

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	INHALT
------------------------	---------------	--------

GRUNDLAGEN DER DEKOMPRESSION UND BERECHNUNG VON
DEKOMPRESSIONSPROFILIEN MIT HILFE DES ZH-L12 SYSTEMS

1. HISTORISCHE ENTWICKLUNG DER DEKOMPRESSIONSFORSCHUNG
2. MODELLE DER BLAESCHENBILDUNG
3. AUFNAHME UND ABGABE VON INERTGASEN IM ORGANISMUS
4. GRUNDLAGEN DES ZH-L12-SYSTEMS
5. BERECHNUNGEN VON DEKOMPRESSIONSPROFILIEN NACH ZH-L12
6. ASPEKTE ZUM GÜLTIGKEITSBEREICH DES ZH-L12-SYSTEMS

VERWENDETE LITERATUR:

"DEKOMPRESSION-DEKOMPRESSIONSKRANKHEIT"
A.A.Bühlmann, Springer Verlag 1983

"THE PHYSIOLOGY AND MEDICINE OF DIVING"
Bennett & Elliott, 3. Auflage

"SCHWERPUNKTE DER TAUCHFORSCHUNG"
Verlag Dr. Nagelschmid im VDST, Band 1

sowie persönliche Mitteilungen von
Dr. M. Hahn, Kaarst

HINWEIS:

Diese Unterlagen sind ausschließlich für Ausbildungszwecke
im Bereich des VDST bestimmt. Eine darüberhinausgehende Verwendung
dieser Unterlagen bedarf der Zustimmung des Autors bzw. des
Sachabteilungsleiters Ausbildung im VDST.

Dr. Klaus Meier-Ewert Tel. 06201/75127 bzw. 809181
Brunhildstr. 17
6944 Hemsbach

Edition 04.85 für Weiterbildungsseminar in TAILFINGEN am 04.05.85

1. HISTORISCHE ENTWICKLUNG DER DEKOMPRESSIONSFORSCHUNG

Die erste Maschine, mit der man den Umgebungsdruck kontrolliert absenken konnte, war die Saugpumpe von Otto von GUERICKE im Jahre 1654.

Der erste Zeuge eines Dekompressionsunfalls war Robert BOYLE, bei Tauchern hinlänglich bekannt durch das BOYLE-MARIOTTESche Gesetz. Im Jahre 1670 schloß er eine Schlange in einen Glasrezipienten ein, den er mit einer verbesserten Version der GUERICKEschen Saugpumpe evakuierte.

BOYLE berichtete, daß sich dabei in der wässrigen Flüssigkeit des Schlangenauges Gasbläschen bildeten, die hin und her wanderten.

Ab diesem Zeitpunkt entstand der Verdacht, daß die schnelle Reduktion des Umgebungsdrucks zu einer Bläschenbildung führen kann, die in sensitiven Geweben des Körpers ernste Schädigungen verursacht.

Weit vor der Erfindung der Saugpumpe begab sich der Mensch jedoch ins Wasser und setzte sich damit erhöhtem Umgebungsdruck aus. Es wurden dabei viele Versuche unternommen mit einer Vielzahl von Tauchapparaten.

Der erste historisch belegte Tauchapparat war die Tauchglocke "COLIMPHA" von ALEXANDER DEM GROSSEN, etwa 330 v. Chr. Aber bis in vergleichsweise jüngste Zeit waren alle entwickelten Gerätschaften absolut ungeeignet für irgendeine länger ausgedehnte UW-Tätigkeit und boten kaum einen Vorteil gegenüber dem Apnoetauchen.

Auf Grund der kurzen Kompressionsphase konnten somit auch kaum Dekompressionserscheinungen auftreten.

Erst 1717 wurde von dem Engländer Edmond HALLEY die erste praktikable Tauchglocke konstruiert. Die mit Blei überzogene Holzglocke besaß ein Ventil nach oben und die Luftzufuhr erfolgte über herabgelassene Holzfässer, deren eingeschlossene Frischluft über einen Schlauch in die Glocke strömen konnte. Auf diese Weise konnte man immerhin für 1,5 Stunden bis zu 18 m Tiefe absteigen.

Als die Druckpumpe erfunden war, schritt die Entwicklung des Tauchgerätebaus rasant vorwärts. Es entstanden der Caisson, der berühmte Senkkasten für Tunnel- und Brückenbau, im weiteren das Helmtauchergerät, das Narguile-Gerät, dann Preßluftgeräte, Dekompressionskammern und Tiefseetauchglocken, geeignet für einen Einsatz in mehreren hundert Metern Tiefe.

Und mit dieser Entwicklung stellte sich mit sehr drastischen

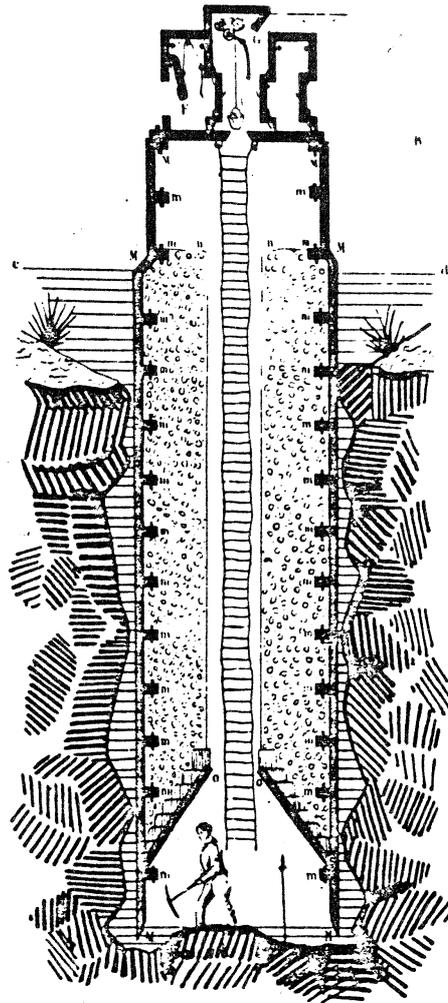
ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	HISTORISCHE ENTWICKL.
------------------------	---------------	-----------------------

Symptomen das Problem der Dekompressionskrankheit.

Erstmals wurde 1845 über Dekompressionserscheinungen nach mehrstündigen Arbeiten im Caisson in 20 m Tiefe berichtet. Die Arbeiter klagten über Gelenkschmerzen. Weitere Berichte über die

Abb.1.1

Der "Caisson"



Blister man-locks used on caisson at d'Argenteuil, 1861

unerklärlichen Merkmale der "CAISSON-KRANKHEIT", wie die Dekompressionskrankheit damals genannt wurde, häuften sich. Nicht selten wurden auch Todesfälle von Tauchern und Caissonarbeitern, die in entsprechender Tiefe tätig waren, erwähnt.

Man suchte nach einer Ursache für diese Erkrankungen.

Zuerst glaubte man, daß die komprimierte Luft als solche, der die Arbeiter ausgesetzt waren, die Ursache der Schmerzen sei.

1849 wurde die These vertreten, daß wegen des hohen Luftdrucks eine vermehrte organische Verbrennung im Körper stattfindet und diese in Verbindung mit einem erhöhten CO₂-gehalt der Um-

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	HISTORISCHE ENTWICKL.
------------------------	---------------	-----------------------

gebungsluft als Folge schlechter Entlüftung, schuld an den Schmerzen sei.

1854 machte man dann den Sauerstoff für diese Schmerzen verantwortlich. Das Blut sei mit CO₂ übersättigt und dies hätte eine schädigende Wirkung auf das Zentralnervensystem.

Dann wurde die Auffassung vertreten, daß die Schmerzen an den Gelenken rheumatischer Natur seien. Als Grund dieser Hypothese wurde angegeben, daß durch die schnelle Druckminderung die Luft sich stark abkühlt und somit rheumatische Gelenk- und Muskelschmerzen fördere.

1857 entsann man sich der 90 Jahre zurückliegenden BOYLESchen Tierversuche in der Unterdruckatmosphäre. Man stellt bei Tieren, die durch plötzlich einsetzenden Unterdruck getötet wurden, Gasbläschen in den Blutgefäßen fest und machte diese für den Tod verantwortlich.

Diese Erklärung wurde auf die Dekompression aus einer Ueberdruckatmosphäre übertragen, ohne allerdings Versuche darüber gemacht zu haben.

Um 1870 wurde von dem franz. Physiologen Paul BERT, der u. a. den Tauchreflex und die toxische Wirkung des hyperbaren Sauerstoffs entdeckte, zum erstenmal gewissenhafte Untersuchungen durchgeführt und er erkannte, daß der Stickstoff als Ursache der Dekompressionskrankheit anzusehen ist. BERT führte auch schon Versuche mit stufenweiser Dekompression durch, aber er fand keine Vorteile darin und empfahl eine langsame und gleichmäßige Druckminderung.

Trotz seiner großen Verdienste um die Ueberdruck- und Unterdruckmedizin gibt BERT eine völlig unzureichende Anweisung für die Dekompression. So blieben die Dekompressionsunfälle bei Tauchern an der Tagesordnung. Noch im Jahre 1909 kam es bei Bau des EAST-RIVER-Tunnels in NEW YORK zu 3692 Fällen von Caisson-Krankheit. 20 dieser Fälle endeten tödlich.

Erst die berühmt gewordenen Austausch Tabellen von John HALDANE, die 1908 und 1922 veröffentlicht wurden, leisteten einen wichtigen Beitrag zur Verringerung des Risikos bei der Dekompression.

Die Grundlage dieser Austausch Tabellen bildet die sog. HALDANEsche 2:1 Theorie. Sie besagt, daß der anfangs herrschende Druck um die Hälfte vermindert werden darf, ohne daß Dekompressionserscheinungen zu befürchten sind. D. h. man kann aus einer Wassertiefe von 10 m, also 2 bar, beliebig schnell dekomprimieren, gleichgültig wie lange der Aufenthalt war. Entsprechendes trifft zu beim Aufstieg von 30 m (4 bar) auf 10 m (2 bar).

An Hand dieser 2:1 Regel der gefahrlosen Gewebeübersättigung

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	HISTORISCHE ENTWICKL.
------------------------	---------------	-----------------------

konnte HALDANE brauchbare Dekompressionstabellen berechnen. Er führte dazu den Begriff der theoretischen Gewebe (KOMPARTIMENTE) ein, die sich formelmäßig sättigen und entsättigen. Er betrachtete 5 theoretische Gewebe mit Halbsättigungszeiten (Halbwertszeiten) von 5, 10, 20, 40 und 75 min.

Abb. 1.2

Original=
tabelle von
HALDANE

TABLE I.

Depth.		Pressure Pounds per Square Inch.	Time under Water, i.e., from Surface to Beginning of Ascent.**	Stoppages in Minutes at different Depths.						Total Time for Ascent in Minutes.	Number of Cylinders needed.†	Revolutions of Pump per Minute.‡	
Feet.	Fathoms.			60 ft.	20 ft.	40 ft.	30 ft.	20 ft.	10 ft.				
60-66	10-11	26½-29½	Up to 15 mins.	—	—	—	—	—	—	2	2	25	
			15 to 30 mins....	—	—	—	—	—	5	7			
			30 to 48 mins....	—	—	—	—	—	2	8			12
			48 to 60 mins....	—	—	—	—	—	3	10			15
			1 to 1½ hrs.	—	—	—	—	—	4	13			19
			1½ to 2 hrs.	—	—	—	—	—	5	15			22
			2 to 2½ hrs.	—	—	—	—	—	5	20			27
Over 2½ hrs.	—	—	—	—	—	10	20	32					
66-72	11-12	29½-32	Up to 15 mins.	—	—	—	—	—	2	4	2	25	
			15 to 25 mins....	—	—	—	—	—	2	4			8
			25 to 30 mins....	—	—	—	—	—	3	5			10
			30 to 45 mins....	—	—	—	—	—	4	9			15
			½ to 1 hr.	—	—	—	—	—	5	12			19
			1 to 1½ hrs.	—	—	—	—	—	8	16			26
			Over 2 hrs.	—	—	—	—	—	10	20			32
72-78	12-13	32-34½	Up to 10 mins.	—	—	—	—	—	3	5	2	25	
			10 to 20 mins....	—	—	—	—	—	—	5			7
			20 to 30 mins....	—	—	—	—	—	3	8			13
			30 to 38 mins....	—	—	—	—	—	4	12			18
			38 to 45 mins....	—	—	—	—	—	5	15			22
			½ to 1 hr.	—	—	—	—	—	8	16			26
			1 to 1½ hrs.	—	—	—	—	—	9	18			29
1½ to 1¾ hrs.	—	—	—	—	—	10	20	32					
78-84	13-14	34½-37	Up to 10 mins.	—	—	—	—	—	3	5	2	30°	
			10 to 20 mins....	—	—	—	—	—	—	5			7
			20 to 30 mins....	—	—	—	—	—	3	8			13
			30 to 40 mins....	—	—	—	—	—	4	13			19
			40 to 45 mins....	—	—	—	—	—	5	15			22
			45 to 55 mins....	—	—	—	—	—	8	16			26
			55 to 65 mins....	—	—	—	—	—	9	18			29
65 to 75 mins....	—	—	—	—	—	10	20	32					
84-90	14-15	37-40	Up to 10 mins.	—	—	—	—	—	1	3	6	2	30°
			10 to 20 mins....	—	—	—	—	—	3	5	10		
			20 to 30 mins....	—	—	—	—	—	4	10	16		
			30 to 40 mins....	—	—	—	—	—	5	15	22		
			40 to 50 mins....	—	—	—	—	—	7	15	26		
			50 to 60 mins....	—	—	—	—	—	3	10	15		
90-96	15-16	40-42½	Up to 10 mins.	—	—	—	—	—	1	3	7	2	30°
			10 to 20 mins....	—	—	—	—	—	3	5	11		
			20 to 30 mins....	—	—	—	—	—	5	11	18		
			30 to 35 mins....	—	—	—	—	—	5	15	22		
			35 to 45 mins....	—	—	—	—	—	2	8	15		
45 to 55 mins....	—	—	—	—	—	5	10	15	32				
96-108	16-18	42½-48	Up to 5 mins.	—	—	—	—	—	3	6	4	20	
			5 to 10 mins.	—	—	—	—	—	—	5			8
			10 to 15 mins....	—	—	—	—	—	3	5			11
			15 to 20 mins....	—	—	—	—	—	4	8			15

27-30 m →

FIG. 13.3. A reproduction of Haldane's original Table I (see text)

Die HALDANEsche Methode hat großen Einfluß auf die weitere Entwicklung der Austausch Tabellen genommen. Die verschiedenen Tabellen wie amerikanische, britische, französische, deutsche, schweizerische etc unterscheiden sich vom Prinzip her nicht. Sie basieren fast ausnahmslos auf dem HALDANE-Modell der erlaubten Stickstoffübersättigung.

Die US-NAVY-Tabellen, die uns Sporttauchern seit 1958 gedient haben, sind dahingehend abgewandelt, daß die Uebersättigungsto-

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	HISTORISCHE ENTWICKL.
------------------------	---------------	-----------------------

leranz von 2:1 nicht für alle Gewebe als konstant angenommen wird, sondern daß sie eine charakteristische Größe für jedes Gewebe darstellt und von der jeweiligen Tiefe abhängt. Dieses Verfahren wird auch von BUEHLMANN benutzt, auf dessen System anschließend noch ausführlich eingegangen wird.

