

Gassättigung – Berechnung der Dekompression I

Das Verständnis für die sich während des Tauchganges in unserem Körper abspielenden Gassättigungsvorgänge, blieb den weitaus meisten Tauchern seit jeher ein Buch mit sieben Siegeln. Allzu gerne liess man es damit bewenden, genauste Tabellenberechnungen anzustellen, ohne dabei überhaupt nur zu ahnen, wie eine risikoarme Dekompression erforscht und berechnet wird. Mit dem Aufkommen der ersten funktions- und gebrauchsfähigen Tauchcomputer hat sich diese Gefahr noch verstärkt.

Unser Ziel ist es deshalb, in einfacher und verständlicher Form die Gesetzmässigkeiten der Gasaufnahme und -abgabe zu beschreiben, und dem interessierten Taucher auch einfache Dekompressionsberechnungen etwas näher zu bringen.

Inertgasaufnahme und -abgabe der Gewebe

Mathematische Grundlagen

Der Inertgasdruckgradient (Partialdruckgefälle) ist die treibende Kraft des Druckausgleiches der Inertgase zwischen Atemgas, Lungen, Blut und Gewebe.

Dieser Druckausgleich erfolgt für die Inertgasaufnahme und -abnahme **exponentiell**.

Sind **Druckdifferenz** und **Expositionszeit** bekannt, kann der Druckausgleich mittels **Halbsättigungszeiten** berechnet werden.

Berechnungsformel

Der Inertgas im Gewebe ($p_{i.g.t.}$) beträgt für eine gegebene Halbsättigungszeit nach einer gegebenen Expositionszeit (tE):

$$p_{i.g.t.}(tE) = p_{i.g.t.}(t0) + (pI_{i.g.} - p_{i.g.t.}(t0)) \cdot (1 - e^{-k \cdot tE})$$

$p_{i.g.t.}(tE)$ = Inertgasdruck im Gewebe bei Ende der Expositionszeit

$p_{i.g.t.}(t0)$ = Inertgasdruck im Gewebe zu Beginn der Expositionszeit

$pI_{i.g.}$ = Inspiratorischer Inertgasdruck

e = 2,71828

k = 0,69315 / Halbsättigungszeit

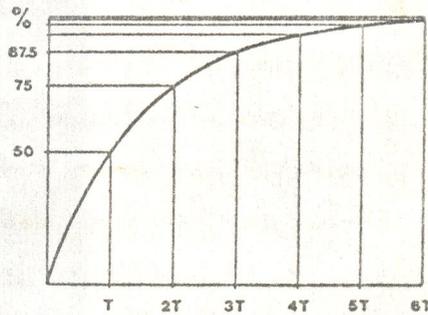
0,69315 = natürlicher Logarithmus von 2

Initialer Inertgasdruck

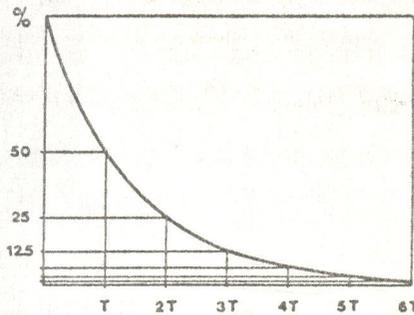
Verändert sich der Druckgradient beim Ab- bzw. Auftauchen, wird vermehrt Inertgas vom Körper gelöst bzw. über die Atmung ausgeschieden.

Da der Taucher bereits an der Oberfläche entsprechend dem atmosphärischen Druck mit inertem Stickstoff gesättigt ist, sprechen wir beim Abtauchen von einer Aufsättigung. Dieser in sämtliche Berechnungen einzubeziehende Initialwert beträgt auf Meereshöhe ca. 0,79 bar und wird mit zunehmender Höhenlage proportional zum Luftdruck entsprechend kleiner, wobei eine genügende Adaptionszeit zu berücksichtigen ist.

Halbsättigungszeit



Aufsättigung (Abb.1)



Entsättigung (Abb.2)

Der Auf- bzw. Entsättigungsvorgang verläuft **exponentiell**, d.h. zu Beginn sehr schnell und dann zunehmend langsamer.

