

Dekompression und Dekompressionscomputer

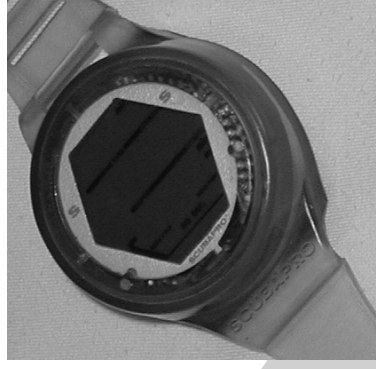
Theorie, Modelle und Praxis

Peter Rachow und Claudia Prutscher
bei Pro Dive, Cala Jóncols, Spanien

Juli 2002

© Peter Rachow & Claudia Prutscher, Karlsruhe, Germany

Wie arbeitet eigentlich ein Tauchcomputer?



- Was sind „Rechenmodelle“?
- Wie sind sie im Tauchcomputer umgesetzt?
- Welche Grenzen haben sie?

Dekompressionsmodelle



- Tauchcomputer verwenden sog. „Dekompressionsmodelle“, um Vorhersagen über den Dekompressionsverlauf treffen zu können.
- Sie versuchen, die komplizierten Vorgänge der Inertgaslösung im Körper durch mathematische Verfahren abzubilden und so ein sicheres Austauschen innerhalb gewisser statistischer Wahrscheinlichkeiten zu ermöglichen.
- Im Laufe der Entwicklung der Dekompressionsforschung haben sich verschiedene dieser *Dekompressionsmodelle* herausgebildet.

Typen von Dekompressionsmodellen

Die heute am häufigsten verwendeten Modelle sind:

- **Gewebemodelle**
 - Haldane, Bühlmann und andere
- **Blasenmodelle**
 - VPM (variable permeable membrane)
 - RGBM (reduced gradient bubble model)

Welche Überlegungen führen zum
Dekompressionsmodell nach Haldane,
Bühlmann et. al.?

Grundlegende Theorie der Gewebemodelle

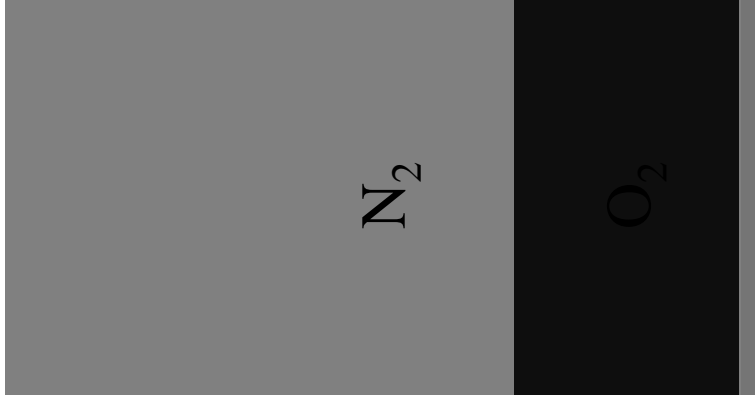
Physikalische und physiologische Grundlagen

- Taucher atmen unter Wasser unter einem erhöhten Umgebungsdruck.
- Die Bestandteile des Atemgases werden über den arteriellen Blutkreislauf zu den einzelnen Geweben des Körpers transportiert.
- Die Atemgasanteile werden in den Geweben (bzw. den Gewebsflüssigkeiten) gelöst.

Bestandteile der Luft

Luft besteht zu ca.

- 78% aus Stickstoff (N_2)
- 21% Sauerstoff (O_2)
- 0,03% Kohlendioxid (CO_2)
- 0,97% Edelgasen (Ar, Kr, He, Ne...)



Welche Wirkung haben die einzelnen Komponenten der Luft im Körper?

- Sauerstoff (O_2): Dient der Energieumwandlung im Körper, indem durch Oxidation („Verbrennung“) von Kohlenhydraten und anderen Stoffen Energieumwandlungen stattfinden (Stoffwechsel).
- Stickstoff (N_2): Nimmt **nicht** am Stoffwechsel teil.
- Kohlendioxid (CO_2): Nimmt ebenfalls **nicht** am Stoffwechsel teil, ist aber Produkt des Stoffwechsels.

Weil N_2 und CO_2 nicht an Reaktionen des Stoffwechsels teilnehmen, werden sie als inerte Gase bezeichnet.

Beim sog. *Trimix* (künstl. Mischgas) kommt als weiteres Inertgas Helium hinzu, dafür wird der Sauerstoff- und Stickstoffanteil vermindert.

Der Partialdruck (Teildruck)

Die Wirkung eines Atemgases hängt ab von:

- seinem Anteil am Gasgemisch.
- dem Druck, unter dem das Gemisch geatmet wird.

Beispiel: Befindet sich ein Taucher mit Pressluft auf einer Wassertiefe von 40 Metern, so atmet er unter einem Druck von 5 bar.

Der Stickstoff mit seinem Anteil von 78% an der Luft steht daher auf 40 m Wassertiefe unter einem **Partialdruck** von

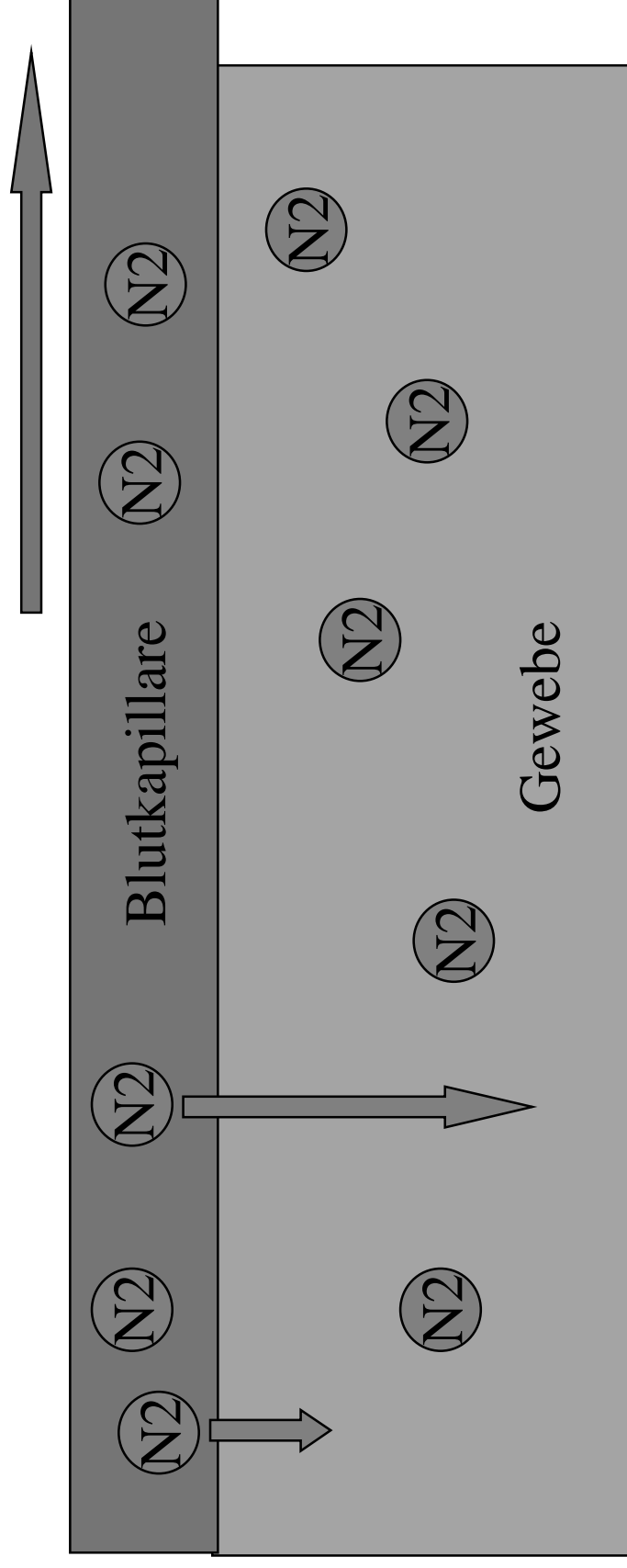
$$0,78 \times 5 \text{ bar} = 3,9 \text{ bar}$$

Partialdruck = Umgebungsdruck × Anteil des Gases

In Formelsprache: $p.p = p.amb \times f$

Die Löslichkeit von Inertgas(en) in den Körpergeweben

Inertgase werden von den Lungen aufgenommen und mit dem **Blutstrom** zu den einzelnen Körpergeweben transportiert, wo das Gas in der Gewebeflüssigkeit gelöst wird (Gesetz von Henry).