Durch die Tiefseetauchforschung, die seit 1957 betrieben wird, flossen weitere Erkenntnisse ein. So konnten lange Halbsättigungszeiten präzisiert werden. Während HALDANE noch 75 min als längste HS-Zeit für Stickstoff annahm, ergaben die Hochdruckversuche die Existenz eines 635 min Kompartiments.

Diese Hochdruckversuche werden mittlerweile bis nahe an 70 bar, entsprechend 700 m Tauchtiefe durchgeführt.

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	BLAESCHENBILDUNG
------------------------	---------------	------------------

2. MODELLE DER BLAESCHENBILDUNG

Der Ansatzpunkt für das Erstellen von Dekompressionsregeln ist die Kenntnis des Bildungsmechanismus von Gasblasen im Organismus.

Seit langem schon wird an diesem Entstehungsmechanismus geforscht, ohne ihn allerdings umfassend erklären zu können. Der menschliche Organismus ist zu komplex, um ihn in seiner Gesamtheit und unter Berücksichtigung individueller Eigenschaften mit physikochemischen Daten beschreiben zu können.

Es läßt sich daher im einzelnen nicht voraussagen, wann und wo Blasen entstehen und ob sie zu einer kritischen, gesundheitsgefährdenden Größe heranwachsen.

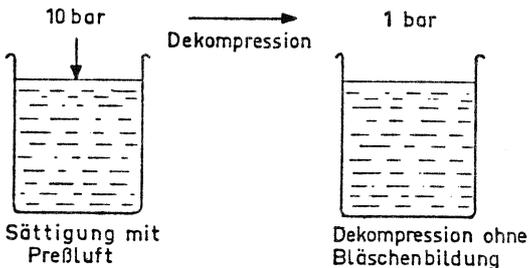
Im folgenden einige Studien zu diesem Problemkreis.

Abb. 2.1

Demonstrationsversuch

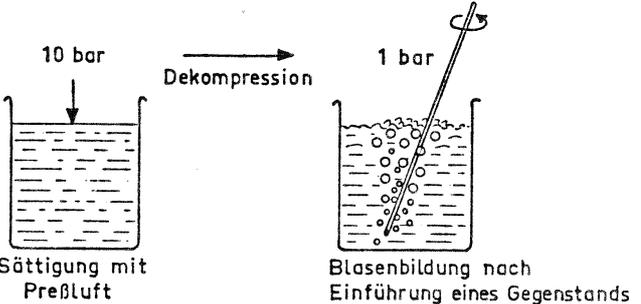
VERSUCHE ZUR BLÄSCHENBILDUNG

Versuch 1 (nach NEWTON-HARVEY, 1944)
Becherglas mit Wasser oder Blut komprimieren:



⇒ kein sichtbarer Effekt bei ungestörter Dekompression

Versuch 1a



⇒ heftige Gasentwicklung bei Fremdkörpern oder Bewegungen während der Dekompression

Wenn man ein Becherglas mit reinem Wasser oder Blut bei konstanter Temperatur einer N₂-Hochdruckatmosphäre bis zur Sättigung aussetzt und es anschließend rasch dekomprimiert, ist kein erkennbarer Effekt einer Bläschenbildung zu erzielen.

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	BLAESCHENBILDUNG
------------------------	---------------	------------------

Wenn man jedoch während der Dekompression eine fremde Oberfläche in den Becher einführt und die Flüssigkeit ev. noch umrührt, kann man eine heftige Gasentwicklung beobachten.

Diese Art von Versuchen führt zu dem Schluß, daß durch die fremde, nicht druckbehandelte Oberfläche eines Gegenstandes irgendwelche initiierenden Keime in die Flüssigkeit eingebracht worden sind, die das in Lösung befindliche Gas austreiben können.

Bezogen auf den Organismus könnten diese Keime durchaus schon vorhandene Mikrobläschen sein, die dann beim Druckabfall wachsen. Wenn es sich dabei tatsächlich um existierende Gasblasenkeime handelt, so müßten diese sich allerdings bei einer schnell durchgeführten Kompression unter hohem Druck auflösen können. Diese Forderung wird zum Teil durch das Experiment bestätigt (Abb.2.2)

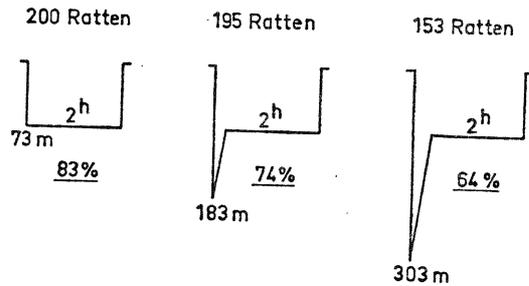
Abb.2.2

Nachweis von Mikroblasen

VERSUCHE ZUR BLÄSCHENBILDUNG

Versuch 2 (VANN, 1980)

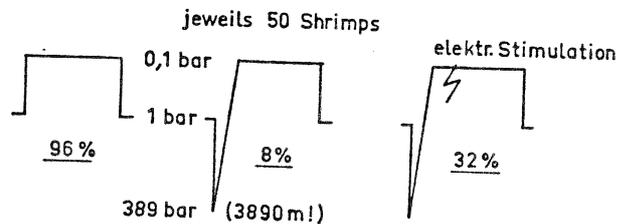
Dekompressionserscheinungen in % bei Ratten nach vorheriger Hochdruckbehandlung:



⇒ Reduzierung von Blasen nach Hochdruckbehandlung

Versuch 3 (WALDER, 1969)

Dekompressionserscheinungen in % bei Shrimps:



⇒ wie Versuch 2, jedoch nachlassender Effekt bei körperlicher Aktivität

Aus der Tauchpraxis existieren ebenfalls Beobachtungen, daß Taucher, die mehrfach in kurzen Zeitabständen im Einsatz sind, weniger durch die Dekompressionskrankheit gefährdet sind, als

ANGEHANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	BLAESCHENBILDUNG
------------------------	---------------	------------------

solche, die noch nicht druckexponiert waren.

Diese Adaptionsfähigkeit macht man sich beim Berufstauchen insofern von Nutzen, daß die Dekompressionszeiten entsprechend verkürzt werden können. Nach Beendigung der regelmäßigen Expositionen verschwindet diese Adaptionsfähigkeit allerdings innerhalb von einigen Tagen.

Diese Hypothese der im Organismus vorhandenen Mikrobläschen läßt folgenden Entstehungsmechanismus für die Gasblasen bei der Dekompression als denkbar erscheinen:

Abb. 2.3

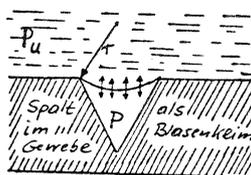
Modelle zur
Blasenbildung

Mechanismus der Bläschenbildung

Laplace'scher Satz: $p = \frac{2\gamma}{r}$, γ = kapillar konst.

p = Druck in einer Blase mit dem Radius r .
Auf Grund der Oberflächenspannung ist der Druck innerhalb der Blase größer als ausserhalb.

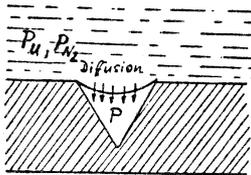
1. Normaldruck



$p = p_u - \frac{2\gamma}{r}$ d.h. es besteht

Unterdruck im Spalt wegen der konkaven Grenzschicht. Blasenkeim ist stabil.
 p_u = Umgebungsdruck,
 p_{N_2} = N_2 -Lösungsdruck

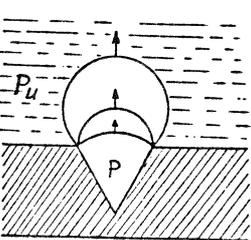
2. Kompression



Bei normaler Kompression erfolgt Diffusion von N_2 in die Mikroblase. Der Keim bleibt erhalten.

Bei schneller Hochdruckbehandlung kann Keim restlos aufgelöst werden.

3. Dekompression



Bei schneller Dekompression kann sich auf Grund des Überdrucks im Spalt ($p > p_u$) eine Blase absetzen.

1. Man nimmt an, daß kleine Gaskerne in feinsten Gewebespalten eingeschlossen sind. Auf Grund der Oberflächenspannung zwischen Gas und Gewebeflüssigkeit besteht ein relativer Unterdruck im Spalt. Der Blasenkeim ist somit stabil.
2. Bei normaler Kompression wird sich der Spalt wegen seines

ANGEHANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	BLAESCHENBILDUNG
------------------------	---------------	------------------

flüssigkeitsabweisenden Zustands, bedingt durch die Oberflächenspannung, nicht auflösen, sondern es wird vielmehr zum Ausgleich der Druckdifferenz eine bestimmte Gasmenge in den Spalt hineindiffundieren.

Bei exzessiver Kompression wird die Luft im Spalt allerdings soweit zusammengedrückt, daß der Keim verschwindet, wie es durch die angeführten Experimente bestätigt wird.

3. Bei langsamer Dekompression wird der nunmehr im Spalt sich aufbauende Ueberdruck eine Diffusion von Gas in die Gewebe bewirken, so wie es erwünscht ist.

Bei schneller Dekompression allerdings kann sich das Gasvolumen im Spalt jedoch soweit ausdehnen, daß sich eine Blase in die Gewebeflüssigkeit oder Blut absetzen kann.

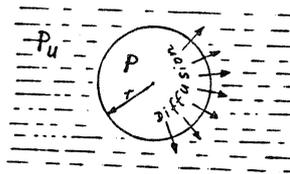
Solange die auf diese Art gebildeten und ev. freibeweglichen Blasen die Zellfunktionen nicht beeinträchtigen oder Kapillargefäße blockieren, besteht keine akute Gefahr.

Abb. 2.4

Modelle zur Blasenbildung

Mechanismus der Bläschenbildung

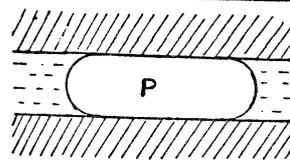
4. Auflösung einer Blase



$$P = P_u + \frac{2\sigma}{r}$$

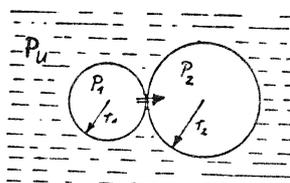
Auf Grund der Oberflächenspannung herrscht ein Ueberdruck in der Blase, wobei durch Diffusion die Blase sich allmählich auflöst.

5. Behinderung der Auflösung



Bei z.B. in Gefäßkapillaren eingeschlossenen Blasen ist die Oberfläche für die Gasabgabe reduziert. Auflösung ist behindert. Möglicherweise Einkapselung der Blase.

6. Konfluieren von Blasen



$$P_1 = P_u + \frac{2\sigma}{r_1}$$

$$P_2 = P_u + \frac{2\sigma}{r_2}$$

$$\text{da } r_1 < r_2 \rightarrow P_1 > P_2$$

d.h. kleinere Blase bläst größere Blase auf. Zusammenschluß zu größeren Blasen.

4. Auf Grund der Oberflächenspannung herrscht immer ein Ueber-

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	BLAESCHENBILDUNG
------------------------	---------------	------------------

druck in einer Blase, wobei sie sich durch Gasabgabe über Diffusion allmählich wieder auflöst.

5. Blasen allerdings, die Gefäße verstopfen, wobei sie während der Druckminderung beim Aufstieg noch weiter wachsen, nehmen eine zylindrische Form an. Hierbei ist auf Grund der reduzierten Oberfläche für die Gasabgabe an die Gewebeflüssigkeit oder an das Blut die Auflösung behindert. Möglicherweise erfolgt auch noch durch die Abwehreigenschaften des Körpers eine Einkapselung der Blase und ihre Auflösung wird zum langwierigen Prozeß.
6. Beim Zusammenstoß von freibeweglichen Blasen werden sie konfluieren, d.h. auf Grund der unterschiedlichen Oberflächenspannung wird die kleinere Blase die größere aufblasen, wobei die kleinere verschwindet und die Gefahr der Dekompressionserscheinungen steigt.

In diesem Zusammenhang sei noch kurz auf das Prinzip der Druckkammertherapie hingewiesen.

Abb. 2.5

Blasen=
behandlung

Prinzip der Druckkammertherapie

Entscheidene Prinzipien:

1. Reiner Sauerstoff; dadurch Gasaustausch $N_2 \leftrightarrow O_2$, d.h. schnellere N_2 -Diffusion aus den Geweben.
2. Boyle-Mariotte: Verringerung des Gasblasenradius durch Druckeinwirkung, dadurch besser Abtransport von Gasblasen in das periphere System.

Änderung des Bläschenvolumens nach $p \cdot V = konst.$:

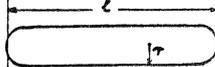
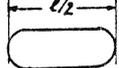
1. Kugelblase

1 bar	4 bar	8 bar	$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{konst}{p}$ oder $r \propto \frac{1}{\sqrt[3]{p}}$
			
r	r	r	
r	$r=0.63$	$r=0.5$	

d.h. Radius halbiert sich erst bei 8-fachem Druck,

höhere Drücke ergeben kaum Volumenverringierungen.

2. Zylindrische Blase

1 bar	
2 bar	
4 bar	

$V = \pi \cdot r^2 \cdot l = \frac{konst}{p}$ oder
 $r \propto \frac{1}{\sqrt{p}}$ bzw. $l \propto \frac{1}{p}$

d.h. Radius halbiert sich bei 4-fachem Druck, die Länge einer Blase halbiert sich dagegen schon bei doppeltem Druck.

Zylindrische Blasen lassen sich wirkungsvoller verkleinern als kugelförmige.

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	BLAESCHENBILDUNG
------------------------	---------------	------------------

Die Änderung des Blasen Volumens erfolgt nach dem BOYLE-MARIOTTE= schen Gesetz. Ziel ist dabei die blockierten Gefäße durch Ver= kleinerung der Blasen wieder freizulegen, um die Durchblutung und Versorgung der Organe zu fördern.

Wie aus der Rechnung in Abb. 2.5 ersichtlich ist, lassen sich kugel= förmige Blasen nur sehr schwer verkleinern. Ihr Radius halbiert sich erst bei 8-fachem Druck. Zylindrische Blasen lassen sich dagegen wesentlich wirkungsvoller verkleinern, ein sehr positiver Aspekt, weil in der Regel die zylindrisch geformten Blasen Gefäße blockieren.

Eine wesentliche Ergänzung der Druckkammertherapie ist die Gabe von hyperbaren Sauerstoff. Auf Grund des DALTONSchen Ge= setzes wird dabei N₂ bei Zunahme des O₂-Lösungsdruck beschleunigt ausgetrieben, da ja der Gesamtlösungsdruck physikalisch gesehen erhalten bleiben muß.

Die beschriebenen Versuche mit vorheriger Hochdruckbehand= lung vor der Dekompression haben gezeigt, daß Gasblasenkeime erfolgreich aufgelöst werden können, aber nur für begrenzte Zeit, denn nach einigen Stunden bis Tagen tauchen sie im Gewebe wieder auf.