Die Zeit in welcher ein Gewebe zur Hälfte mit dem Inertgas gesättigt ist, bezeichnen wir als **Halbsättigungszeit** oder auch **Periode** (abgekürzt T)

Wie in Abb. 1 ersichtlich, erreicht die Aufsättigung nach zwei Perioden (2T) 75%, nach drei Perioden 87,5% usw., d.h., mit jeder zusätzlichen Periode wird die Aufsättigungsrate halbiert. Nach 6 Perioden ist eine annähernd volle Sättigung (98,5%) erreicht.

Dasselbe gilt sinngemäss auch für den Entsättigungsvorgang (Abb. 2).

$$p_i(t=0) \approx 0,79$$

(1/2 N₂, bei Normaldruck)

$$pI_{ig} = \frac{\text{Tiefe/m}}{10/m} * 0,79 \text{ (Luft)}$$

Die Körpergewebe und ihre Halbsättigungszeiten

Während der Inertgasdruckausgleich zwischen Atemluft und dem die Lungen durchströmenden Blut schnell erfolgt, verläuft er zwischen dem Blut und Geweben entsprechend der Durchblutung langsamer. Die grossen Unterschiede der einzelnen Körpergewebe hinsichtlich Durchblutung und körperlicher Beanspruchung können nur durch ein entsprechend breites Spektrum von Halbsättigungszeiten abgedeckt werden.

Wenn die Halbwertszeit eines Gewebes in erster Linie von seiner Durchblutung abhängt, so muss für ein bestimmtes Gewebe je nach körperlicher Aktivität mit einer variierenden Halbsättigungszeit gerechnet werden. Dies gilt insbesondere für die Muskulatur, für die Haut und damit auch für das Unterhautfettgewebe. Auch für die Gelenke und Knochen ist während Arbeit mit einer gewissen Zunahme der Durchblutung und damit auch mit einem etwas schnelleren Inertgasdruckausgleich zu rechnen. In der experimentellen Dekompressionsforschung wird dieser Tatsache mit Leistung von leichter körperlicher Arbeit Rechnung getragen. Aus demselben Grund empfiehlt es sich für den Taucher eine leichte körperliche Belastung (Schwimmen) insbesondere während der Dekompressionsphase.

Die Tabellen des Druckkammerlabors der Universität Zürich basieren auf einem Modell mit 16 verschiedenen Halbsättigungszeiten, die Gewebe oder Gewebegruppen charakterisieren:

Tab. 1

Nr.	T für N ₂	T für He	Gewebe
1	2,65 min	1 min	Blut Gehirn Rückenmark
2	7,94 min	3 min	
3	12,2 min	4,6 min	
4	18,5 min	7 min	Haut Muskulatur
5	26,5 min	10 min	
6	37 min	14 min	
7	53 min	20 min	Innenohr
8	79 min	30 min	
9	114 min	43 min	
10	146 min	55 min	Gelenke Knochen
11	185 min	70 min	
12	238 min	90 min	
13	304 min	115 min	
14	397 min	150 min	
15	503 min	190 min	
16	635 min	240 min	

Berechnung der Aufsättigung

Anhand Tab. 2 kann die Auf- bzw. Entsättigung eines Gewebes in Abhängigkeit von Expositions- und Halbsättigungszeit wie folgt bestimmt werden.

- Bestimmen des Verhältnisses $\frac{t}{T}$ (Expositionszeit / Halbsätt.zeit)
- Bestimmen der erfolgten Auf- bzw. Entsättigung in der entsprechenden Zeile von Tab. 2. Die horizontalen Zahlen von 0-9 geben die zweite Dezimalstelle des Verhältnisses t/T an.

Rechnungsbeispiel

Welchen Inertgasdruck weist ein Gewebe mit $T_{N_2} = 18,5$ min nach 25 min auf 35 m Tiefe auf, wenn der Taucher an den herrschenden Luftdruck von 1 bar adaptiert ist?

$$\frac{t}{T} = \frac{25 \text{ min}}{18,5 \text{ min}} = 1,35$$

Fahren wir in der Spalte 1,3 bis zur mit 5 bezeichneten senkrechten Kolonne, finden wir den Betrag der Aufsättigung angegeben mit: 0,608.

Dieser Wert besagt, dass der Druckanstieg des Inertgases nach 25 min. auf 35 m Tiefe bereits zu 60,8% ausgeglichen ist.