Wie viel Gas löst sich im Gewebe?

Die Menge gelösten Gases hängt ab von:

Partialdruck des Gases

Tauchzeit

Temperatur

Löslichkeit des Gases in fett- bzw.
wasserhaltigem Gewebe

Löslichkeit verschiedener Gase* in

Körporgeweeben

Fett Blut

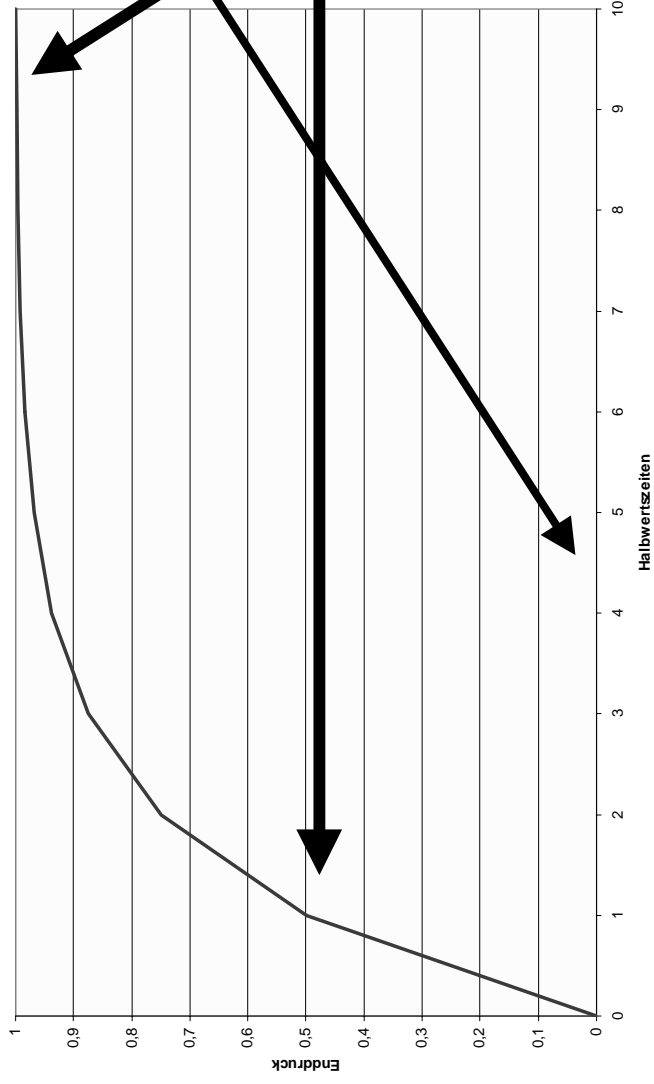
N ₂	66	12
O ₂	100	23
CO ₂	870	477

* Angaben jeweils in ml gelöstes Gas bei 37°C und 1 bar und 1 kg Gewebemasse

Verlauf der Lösungskurven

Die gelöste Gasmenge in einem Gewebe nimmt am Anfang der Zeit schnell zu. Diese Zunahme wird dann in der Folge rasch kleiner. Nach ca. 10 Zeitperioden bei gleichem Druck ist das Gewebe weitgehend gesättigt.

Nach jeder
Zeitperiode (z. B.
12 min.) halbiert
sich die Differenz
zwischen dem
gerade aktuellen
Gewebedruck
und dem **max.
möglichen
Gewebedruck.**



Halbwertszeiten der Körpergewebe

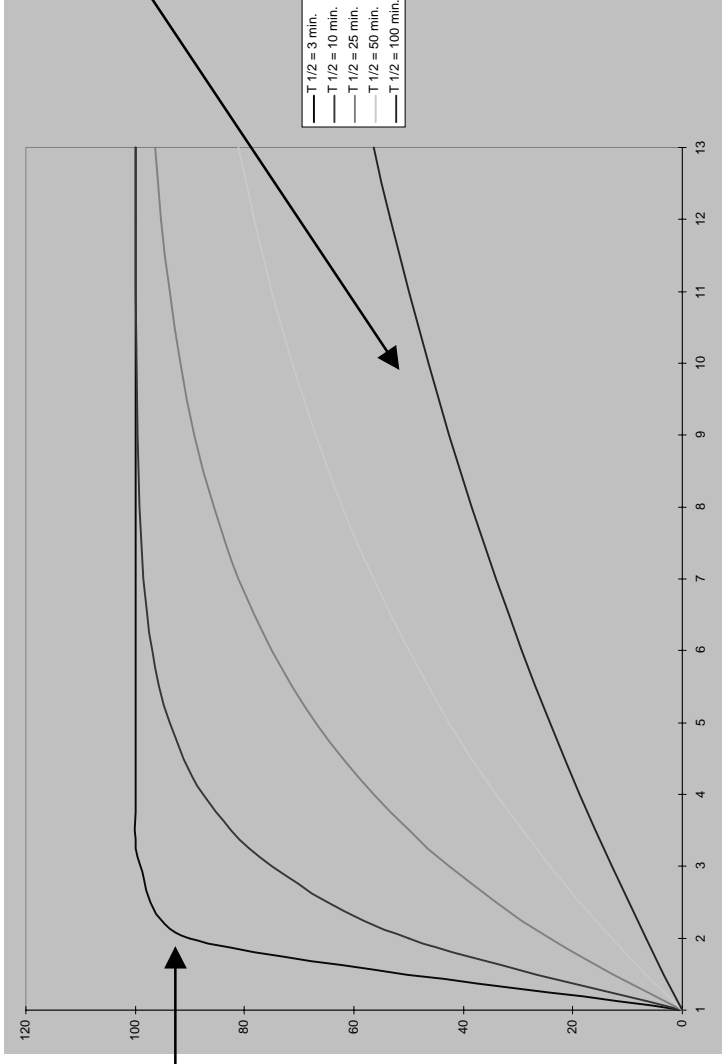
Verschiedene Gewebe nehmen ein bestimmtes Gas unterschiedlich schnell auf und geben es wieder ab \Leftrightarrow sie haben unterschiedliche **Sättigungshalbwertszeiten**.

- **Schnelle Gewebe:** Nerven, Gehirn, Rückenmark, Blut, Nieren ($T_{1/2}$ ca. 3 bis 15 min.)
- **Mittlere Gewebe:** Muskeln, Haut, Magen, Darm ($T_{1/2}$ ca. 20 bis 150 min.)
- **Langsame Gewebe:** Knochen, Knorpel, Fettgewebe ($T_{1/2} > 150$ min. bis 630 min.)
- Der Durchblutungsstatus eines Gewebes (Perfusionsrate) entscheidet seine Sättigungshalbwertszeit.
- Hohe Durchblutungsrate \rightarrow Kurze Halbwertszeit

Sättigungsverlauf verschiedener Gewebe

Während der Aufsättigungsphase ist in verschiedenen Geweben unterschiedlich viel Inertgas gelöst.

