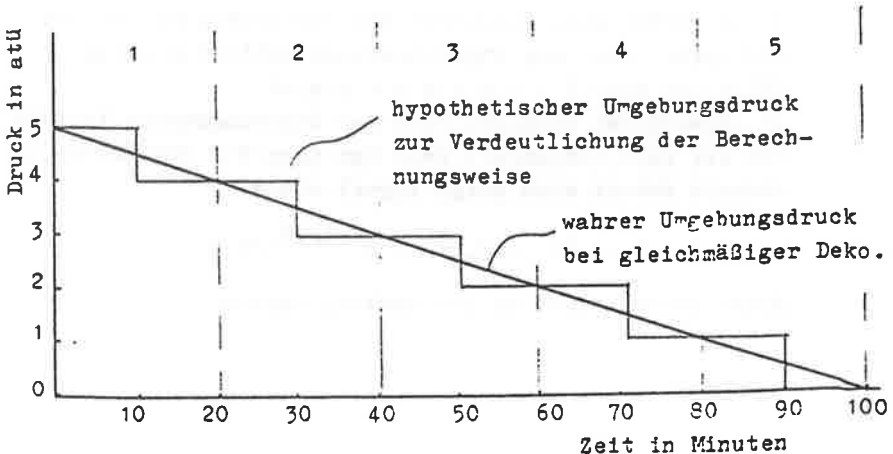
Im angegebenen Beispiel wird der Umgebungsdruck laufend mit der Zeit vermindert (mit der Rate $R = 1 \text{ ata}/20 \text{ min}$); deshalb ändert sich obige Formel etwas.

$$P = P_0 + (P_1 - P_0)(1 - e^{-kt/2T_{1/2}})$$

Diese Formel führt zu den exakten Werten.

6b) HALDANE dagegen benutzte folgende Überlegung und erhielt deshalb ungenauere Werte.

Zur Berechnung der am Ende herrschenden Gewebsspannung unterteilt man den Prozeß in fünf Abschnitte á 20 Minuten. In jedem Abschnitt soll die Druckverminderung um eine Atmosphäre stattfinden. Man kann sich dann die Entsättigung so vorstellen, daß die erste Hälfte jedes Abschnitts (10 Minuten) bei dem Druck verweilt wird, der zu Beginn des Intervalls herrscht, die zweite Hälfte (nach 20 Minuten) bei dem Druck, der am Ende des Intervalls erreicht ist. Die ersten 10 Minuten werden bei einem Druck von 5atü angenommen, die zweiten 10 Minuten bei 4atü. Während dieser 10 Minuten entsättigt sich das Gewebe (laut Formel (1) im Anhang I,5a) um 28% der Differenz zwischen Anfangs- und Enddruck der ersten Etappe, also um 0,28ata. In weiteren 10 Minuten bei 4ata reduziert sich der Druck im Gewebe auf 4,5atü. 10 Minuten bei 3atü verringern den Druck um 28% der Differenz zwischen Gewebdruck und Umgebungsdruck, also um $(4,5 - 3) \times 0,28 = 0,42$ ata. Es herrscht am Ende der zweiten Periode ein Gewebdruck von 4,08 atü. Führt man diese Berechnung fort, so erhält man den resultierenden Gewebüberdruck von 1,3atü statt 1,1atü (nach der Formel), da bereits nach 90 Minuten der hypothetische Umgebungsdruck auf 1ata abgesunken ist.



7) Ausgehend von Gleichung (1) aus Anhang 5a erhält man:

$$t = T_{1/2} \cdot \frac{\log(1-y)}{\log 0,5}$$

Mit den Zahlenwerten

$$y = 16\% = 0,16$$

$$T_{1/2} = 75 \text{ Minuten}$$

ergibt sich für t eine Zeit von 18,8 Minuten.

8) Damit überhaupt Werte berechnet werden können, darf eine totale Sättigung nicht verwendet werden, da dies zu einer unendlich langen Halbwertszeit führen würde. Als gemeinsame Berechnungsbasis sei eine Sättigung von 90% angenommen.

$$T_{1/2} = \frac{\log 0,5}{\log(1-y)} \cdot t$$

$$t = 12 \text{ bzw. } 20 \text{ Stunden}$$

$$y = 0,9$$

Daraus berechnet sich $T_{1/2}$ zu 228 bzw. zu 361 Minuten.