Für diese Neubildung der Blasenkeime gibt es einige Hypothesen:

1. Scherkräfte, die während Bewegungen zwischen verschiedenen Gewebeschichten auftreten, können Gas aus der Lösung treiben, was sich wieder in Gewebespalten einnisten kann.
2. Die Wirbelbildungen des Bluts im Herz und an den Arterien= verzweigungen können Kavitationen ("Unterdruckblasen") auslösen.
3. Im Organismus befinden sich Spuren von radioaktivem Uran. Die beim radioaktiven Zerfall entstehenden Spaltprodukte erzeugen im Gewebe Ionisationsspuren, die die Oberflächenspannung herab= setzen und somit Blasenkeime fördern.

Obschon alle die angeführten Untersuchungen plausibel erschei= nen, existiert jedoch keine gesicherte Theorie für die Blasen= bildung und somit auch kein direkt ableitbares Modell für Dekompressionsberechnungen.

Die Tiefseetauchforschung beschehrt dem Menschen darüber hinaus neue Hindernisse und steckt der Euphorie des Tiefseetauchens wohl absolute Grenzen. Dazu gehören das sog. HPNS (HIGH PRESSURE NERVOUS SYNDROM), das "Heliumzittern", wie auch die Tatsache, daß bei Drücken ab etwa 2000 m Tiefe das Zellplasma sich verändert und das gesamte biochemische Geschehen im Körper gestört wird.

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	BLAESCHENBILDUNG
------------------------	---------------	------------------

In diesem erweiterten Gesichtsfeld befindet sich die Dekompressionsforschung noch vor einer großen Aufgabe.

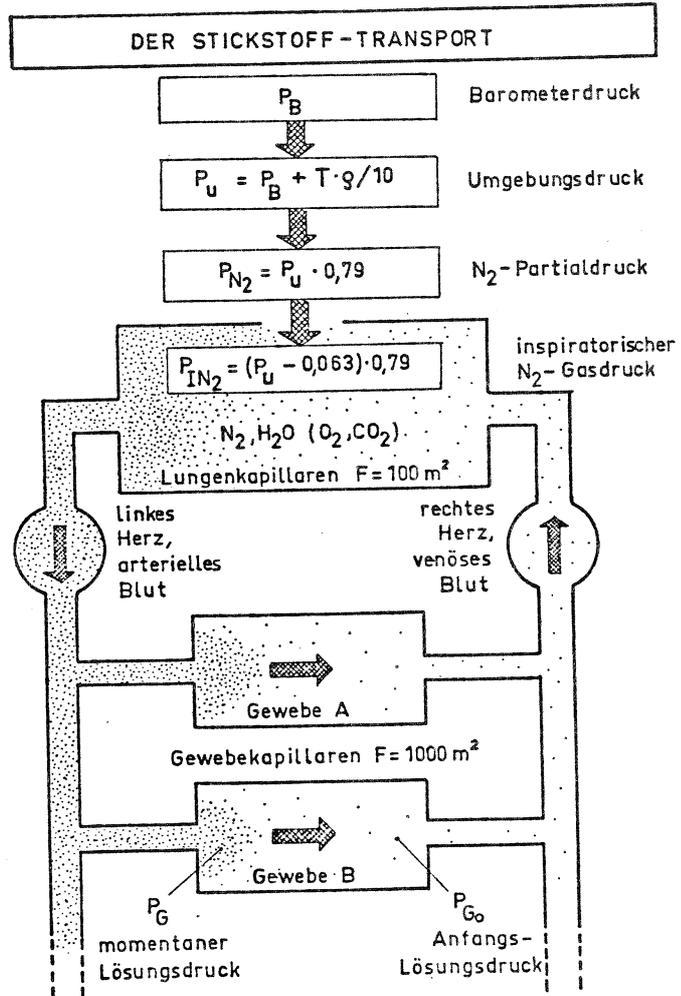
ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	INERTGASTRANSPORT
------------------------	---------------	-------------------

3. DIE AUFNAHME UND ABGABE VON INERTGASEN

Jeder Dekompression geht zunächst immer eine Kompression vor= aus. Hierbei gelangt der Stickstoff nach folgendem Vorgang in das Körpergewebe:

Abb.3.1

Blut als N₂-Transport= mittel



Wie gehen aus vom atmosphärischen Luftdruck P_B. Er bestimmt die Grundsättigung P_{G0} von N₂ im Organismus.

Beim Abtauchen auf die gelotete Tiefe T lastet auf uns der Umgebungsdruck $P_U = P_B + T \cdot \rho / 10$, wobei rho die Dichte des Wassers ist. In der Lunge herrscht der gleiche Druck (Atemregler).

Der Inertgaspartialdruck P_{N2} ist dabei Umgebungsdruck mal Stickstoffanteil im Atemgas.

In der Lunge besteht ein konstanter Wasserdampfdruck von 0,063 bar (Dampfdruck von Wasser bei 37 Grad). Dadurch reduziert sich der Gesamtdruck um diesen Anteil. Die Größe P_{IN2} ist dann der

ANGEHANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	INERTGASTRANSPORT
------------------------	---------------	-------------------

effektive Inertgaspartialdruck in der Lunge. Wir bezeichnen ihn als INSPIRATORISCHEN INERTGASPARTIALDRUCK (kurz insp. Gasdruck).

Die Gaskomponenten O₂ und CO₂ können für die Dekompressionsbetrachtungen außer Acht gelassen werden, da diese Gase durch den Stoffwechsel chemischen Einflüssen unterliegen.

Bedingt durch diesen wirkenden Druck P_{IN2} diffundiert der Stickstoff ins Blut.

Die dabei zur Verfügung stehende Gasaustauschfläche in der Lunge hat die beachtliche Größe von 100 - 200 qm. Der Gasaustausch findet an den feinsten Verästelungen des Bronchialsystems, den Alveolen statt. Die Alveolen sind von den Lungenkapillaren umgeben. Die Membrandicke zwischen Kapillaren und Alveolen beträgt nur 1/1000 mm. Das Blut verweilt, je nach körperlicher Belastung, zwar nur 1/4 bis 3/4 s in der Umgebung einer Alveole, jedoch ist die Diffusionsgeschwindigkeit der Gase in der Lunge so hoch, daß das an den Alveolen vorbeiströmende Blut vollständig gesättigt werden kann bzw. entsättigt werden kann bei umgekehrten Druckverhältnissen.

Das arterielle Blut transportiert den physikalisch gelösten Stickstoff in alle Körpergewebe. In den einzelnen Organen verzweigen sich die zuleitenden Arterien (Arteriolen) in ein feines Kapillarnetz. Die Gesamtzahl aller Kapillaren eines Erwachsenen beträgt 5 Milliarden. Berücksichtigt man Querschnitt und Länge der Gefäße, so ergibt sich eine Gasaustauschoberfläche von 1000 qm, bei Leistungssportlern bis zu 6000 qm.

Zwischen starker körperlicher Belastung und Ruhestellung bzw. zwischen Normaltemperatur und Unterkühlung kann sich diese Fläche durch Erweitern bzw. Verengung der Gefäße erheblich ändern, d.h. der N₂-Gasaustausch ist von solchen Zuständen abhängig.

Die N₂-Moleküle treten durch die Kapillarwände hindurch und diffundieren in alle Gewebезonen hinein. Dieser Prozeß vollzieht sich solange, bis das gesamte Gewebe den gleichen N₂-Lösungsdruck besitzt wie das einströmende Blut.

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	INERTGASTRANSPORT
------------------------	---------------	-------------------

Abb.3.2

Berechnung
von gelösten
Gasmengen

DAS HENRYSCHE GESETZ

Das bei gegebener Temperatur in einer bestimmten Flüssigkeitsmenge gelöste Gasvolumen ist dem Teil-
druck des Gases in der Gasphase proportional:

$$Q_i = \alpha_{ij} \cdot V_j \cdot p_i$$

i = Gasart

j = Art des Lösungsmittels

Q_i = gelöste Gasmenge [cm^3]

α_{ij} = Löslichkeitskoeff. [$\frac{cm^3}{cm^3(Lsgm) \cdot bar}$]

V_j = Menge des Lösungsmittels [cm^3]

p_i = Lösungsdruck [bar]

Der Löslichkeitskoeff. ist eine Funktion der
Temperatur: $\alpha = e^{f(T)}$

Beispiel:

Löslichkeit von Luftstickstoff in Wasser bei

37 °C: $\alpha = 0,01223$ [$\frac{cm^3}{cm^3(H_2O) \cdot bar}$]

30 °C: $\alpha = 0,01340$ [$\frac{cm^3}{cm^3(H_2O) \cdot bar}$]

d.h. bei unterkühlten Körpergewebe würde 10%
mehr N_2 gelöst.

Die Menge des physikalisch gelösten Inertgases wird durch das HENRYsche Gesetz beschrieben. Die bestehende Temperaturabhängigkeit dieses Gesetzes ist im Beispiel Abb.3.2 angedeutet.

Bei Normaldruck befinden sich je nach Fettgehalt etwa 15 - 20 ml/kg im Gesamtorganismus, wie die Abschätzung in Beispiel Abb.3.3 zeigt.

Der vollständige Druckausgleich zwischen Alveolen, Blut und allen Geweben erfordert für Stickstoff mehrere Tage. Wird während 3 Tagen ein konstanter PIN_2 geatmet, besteht praktisch in keinem Organ mehr ein Druckgradient. Wir bezeichnen diesen Zustand als Sättigung.

In Abb.3.3 ist ein Anwendungsbeispiel zum HENRYschen Gesetz angeführt.

ANGEHANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	INERTGASTRANSPORT
------------------------	---------------	-------------------

Abb. 3.3

**Gelöste N₂-
Gasmengen im
menschlichen
Körper**

N ₂ -GASMENGEN IM MENSCHL. KÖRPER
--

Annahme: 70 kg schwerer Mensch bei N₂-Sättigung
80% Wasser, 20% Fette

Löslichkeitskoeff.:

$$\alpha_{H_2O} = 0,0122 \left[\frac{l_n}{l(H_2O) \cdot \text{bar}} \right] \quad (37^\circ\text{C}) \quad l_n \text{ \textcircled{=} bei Normaldruck}$$

$$\alpha_{Fett} = 0,067 \left[\frac{l_n}{l(Fett) \cdot \text{bar}} \right] \quad (\text{Olivenöl, } 37^\circ\text{C})$$

Volumen des Lösungsmittels:

$$V_{H_2O} = \frac{70 \cdot 80\%}{1 \cdot 100\%} = 56 \text{ l} \quad (g = 1 \text{ kg/l})$$

$$V_{Fett} = \frac{70 \cdot 20\%}{0,9 \cdot 100\%} = 15 \text{ l} \quad (g = 0,9 \text{ kg/l})$$

Lösungsdruck bei p_u = 1 bar:

$$\text{insp. Gasdruck } p_{N_2} = (p_u - 0,063) \cdot 0,79 = 0,74 \text{ bar}$$

gelöste Gasmenge (p_u = 1 bar):

$$Q_{H_2O} = 0,0122 \cdot 56 \cdot 0,74 = 0,5$$

$$Q_{Fett} = 0,067 \cdot 15 \cdot 0,74 = 0,8$$

$$\underline{1,3 \text{ l}} \quad (\text{entspr. } 18 \text{ ml / kg})$$

Lösungsdruck bei p_u = 5 bar (40 m): p_{N₂} = 3,9 bar

gelöste Gasmenge (p_u = 5 bar):

$$Q_{H_2O} = 0,0122 \cdot 56 \cdot 3,9 = 2,7$$

$$Q_{Fett} = 0,067 \cdot 15 \cdot 3,9 = 3,9$$

$$\underline{6,6 \text{ l}}$$

Differenzmenge $\Delta Q = 6,6 - 1,3 = \underline{5,3 \text{ l}}$

Gegenüber Normaldruck wird z.B. bei einem 40 m Sättigungstauchgang (Druckkammer) eine zusätzliche Stickstoffmenge von ca 5 l im Körper gelöst (Abb.3.3).

Im Gegensatz zum Berufstauchen nähern sich im Bereich des Sporttauchens nur wenige Gewebearten dem vollständigen Sättigungszustand. Hierzu gehören allerdings unsere empfindlichsten Organe, das Zentralnervensystem. Andere Gewebe wie Knochen, Sehnen, Knorpel und Gelenke nehmen dagegen während eines Tauchgangs nur geringe Mengen an Stickstoff auf.

Bei einem 20 min-Tauchgang auf 40 m Tiefe dürfte die zusätzlich gelöste Gesamtstickstoffmenge bei 2 l liegen.

ANGEHANDTE TAUCHPHYSIK

DEKOMPRESSION

INERTGASTRANSPORT

Die Bedeutung dieser scheinbar geringen Gasmenge von 2 l für die Dekompression soll in der folgenden Betrachtung (Abb.3.4) veranschaulicht werden:

Abb.3.4

Fiktive Anzahl
von kritischen
Blasen aus 2 l
Inertgas

THEORETISCHE ANZAHL KRITISCHER BLASEN

Annahme: 2l gelöster Stickstoff werden durch explosive Dekompression kurzzeitig freigesetzt, jede 1000-te Blase gelangt ins Kapillarsystem, Blase etwas größer als Kapillare (Gasembolie).

Kapillarradius	$r_K = 4,5 \mu\text{m} = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$
Bläschenradius	$r_B = 5 \mu\text{m} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$
Volumen einer Blase	$V_B = \frac{4}{3} \pi r_B^3 = 0,52 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3$
Anzahl Blasen aus 2l	$n_B = \frac{2000 \text{ cm}^3}{\frac{4}{3} \pi r_B^3 \text{ cm}^3} = \underline{\underline{3,8 \cdot 10^{12}}}$
Anzahl Kapillargefäße	$n_K = 5 \cdot 10^9$
Anz. blockierte Gefäße	$n_b = \frac{3,8 \cdot 10^{12}}{1000} = \underline{\underline{3,8 \cdot 10^9}}$

d.h. nahezu jede Kapillare ist blockiert, Billionen von Zellen sind betroffen

Würden wie beim Sprudelwassereffekt alle Bläschen kurzzeitig entstehen und sich im Körper verteilen können, würde das mit Sicherheit zum sofortigen Tode führen, eine Situation, wie sie möglicherweise bei einer Druckkammerexplosion entstehen könnte.