Tab. 2: Bestimmung der Auf- bzw. Entsättigung (als Funktion von Expositions- und Halbsättigungszeit)

t/T	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0		0,007	0,014	0,021	0,027	0,034	0,041	0,047	0,054	0,061
0,1	0,067	0,073	0,081	0,086	0,092	0,099	0,105	0,111	0,117	0,123
0,2	0,129	0,136	0,141	0,147	0,153	0,159	0,165	0,171	0,176	0,182
0,3	0,188	0,193	0,199	0,204	0,210	0,215	0,221	0,226	0,232	0,237
0,4	0,242	0,247	0,253	0,258	0,263	0,268	0,273	0,278	0,283	0,288
0,5	0,293	0,298	0,303	0,307	0,312	0,317	0,322	0,326	0,331	0,336
0,6	0,340	0,345	0,349	0,354	0,358	0,363	0,367	0,372	0,376	0,380
0,7	0,384	0,389	0,393	0,397	0,401	0,405	0,410	0,414	0,418	0,422
0,8	0,426	0,430	0,434	0,438	0,441	0,445	0,449	0,453	0,457	0,460
0,9	0,464	0,468	0,472	0,475	0,479	0,482	0,486	0,490	0,493	0,496
1,0	0,500	0,503	0,507	0,510	0,514	0,517	0,520	0,524	0,527	0,530
1,1	0,533	0,537	0,540	0,543	0,546	0,549	0,553	0,556	0,559	0,562
1,2	0,565	0,568	0,571	0,574	0,577	0,580	0,583	0,585	0,588	0,591
1,3	0,594	0,597	0,600	0,602	0,605	0,608	0,610	0,613	0,616	0,618
1,4	0,621	0,624	0,626	0,629	0,632	0,634	0,637	0,639	0,642	0,644
1,5	0,646	0,649	0,651	0,654	0,656	0,659	0,661	0,663	0,666	0,668
1,6	0,670	0,672	0,675	0,677	0,679	0,681	0,684	0,686	0,688	0,690
1,7	0,692	0,694	0,697	0,699	0,701	0,703	0,705	0,707	0,709	0,711
1,8	0,713	0,715	0,717	0,719	0,721	0,723	0,725	0,726	0,728	0,730
1,9	0,732	0,734	0,736	0,738	0,739	0,741	0,743	0,745	0,747	0,748
2,0	0,750	0,752	0,754	0,755	0,757	0,759	0,760	0,762	0,764	0,765
2,1	0,767	0,768	0,770	0,772	0,773	0,775	0,776	0,778	0,779	0,781
2,2	0,782	0,784	0,785	0,787	0,788	0,790	0,791	0,793	0,794	0,796
2,3	0,797	0,798	0,800	0,801	0,803	0,804	0,805	0,807	0,808	0,809
2,4	0,811	0,812	0,813	0,815	0,816	0,817	0,818	0,820	0,821	0,822
2,5	0,823	0,824	0,826	0,827	0,828	0,829	0,830	0,832	0,833	0,834
2,6	0,835	0,836	0,837	0,839	0,840	0,841	0,842	0,843	0,844	0,845
2,7	0,846	0,847	0,848	0,849	0,850	0,851	0,852	0,853	0,854	0,855
2,8	0,856	0,857	0,858	0,859	0,860	0,861	0,862	0,863	0,864	0,865
2,9	0,866	0,867	0,868	0,869	0,870	0,871	0,872	0,872	0,873	0,874
3,0	0,875	0,876	0,877	0,878	0,878	0,879	0,880	0,881	0,882	0,883
3,1	0,883	0,884	0,885	0,886	0,887	0,887	0,888	0,889	0,890	0,890
3,2	0,891	0,892	0,893	0,893	0,894	0,895	0,896	0,896	0,897	0,898
3,3	0,899	0,899	0,900	0,901	0,901	0,902	0,903	0,903	0,904	0,905
3,4	0,905	0,906	0,907	0,907	0,908	0,909	0,909	0,910	0,910	0,911
3,5	0,912	0,912	0,913	0,913	0,914	0,915	0,915	0,916	0,916	0,917
3,6	0,918	0,918	0,919	0,919	0,920	0,920	0,921	0,921	0,922	0,923
3,7	0,923	0,924	0,924	0,925	0,925	0,926	0,926	0,927	0,927	0,928
3,8	0,928	0,929	0,929	0,930	0,930	0,931	0,931	0,932	0,932	0,933
3,9	0,933	0,934	0,934	0,934	0,935	0,935	0,936	0,936	0,937	0,937
4,0	0,938	0,938	0,938	0,939	0,939	0,940	0,940	0,941	0,941	0,941
4,1	0,942	0,942	0,943	0,943	0,943	0,944	0,944	0,944	0,945	0,945
4,2	0,945	0,946	0,946	0,947	0,947	0,947	0,948	0,948	0,949	0,949
4,3	0,949	0,950	0,950	0,950	0,951	0,951	0,951	0,952	0,952	0,952
4,4	0,953	0,953	0,953	0,954	0,954	0,954	0,955	0,955	0,955	0,956
4,5	0,956	0,956	0,957	0,957	0,957	0,957	0,958	0,958	0,958	0,959
4,6	0,959	0,959	0,959	0,960	0,960	0,960	0,960	0,961	0,961	0,961
4,7	0,962	0,962	0,962	0,962	0,963	0,963	0,963	0,963	0,964	0,964
4,8	0,964	0,964	0,965	0,965	0,965	0,965	0,966	0,966	0,966	0,966
4,9	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,968	0,968	0,968	0,968	0,969
5,0	0,969	0,969	0,969	0,970	0,970	0,970	0,970	0,970	0,970	0,971
5,1	0,971	0,971	0,971	0,971	0,972	0,972	0,972	0,972	0,972	0,973
5,2	0,973	0,973	0,973	0,973	0,974	0,974	0,974	0,974	0,974	0,974
5,3	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,976	0,976	0,976	0,976	0,976
5,4	0,976	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977	0,978	0,978
5,5	0,978	0,978	0,978	0,978	0,979	0,979	0,979	0,979	0,979	0,979
5,6	0,979	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,981	0,981
5,7	0,981	0,981	0,981	0,981	0,981	0,981	0,982	0,982	0,982	0,982
5,8	0,982	0,982	0,982	0,982	0,983	0,983	0,983	0,983	0,983	0,983
5,9	0,983	0,983	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
6,2	0,986									
6,5	0,989									
6,7	0,990									
7,0	0,992									
7,5	0,994									
8,0	0,996									
9,0	0,998									