9) Umrechnungstabelle für Druckeinheiten

Einheit	bar	mWS	atm	ata	mmHg
bar	1	10,19716	0,986923	1,019716	750
mWS	0,098066	1	0,096784	0,1	73,5559
atm	1,01325	10,33227	1	1,033227	760
ata	0,980665	10	0,967841	1	735,559
mmHg	$1,333224 \times 10^{-3}$	$13,5951 \times 10^{-3}$	$13,15789 \times 10^{-3}$	$1,35951 \times 10^{-3}$	1

Anhang II

Anmerkung:

An dieser Stelle muß eine Klarstellung erfolgen, die in dem Aufsatz von HALDANE (1908) nicht immer deutlich ersichtlich ist.

Wenn es heißt, ein Gewebe ist bei einem Druck (z.B. 5ata) gesättigt, dann beträgt die Stickstoffspannung in diesem Gewebe natürlich nicht 5ata, sondern nur 80% davon, herrührend vom prozentualen Stickstoffanteil der Luft. Der wahre Stickstoffdruck im Gewebe beträgt also nur 4ata. Da aber der Faktor von 80% jedesmal berücksichtigt werden müßte, spielt es für die Berechnung keine Rolle, ob man sagt, ein Gewebe ist bei dem bestimmten Druck oder mit dem bestimmten Druck gesättigt. Entscheidend ist, daß das Gewebe bei dem herrschenden Umgebungsdruck keinen Stickstoff mehr aufnehmen kann, also gesättigt ist. Bleibt nach der Deko. ein bestimmter Überdruck im Gewebe vorhanden, das vorher bei einem bestimmten Druck gesättigt war, dann handelt es sich um einen Stickstoffüberdruck bezogen auf den bei einer Atmosphäre herrschenden Stickstoffdruck. Dies hat HALDANE nicht immer klar zum Ausdruck gebracht.

In den hier im Text exemplarisch vorgeführten Berechnungen wird nicht mit dem Stickstoffpartialdruck gerechnet, sondern der Einfachheit halber mit dem Luftdruck, d.h., man nimmt an, daß die Gewebe mit Luft gesättigt sind und der Überschuß an Luft freigesetzt wird. Zur Ermittlung der wahren N_2 -Partialdruckwerte braucht jeder Betrag nur mit 0,8 multipliziert zu werden.

Am Prinzip der konstanten, erlaubten Übersättigung ändert sich damit nichts, was ein einfaches Beispiel beweist:

Die Deko. von 5ata auf 2,5ata bedeutet sowohl für Luft als auch für Stickstoff eine Druckverminderung im Verhältnis 2:1.

Stickstoffdruck bei 5ata = 4ata

" bei 2,5ata = 2ata

Verhältnis für Luftdruck:

$$\frac{5ata}{2,5ata} = 2:1$$

Verhältnis für Stickstoff:

$$\frac{4ata}{2ata} = 2:1$$

Anhang III

Adressen von Tauchforschungsinstituten und ihre wichtigsten Vertreter.

Europa:

- 1) Royal Naval Physiological Laboratory (RNPL)
Alverstoke, Hants, England
(P.B.Bennett (ab ca. 1974 Duke Univers. Durham), D.H.
Elliott, H.V.Hempleman, S.Miles, E.E.P.Barnard)
- 2) Université de Marseille
Faculté de Sciences
France
(J.Chouteau)
- 3) Société Française de Médecine Subaquatique et Hyperbare
Docteur R. Rispe
MEDSUBHYP
102 rue Grignan
13001 Marseille
France
(C.Agarate, X.R.Fructus, J.Cousteau)
- 4) Universitätsspital Zürich
Departement für Innere Medizin
Medizinische Klinik
8091 Zürich
(A.A. Bühlmann, H.Keller)
- 5) Laboratory of Aviation Medicine
Institute of Physiology
University Lund, Schweden
(E.G.Lundgren)
- 6) Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine
Kopperpähler Allee 120
2300 Kronshagen/Kiel
(K.Seemann)

- 7) Europäische Gesellschaft für Unterwasserbiomedizin
Dr. H. Krekeler
5300 Bonn
Zanderstr. 1a
- 8) Sechenow Institut für Entwicklungsphysiologie und Biochemie
Leningrad, UdSSR
(G.L.Zaltsman)

Amerika:

- 9) State University of New York at Buffalo
Department of Physiology
(H.C.Ornhagen, Ch.V.Paganelli, N.Bateman)
- 10) US Naval Medical Research Institute and Undersea Medical
Society
9650 Rockville Pike
Bethesda, Maryland 20014
(E.L.Beckmann, E.H.Lanphier, A.J.Bachrach)
- 11) University of California Medical Center
San Francisco, California
(A.R.Behnke)
- 12) Duke University School of Medicine
Duke Medical Center
Durham, North Carolina 27710
(P.B.Bennett, J.A.Kylstra, H.A.Saltzman, J.Salzano)
- 13) Special Projects Office
Bureau of Naval Weapons
Washington D.C.
(G.F.Bond, R.D.Workman)
- 14) Submarine Development Group One
US Navy
San Diego, California
(W.L.Hunter)

- 15) US Naval Medical Center
Submarine Base, New London
Groton, Connecticut
(M.Greenwood, W.Mazzone)
- 16) University of Pennsylvania
School of Medicine
Philadelphia, Pennsylvania
(C.J.Lambertsen)
- 17) Union Carbide Corporation
Linde Division
Tonawanda, New York
(H.R.Schreiner, P.L.Kelley)

Literaturverzeichnis

- BENNETT, P.B.: Psychometric Impairment in Men Breathing Oxygen-helium at Increased Pressures. Medical Research Council, Underwater Physiology Sub-Committee, Report Nr. 251, 1965
- BENNETT, P.B.: The Physiology of Nitrogen Narcosis and the High Pressure Nervous Syndrom. In: STRAUSS: Diving Medicine, 1976, S. 157 - 181
- BENNETT, P.B.: Duke Rapid Trimix Dive to 1500 Ft. ATLANTIS I. In: Pressure, July 1979, S. 7
- BENNETT, P.B., D.H. ELLIOTT: The Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work, 2. Ed., Bailliere + Tindall, London, 1975
- BENNETT, P.B., J. ROBY, S. SIMON, D. YOUNGBLOOD: Optimal use of nitrogen to suppress the high pressure nervous syndrome. In: Aviat. Space Environ. Med., 46, 1975, S. 37 - 40
- BERT, P.: La Pression Barometrique, Recherches de physiologie experimentale, Typographie Labure, Paris, 1878
- BOND, G.F.: Medizinische Aspekte des Lebens unter Wasser. In: Überleben auf See, 1968, S. 71 - 80
- BOODA, L.L.: Divers Work On Well Head At 1600 Feet In Wet Pot. In: Sea Technology, 14, 1975, S. 29 - 43
- BORNSTEIN, A., M. STROINK: Ueber Sauerstoffvergiftung. In: Dt. med. Wschr., 38, 1912, S. 1495 - 1497
- BOYCOTT, A.E., G.C.C. DAMANT: Experiments of the Influence of Fatness on Suszeptibility on Caisson Disease. In: J. Hyg. Lond., 4, 1908, S. 445 - 456
- BOYLE, R.: A new experiment concerning an effect of the varying weight of the atmosphere upon some bodies in the water. In: Philosophical transactions, VII, 1672, zit. nach: HELLER et al., 1900
- BRAUER, R.W.: The High Pressure Nervous Syndrom: Animals. In: BENNETT/ELLIOTT, 1975, S. 231 - 247

- BÜHLMANN, A.A.: Decompression in Saturation Diving. In:
LAMBERTSEN, 1971, S. 221 - 227
- BÜHLMANN, A.A.: Persönliche Mitteilung, 1980
- BÜHLMANN, A.A., P.FREI, H.KELLER: Saturation and Desaturation
with N² and He at 4 atm. In: J.Appl.Physiol., 23, 1967,
S. 458 - 462
- CHOUTEAU, J., J.-Y.COUSTEAU, J.ALINAT: Zukünftige Entwicklung
und Möglichkeiten des Tieftauchens. In: Überleben auf
See, 1968, S. 55 - 70
- CROCKER, W.E.: Investigation into the decompression tables VII-
sea trials, Medical Research Council, RNPRC Report UPS
162, 1957a
- CROCKER, W.E.: Investigation into decompression tables IX -
revised tables, RNPRC Report UPS 171, 1957b
- CROCKER, W.E.: Proposals for applying the new standard tables
to surface decompression and combined dives, RNPRC Re-
port UPS 175, 1958
- CROCKER, W.E., H.J.TAYLOR: A method of calculating decompression
stages and the formulation of new diving tables, RNPRC
Report UPS 131B, 1952
- DER SPIEGEL, 29, vom 14.7.1980, S. 173
- EBBECKE, U.: Lebensvorgänge unter der Einwirkung hoher Drucke.
In: Ergebnisse der Physiologie, biologischen Chemie und
experimentellen Pharmakologie, 45, 1944, S. 34 - 183
- EHM, O.F.: Tauchen - noch sicherer! RÜschlikon, Stuttgart,
Wien, Müller Verlag, 1974
- EHM, O.F., K.SEEMANN: Sicher tauchen. RÜschlikon, Stuttgart,
Wien, Müller Verlag, 1965