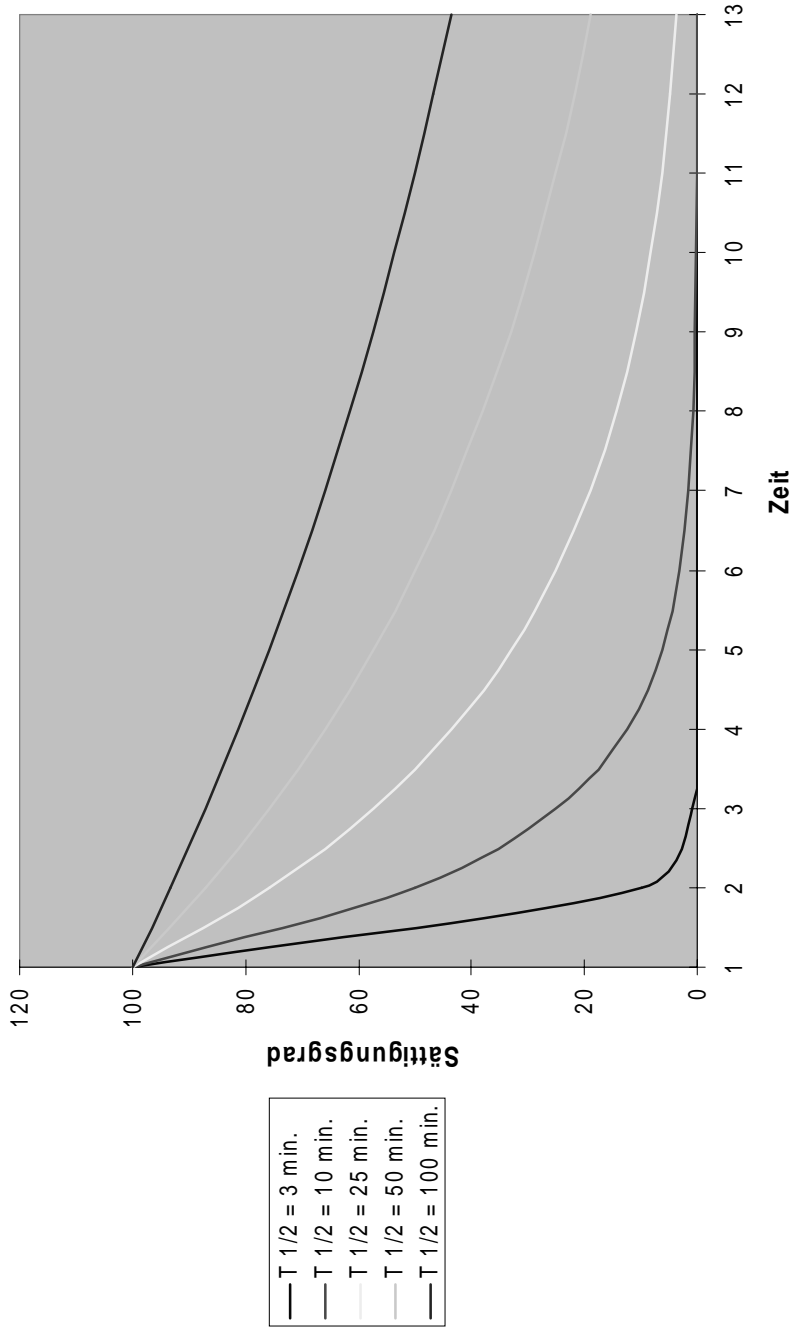
schnelles Gewebe
(z.B. Blut, Gehirn oder Rückenmark)



Entsättigung

Bei Verminderung des Umgebungsdruckes (Auftauchen) geben die Gewebe den gelösten Stickstoff wieder ab. Allerdings mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

Entsättigung verschieden schneller Gewebe



Demonstration von Inertgassättigung und -entsättigung mit der Software

Visual Decompression 2

- „Klassisches Tauchprofil“ (größte Tiefe am Anfang des TG) _Demo1.vdp
- Tauchprofil mit ständig wechselnden Tiefen („Jo-Jo“-TG) _Demo2.vdp
- Non-Limit-Tauchen mit 3 TG innerhalb 10 h _Demo3.vdp

Wie wirkt sich das unterschiedliche Sättigungsverhalten der einzelnen Gewebe beim Sporttauchen aus?

Schnelle Gewebe (Gehirn, Rückenmark, Nerven, Blut)

- Sättigen schneller auf
- Geben Stickstoff schnell wieder ab
- Sind besonders für **kurze tiefe** Tauchgänge relevant
- Haben beim Entsättigen höhere Toleranzen

Mittlere und langsame Gewebe (Muskeln, Haut, Knochen)

- Langsame Stickstoffaufnahme und -abgabe
- Besonders relevant bei **langen flachen Tauchgängen** und **häufigen Wiederholungstauchgängen** in kurzer Zeit (sog. „Non-limit-Tauchen“)

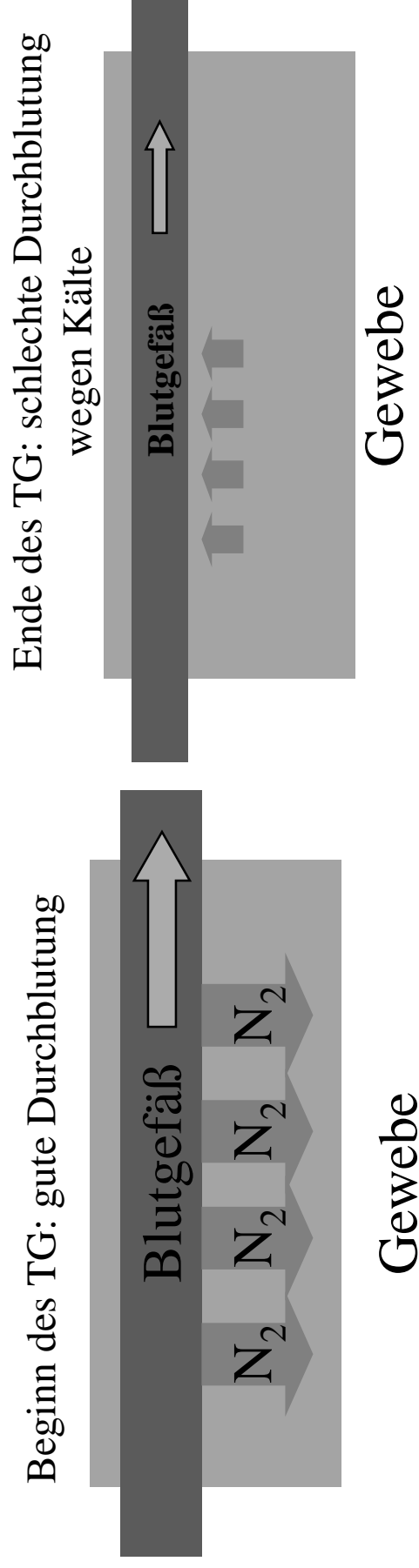
Entsättigung, Übersättigung und Toleranzen

- Beim Auftauchen kann der Stickstoff den Körper nicht unbegrenzt schnell verlassen.
- Es entsteht eine zuerst unproblematische Übersättigung der Gewebe mit Stickstoff, denn alle Gewebe haben bestimmte Toleranzen gegen eine zu hohe Stickstoffaufladung (Gasspannung).
- Wird der Umgebungsdruck jedoch zu schnell verringert, kann das Inertgas nicht mehr im Gewebe gehalten werden. Der Inertgasdruck im Gewebe ist dann zu hoch, der Umgebungsdruck zu niedrig.
- Schnelle Gewebe sind toleranter gegen Übersättigung als langsame.
- Die Austauschgeschwindigkeit muss daher so bemessen sein, dass die Übersättigungstoleranzen aller Gewebe immer eingehalten werden. (Bei Nullzeit- und bei Deko-TG)