Der Inertgasdruck ist beim Abtauchen um 2,765 bar [(4,5 × 0,79) - 0,79] angestiegen. Entsprechend der Aufsättigung von 60,8% beträgt der Inertgasdruck am Schluss 2,47 bar (1,68 bar + 0,79 bar).

$$(1 - e^{-0,79 \cdot \frac{t}{T_{1/2}}})$$

Gassättigung - Berechnung der Dekompression II

Tolerierter Umgebungsdruck, kritischer Inertgas-Überdruck

Am Ende des Aufenthaltes in der Tiefe haben sich die verschiedenen Gewebe entsprechend ihren Halbsättigungszeiten mit Inertgas aufgeladen. Auf dem Rückweg zur Oberfläche kommt nun der Augenblick, in welchem der Inertgasdruck in einem oder mehreren Geweben den inspiratorischen Inertgasdruck übersteigt. Diese Gewebe befinden sich somit von diesem Zeitpunkt an in einem übersättigten Zustand.

Aufgrund reeller Tauchgänge und entsprechender Druckkammerversuche wurde festgestellt, dass jedes Körpergewebe je nach Umgebungsdruck ein bestimmtes Übermass an gelöstem Inertgas verträgt, ohne dass es zum Ausperlen von Gasblasen und damit zu den bekannten Symptomen der Dekompressionskrankheit kommt. Dieser **kritische Inertgas-Überdruck** kann nur anhand der in Testreihen aufgetretenen Symptome, nicht aber aufgrund physikalischer oder chemischer Daten rechnerisch bestimmt werden. Er wird von der Halbsättigungszeit insofern beeinflusst, als Gewebe mit kurzen Halbsättigungszeiten einen höheren Inertgas-Überdruck tolerieren als solche mit entsprechend längeren. D.h., dass reichlich durchblutete Körpergewebe bzw. -organe (z.B. Gehirn, Rückenmark) einen höheren Inertgas-Überdruck symptomloser ertragen als weniger durchblutete (z.B. Gelenke, Knochen, Knorpel).