Es ist das Ziel der Dekompressionsvorschriften, daß zu keinem Zeitpunkt der Druckentlastung Gasblasen entstehen, die ein kritisches Volumen einnehmen können. Das Inertgas sollte, analog wie bei der Kompression, den Körper ausschließlich über den physikalischen Weg der Diffusion verlassen können:

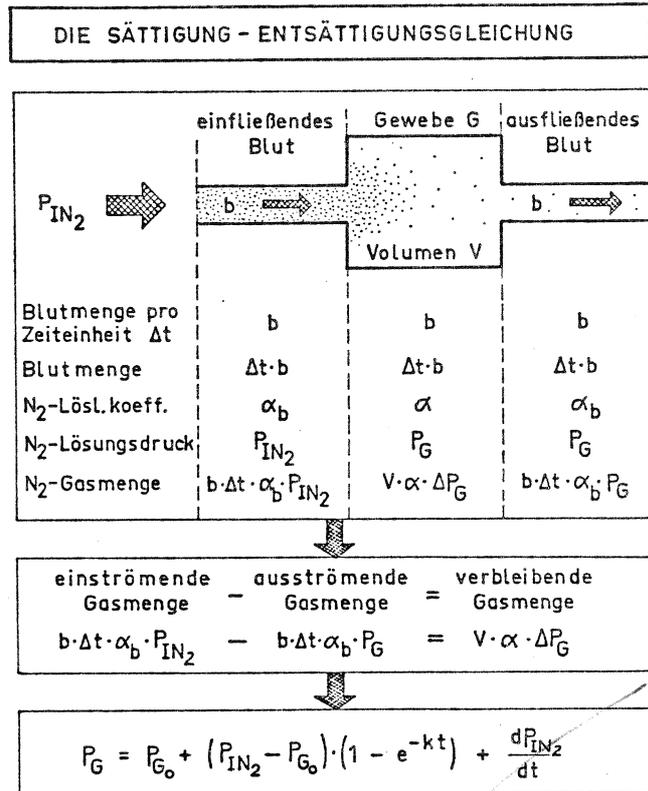
	DIFFUSION		DIFFUSION	
LUNGE	←→	BLUT	←→	GEHEBE

ANGEHANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	INERTGASTRANSPORT
------------------------	---------------	-------------------

Dieses Modell des Stickstofftransports läßt sich nun mit folgendem physikalischen Formalismus beschreiben:

Abb.3.5

Physikalischer Ansatz zur Ableitung der Sättigungsgl.



- P_G = Lösungsdruck im Gewebe nach Zeitdauer t
- P_{G_0} = Anfangslösungsdruck
- P_{IN_2} = inspiratorischer Gasdruck
- $k = \frac{b \cdot \alpha_b}{V \cdot \alpha} = \text{Gewebekonstante} \left(= \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \right)$

Die Blutflußrate, also Blutmenge pro Zeiteinheit dt, in ein Gewebe des Volumens V bezeichnen wir mit b, z.B. 1 l/min. In einer Minute hätte dann (1 l/min * 1 min) = 1 l Blut das Gewebe passiert.

Das einfließende Blut ist mit Stickstoff gesättigt und der Lösungsdruck ist gleich dem insp. Gasdruck.

Zu einem beliebigen Zeitpunkt t habe das Gewebe den mittleren Lösungsdruck P_G .

Das Blut gibt beim Durchströmen durch das Gewebe, entsprechend dem herrschenden Druckgefälle, den überschüssigen Stickstoff ab, so, daß es beim Verlassen des Gewebes über die Venen den gleichen Gasdruck P_G besitzt.

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	INERTGASTRANSPORT
------------------------	---------------	-------------------

Wir betrachten diesen Vorgang nun für einen kleinen Zeitabschnitt, den wir mit dt bezeichnen. Nach dem HENRYschen Gesetz beträgt die einströmende Gasmenge:

$$\begin{aligned} & \text{mal} \quad \text{Volumen des einströmenden Blutes } b \times dt \\ & \text{mal} \quad \text{Löslichkeitskoeff. des Blutes } \alpha \cdot b \\ & \text{mal} \quad \text{insp. Gasdruck } P_{IN2}, \end{aligned}$$

Während das ausfließende Blut nur noch die Gasmenge

$$\begin{aligned} & \text{mal} \quad \text{Volumen des ausströmenden Blutes } b \times dt \\ & \text{mal} \quad \text{Löslichkeitskoeff. des Blutes } \alpha \cdot b \\ & \text{mal} \quad \text{bestehendem Gewebelösungsdruck } P_G \end{aligned}$$

enthält.

Dadurch, daß das einströmende Blut Stickstoff an das Gewebe abgegeben hat, steigt im Gewebe innerhalb der Zeitspanne dt der Lösungsdruck um einen gewissen Betrag dP_G an. Die dabei an das Gewebe abgegebene Gasmenge ist somit:

$$\begin{aligned} & \text{mal} \quad \text{Volumen des Gewebes } V \\ & \text{mal} \quad \text{Löslichkeitskoeff. des Gewebes } \alpha \\ & \text{mal} \quad \text{Lösungsdruckzuwachs } dP_G. \end{aligned}$$

Es ist einleuchtend, daß insgesamt der folgende Erhaltungssatz gelten muß:

$$\begin{aligned} & \text{einströmende Gasmenge} - \text{ausströmende Gasmenge} = \\ & \text{im Gewebe verbleibende Gasmenge.} \end{aligned}$$

Mit Hilfe von mathematischen Methoden, bei denen man die Zeitintervalle dt sehr klein werden läßt und dabei die entsprechenden Druckzuwachselemente dP_G im Gewebe aufaddiert ("integriert"), ergibt sich die Fundamentalgleichung für die Sättigung bzw. Entsättigung von Inertgasen in Körpergeweben.

Diese Fundamentalgleichung ist die mathematisch-physikalische Basis zur Berechnung unserer Dekompressionstabellen.

Sie beschreibt den zeitlichen Verlauf des Stickstofflösungsdrucks in einzelnen Organen. Sie ist anwendbar für ein Rechteckprofil eines Tauchgangs. Ein geschwindigkeitsabhängiges Profil ist ungleich komplizierter, aber mit den Mitteln der Mathematik lösbar.

Die Größen b , $\alpha \cdot b$, V , α sind als sog. Gewebekonstante k zusammengefaßt.

Die Gewebekonstante ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der die Inertgase wie N_2 in den einzelnen Geweben in Lösung gehen bzw. entweichen. Je größer der Wert von k ist, um so schneller wird ein Gewebe gesättigt bzw. entsättigt.

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	INERTGASTRANSPORT
------------------------	---------------	-------------------

Anstelle der Gewebekonstanten wird meist der Begriff der sog. Halbsättigungszeit $t_{1/2}$ (Halbwertszeit) verwendet. Sie ist über die Beziehung $k = \ln(2) / t_{1/2}$ mit der Gewebekonstanten verknüpft. Dies ergibt sich direkt aus der Fundamentalgleichung wenn man fragt, welche Zeit erforderlich ist, damit sich das Gewebe bis zur Hälfte sättigt ($P_G = P_{IN2} / 2$).

Also, die Halbsättigungszeit (im folg. kurz HS-Zeit) ist diejenige Zeit, nach der ein bestimmtes Gewebe zur Hälfte gesättigt ist. Ein großer Wert der Gewebekonstanten bedeutet eine kurze HS-Zeit.

Für stark durchblutete Organe wie z.B. Gehirn und Rückenmark ist eine kleine HS-Zeit anzusetzen und für gering durchblutete Gewebe wie Knochen eine entsprechend lange HS-Zeit.

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	ZH-L12 GRUNDLAGEN
------------------------	---------------	-------------------

4. GRUNDLAGEN DES ZH-L12 SYSTEMS

Seit Mai 1984 sind für uns Sporttaucher neue Dekompressionstabellen verbindlich. Sie basieren auf den ZH-L12 Koeffizienten von Prof. BUEHLMANN aus Zürich.

Die Bedeutung dieser Koeffizienten für die Berechnung von Dekompressionstabellen bzw. von beliebigen Dekompressionsprofilen soll im folgenden diskutiert werden.

Mit Hilfe der Sättigungs-Entsättigungsgleichung (Abb. 3.5) ließe sich durchaus ein Dekompressionsprofil berechnen, wenn zwei Bedingungen bekannt wären:

1. Die Werte der Gewebekonstanten bzw. HS-Zeiten aller Körpergewebe.
2. Die erlaubte Druckminderung für alle Körpergewebe beim Aufstieg, ohne daß kritische Bläschen entstehen.

Zu Punkt 1

Die Vorgehensweise, die HS-Zeiten für alle Körpergewebe und alle Kreislaufparameter auf Grund von physikochemischen Daten

Abb. 4.1

Abhängigkeit der Gewebekonstanten

Physiologische Einflussgrößen

$$P_G = f(k) , k = \frac{b \cdot \alpha_b}{V \cdot \alpha}$$

$\alpha_b = \text{konstant}$

$V = \text{konstant}$

$b = f(\text{Kreislauf})$

$\alpha = f(\text{Gewebeart})$

$$P_G = f(b, \alpha)$$

Gewebeart

- Kapillarisation
- Diffusionsgeschwindigkeit
- Oberflächenspannung bei Blasenbildung
- Durchblutungsstörungen
 - Gefäßkrankheiten
 - Einschnürungen Gurtbänder
 - Gefäßkontraktionen bei Kälte
- Alter
- Grad der Fettleibigkeit

Kreislaufaktivität

- physische Belastung
- psychische Belastung
- Temperatureinflüsse
- Kondition
- Alkohol - Medikamenteinflüsse

ANGEHANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	ZH-L12 GRUNDLAGEN
------------------------	---------------	-------------------

bestimmen zu wollen, scheitert augenscheinlich an der Komplexität des menschlichen Organismus. Es müssen zusätzlich ja auch noch individuelle Eigenschaften eines Menschen und situationsbedingte Abhängigkeiten berücksichtigt werden.

Im Übrigen dürfte es nach den bisherigen Erläuterungen hinlänglich klar geworden sein, daß die Gewebekonstante eines bestimmten Gewebes selber im physiologischen Sinne keine konstante Größe sein kann, wie in Abb. 4.1 aufgezeigt ist.

Ohne Fehler können wir das Organvolumen V als Konstante ansetzen. Gleiches gilt für den Löslichkeitskoeffizienten von N_2 in Blut, wenn Temperatureffekte ausgeschlossen werden können.

Die Blutflußrate b und somit der gesamte Stickstofftransport hängen jedoch signifikant von der Kreislaufaktivität ab und der N_2 -Löslichkeitskoeffizient α stark von der Gewebeart.

Die Abhängigkeit der Organdurchblutung von der körperlichen Aktivität ist in Abb. 4.2 dargestellt.

Abb. 4.2 a

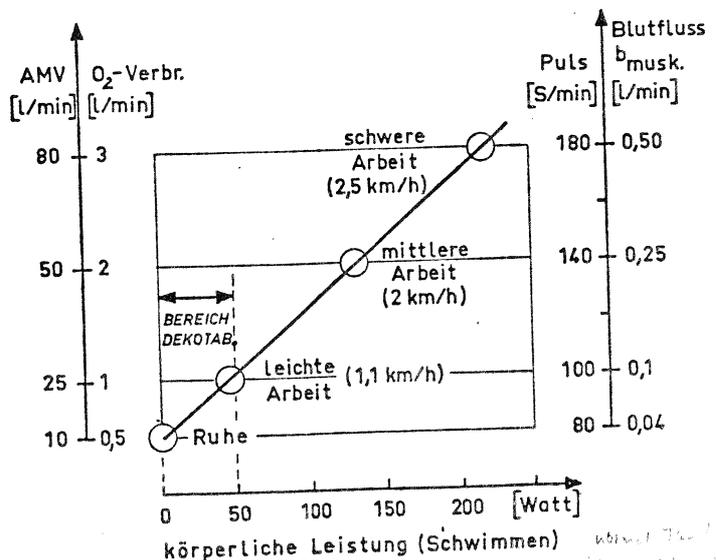
Kreislaufwerte.
Beachte: ZNS kaum abhängig von körperl. Aktivität

Organ	Gewicht [kg]	Durchblutung [L/min/kg]	
		Ruhe	Arbeit (175 W)
Gehirn, Rückenmark	1,7	0,50	0,50
Skelettmuskulatur	30	0,04	0,40
Haut, Fettgewebe	12	0,04	0,10
Gelenke, Knochen	14	0,03	0,06

75 kg schwerer Mensch

Abb. 4.2 b

Abhängigkeit der Muskulaturdurchblutung von körperl. Aktivität



Wir erkennen, daß z.B. für die Skelettmuskulatur, die den größten Gewichtsanteil unseres Körpers einnimmt, die Durchblutung vom Ruhezustand bis zur Arbeitsleistung von 175 W um den

*Regel
In Ruhe 100 ml/min, mit Anstrengung 1000 ml/min -> 10-fache Zunahme
... mit der Verdopplung der Leistung ...*

10-fachen Wert steigt, wobei das noch keinesfalls der physisch mögliche Grenzwert ist.

In der Physiologie werden die Begriffe Ruhe, leichte, mittlere und schwere Arbeit an Hand des O₂-Verbrauchs definiert. Die Größen AMV (Atemminutenvolumen), Pulsfrequenz und Blutflußrate sind entsprechend zugeordnet (Abb.4.2 b)

Es ist somit kein gangbarer Weg alle Körpergewebe mit eigenen, dazu noch von mehreren Parametern abhängigen Gewebekonstanten identifizieren zu wollen.

Der Ausweg aus dieser Schwierigkeit wurde, wie im Kapitel 1 erwähnt, schon von HALDANE formuliert als er den Begriff der theoretischen Gewebe, die sog. Kompartimente, einführte. Anstelle einer Unzahl von realen Körpergeweben beschränkte sich HALDANE auf 5 theoretische Gewebe, die das Gesamtverhalten des Körpers hinsichtlich Sättigung und Entsättigung repräsentieren.

Im Laufe der Dekompressionsforschung ergab sich, daß diese Anzahl zur hinreichend brauchbaren Beschreibung für die Sättigungscharakteristik des menschlichen Körpers nicht ausreicht. Beim ZH-L12 System sind mittlerweile 16 Kompartimente definiert.

Die HS-Zeiten reichen dabei von 4 min bis zu 635 min für N₂, wobei diese bis zu einem gewissen Grade dem Verhalten der wirklichen Gewebe entsprechen, wie es in Abb.4.5 dargestellt ist.

Durch die Einführung der Kompartimente werden die physiologischen Eigenschaften wie Löslichkeitskoeff., Grad der Kapillarisation, Durchblutungsrate, Temperaturverhalten, Diffusionsverhalten zwischen den Geweben etc. pauschal ausgedrückt durch die HS-Zeiten.

An Hand der 16 verschiedenen Kompartimente ergeben sich jetzt 16 Gleichungen, die den Sättigungsverlauf des Gesamtkörpers bestimmen (Abb.4.3).

Jede Gleichung enthält drei beschreibende Terme:

1. den Ausgangssättigungsdruck P_{G0}
2. die Sättigungszunahme während der Isopression ($P_{IN2} > P_{G0}$) bzw. Sättigungsabnahme während der Dekostufen ($P_{IN2} < P_{G0}$)
3. die durch Ab- und Auftauchen bedingte geschwindigkeitsabhängige Kompression und Dekompression.

Die Größe v_{IN2} ist dabei die Änderung des insp. Gasdrucks mit der Zeit, die aus der Geschwindigkeit beim Ab- und Aufstieg resultiert.

Mit Hilfe dieses Systems von 16 Gleichungen läßt sich die Sättigung jedes Tauchprofils sehr einfach erfassen. Der Sätti=

ANGEHANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	ZH-L12 GRUNDLAGEN
------------------------	---------------	-------------------

gungsverlauf P_G ist lediglich eine Funktion des insp. Gasdrucks und der Expositionszeit.