- FRUCTUS, X.R., C. AGARATE, R. NAQUET, J.C. ROSTAIN: Postponing the "High Pressure Nervous Syndrom" to 1640 feet and beyond. In: LAMBERTSEN, 1976, S. 21 - 33
- GUERARD, M.A.: Note sur les effets physiologiques et pathologiques de l'Air comprimée. In: Ann.d.Hyg., VIII, 1854, S. 279 - 304
- HALDANE, J.S.: Respiration. New Haven, Yale University Press, 1922
- HALDANE, J.S., A.E. BOYCOTT, G.C.C. DAMANT: The Prevention of Compressed-air Illness. In: Journ.Hyg.Lond., VIII, 1908, S. 342 - 445
- HALSEY, M.J.: Deep sea diving. In: Nature, 285, 1980, S. 14
- HELLER, R., W. MAGER, H.v. SCHRÖTTER: Luftdruckerkrankungen mit besonderer Berücksichtigung der sogenannten Caissonkrankheit. Verlag Alfred Hölder, Wien, 1900
- HEMPLEMAN, H.V.: Investigation into the diving tables. Medical Research Council, RN Personnel Research Committee, Report 111, UPS 131, 1952
- HERVIER, P., St. LAGER: Note sur la carbonmetrie pulmonaire dans l'air comprimée. In: Gazette Medicale de Lyon, XVIII, 1849, S. 148 - 152
- HILL, L.: Caisson Sickness and the Physiology of Work in Compressed Air. Edward Arnold, Int.Med.Monographs, London, 1912
- HOPPE, F.: Ueber den Einfluss, welchen der Wechsel des Luftdrucks auf das Blut ausübt. In: Arch.f. Anat.,Physiol. u.wissenschaftl.Med., XXIV, 1857, S. 63 - 73
- HUNTER, W.L., P.B. BENNETT: The causes, mechanisms and prevention of the high pressure nervous syndrome. In: Unders.Biomed.Res., 1, 1974, S. 1 - 28
- JOHNSON, S.M., K.W. MILLER: Antagonism of pressure and anesthesia. In: Nature, 228, 1970, S. 75 - 76

- KIESOW, L.A.: Hyperbaric inert gases and the hemoglobin-oxygen equilibrium in red blood cells. In: *Unders.Biomed. Res.*, 1, 1974, S. 29 - 43
- KINDWALL, E.P.: A Short History of Diving and Diving Medicine. In: STRAUSS, 1976, S. 1 - 12
- KYLSTRA, J.A.: Flüssigkeitsatmung: Tieftauchen ohne Inertgasnarkose und Dekompressionsunfälle - Ziel einer Reihe von Experimenten. Deutsche Übersetzung bei Schiff.Med. Inst. Kiel, aus: *Revue de Physiologie Subaquatique et Medecine Syperbare*, 1968, S. 45 - 49
- KYLSTRA, J.A.: The Feasibility of Liquid Breathing in Man. In: *Pressure*, Sept.1977, S. 2 - 5
- KYLSTRA, J.A., R.NANTZ, J.CROWE, W.WAGNER, H.A.SALTZMAN: Hydraulic Compression of Mice to 166 Atmospheres. In: *Science*, 1967, S. 793 - 794
- LAMBERTSEN, C.J.: Underwater Physiologie. Proceedings of the 4th Symposium on Underwater Physiologie, Academic Press, New York, London, 1971
- LAMBERTSEN, C.J.: Underwater Physiologie. Proceedings of the 5th Symposium on Underwater Physiologie, Publication Press, Baltimore, 1976
- LAMBERTSEN, C.J.: Collaborative investigation of limits of human tolerance to pressurization with helium, neon and nitrogen. Simulation of density equivalent to helium-oxygen respiration at depths to 2000, 3000, 4000 and 5000 feet of sea water. In: LAMBERTSEN, 1976, S. 35 - 48
- LEMAIRE, C., E.L.MURPHY: Longitudinal study of performance after deep compression with heliox and He - N₂ - O₂. In: *Unders.Biomed.Res.*, 3, 1976, S. 205 - 216
- LEVER, M.J., K.W.MILLER, W.D.PATON, E.B.SMITH: Pressure reversal of anesthesia. In: *Nature*, 231, 1971, S. 368 - 371