Verzögerte Entsättigung

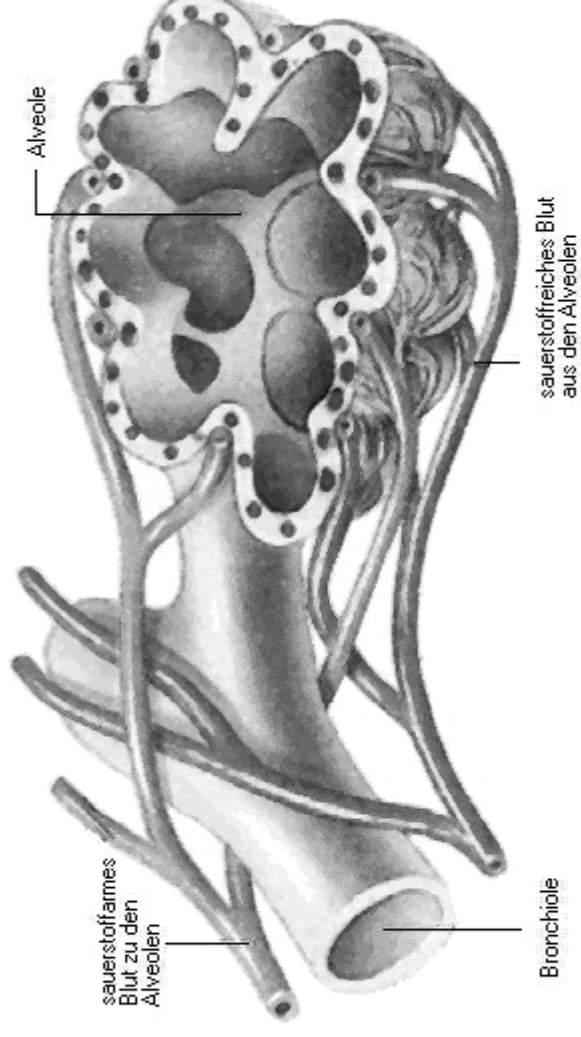
Die Entsättigung verläuft theoretisch umgekehrt wie die Aufsättigung, aber

- Unterschiedliche Durchblutungscharakteristika können die Entsättigung verlangsamen: Kalte Haut und schlechte Durchblutung am Ende des TG verursachen „Transportprobleme“.




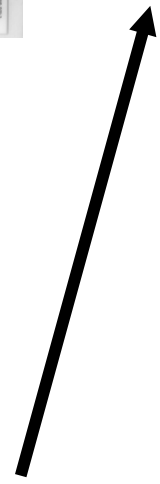
Stickstoffabgabe über die Lunge

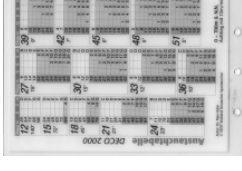
Der aus den Geweben stammende Stickstoff wird im venösen (sauerstoffarmen) Blut gelöst und zur Lunge transportiert, wo er weitgehend abgeatmet werden kann.



Physiologische Ursachen können dies verlangsamen,
z. B. eine Herabsetzung der Effektivität des Gasaustausches
in der Lunge durch das Inertgas selber.

Bühlmann-Modelle ZH-L16 und ZH-L8

- ZH-L16 in Deco 92, Deco 2000 
- 16 (+1) Gewebe
- ZH-L8 im Tauchcomputer Aladin 
- 8 Gewebe
- im Wesentlichen bestehend aus 2 math. Gleichungen.



19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100



- Kernaussagen:
 - Das Entstehen von großen Gasblasen wird durch die Anwendung des Modells verhindert, indem so langsam aufgetaucht (druckentlastet) wird, dass die Gewebe ausreichend entsättigen können.
 - Bei jedem Austausch entstehen Mikrogasblasen, die aber nicht krankmachend (pathogen) wirken

- Das Modell basiert auf 16 (bzw. 17) Kompartimenten (Modellgeweben). Ein reales Gewebe kann durch ein oder mehrere Kompartimente repräsentiert sein.
- Die Kompartimente Nr. 9-11 z.B. entsprechen Haut und Muskulatur.
- Jedes Kompartiment hat seine individuelle Halbwertszeit. Diese reichen von 4 Minuten für das Kompartiment 1 bis 635 Minuten für das Kompartiment 16.
- Jedes Kompartiment nimmt bei einer Druckerhöhung Inertgas (N_2 , He, etc.) entsprechend seiner Halbsättigungszeit auf und gibt diese bei einer Druckentlastung wieder ab.
- Die Durchblutungsrate eines Gewebes bestimmt seine Halbwertszeit. Der vom Gewebe symptomlos tolerierte Inertgasüberdruck ist von der Durchblutungsrate und der Löslichkeit des Inertgases abhängig.

Sättigungsgleichung

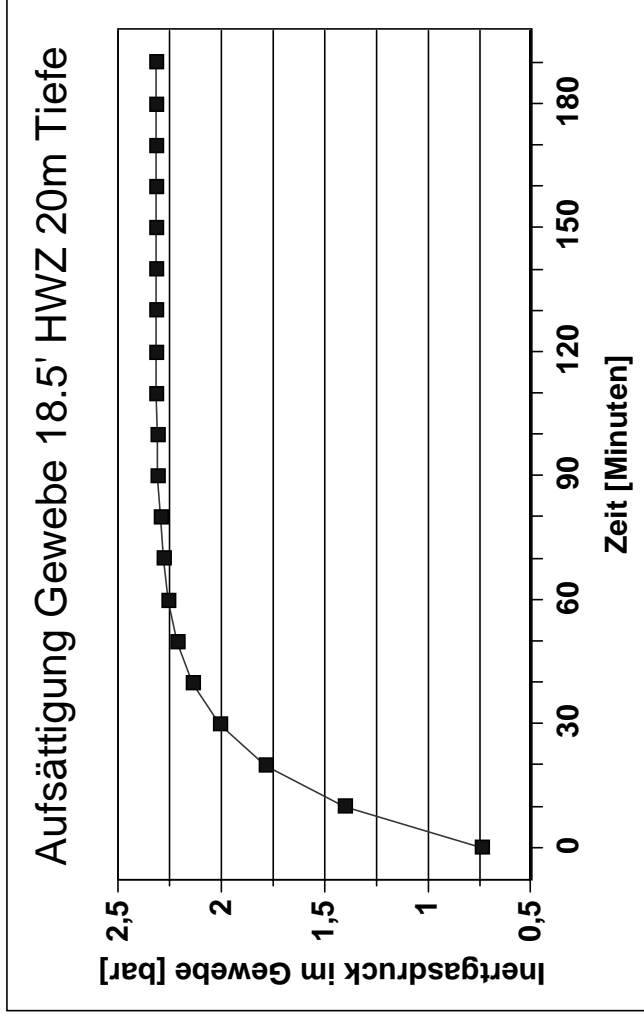
$$P_{\text{gewebe}(\text{jetzt})} = P_{\text{gewebe}(\text{vorher})} + (P_{\text{atem}} - P_{\text{gewebe}(\text{vorher})}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\text{Zeitabschnitt}} \cdot \text{Zeit}} \right)$$

P_{atem} : Inertgasdruck im Atemgas

Zeit: Zeitdauer

P_{gewebe} : Inertgasdruck im Gewebe

HWZ: Halbwertszeit
des Gewebes



Tolerierter Inertgasdruck im Gewebe

- Während des Auftauchens darf der für jedes der 16 Gewebe minimal zulässige Umgebungsdruck nicht unterschritten werden weil sonst der Inertgasdruck im Gewebe im Vergleich zu groß würde. In diesem Falle entstehen im Gewebe Gasblasen.
- Der Inertgasdruck im Gewebe ergibt sich aus der vorher gezeigten Sättigungsgleichung.