Abb. 4.3

Die zur Berechnung verwendete Gleichung.

Die Sättigung - Entsättigungsgleichung

$P_{G_i} = P_{G_{oi}} + (P_{IN_2} - P_{G_{oi}})(1 - e^{-k_i t}) + v_{IN_2} \left(t - \frac{1}{k_i} (1 - e^{-k_i t}) \right)$	Ausgangs = sättigungsdruck Isopression - Dekompress.stufe geschw.abh. Kompr. - Dekompr.
$k_i = \frac{\ln 2}{t_{1/2_i}}, \quad i = 1-16, \quad v_{IN_2} = \frac{dP_{IN_2}}{dt}$ <p style="text-align: center; margin-left: 50px;"><small>Kompartimente</small></p>	

$P_G = f(P_{IN_2}, t)$

- └ Expositionszeit
 - Grundzeit
 - Zeit für Ab- Aufstieg
 - Aufenthaltsdauer im Tauchgebiet
 - Oberflächenpause bei Wiederholtg.
 - Dekompressionszeit
- └ insp. Gasdruck
 - = $(P_B + T \cdot g / 10 - 0.063) \cdot 0.79$
 - Barometerdruck
 - Bergseetauchen
 - Fliegen nach Tauchen
 - Tauchtiefe (gelotet) } Druckmessung
 - Dichte des Wassers }
 - Gasgemisch

Alle praktischen Anforderungen, wie Aufenthalt auf einer konstanten Tiefe, Ab- und Aufstiege, Aufenthaltsdauer im Tauchgebiet bei Bergseetauchen, sowie Oberflächenpausen bei Wiederholungstauchgängen sind berücksichtigt.

Da der Barometerdruck in den insp. Gasdruck eingeht, ist das Problem Bergseetauchen, Fliegen nach Tauchen sowie jede andere Druckschwankung genau kalkulierbar.

Zu Punkt 2

Durch die Einführung der Kompartimente sind wir aber nur einen Schritt weitergekommen, ein Dekompressionsprofil selber können wir immer noch nicht berechnen. Denn wir wissen nicht, welche Druckminderung, sprich Aufstiegshöhe, bei einem gegebenen Sättigungsdruck zulässig ist.

Die Grundlage hierzu, hat wie in Punkt 1, ebenfalls HALDANE geschaf=

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	ZH-L12 GRUNDLAGEN
------------------------	---------------	-------------------

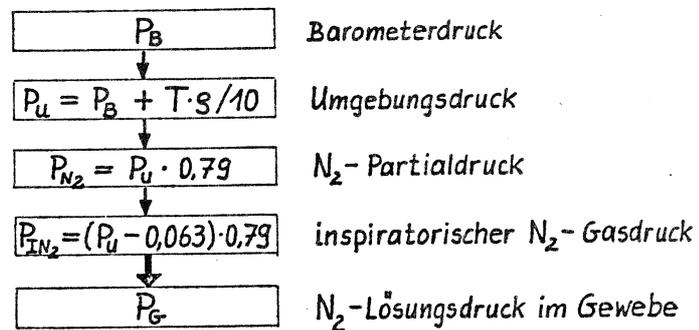
fen durch die Theorie der tolerierten Stickstoffübersättigung, d.h. der Körper erträgt einen bestimmten N₂-Ueberdruck in seinen Geweben, ohne daß es dabei sofort zu einer kritischen Bläschenbildung führt.

Ein treffendes Beispiel für diesen Lösungsüberdruck ist der Zustand der "ewigen" Nullzeit. Hierbei können wir ja "ewig" auf einer bestimmten Tiefe verweilen und anschließend sofort zur Oberfläche zurückkehren, ohne daß dabei Dekompressionserscheinungen erkennbar werden. Dazu folgende Betrachtungen:

Abb. 4.4

Die Begriffe des tolerierten Drucks

Der tolerierte Umgebungsdruck P_{tol}



$(1,7 - 0,063) \cdot 0,79 \Rightarrow$	Oberfläche ($P_B = 1 \text{ bar}, T = 0 \text{ m}$)	0,74 bar
	"ewige"- Nullzeit- Tiefe $T = 7 \text{ m}$	1,29 bar
	tolerierter Gewebeüberdruck	0,55 bar
	Tauchtiefe $T = 10 \text{ m}$ ($t \rightarrow \infty$)	1,53 bar
	tolerierter Gewebeüberdruck bei 10m	- 0,60 bar ?
	tolerierter insp. Gasdruck	0,93 bar
	tolerierter Umgebungsdruck:	
	$P_u = P_{tol} = P_{IN_2} / 0,79 + 0,063$	1,24 bar
	Barometerdruck	- 1,00 bar
	tolerierter Tiefe	$\cong 2,40 \text{ m}$

NEU

P_{tol} bestimmt Tiefe für Dekostops

An der Oberfläche ist der gesamte Körper mit dem herrschenden insp. Gasdruck von 0,74 bar mit N₂ gesättigt.

Nach dem ZH-L12 System liegt die "ewige" Nullzeit bei etwa 7 m Tiefe. Verweilen wir sehr lange auf dieser Tiefe, so nimmt der gesamte Körper den N₂-Sättigungsdruck von 1,29 bar an. Da wir aus dieser Tiefe ja sofort auftauchen können, toleriert der Körper also eine Lösungsüberdruck von $1,29 - 0,74 = 0,55 \text{ bar}$.

ANGEHANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	ZH-L12 GRUNDLAGEN
------------------------	---------------	-------------------

Der Begriff des tolerierten Gewebeüberdrucks ist für die Praxis der Dekompression unhandlich und man verwendet stattdessen den hieraus ableitbaren Begriff des tolerierten Umgebungsdrucks.

Dieser ergibt sich aus folgender Ueberlegung. Würden wir sehr lange auf 10 m Tiefe, z.B. in einer UW-Station, verweilen, so würde sich der Organismus bis zu 1,53 bar sättigen können. Mit diesem Lösungsdruck im Körper dürfen wir jetzt nicht mehr sofort bis zur Oberfläche aufsteigen, weil dabei der tolerierte Lösungsdruck überschritten würde. Wie später noch ersichtlich wird, beträgt dieser für den Aufenthalt bei 10 m Tiefe 0,6 bar. Die erlaubte Druckminderung beträgt somit $1,53 - 0,60 = 0,93$ bar.

D.h. wir dürfen aufsteigen bis zu einer Tiefe, bei der der insp. Gasdruck 0,93 bar beträgt. Durch Umrechnung findet man den dazu entsprechenden Umgebungsdruck von 1,24 bar, also 2,4 m Tiefe. Dieser, dem tolerierten insp. Gasdruck entsprechende Umgebungsdruck wird als tolerierter Umgebungsdruck bezeichnet.

Bei unserem Beispiel müssen wir also spätestens auf einer Tiefe von 2,4 m einen Dekostop einlegen, solange, bis eine nennenswerte Menge von N₂ abgebaut ist.

Der jeweilige tolerierte Umgebungsdruck bestimmt also die Tiefe für Dekostops.

Es ist nun mit ein Verdienst von Prof. BUEHLMANN, daß er eine einfache mathematische Beziehung für den tolerierten Umgebungsdruck P_{tol} nutzbar gemacht hat.

Diese Beziehung (Abb. 4.5) besagt, daß der tolerierte Umgebungsdruck vom bestehenden N₂-Lösungsdruck abhängt und, wie aus den Koeff. ersichtlich ist, mit zunehmender HS-Zeit immer größere Werte einnimmt, also immer größere Dekompressionstiefen verlangt.

Während die Kompartimente den Sättigungs- und Entsättigungsverlauf rechnerisch bestimmen, beinhaltet der tolerierte Umgebungsdruck das Kriterium der kritischen Bläschenbildung.

Die ZH-L12 Koeffizienten wurden rein empirisch ermittelt. Die Koeffizienten beinhalten als Voraussetzung zusätzlich einen Maximalwert für die Geschwindigkeit der Druckminderung. Für das Sporttauchen gilt dabei, daß ab Tiefen niedriger als 25 m die Aufstiegs geschwindigkeit von 10 m/min nicht überschritten werden darf.

Bei genauer Betrachtung kann nun insgesamt bei diesem Dekompressionsmodell der Eindruck entstehen, daß die vielschichtigen Abhängigkeiten des Organismus nur noch am Rande theoretisch begründet sind. Vereinfacht gesehen besteht ja eigentlich auch

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	ZH-L12 GRUNDLAGEN
------------------------	---------------	-------------------

das gesamte Dekompressionskonzept nur aus der Definition von HS-zeiten für Gewebe, dessen Feinstruktur offenbar ignoriert wird, wobei lediglich gefragt wird, welche Druckentlastung die Gewebe tolerieren, ohne daß es dabei zu einer Dekompressionskrankheit führt.

Es bleibt jedoch zu würdigen, daß auch der lebende Organismus prinzipiell der physikalischen Gesetzmäßigkeit der Diffusion unterliegt, die ja immerhin durch 16 repräsentierende HS-Zeiten im Dekompressionssystem berücksichtigt wird und für die jeweils durch ein Koeffizientenpaar die Kontrolle der erlaubten Uebersättigung besteht.

Abb. 4.5

Die ZH-L12 Koeff. und die Beziehung vom tolerierten Umgebungsdruck

DIE ZH-L12 KOEFF.(a,b)

$$P_{tol} = (P_G - a) \cdot b \quad (\text{bar})$$

P_{tol} = tolerierter Umgebungsdruck

P_G = N_2 -Lösungsdruck

Gewebe	Komp. Nr.	$t_{1/2}$ (min)	Koeff. a (bar)	Koeff. b
Gehirn, Rückenmark	1	4,00	1,89...	0,82...
	2	7,94	1,46	0,82
	3	12,2	1,05	0,83
	4	18,5	0,88	0,84
	5	26,5	0,69	0,86
Haut, Muskulatur	6	37	0,54	0,88
	7	53	0,43	0,89
	8	79	0,40	0,92
	9	114	0,41	0,90
Innenohr	10	146	0,43	0,94
	11	185	0,43	0,95
	12	238	0,37	0,95
	13	304	0,25	0,97
Gelenke, Knochen	14	397	"	"
	15	503	"	"
	16	635	"	"

*H. Max Hahn STAND 03.85
aufgrund Versuchs erweitert in die letzten zwei
auch in die letzten angegeben*

Viele hundert Versuche wurden durchgeführt, um die ZH-L12 Koeffizienten zu ermitteln. Sie bieten nach heutiger Sicht eine risikoarme Dekompression. Aber es handelt sich dabei nur um eine statistische Sicherheit, eine Garantie für den individuellen Fall kann nicht gegeben werden. Dieser Fragenkreis wird im Kapitel 6 noch aufgegriffen.

Mit Hilfe der BUEHLMANNschen Beziehung vom tolerierten Umgebungsdruck und dem Formalismus der Sättigungs-Entsättigungsgleichung ist es nunmehr ohne Schwierigkeiten möglich jedwedes Dekompres-

ANGEHANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	ZH-L12 GRUNDLAGEN
------------------------	---------------	-------------------

sionsprofil zu berechnen, wie an Hand von Abb. 4.6 gezeigt ist.

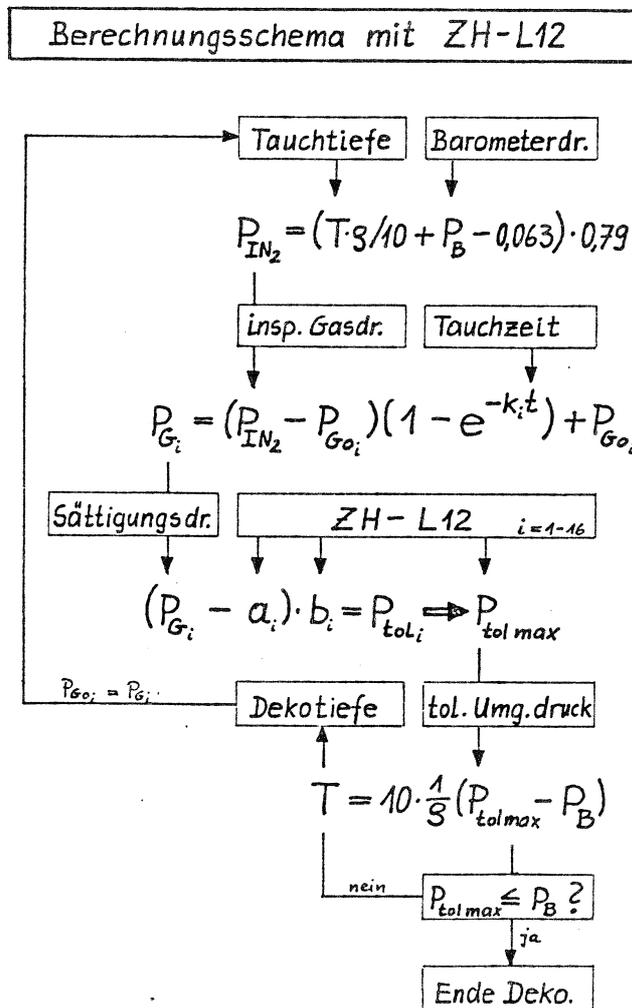
Tauchtiefe und Barometerdruck bestimmen den insp. Gasdruck. Insp. Gasdruck und Tauchzeit ergeben den Sättigungsdruck für die einzelnen Kompartimente $i=1-16$.

Mit Hilfe der ZH-L12 Koeffizienten a, b läßt sich für die Sättigungsdrücke P_{Gi} der tolerierte Umgebungsdruck der einzelnen Kompartimente nach der BUEHLMANNschen Beziehung ermitteln.

Entscheidend ist jetzt dasjenige Kompartiment, welches den höchsten tolerierten Umgebungsdruck erfordert, also die größte Dekotiefe verlangt.

Abb. 4.6

Das Schema zur Berechnung von Dekoprofilen



Ist dieses P_{tolmax} kleiner als der Barometerdruck P_B , dann können wir innerhalb der erlaubten Aufstiegs geschwindigkeit sofort austauchen. Wir befinden uns noch innerhalb der Nullzeit.

Andernfalls müssen wir solange auf der durch P_{tolmax} bestimmten Dekotiefe verweilen, bis durch die nunmehr abklingende Sätti=

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	ZH-L12 GRUNDLAGEN
------------------------	---------------	-------------------

gungsfunktion ($P_{IN2} < P_{G0}$) der tolerierte Umgebungsdruck der
nächst höheren Dekostufe erreicht ist.