- LULLIES, H., D. TRINCKER: Taschenbuch der Physiologie II.
Stuttgart, Fischer Verlag, 1973
- MILES, S., D. E. MACKAY: Underwater Medicine, Adlard Coles Ltd.,
London, 1976
- OVERFIELD, E. M., H. A. SALTZMAN, J. A. KYLSTRA, J. V. SALZANO: Respiratory gas exchange in normal men breathing 0,9% oxygen in helium at 31,3 Ata. In: J. Appl. Physiol., 27, 1969, S. 471 - 475
- POL, B., T. J. J. WATELLE: Memoire sur les Effets de la Compression de l'Air. Ann.d.Hyg., VIII, 1854, S. 241 - 279
- PROCTOR, L. D., C. R. CAREY, R. M. LEE, K. E. SCHAEFER, H. v. d. ENDE: Electroencephalographic changes during saturation excursion dives to a simulated sea water depth of 1000 ft. In: Aerospace Medicine, 43, 1972, S. 867 - 877
- SCHOENFISCH, H. W., G. D. BLENKARN, B. A. HILLS, J. A. KYLSTRA: Gas exchange in saline-filled lungs of man. In: J. Appl. Physiol., 35, 1973, S. 136 - 142
- SEEMANN, K.: Das Problem der Inertgasnarkose beim Tauchen. In: Überleben auf See, 1968, S. 103 - 112
- SMITH, J. L.: The pathological effects due to increase of oxygen tension in the air breathed. In: J. Physiol. Lond., 24, 1899, S. 19 - 35
- STRAUSS, R. H.: Diving medicine. Grune + Stratton, New York, San Francisco, London, 1976
- SUMMITT, J. K., J. S. KELLEY, J. M. HERRON, H. A. SALTZMAN: 1000 - foot helium saturation exposure. In: LAMBERTSEN, 1971, S. 519 - 527

- THALMANN, A.F., L. PIANTADOSI, R.J. SPAUR: U.S. Navy 1800ft Dive.
In: Pressure, Febr.1980, S. 7
- TRIGER, M.: Lettre à M. Arago. Comptes Rendus de l'Academie
des Sciences, XX, 1845, S. 445 - 449
- Überleben auf See. II. Marinemedizinisch - Wissenschaftliches
Symposium in Kiel, Rahmenthema: Neue Wege des Tieftau-
chens und der Tiefseeforschung, am 4./5. Mai 1968
- US NAVY DIVING MANUAL, NAVSHIPS, Vol.1/2, Navy Detartment,
U.S. Government Printing Office, Washington D.C.,
USA, 1978
- WALDVOGEL, W., A.A. BÜHLMANN: Man's reaction to long - lasting
overpressure exposure: Examination of the saturated
organism at a helium pressure of 21 - 22 ata. In: Hel-
vetica medica acta, 34, 1967/69, S. 130 - 150
- ZALTSMAN, G.L.: Physiological Principles of a Sojourn of a
Human in Conditions of raised Pressure of the Gaseous
Medium, Leningrad, 1961
Englische Übersetzung: Foreign Technology Division,
Wright - Patterson Air Force Base, Ohio, 1967
- ZUNTZ, F.: Pathogenese und Therapie der durch Luftdruckschwan-
kungen erzeugten Krankheiten. In: Fortschritte der Me-
dicin, XV, 1897, S. 799 - 807

Weitere Literatur, die zum tieferen Verständnis beiträgt, aber nicht direkt in der Arbeit Verwendung gefunden hat.