Der kleinste gerade noch tolerierte Umgebungsdruck ist dann:

$$P_{tol.Umgebung} = (P_{gewebe} - a) \cdot b$$

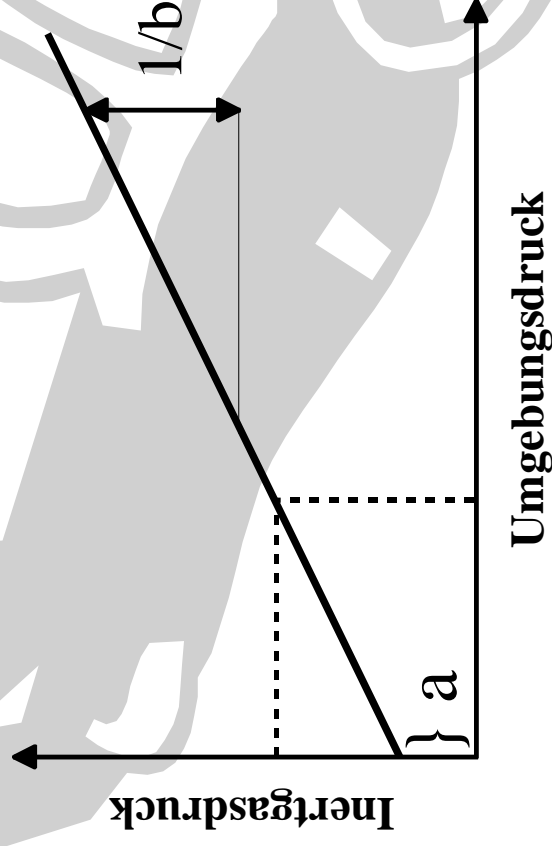
$P_{tol.Umgebung}$: Tolerierter Umgebungsdruck

P_{gewebe} : Inertgasdruck im Gewebe

a, b : Koeffizienten die die Toleranz eines Gewebes gegen zu hohen Inertgasdruck beschreiben.

Die Koeffizienten a und b

- Die Koeffizienten a und b lassen sich direkt aus den Halbwertszeiten berechnen (Rechenmodell ZH-L16) oder durch Versuche mit Testpersonen ermitteln (ZH-L12).
- Der Koeffizient b beschreibt die Steilheit der linearen Beziehung zwischen Umgebungsdruck und toleriertem Inertgasdruck.
- Modifikationen des Modells, z.B. Berücksichtigung des Rechts-links-Shunts, beschränken sich auf den Koeffizienten a.



- Ein enges Netz von Halbwertszeiten ermöglicht kürzere Dekozeiten bei gleicher Sicherheit.
- Die Wahrscheinlichkeit für eine nicht behandlungsbedürftige Dekompressionskrankheit unter Einhaltung der Grenzen des Modells ZH-L16A beträgt 1,9 %.

Kompartiment	Halbwertszeit	Koeffizient b	Koeffizient a
1	4,00	0,5050	1,2599
1b	5,00	0,5578	1,1696
2	8,00	0,6514	1,0000
3	12,50	0,7222	0,8618
4	18,50	0,7825	0,7562
5	27,00	0,8126	0,6670
6	38,30	0,8434	0,5933
7	54,30	0,8693	0,5282
8	77,00	0,8910	0,4701
9	109,00	0,9092	0,4187
10	146,00	0,9222	0,3798
11	187,00	0,9319	0,3497
12	239,00	0,9403	0,3223
13	305,00	0,9477	0,2971
14	390,00	0,9544	0,2737
15	498,00	0,9602	0,2523
16	635,00	0,9653	0,2327

$$b = 1,005 - \frac{1}{\sqrt[2]{HWZ}}$$

$$a = \frac{2,0bar}{\sqrt[3]{HWZ}}$$

ZH-L16A mit mehreren Inertgasen

- Für mehrere Inertgase (Heliox, Trimix, etc.) summieren sich die Inertgasdrücke im Gewebe.

$$P_{\text{gewebe gesamt}} = P_{\text{gewebe } N_2} + P_{\text{gewebe He}}$$

- Die Koeffizienten a und b der einzelnen Inertgase werden mit ihrem Anteil am Gesamtinertgasdruck im Gewebe multipliziert.

$$P_{\text{Umgebung tol.}} = \left(\frac{P_{\text{gewebe gesamt}} \cdot a_{N_2}}{P_{\text{gewebe gesamt}}} + \frac{P_{\text{gewebe gesamt}} \cdot a_{\text{He}}}{P_{\text{gewebe gesamt}}} \right) \cdot \left(\frac{b_{N_2} \cdot P_{\text{gewebe } N_2}}{P_{\text{gewebe gesamt}}} + \frac{b_{\text{He}} \cdot P_{\text{gewebe He}}}{P_{\text{gewebe gesamt}}} \right)$$

RGBM-Modell >

- Neueres Deko-Modell aus den USA
- Kernaussagen
 - Die Bildung von Mikrogasblasen kann (fast) vollständig verhindert werden, wenn die Aufstaugeschwindigkeit stark abgesenkt wird.
 - Durch das richtige Tauchprofil (am Anfang tief, dann flach) können die Mikrogasblasen zerkleinert („crushed“) werden und sind daher weniger risikobehaftet.
- Bisher nur ansatzweise *in vivo*, sondern nur *in vitro* (an Gelatine), verifiziert.
- Führt theoretisch zu früheren Dekostopps als das Bühlmann-Modell, in der Praxis aber wenig Unterschiede (z. B. Computer *Suunto Vyper*).

RGBM Rechenmodell

- Analyse der Blasenmechanik führt zu bestimmten Kernaussagen:
 - Blasen unterliegen verschiedenen Randbedingungen, die durch Blasengröße, Blasenoberfläche und dem Übergang zum umgebenden Medium bestimmt werden.
 - Für Gasblasen existiert ein sog. „kritischer Radius“ (r_0):
 - Liegt der Radius einer Blase bei einem bestimmten Druck unter diesem Wert, wächst die Blase bei der Dekompression nicht.
 - Anzahl, Größe und Verteilung der (Mikro-)Gasblasen lassen sich durch frühe Dekompressionsstopps begrenzen.

Unterschiede Bühlmann-Modell RGBM

- Bühlmann-Modell
 - Begrenzt den Aufstieg durch die Frage, wie die Gasspannung im Gewebe so klein gehalten werden kann, dass keine pathogenen Gasblasen auftreten
 - mathematisch einfach
- RGBM
 - mathematisch komplex
 - Legt den Dekompressionsregeln verschiedene Faktoren zugrunde:
 - Physikalische Gesetze der Blasenbildung und Stabilisierung.
 - Freisetzung von Inertgas aus Geweben unter bestimmten Bedingungen.
 - Übersättigung im Gewebe und Toleranz.
 - Austausch zwischen freiem und gelöstem Gas im Gewebe.

Annahmen des RGBM

- Das Volumen freigesetzten Gases während der Dekompression muss begrenzt werden.
- Blasen können, wenn sie klein genug sind, in einen stabilen Zustand übergehen.
- Die Blasen verteilen sich so, dass die Anzahl mit zunehmender Größe abnimmt.
- Langsame Gewebe sind besonders wichtig bei der Betrachtung der Dekompression.
- Die Nullzeiten des Modells basieren auf empirischen Dopplermessungen.
- Die Entsättigung während der Oberflächenpause ist relevant für die Verteilung der Blasen in Bezug auf Zahl und Größe.
- Maßgebend für die Dekompression sind nicht nur Tauchtiefe und -zeit, sondern auch das Tauchprofil.