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	ZH-L12 BERECHNUNGEN
------------------------	---------------	---------------------

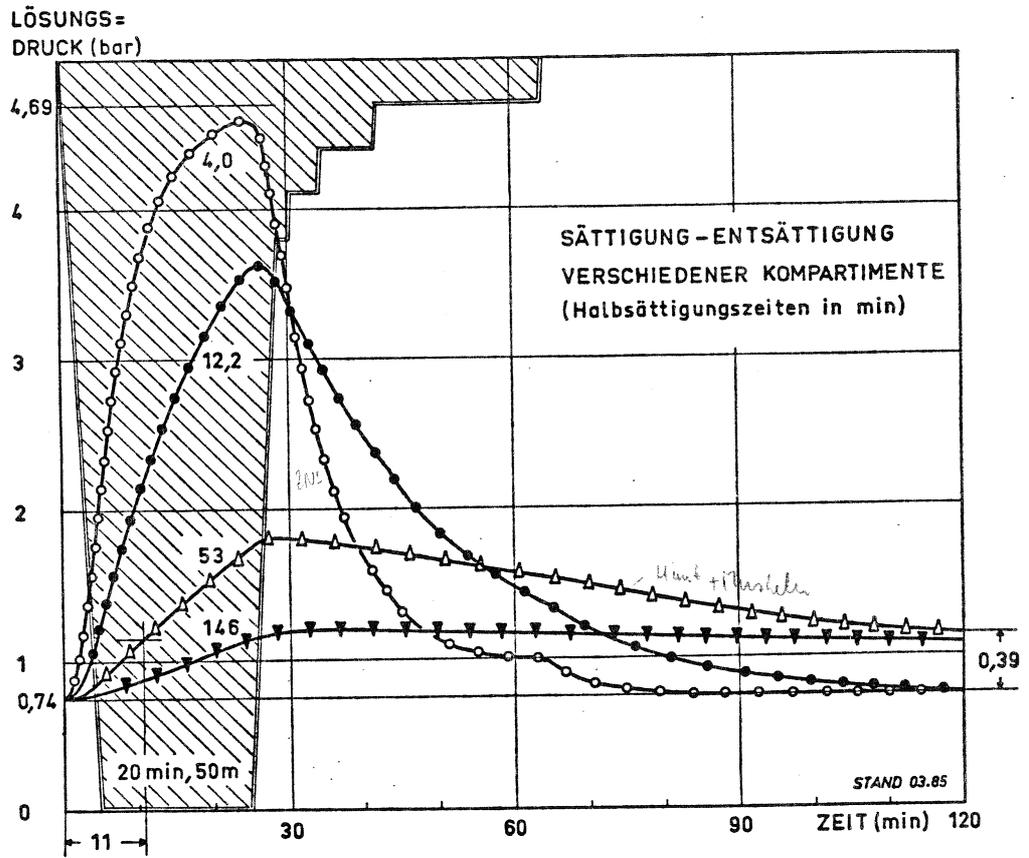
5. BERECHNUNGEN VON DEKOMPRESSIONSPROFILIEN NACH ZH-L12

Im folgenden Diagramm ist für 4 Kompartimente der Sättigungs-Entsättigungsverlauf bei einem konkreten Tauchgang dargestellt.

Der Druck im Tauchgebiet betrage 1 bar und alle Gewebe seien mit dem insp.Gasdruck von 0,74 bar als Ausgangswert gesättigt.

Abb.5.1 Sättigungsverlauf 4 verschiedener Kompartimente

3
7
#10



Wir tauchen ab mit einer Geschwindigkeit von 10 m/min, verweilen für 20 min auf 50 m Tiefe und steigen dann wieder mit 10 m/min auf.

Man erkennt, daß das Kompartiment mit der kurzen HS-Zeit von 4 min sich quasi schritthaltend mit der Änderung des Umgebungsdrucks sättigt und auch entsättigt.

Der insp.Gasdruck in 50 m Tiefe beträgt 4,69 bar. Es ist ersichtlich, daß sich dieses Gewebe am Ende der Grundzeit fast vollständig dem insp.Gasdruck angepasst hat. So schnell, wie es sich aufgeladen hat, entlädt es auch wieder den Stickstoff und kurz nach Ende des Tauchgangs hat es wieder den Ausgangslösungsdruck

von 0,74 bar erreicht.

Das Kompartiment mit 12,2 min HS-Zeit weicht nun schon deutlich von dem "Idealverhalten" des 4 min Gewebes ab. Es ist am Ende des Tauchgangs noch weit vom maximalen Lösungsdruck von 4,69 bar entfernt und benötigt schon 1 Stunde Oberflächenpause, bis es den Ausgangswert wieder erreicht hat.

Beim Kompartiment mit 53 min HS-Zeit ist nach 1 Stunde Oberflächenpause noch der erhebliche Lösungsüberdruck von 0,39 bar vorhanden. Erst nach weiteren 5 Stunden wird der Ausgangswert erreicht.

Beim Kompartiment mit 146 min HS-Zeit erkennt man innerhalb des hier betrachteten Zeitraums von 2 Stunden quasi nur einen Anstieg der Sättigung bis zum Ende der 1. Dekostufe. Sodann bleibt der Lösungsdruck nahezu konstant. Erst nach 10 Stunden Oberflächenpause nähert er sich wieder dem Ausgangswert von 0,74 bar.

Bei Kompartimenten mit noch höheren HS-Zeiten ist der Anstieg der Sättigung während des Tauchgangs zwar noch langsamer, aber dafür wird die Abklingzeit außerordentlich lang. Bei dem 635 min Kompartiment (in Abb. 5.1 nicht eingetragen) überschreitet die Abklingzeit bereits einen vollen Tag.

Es ist nun klar, daß die Gewebe mit mittleren und langen HS-Zeiten das Dekompressionsprofil eines Wiederholungstauchgangs gravierend beeinflussen können. Auf Grund der langen Entsättigungszeit dieser Gewebe beginnen wir sozusagen "vorbelastet" den Wiederholungstauchgang.

Würden wir in unserem Fall nach 1 Stunde Oberflächenpause einen Wiederholungstauchgang durchführen, so besitzt das 53-min Gewebe als Beispiel noch einen Ueberschuß von 0,39 bar. Dieser Wert entspricht für dieses Gewebe den ersten 11 min des vorausgegangen 50 m Tauchgangs. Das bedeutet für den Wiederholungstauchgang, daß wir vor dem eigentlichen Abtauchen schon einen 11 min Abstieg auf 50 m durchgeführt haben.

Diese Betrachtungen schlagen sich bekanntermaßen bei der Benutzung der Dekotabellen nieder als Wiederholungsgruppe mit entsprechendem Zeitzuschlag.

An Hand des Sättigungsverlaufs aller Kompartimente, der Uebersichtlichkeit halber sind in Abb. 5.1 nur vier dargestellt, ergibt sich nach der BUEHLMANNschen Beziehung (Abb. 4.6) der Verlauf des maximal tolerierten Umgebungsdrucks P_{tolmax} . Dabei bestimmen zu verschiedenen Zeiten des Tauchgangs unterschiedliche Kompartimente den Wert von P_{tolmax} .

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	ZH-L12 BERECHNUNGEN
------------------------	---------------	---------------------

Abb.5.2 Ptolmax Berechnungsbeispiel zum Zeitpunkt 30 min
Tauchzeit nach Abb.5.1

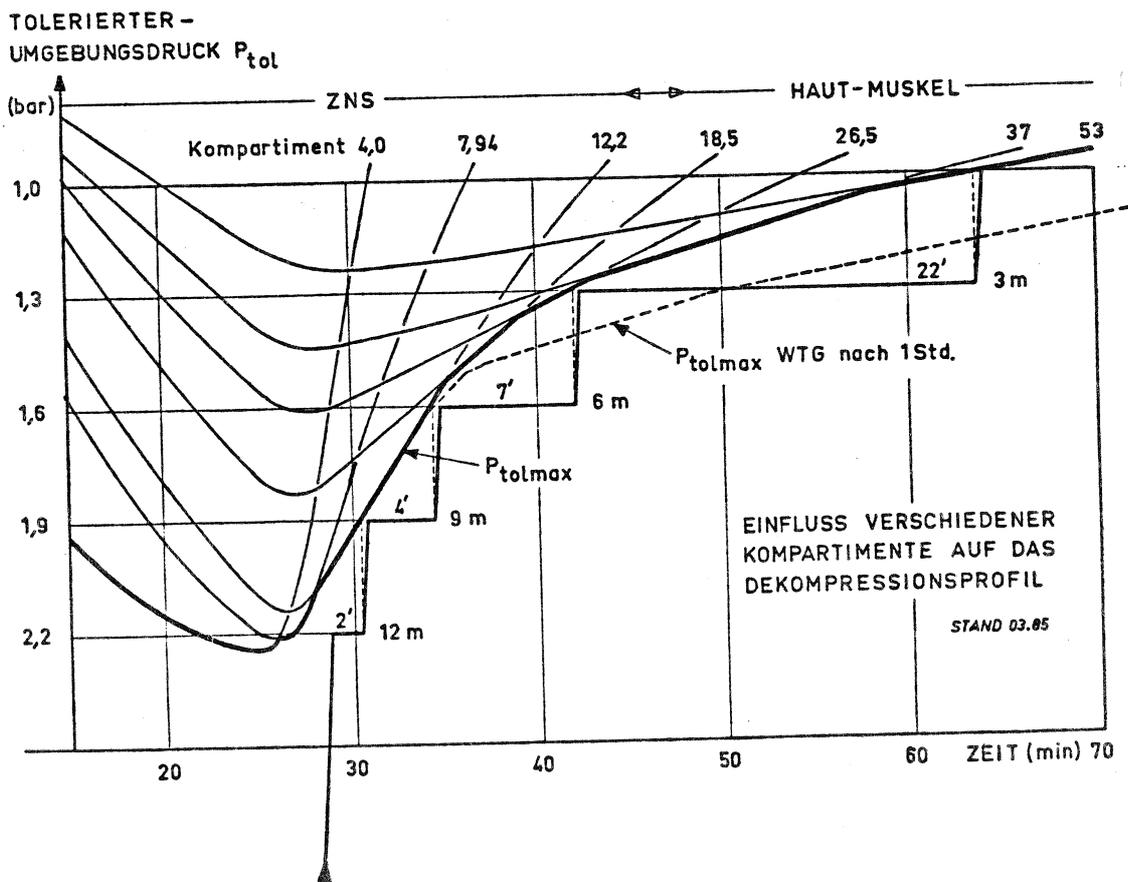
t1/2 (min)	a (bar)	b	Pg (bar)	Ptol=(Pg-a)*b (bar)
4,00	1,89	0,82	3,44	1,28
12,20	1,05	0,83	3,38	1,93
53,00	0,43	0,89	1,81	1,23
146,00	0,43	0,94	1,18	0,71

<-- Ptolmax

d.h. beim Zeitpunkt 30 min des 50 m Tauchgangs bestimmt das 12,2 min Kompartiment die Dekotiefe. (Dieses Ergebnis ändert sich nicht, wenn auch alle anderen Kompartimente berücksichtigt werden). Ptol=1,93 bar entspricht 9,30 m Tiefe, aufgerundet 12 m.

Im Diagramm Abb.5.3 ist der tolerierte Umgebungsdruck in Form einer Feinanalyse im Bereich der Dekompressionsstufen dargestellt.

Abb.5.3 Verlauf von Ptol im Bereich der Dekostufen.



Berücksichtigt ist der Verlauf der Kompartimente von 4 min bis 53 min HS-Zeit. Alle anderen Kompartimente spielen beim Dekompressionsprofil dieses Tauchgangs keine Rolle.

Ausklammern können wir auch noch das 4'-Kompartiment. Denn der erste Dekostop wird bestimmt durch das 12,2'-Gewebe. Der Verlauf von Ptol reicht hierbei bis in die 6 m Dekozone.

Hier erfolgt dann der Uebergang zum Einfluß des 18,5'-Kompartiments. Zu Beginn der 3 m Dekostufe wird die Dekompression dann bestimmt von der Abklingzeit des 26,5'-Gewebes, sodann vom 37'-Gewebe und schließlich vom 53'-Gewebe.

Das Dekompressionsprofil ist jetzt genau der Verlauf dieser Einhüllenden Funktion aller beteiligten Kompartimente. Diese Funktion stellt den maximal tolerierten Umgebungsdruck Ptolmax dar.

Unter Berücksichtigung der Aufstiegs geschwindigkeit von 10 m/min, um eine vorzeitige N₂-Bläschenbildung durch Ueberschreiten der Lösungsfähigkeit der Gewebe zu vermeiden, könnte man genau entsprechend des Verlaufs von Ptolmax dekomprimieren.

Im amerikanischen Sprachgebrauch nennt man einen solchen Austauschvorgang "ceiling", zu deutsch etwa Höchstgrenzenverhalten. Durch ceiling kann die Dekompressionszeit geringfügig abgekürzt werden, in unserem Beispiel etwa 4 min.

Dieser kontinuierliche Aufstieg ist in der Praxis nicht immer realisierbar und bedeutet ein Risiko z.B. bei geringen Tiefen und einer Rauwassersituation. Man kann, wenn es eine solche Situation erfordert auch bei 4 oder 5 m dekomprimieren. Das setzt, genauso wie für ceiling-Verhalten, einen Dekompressionscomputer voraus, der die dabei entstehenden verkürzten bzw. verlängerten Austauschzeiten vor Ort berechnet.

In der Praxis hatsich jedoch das Einhalten von Dekostufen in Abständen von 3 m bewährt. Bei Bergseetauchen kommt man dem ceiling etwas näher und dekomprimiert ab 6 m Tiefe in 2 m Abständen.

An Hand dieses, durch verschiedene Kompartimente gesteuerten Entsättigungsvorgangs, lassen sich zwei Aspekte hervorheben:

1. Unter Berücksichtigung mathematischer Methoden ist der Funktionsverlauf von Ptolmax zwar stetig, aber nicht mehr differenzierbar ("eckiger Verlauf").

Für das Auftauchen heißt das: es gibt keine sinnvolle Näherungsformel für die Dekompression. Jeder Versuch, eine Näherungsbeziehung aufstellen zu wollen, ist "verboten".

Daraus resultiert auch das seit Jahren gepredigte Interpolationsverbot bei der Benutzung der Dekotabellen. Jedes Tauchprofil hat ein eigenes Dekompressionsprofil.

Die gestrichelte Linie in Abb.5.3 stellt den Verlauf für einen Wiederholungstauchgang (s. Abb.5.5) dar. In diesem Fall gilt, daß die tieferen Dekompressionszonen überhaupt nicht betroffen sind, jedoch die niedrigeren Zonen gravierend.

2. Allgemein gesehen ist festzuhalten, daß beim Aufstieg die schnellen Kompartimente auch als erste hinreichend schnell entsättigt sind.

Die schnellen Kompartimente sind dem ZNS zugeordnet. Es gibt keine exakten Ergebnisse, welche maximale HS-Zeit für ZNS-Gewebe zutrifft; Experimente in Dekompressionskammern am lebenden Menschen verbieten sich für diese Gewebebereiche von selber. Nach den heutigen Erfahrungen dürften jedoch HS-Zeiten von ca. 15 - 20 min für ZNS-Gewebe signifikant sein.

Die Sättigungs-Entsättigungs-Charakteristik des ZNS-Gewebes ist zwar als schnell zu betrachten, aber es besteht der Nachteil der erheblichen Lösungsmenge von N₂ pro Volumeneinheit. Gewebesubstanzen des Gehirns lösen ca. 5 mal soviel N₂ wie wässrige Gewebe, was im Falle einer schlagartigen oder ungenügenden Dekompression schwere gesundheitliche Schädigungen hervorrufen wird.