- BEHNKE, A.R., R.M. THOMSON, L.A. SHAW: Rate of Elimination of Dissolved Nitrogen in Man in Relation to Fat and Water Content of the Body. In: Am.J.Physiol., 114, 1935, S. 137 - 146
- BRADNER, H., R.S. MACKAY: Biophysical limitations on deep diving: some limiting performance expectations. In: Bull.Math. Biophys., 25, 1963, S. 251 - 271
- CARLYLE, R.F., G. NICHOLAS, P.M. ROWELS: Abnormal red cells in blood of men subjected to simulated dives. In: Lancet, 1979, S. 1114 - 1116
- CHOUTEAU, J.: Saturation Diving: The Consbelf Experiments. In: BENNETT/ELLIOTT, 1969 S. 491 - 504
- CHOUTEAU, J., J.H. CORRIOLL: Physiologische Aspekte des Tiefseetauchens. In: Endeavour, 30, 1971, S. 70 - 76
- CLAMAN, H.G.: Decompression Sickness. In: HUGH, 1971, S.99- 118
- CLARK, L.C., F.GOLLAN: Survival of Mammals Breathing Organic Liquids Equilibrated with Oxygen at Atmospheric Pressure. In: Science, 152, 1966, S. 1755 - 1756
- HUGH, W.R.: Aerospace Medicine. William + Wilkins, Baltimore, 1971
- LAWES, G.: No "floor" yet for the deep diver. In: New Scientist, 41, 1969, S. 396
- KELLER, H., A. A. BÜHLMANN: Probleme der Dekompressionsberechnung. In: Helvetica Medica Acta, 28, 1961, S. 764 - 774
- KELLER, H., A. A. BÜHLMANN: Deep diving and short decompression by breathing mixed gases. In: J.Appl.Physiol., 20, 1965 S. 1267 - 1270

SCHREINER, H.: Ein kritischer Überblick über den gegenwärtigen Stand der angewandten Tieftauchphysiologie. In: Int.Zs.f.angew. Physiol.einschl.Arbeitsphysiol., 27, 1969, S. 76 - 98

SEEMANN, K.: Medizinische Grenzen des Tauchens. In Neptun, 3.Jg., 1963, S. 80 - 81

SEEMANN, K.: Tieftauchforschung - heute und morgen. In: Wehrmedizin, 2, 1967, S. 206 - 210

SNELL, H.: Compressed Air Illness or So-called Caisson Disease. Lewis, London, 1896

SCHWERPUNKTE DER TAUCHFORSCHUNG

Wissenschaftliche Beiträge aus allen Bereichen der Erforschung der Meere und Binnengewässer, des Tauchens und des Gewässerschutzes

Band 1 :

-Entstehung klassischer Austauchtabeln.

Christoph Hoffmann

-Entwicklung neuer Tauchformen beim modernen Tiefseetauchen zur Vermeidung von Kompressions- und Dekompressionserscheinungen im menschlichen Körper. Christoph Hofmann

Band 2 :

-Zum Einfluß wiederholten Atemanhaltens unter Wasser auf die Atemanhaltezeit. Ute Hentsch

Band 3 :

-Die Problematik des Sättigungstauchens.

Joachim Scharl

Band 4 :

-Vergleichende Untersuchung über das Richtungshören unter und über Wasser.

Fred Dembny

Band 5 :

-Die Leistungsfähigkeit des Orientierungsvermögens unter Ausschaltung der visuellen Komponente beim Tauchen mit und ohne Pressluftgerät.

Gerhard Straub

Band 6 :

-Die Veränderung der neuromuskulären Erregbarkeit bei steigendem atmosphärischem Druck und deren Bedeutung für das Tiefenrauschphänomen beim Tauchen mit Pressluftgeräten.

Rainer Schulz

- *Begeisterung für die Welt unter Wasser*
- *Erstklassige tauchsportliche Ausbildung*
- *Mehr Wissen vom Meer und von Binnengewässern*
- *Erleben, Erfahren, Erforschen, Erhalten*
- *Praktizierter Umwelt- und Artenschutz*
- *Phantastische Unterwassererlebnisse*
- *Tauchsportbegeisterte Freunde gewinnen*
- *Freundschaften schließen*
- *Den Alltag vergessen*
- *Sport und Natur vereinen*
- *Heute schon dafür kämpfen, daß es auch morgen noch etwas zu erleben gibt*
- *Treffpunkt für Unterwasser-Filmer und -Fotografen*
- *Konditionssteigerung*
- *Sportliche Wettkämpfe in Einzel- und Mannschaftsdisziplinen*
- *Nationale und internationale Kontakte*
- *Kameradschaft für jung und alt*

Das sind einige der Punkte, die für eine Mitgliedschaft in einem der Vereine des Verbandes Deutscher Sporttaucher sprechen!



Informationen über
Tauchsportvereine in Ihrer Nähe:

Verband Deutscher Sporttaucher e.V.

2000 Hamburg 60

Gründgensstraße 18 · ☎ (0 40) 6 31 33 55