Dekompression

Praxisteil

Anwendung von Dekompressionstabellen

Beispiele mit der Deco 2000

Dekompressionstabelle Deco 2000 (Autor Dr. Max Hahn)

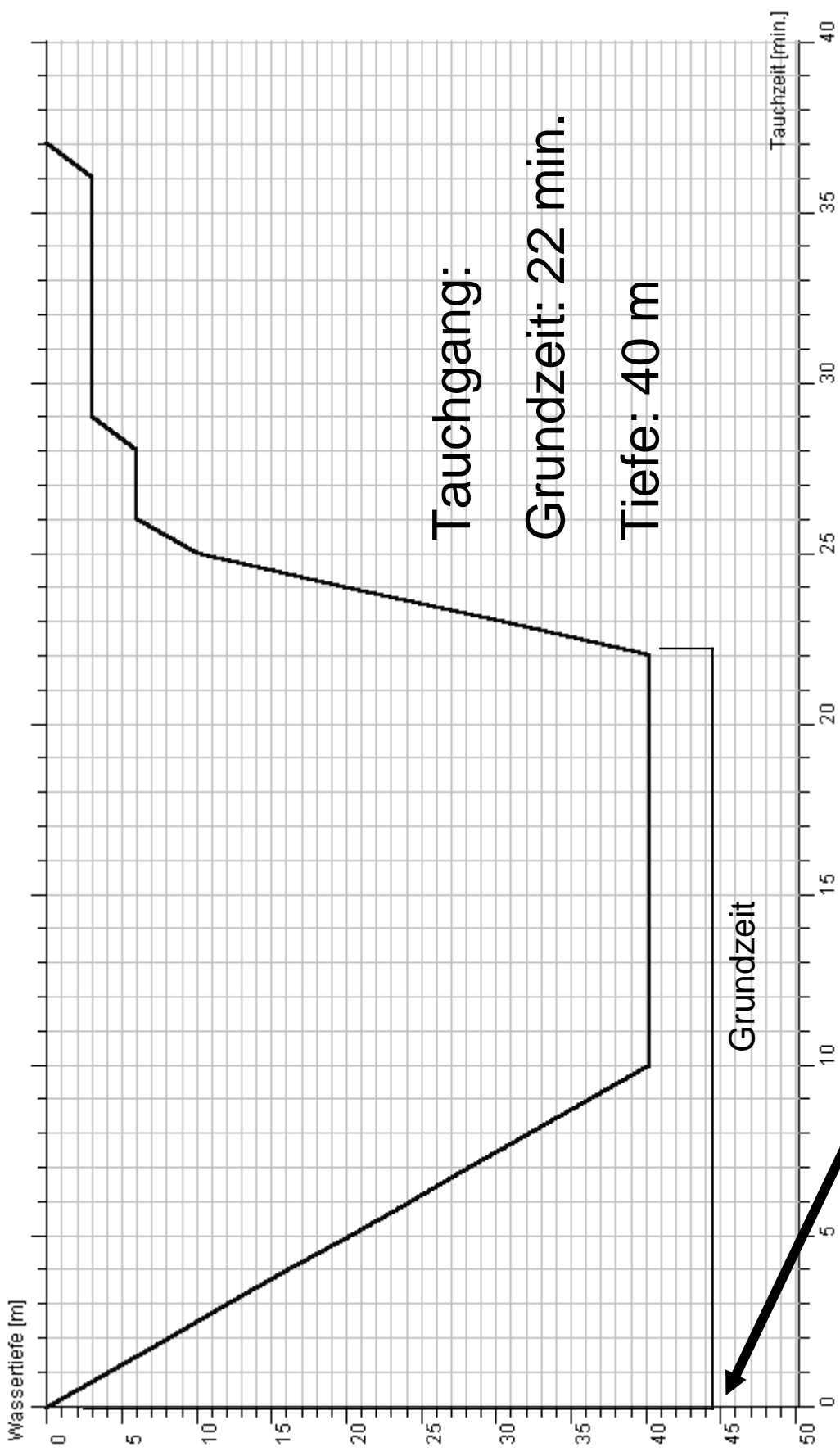
The image shows a screenshot of a software application titled "Dekompressionstabelle Deco 2000". The main window displays a grid of 15 tables, arranged in three rows and five columns. Each table contains numerical data, likely representing decompression rates or values for different parameters. The tables are organized into three main sections: the top row has five tables, the middle row has four tables, and the bottom row has two tables. The interface also includes a sidebar on the left with a search bar and a list of items, and a bottom bar with navigation buttons.

Aufbau der Deko-Tabelle

- Tauchtiefe (max. Tiefe des Tauchgangs)
- Nullzeit
- Grundzeiten
- Dekompressionstufen
- Dekompressionszeiten
- Wiederholungsgruppen

Stop In	0	6	3	0	B	C	D	E	F	F	F	G	G	G
27	6								2	5	8			
18	10								2	10				
10	14								3	13				
6	18								5	15				
	22								7	18				
	26								9	21				
	30													
	34													
	38													
	42													
	46													
	50													

Tauchgangsprofil



Die Grundzeit beginnt beim Abtauchen!

Wiederholungs-Tauchgang

2. Tauchgang mit Grundzeit: 12 min. und Tiefe: 25 m

Oberflächenpause: 3 Std. 30 min.

■ Zeitzuschlag ermitteln

- Ausgehend von der Wiederholungsgruppe und der beabsichtigten Tauchzeit des 2. Tauchganges muss ein Zeitzuschlag gefunden werden:

- **In Reihe „G“ zwischen 3:00 und 4:00 dem Pfeil nach unten folgen**

- In den Zeilen der unteren Tabelle nach 25m suchen, da nicht vorhanden diesmal abrunden auf 24 m und Zeitzuschlag von 28 min. finden.

■ Daten für den 2. Tauchgang:

- 12+28 min=40 min Grundzeit
- Tiefe 25 m

		Oberflächenpause (h:min)											
		2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	12:00	24h	
G	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	12:00	24h		
F	0:30	1:00	1:30	2:15	3:00	3:45	4:30	5:30	6:30	10:00	20h		
E			0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	8:00	16h		
D					0:30	0:45	1:00	1:30	2:00	6:00	12h		
C							0:10	0:20	0:30	4:00	8h		
B								0:10	0:20	2:00	4h		

		Zeitzuschlag (min)																	
		12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63
G	2:00	66	60	54	47	41	35	30	25	20									
F	0:30	52	47	42	37	32	27	23	19	16									
E		43	39	34	30	26	22	19	16	13									
D		36	33	29	26	22	19	16	13	11									
C		31	28	25	22	19	16	14	12	10									
B		27	27	25	22	19	17	14	12	10	8								
		24	24	22	20	17	15	13	11	9	8								
		22	22	20	18	16	14	12	10	9	7								
		20	18	16	14	12	11	9	7	6									
		18	17	15	13	11	10	8	7	6									
		17	16	14	12	10	9	8	6	5									
		16	16	14	13	11	10	9	7	6	5								
		15	13	12	10	9	8	6	5	4									
		14	12	11	10	8	7	6	5	4									
		13	12	10	9	8	7	6	5	4									
		12	11	10	9	7	6	5	4	4									
		11	10	9	8	7	6	5	4	4									
		11	10	9	8	7	6	5	4	3									

Übung mit der Dekotabelle

- 1. TG: 25 min. auf 42 m
- Oberflächenpause 4h 30 min
- 2. TG: 21 min. auf 38 m

■ Deko: 1. TG

- 12m ___ min.
- 9m ___ min.
- 6m ___ min.
- 3m ___ min.
- Wdh.-Gruppe _____

■ 2. TG: max. Tiefe _____ m

■ Zeitzuschlag _____

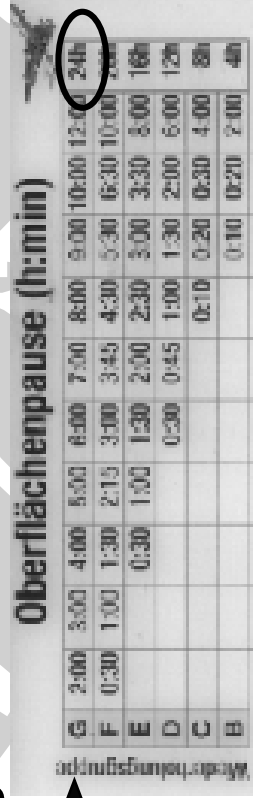
■ Grundzeit gesamt

■ 2. TG Deko:

- 12m ___ min.
- 9m ___ min.
- 6m ___ min.
- 3m ___ min.