Wenn also in der Praxis das Problem entstehen sollte, daß z.B. der Luftvorrat für eine vollständige Dekompression nicht ausreichend ist oder irgendein dringender Ausstieg bei einem Notfall erforderlich ist, so sollte so gut wie möglich versucht werden, die tiefen Dekompressionsstufen einzuhalten, denn diese werden beim Sporttauchen durch das Gewebe des Zentralnervensystems bestimmt. Eine Dekompressionskrankheit der Haut oder Muskulatur ist sicherlich leichter zu ertragen, als eine ungenügende Dekompression des Gehirns oder Rückenmarks.

Im Diagramm abb.5.4 ist der Verlauf von P_{tolmax} über ein gesamtes Tauchprofil dargestellt.

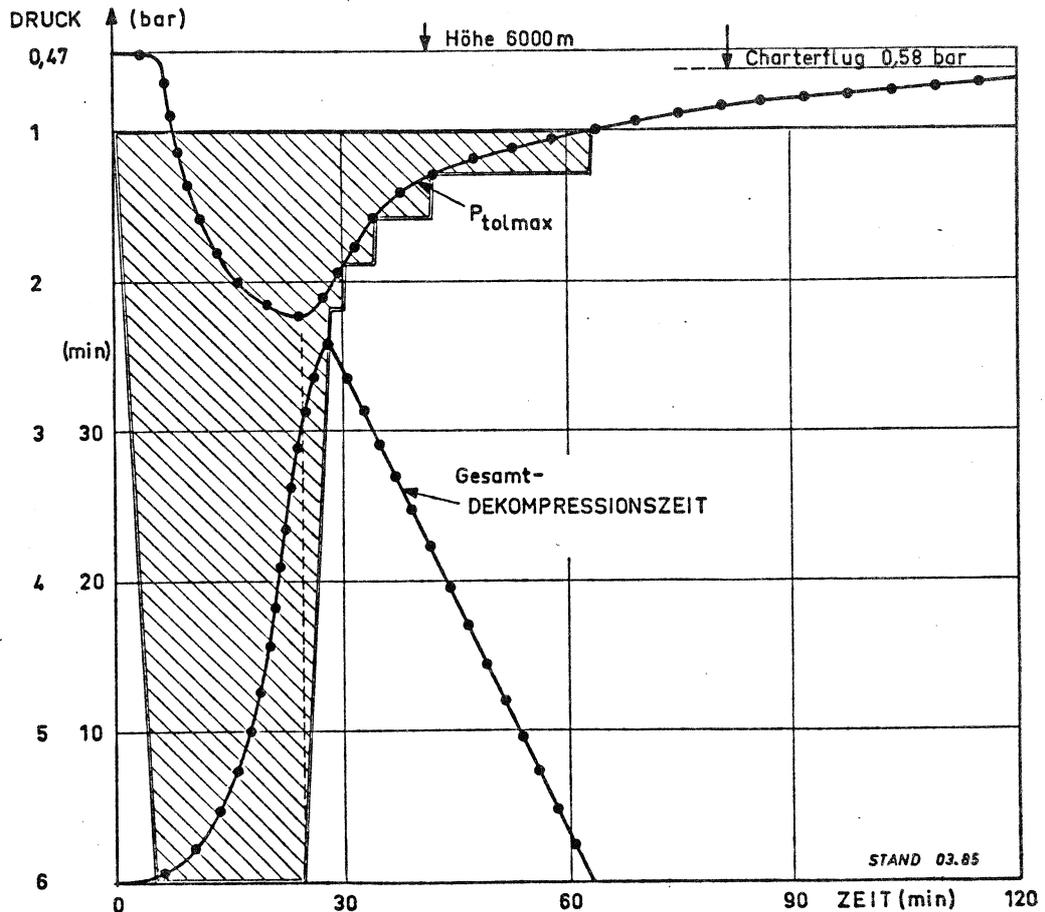
Von Normaldruck ausgehend können wir unseren Organismus bis auf 0,47 bar, entsprechend 6000 m Höhe, sofort Druckentlasten, wie es beim Fliegen ohne Druckkabine von Bedeutung ist. Fliegen ist sozusagen "negatives Tauchen".

Während des Tauchgangs ändert sich dann der tolerierte Umgebungsdruck fortwährend, weil ja die Sättigung bzw. Entsättigung in den Körpergeweben fortschreitet.

Nach Ende des ordnungsgemäß dekomprimierten Tauchgangs ist die Dekompression allerdings noch nicht vollständig abgeschlossen.

Man erkennt, daß nach dem Ausstiegs aus dem Wasser, P_{tolmax} nur gerade den Barometerdruck als niedrigsten Umgebungsdruck zuläßt.

Abb.5.4 Verlauf von P_{tolmax} und der Gesamtdekozeit.



Wenn nach dem Tauchgang ein Flug oder eine Passüberquerung o. dgl. geplant ist, muß solange gewartet werden, bis P_{tolmax} den zu erwartenden Luftdruck unterschreitet. Das ist insbesondere von Bedeutung bei einem anschließenden Flug mit einer Chartermaschine. Hier wird aus Energie- und Kostengründen der Kabinendruck an der unteren zulässigen Grenze gehalten. Im übrigen sind die "neuen" Dekotabellen hinsichtlich Kabinendruck auf 0,58 bar ausgelegt.

Der untere Kurvenverlauf in Abb.5.4 beschreibt die Gesamtdekozeit. Sie steigt erwartungsgemäß mit zunehmender Grundzeit immer steiler an, weil mit fortschreitender Zeit auch die langsamen Kompartimente sich immer stärker sättigen.

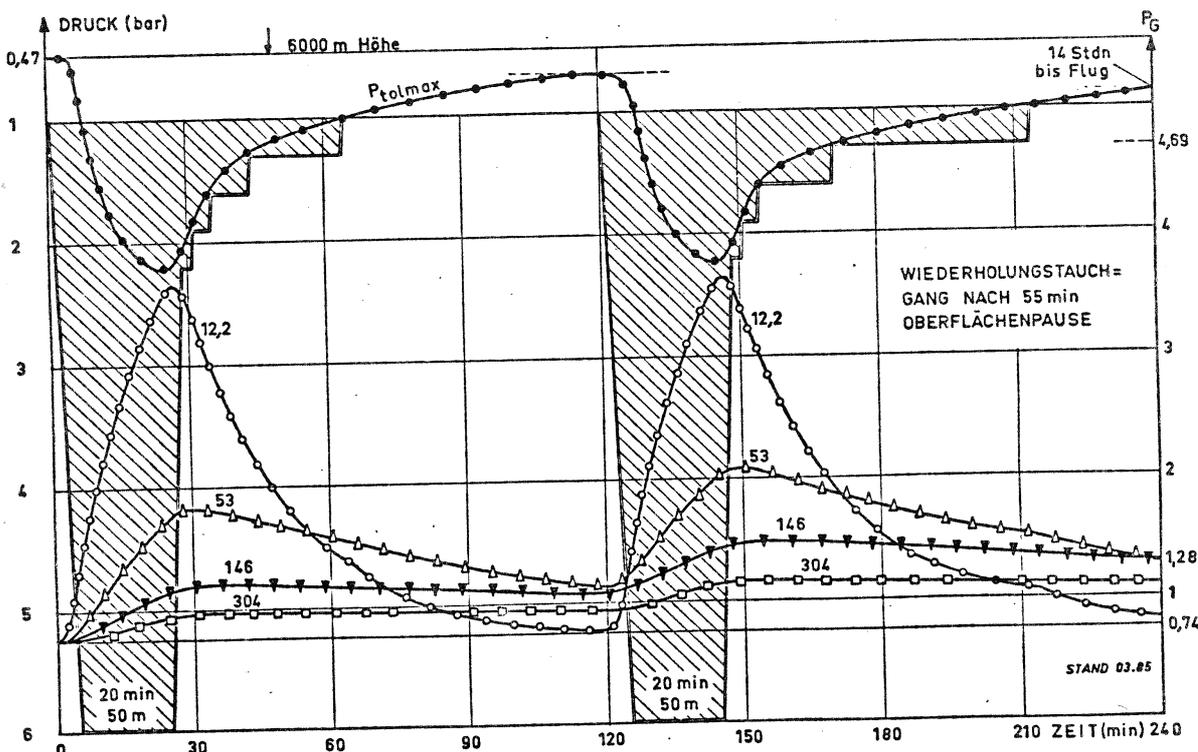
Wiederholungstauchgang (WTG)

Obwohl für die Praxis nicht zu empfehlen, wollen wir nach 55 min Oberflächenpause einen Wiederholungstauchgang mit gleichem

Tauchprofil durchführen.

Alle Kompartimente, die innerhalb der Oberflächenpause wieder auf den Ausgangswert, bezogen auf den herrschenden Barometerdruck, abgeklungen sind, haben für den WTG keinen Einfluß hinsichtlich veränderter Dekozzeit. Diese Kompartimente sind total entsättigt und beginnen die Sättigung von Neuem.

Abb.5.5 Verlauf von P_{tolmax} und einigen Komp. bei einem WTG.



Während beim Ersttauchgang alle Kompartimente bei 0,74 bar ihren Sättigungsprozeß beginnen, sind die "mittleren" und "langsamen" Kompartimente beim Antritt des WTG's noch mit N₂ vorbelastet, wie schon bei Abb.5.1 erwähnt. Sie starten bei entsprechend höheren Ausgangswerten.

Das 53'-Gewebe hat zu Beginn des WTG's den Lösungsdrucküberschuß von 0,39 bar und hat am Ende des WTG's unter Berücksichtigung der gleichen Zeitspanne von 2 Stunden den Ueberschußdruck von 1,28-0,74=0,54 bar. Am Ende des betrachteten Zeitintervalls wird es sogar vom 146'-Kompartiment "überholt". Auch tritt das 304'-Gewebe deutliche in Erscheinung.

Die Gesamtdauer der Dekompressionszeit wird bei diesem Tauchgangsprofil für beide Tauchgänge durch das 53'-Kompartiment bestimmt, also durch Haut- und Muskelgewebe. Der tolerierte

ANGEWANDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	ZH-L12 BERECHNUNGEN
------------------------	---------------	---------------------

Umgebungsdruck für das 146'-Kompartiment, entsprechend Innenohrgewebe, und auch für alle längeren HS-Zeiten wie beim 304'-Gewebe befindet sich noch unterhalb des Barometerdrucks von 1 bar.

Allerdings bestimmen jetzt diese längeren HS-Zeiten die Aufenthaltszeit für einen Flug u. dgl. entscheidend, wie am flachen Verlauf von P_{tolmax} beim WTG erkennbar wird.

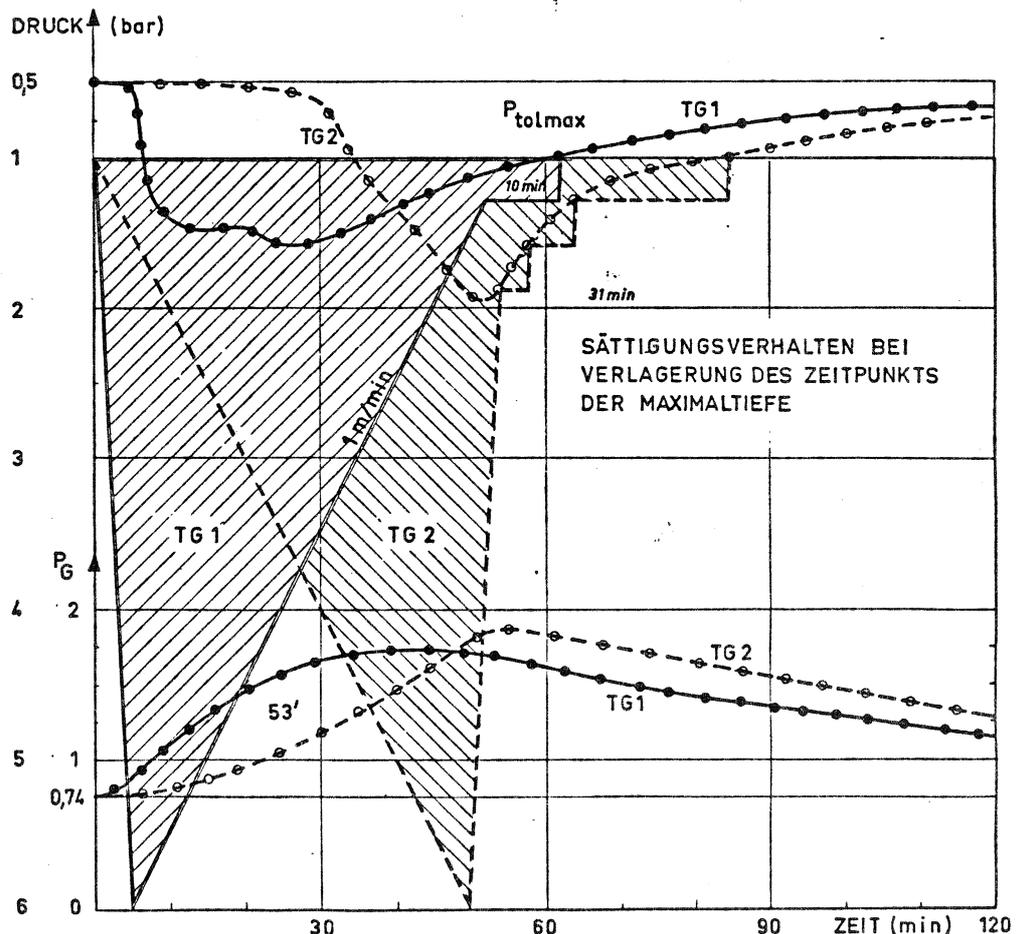
Ein Flug bei einem Kabinendruck von 0,6 bar ist hier erst nach einer Aufenthaltspause von 10 Stunden erlaubt, bei einem Kabinendruck von 0,56 bar erst nach 15 Stunden Aufenthalt.

Tief-Flach-Verhalten

Als nächstes soll uns die Frage beschäftigen: "Warum sollte zuerst der tiefe Teil und dann der flache Teil eines Tauchgangs durchgeführt werden"?

In Abb.5.6 sind zwei spiegelsymmetrische Tauchgänge hinsichtlich Ab- und Aufstiegs geschwindigkeit berechnet.

Abb.5.6 Einfluß der zeitlichen Verlagerung der Maximaltiefe



(Berechnet nach ursprünglichen Koeff.)

ANGEHÄNDTE TAUCHPHYSIK	DEKOMPRESSION	ZH-L12 BERECHNUNGEN
------------------------	---------------	---------------------

Bei TG1 tauchen wir mit 10 m/min auf 50 m ab und steigen direkt wieder auf mit 1 m/min, also äußerst langsam. Im TG2 verhalten wir uns genau umgekehrt. TG1 erfordert 10 min Dekozeit, TG2 dagegen 31 min.

Zunächst dürfte man eigentlich darüber verblüfft sein, denn wir unterliegen bei beiden TG's der gleichen totalen Druckbelastung.

Zur Erklärung dieser Tatsache läßt sich jedoch sagen, daß bei schnellem Abstieg die Kompartimente mit den langen HS-Zeiten die Druckbelastung sozusagen noch gar nicht mitbekommen haben, während bei langsamem Abstieg sich jedoch alle Gewebe mehr oder weniger schritthaltend sättigen können.