Weitere Regeln für die Anwendung der Dekompressionstabelle

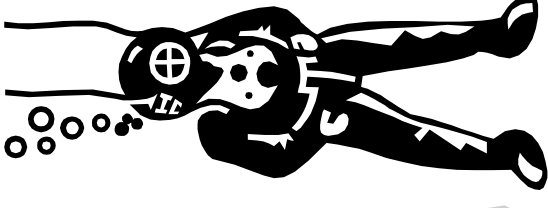
- Wird der Tauchgang in sehr kaltem Wasser durchgeführt, wird eine Tiefenstufe weiter abgelesen, z. B. 42 statt 39 reale Meter.
- Wird während der Grundzeit sehr starke körperliche Arbeit geleistet, z. B. beim Anschwimmen gegen Strömung, wird die Grundzeit um den Faktor 1,5 verlängert.
- Die Flugverbotszeit wird in der Zeile mit den Wiederholungsgruppen abgelesen:



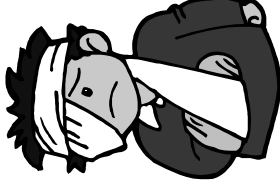
	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	12:00	24h
G	0:30	1:00	1:30	2:15	3:00	3:45	4:30	5:30	6:30	10:00	24h
F		0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	10h	24h
E				0:30	0:45	1:00	1:30	2:00	2:30	4:00	12h
D					0:20	0:30	4:00	4:00	4:00	8h	24h
C						0:10	0:20	0:30	4:00	4:00	8h
B							0:10	0:20	2:00	2:00	4h

Nullzeit-TG / Dekompressions-TG

- **Jeder Tauchgang ist ein Dekompressionstauchgang.**
- Nullzeit-TG bedeutet lediglich: Es sind **keine expliziten** Dekompressionsstopps notwendig.
- Aber: Ebenfalls Austritt von Stickstoff aus den Körpergeweben.
- Mikrogasblasen bilden sich.
- Dekompressionskrankheit ist möglich, besonders bei zu hoher Aufstiegsgeschwindigkeit.
- Gefahr durch „Non-Limit-Tauchen“ (langsame Gewebe sättigen stark auf, keine Zeit für Entsättigung) ⇒ Softwaredemo



Gefahr: Tauchen an der Nullzeitgrenze



- Nach einer bestimmten Tauchzeit auf einer bestimmten Tauchtiefe werden u. U. Dekompressionsstopps notwendig.
- Viele Taucher tauchen kurz vor diesem Zeitpunkt in geringere Tiefen auf.
- Dies wird wiederholt, so dass theoretisch nie eine Dekompressionspflicht entsteht.
- **Risiko:** Bestimmte Gewebe sind sehr nahe an der Toleranzgrenze für die max. zul. Gasspannung.
- Physikalisch kein Unterschied zum Dekompressionstauchen, außer dass explizite Stopps vermieden werden. (Ergebnis: Mindestens ein Gewebe ist so weit gesättigt, dass gerade noch keine großen Gasblasen entstehen.)

Dekompressionstauggänge

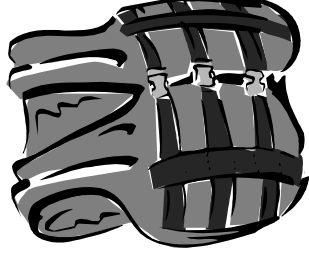
- Erfordern adäquate Planung, Disziplin, Tauchfertigkeiten und Ausrüstung
 - Luft-/Gasvorrat (Kompressions-, Isopressions- und Dekompressionsphase)
 - max. Tauchtiefe bestimmen
 - geplante Grundzeit bestimmen
 - Luftverbrauch ermitteln (berechnen/abschätzen)
 - evtl. Anstrengung (Strömung u.ä.) einkalkulieren
 - Austauschen (Dekompressionsphase)
 - Ort (Freiwasser, Seil, Steilwand, Halde)
 - Zeiten
 - Stufen
 - Verfahren (Tabelle, Computer, welcher?)
 - Notfallverfahren
 - bei evtl. Luftmangelsituationen („Out-of-air“)
 - bei Partnerverlust
 - bei Gerätefehler (Redundanz der Ausrüstung)



Die Aufstiegs geschwindigkeit

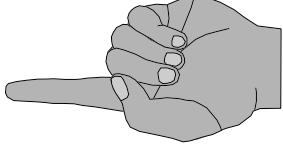
- Je höher diese ist, desto risikoreicher die Dekompression (Mikroblasen, u. U. manifeste Blasen)
- abhängig vom Tiefenbereich (Druckentlastung pro Tiefenmeter)
 - unterhalb 20m: $v_{max.} = 10-15$ m/min
 - oberhalb 20m: $v_{max.} = 8-10$ m/min
 - im Flachbereich **so langsam wie möglich**
- Geplante Dekompressionsstopps setzen die Aufstiegs geschwindigkeit künstlich herab.
- Auch bei „Nullzeit“-TG: minimale Aufstiegs geschwindigkeit und Dekompressionsstopp von 4-5 min. auf 3-5 m Wassertiefe einhalten und danach diese letzten Meter bis zur Oberfläche sehr langsam aufsteigen.

Tipps für die Tauchsicherheit I



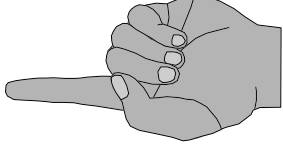
- Jo-Jo-Tauchgänge vermeiden
- Wiederholungstauchgänge planen mit
 - möglichst großer Oberflächenpause dazwischen (Mikrogasblasenbildung erreicht ihr Maximum erst ca. 1-2h nach Ende des letzten TG)
 - Zeitzuschläge zur Dekompression beachten (beim Tauchen mit Tabellen)
- Auch mal einen TG am Tag ausfallen lassen oder einen Tag nicht tauchen (⇒ langsame Gewebeentsättigen lassen).
- Ausreichenden Atemluftvorrat einplanen (d. h. rechtzeitiger Aufstiegsbeginn bei mind. 100-120 bar ⇒ Beginn der Dekompressionsphase bei ca. 70-80 bar)

Tipps für die Tauchsicherheit II



- Körperliche Belastungen (weites Schleppen der Ausrüstung durch schwieriges Gelände / Sport) und hohe Temperaturen (Sauna / heißes Bad) nach dem TG vermeiden (☞ keine vermeidbaren Kondensationskerne für Gasblasen erzeugen).
- Vor dem Fliegen mindestens 12h nicht tauchen.
- Vergleichbares gilt auch beim Überwinden größerer Höhen zu Land (z. B. TG in Südeuropa mit anschließender Autofahrt über Alpenpässe).

Tipps für die Tauchsicherheit III



Was tue ich, wenn Dekostopps wegen Luftmangels ausgelassen werden müssen?

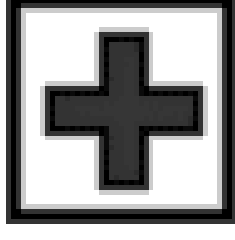
- Tiefere Stopps (15 m, 12 m, 9 m) unbedingt durchführen, weil hier die Gewebe des Gehirns, des ZNS und anderer Nerven entlastet werden (verhindert u. U. irreparable Schäden (Lähmungen))
- Flachere Stopps soweit als möglich mit verbleibender Restluft durchführen
- Falls verfügbar: Weiteres Tauchgerät geben lassen und Dekompression mit dem tiefsten Stopp neu beginnen und Dekompressionszeiten verlängern

Falsche Annahmen

- Es fehlt bis heute ein wissenschaftlicher Beleg für die Richtigkeit der These „Tiefster Tauchgang zuerst“ .
- Nullzeit-TG sind sicher, Dekompressionsschäden sind hier unmöglich.
- Tiefere Dekostopps führen zu weiterer Aufsättigung.



Dekompressionsunfälle/Dekompressionskrankheit



- Entstehen: Durch zu schnelle Druckentlastung und Stickstoffblasen in den Geweben, die sich dabei bilden. Diese Blasen treten wegen ihrer großen Anzahl und Größe über die Lunge oder ein PFO in das arterielle System über und führen zu örtlichen Gewebszerreißen und Thrombosen

Typen der DCS

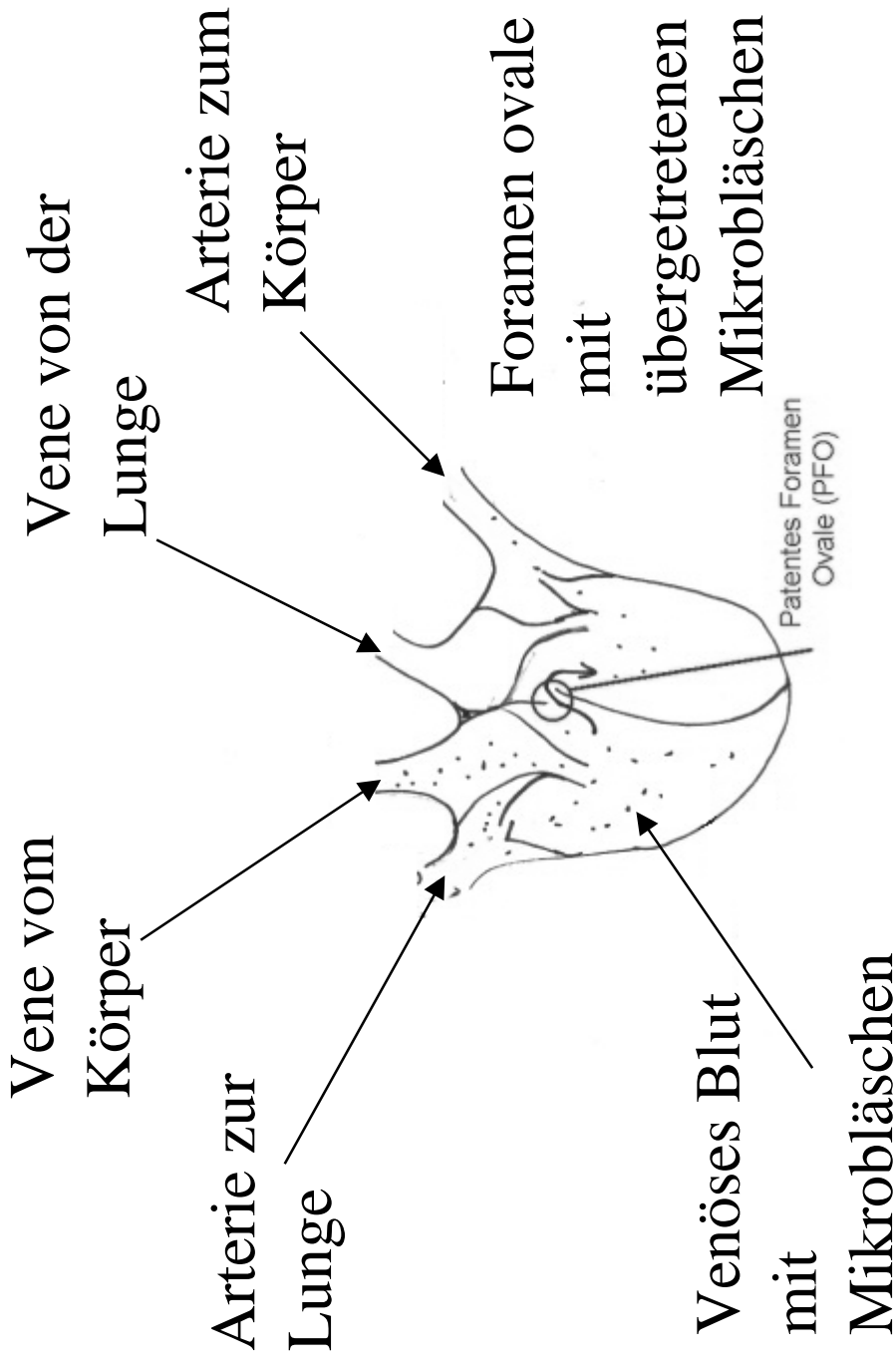


- Unterschieden werden
 - Typ I
 - Haut- („Taucherflöhe“)
 - Muskel- und Gelenksymptome („Bends“)
 - Typ II
 - Nervenlähmungen,
 - Bewusstlosigkeit,
 - sensorische Störungen (Taubheit, Blindheit, Gefühllosigkeit)
 - Typ III
 - Langzeitschäden
 - Skelettveränderungen
 - Nervenschädigungen („Läsionen“)

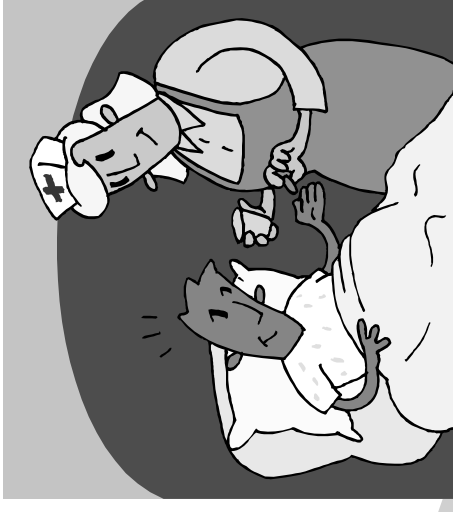
Einflussgrößen für Dekompressionsprobleme

- Offenes Foramen Ovale (Loch in der Herzscheidewand)
- Rauchen 😞😞😞
- Fettleibigkeit
- Dehydrierung (Austrocknung, z. B. bei Durchfall oder zu wenig Flüssigkeitsaufnahme, Seekrankheit mit Erbrechen)
- Körperliche Anstrengung während des TG (vermehrte N_2 -Aufnahme, da AMV erhöht \Rightarrow CO_2 -Überhang \Rightarrow größere Blasen durch 2 Inertgase)
- Stress (höheres AMV)
- Vorhergegangene Dekompressionsunfälle (DCS), vernarbte Gewebe
- kurze Oberflächenpausen (Mikrogasblasen)
- schnelle Aufstiege ($v_{max.} > 7-10$ m/min.)
- Der Vorgang der Stickstoffabgabe selbst, da Mikrogasblasen die Lungenfunktion herabsetzen (Aufstiegsgeschwindigkeit!).

Offenes Foramen Ovale (PFO)



Behandlung der DCS (decompression sickness)



- Gabe von O₂ unter Normaldruck
- möglichst hoher O₂-Anteil, am besten 100%
- ruhige, flache Lagerung bei ansprechbarem Unfallopfer, sonst stabile Seitenlage
- Flüssigkeitszufuhr
- Rettungskette mit Behandlung in Rekompersionskammer
- Kein genauer wissenschaftlicher Beleg für den Nutzen der Gabe von Aspirin zum Zwecke der Verbesserung der Fließfähigkeit des Blutes (wird aber von vielen Tauchmedizinern angeraten).

Alternative Behandlungsmöglichkeiten

- Nasse Re-/Dekompression (Achtung: nicht zu verwechseln mit *nachgeholt*er Dekompression!) mit Druckluft auf 10 bis 15 m WT
 - Abzulehnen, weil
 - Patient in un stabilem (i. a. nicht tauchtauglichem) Allgemeinzustand und unter Wasser durch Helfer nur schwer zu unterstützen
 - Gefahr der Auskühlung durch langen Wasseraufenthalt
 - Gefahr der Bewusstlosigkeit oder des Erbrechens unter Wasser
- Nasse Dekompression mit Sauerstoff (max. 9 m WT)
 - mit Vollgesichtsmaske
 - einige Stunden im warmen Wasser.