Ein langsamer Aufstieg bedeutet zwar für die langsamen Gewebe u.U. eine weitere Sättigungszunahme, aber die schnelleren Kompartimente werden schritthaltend entsättigt, so daß diese für die Dekozone nicht mehr bedeutsam sind. Für diese haben wir quasi einen Zeitvorsprung erzielt.

Ein schneller Aufstieg betrifft dagegen alle Gewebe und die Gesamtabklingzeit schlägt zu Buche. Dies ist deutlich sichtbar am unterschiedlichen Verlauf von P_{tolmax} .

Also, wer Dekozeit minimieren will, sollte bei der Durchführung eines Tauchgangs zuerst die tiefen und dann den flachen Teil absolvieren.

Bergseetauchen

Eine weitere Betrachtung gilt dem Bergseetauchen. Hierbei spielen zwei Effekte eine Rolle, die sich aber bei konsequenter Anwendung des ZH-L12 Berechnungsschemas wie von selber herauskristallisieren.

Im folgenden Beispiel starten wir bei Meeresniveau die Anfahrt zu einem 1300 m hoch gelegenen Bergsee, entsprechend einem Atmosphärendruck von 0,85 bar. Die Anfahrt betrage 60 min und die anschließende Aufenthaltszeit im Bergseegebiet weitere 60 min, bevor wir einen Tauchgang durchführen.

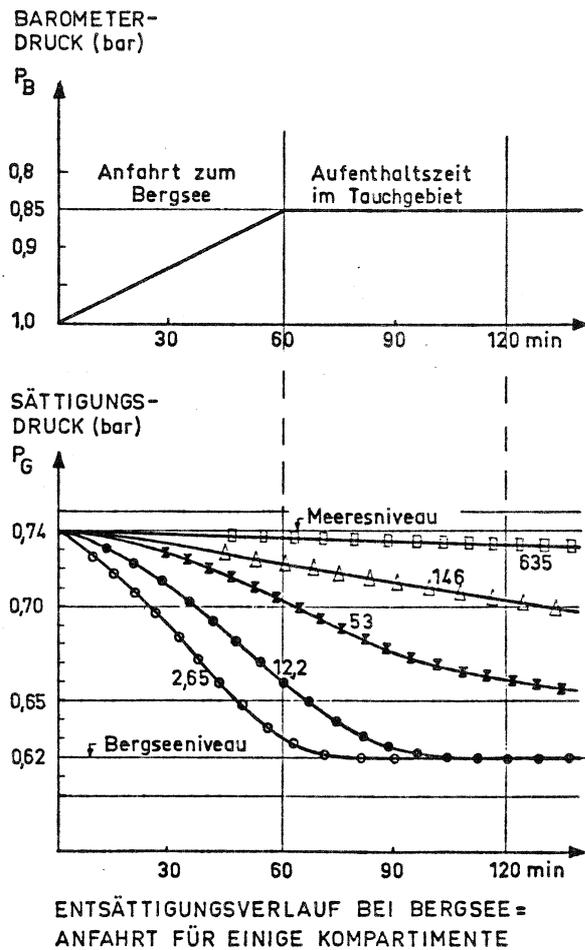
Dieses dabei entstehende Anfahrtprofil ist quasi als Tauchprofil zu interpretieren. Auf Bergseeebene bezogen könnten wir sagen, daß wir einen unendlichlangen Tauchgang auf 1,5 m Tiefe (0,85 bar) durchgeführt haben. Die Anfahrt zum Bergsee ist unsere Austauschphase und der Aufenthalt ist eine Oberflächenpause.

Auf Grund dieses sehr langen Aufenthalts in 1,5 m Tiefe sind alle Gewebe mit 0,74 bar, dem insp. Gasdruck bei Meeresniveau, total gesättigt. Wir dekomprimieren nun gegen den insp. Gasdruck von 0,62 bar in der Höhe ($P_{IN2} = (0,85 - 0,063) \times 0,79 = 0,62$).

Wir erkennen in Abb 5.7, daß sich die schnellen Gewebe schon während der Anfahrt dem Bergseeniveau angepaßt haben, während sehr langsame Gewebe wenig oder quasi garnicht auf die Druckentlastung reagiert haben.

Abb. 5.7

**Bergsee=
anfahrts=
profil.**



Im Prinzip besteht jetzt die gleiche Ausgangsposition wie beim Wiederholungstauchgang. Wir gehen mit unterschiedlichem Sättigungsgrad in den Tauchgang.

Der maximale Sättigungsunterschied ist hierbei aber sehr gering. Er schwankt zwischen den insp. Gasdrücken von 0,74 und 0,62 bar.

In Abb. 5.8 ist dieser Anfahrteinfluß berücksichtigt. Der Übersichtlichkeit halber ist wieder der 20 min, 50 m TG zugrunde gelegt.

Wir untersuchen jetzt den Unterschied im Dekompressionsverhalten bei einer Aufenthaltszeit von 1 Stunde und von 48 Stunden im Bergseegebiet.

Die Sättigung bis einschließlich des 53'-Kompartiments verhält

wird. Aber welcher Sporttaucher taucht schon in solchen Höhen?

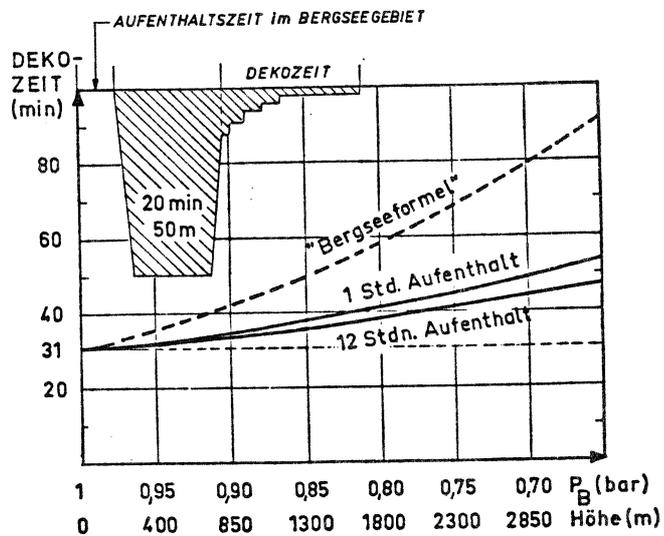
Der zweite Effekt, der beim Bergseetauchen mitspielt, ist die Dekompression zu einem niedrigerem Barometerdruck hin.

Es liegt im mathematischen Verlauf einer Exponentialfunktion, wie sie in der Sättigungsgleichung auftritt, begründet, daß diese Funktion anfangs steil und späterhin immer flacher verläuft. Physikalisch heißt das: je weniger N₂ im Gewebe gelöst ist, wie zu Beginn auf der Bergseehöhe, je schneller wird bei einer einsetzenden Druckdifferenz die Gasaufnahme erfolgen.

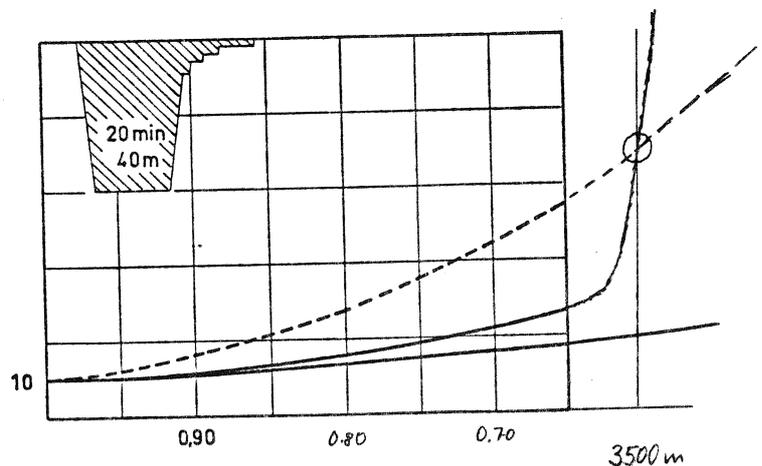
Umgekehrt wird sich an Hand des flachen Verlaufs der exp-Funktion im Bereich des niedrigeren Bergseedrucks der Stickstoff langsamer abbauen.

Abb. 5.9

Gesamt Dekozeit in Abh. von der Höhe



ABHÄNGIGKEIT DER DEKOZEIT VON DER HÖHE UND DER AUFENTHALTSZEIT VOR DEM TG.



Dieser Einfluß des Barometerdrucks auf die Gesamtdekompressionszeit ist in Abb.5.9 dargestellt. Wir beziehen uns wieder auf unseren 50 m Tauchgang. Zum Vergleich ist noch ein 20 min, 40 m TG angeführt. In beiden Diagrammen bezieht sich die gestrichelte Linie auf das Berechnungsergebnis der immer noch verwendeten "Bergseeformel", die ja mit der sog. fiktiven Tiefe operiert.

Man erkennt deutlich, daß die "Bergseeformel", dessen Erfinder unbekannt ist, zu stark überzogenen Dekozeiten führt. Sie fordert mehr als das dreifache an zusätzlicher Dekozeit gegenüber dem ZH-L12 System.

Unter Annahme einer 12-stündigen Aufenthaltszeit in der Höhe ergibt sich für einen 40 m TG in 3000 m Höhe anstatt ausreichender 8 min Dekozeitverlängerung (Abb.5.9 b) eine Dekozeitmehrerfordernis von 45 min bei der Bergseeformel.

Dies hat mit Tauchsicherheit nichts mehr zu tun. Hinzu kommt ein unerwarteter Effekt. Bei einem wenn auch außergewöhnlichen, aber möglichen Helikopter-Taucheinsatz, gestartet von Meeresniveau, gewinnt ab Höhen von 3500 m die kurze Aufenthaltszeit im Tauchgebiet so schlagartig an Bedeutung, daß die Bergseeformel für die Dekompressionserfordernisse bei weitem nicht mehr ausreicht. Hier spielt jetzt plötzlich der max. tol. Umgebungsdruck der Knochengewebe die dominante Rolle.

Angesichts dieser Erkenntnisse, wie sie mit Hilfe des ZH-L12 Systems offengelegt werden, sollte man die Bergseeformel rasch vergessen. Für die wenigen Fälle, wo Bergseetauchen von deutschen Tauchern betrieben wird, sind z.B. die Tabellenwerke von Prof. Bühlmann wesentlich besser geeignet.

Die "ewige" Nullzeit

Die "ewige" Nullzeit ergibt sich direkt aus der Beziehung für den tolerierten Umgebungsdruck unter Verwendung der Koeffizienten der längsten HS-Zeit,

$$(1) \quad P_{tol} = (P_G - a) * b \quad \text{mit } a = 0,25 \text{ und } b = 0,97$$

wobei die Frage gestellt wird: bei welchem Sättigungsdruck P_G kann man nach einem Sättigungstauchgang (also "ewig") direkt zur Oberfläche aufsteigen?

Oberfläche bedeutet: tolerierter Druck = Barometerdruck

$$(2) \quad P_{tol} = P_B$$

Ewig heißt: Lösungsdruck = insp. Gasdruck

$$(3) \quad P_G = P_{IN2}$$

Durch Einsetzen von (2), (3) in (1) ergibt sich:

$$(4) \quad P_B = (P_{IN2} - a) * b$$

Weiterhin gilt:

(5) $P_{IN2} = (P_U - 0,063) * 0,79$

(6) $P_U = P_B + T/10$

Durch Einsetzen von (5), (6) in (4) und Auflösung nach der Tiefe T folgt:

(7) $T_{EWIG} = 12,66 * (P_B/b - 0,74 + a)$

Bei vertretbarer Rundung ergibt sich die Faustformel:

$T_{EWIG} = 3 * P_B + 4 \text{ (m) (ewige Nullzeittiefe)}$

Beispiel: $P_B = 1 \text{ bar}, T_{EWIG} = 7 \text{ m}$

$P_B = 0,8 \text{ bar}, T_{EWIG} = 6,4 \text{ m}$

Der Dekompressionscomputer

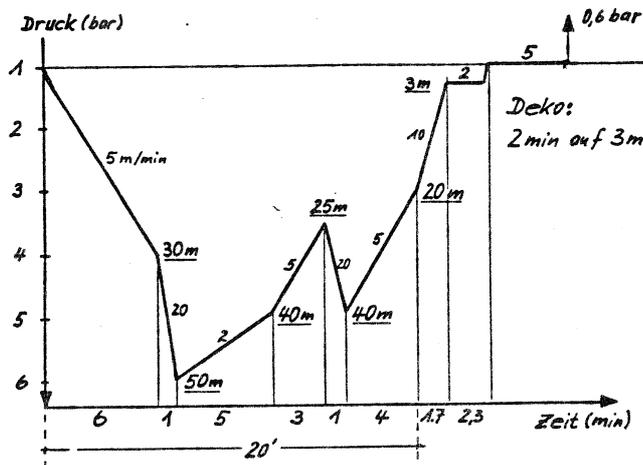
Aus der bisherigen Diskussion haben wir erkannt, daß sich mit Hilfe von ZH-L12 ohne Schwierigkeiten kontinuierliche Dekompressionsprofile berechnen lassen.

Dies eröffnet Möglichkeiten für die Konzeption und Herstellung von Dekompressionscomputern auf der Basis der Mikroelektronik.

In der Praxis haben wir es meist mit Tauchgängen der folgenden Art (Abb.5.10) zu tun:

Abb.5.10

Praxisnahes TG-Profil



Nach Tabelle wäre zu rechnen: 20min auf 51m

Dekozeiten:

12m	9m	6m	3m
2	4	5	15

Summe 26min.

Es handelt sich dabei z.B. um Tauchgänge, die sich einem strukturiertem UW-Gelände anpassen. Die Ermittlung der Dekozeit eines solchen Tauchgangprofils an Hand der normalen Tabellen bereitet Kopfzerbrechen. Bei Verwendung der Dekotabellen ist es unerlässlich, daß wir ein Rechteckprofil zu Grunde legen, weil wir im voraus nicht entscheiden können, welche Kompartimente das Dekompressionsgeschehen bestimmen.

Wir erhalten dabei übertrieben lange Austauschzeiten: anstatt ausreichender 2 min unnötige 26 min. Das ist nicht mehr ökonomisch. Ein kontinuierlich rechnender Dekompressionscomputer auf der Basis von ZH-L12 wäre von großem Nutzen. Die Vorteile liegen auf der Hand:

Abb. 5.10

ZH-L12 als Basis für
Dekompressionscomputer

- mehr Sicherheit bei der Dekompression, Ausschluss der "Daumenpeilerei"
- kontinuierliche Nullzeitanzeige
- Vermeidung von Ablesefehlern wie bei der Dekotabelle
- komplizierte Rechnungen bei Wiederholtg's entfallen
- realistische Dekozeitverkürzungen, dadurch weniger Luftverbrauch, weniger Frieren
- automatische Berücksichtigung von:
 - Bergseetauchen
 - Urlaubsdauertauchen
 - Fliegen nach Tauchen
- kann Tiefenmesser und Uhr ersetzen

Weiterster Dekocomputer nach ZH-L12:
DECO BRAIN II, Fa. Divetronic