Der tolerierte Umgebungsdruck ($p_{amb.tol.}$) lässt sich für jede Halbsättigungszeit aus dem Inertgasdruck im Gewebe ($p_{i.g.t.}$) wie folgt bestimmen:

$$p_{amb.tol.} = (p_{i.g.t.} - a) \cdot b$$

Die vom Druckkammerlabor der Universität Zürich errechneten Faktoren a und b werden aus der nachstehenden Tabelle entnommen:

Kompartiment (Gewebe) Nr.	Halbs.zeit für N ₂ min.	Faktor a	Faktor b
1	4,00	1,8917	0,82593
2	7,94	1,4699	0,82604
3	12,20	1,0575	0,83132
4	18,50	0,87828	0,84232
5	26,50	0,69207	0,85687
6	37,00	0,53783	0,88250
7	53,00	0,43429	0,89375
8	79,00	0,40135	0,91737
9	114,00	0,41385	0,90848
10	146,00	0,43085	0,94176
11	185,00	0,43170	0,94122
12	238,00	0,37321	0,94896
13	304,00	0,25083	0,96671
14	397,00	0,25086	0,96668
15	503,00	0,25087	0,96666
16	635,00	0,25088	0,96666

Tab. 3

Rechnungsbeispiel:

Ein Gewebe mit $T_{N_2} = 26,5$ min weist in der Tiefe einen Inertgasdruck von 3,26 bar auf. Bis zu welcher Tiefe ($p_{amb.tol.}$) kann der Taucher gefahrlos aufsteigen?

Aufgrund der Berechnungsformel:

$$p_{amb.tol.} = (p_{i.g.t.} - a) \cdot b$$

$$= (3,26 - 0,692) \cdot 0,857$$

$$= 2,2 \text{ bar oder } 12 \text{ m}$$

Die Kenntnis des tolerierten Inertgasdruckes beim Erreichen des Normaldruckes von 1,0 bar genügt nicht für die Berechnung der Dekompressionsstufen. Es ist allgemein anerkannt, und es ergibt sich auch aus gesicherten Dekompressionstabellen, dass der tolerierte Inertgasüberdruck mit zunehmender Halbsättigungszeit bei gegebenem Überdruck abnimmt, und dass das Verhältnis zwischen Inertgasdruck im Gewebe und Umgebungsdruck bei gegebener Halbsättigungszeit mit zunehmendem Inertgasdruck kleiner wird.

Auf Tab. 4 ist dies deutlich ersichtlich, gleichzeitig werden die kritischen Inertgasdrücke beim Erreichen der Oberfläche und auf den gewohnten Dekostufen von 3-12 m angegeben:

(p_{amb}/b) + a

Kompartiment (Gewebe) Nr.	Halbs.zeit für N ₂ min.	Kritischer Inertgasdruck bei einem $p_{amb.}$ von:				
		1,0 bar (0 m)	1,3 bar (3 m)	1,6 bar (6 m)	1,9 bar (9 m)	2,2 bar (12 m)
1	4,00	3,10	3,47	3,83	4,19	4,56
2	7,94	2,68	3,04	3,41	3,77	4,13
3	12,20	2,26	2,62	2,98	3,34	3,70
4	18,50	2,07	2,42	2,78	3,13	3,49
5	26,50	1,86	2,21	2,56	2,91	3,26
6	37,00	1,67	2,01	2,35	2,69	3,03
7	53,00	1,55	1,89	2,22	2,56	2,90
8	79,00	1,49	1,82	2,15	2,47	2,80
9	114,00	1,51	1,84	2,18	2,50	2,84
10	146,00	1,49	1,81	2,13	2,45	2,77
11	185,00	1,49	1,81	2,13	2,45	2,77
12	238,00	1,43	1,74	2,06	2,38	2,69
13	304,00	1,29	1,60	1,91	2,22	2,53
14	397,00	1,29	1,60	1,91	2,22	2,53
15	503,00	1,29	1,60	1,91	2,22	2,53
16	635,00	1,29	1,60	1,91	2,22	2,53

Tab. 4

Aufgrund der obenstehenden Werte und unserer bisherigen Kenntnisse über die Berechnung der Auf- bzw. Entsättigung, können wir einfache Dekompressionen berechnen.

Rechnungsbeispiel:

Wie lange muss ein Gewebe mit $T_{N_2} = 12,2$ min nach beendeter 6 m-Stufe noch auf 3 m dekomprimiert werden, bevor es gefahrlos einem atmosphärischen Druck von 1 bar ausgesetzt werden darf?

Aus Tab. 4 können wir entnehmen, dass dieses Gewebe vor Erreichen der Oberfläche in 3 m Tiefe vorerst von 2,62 bar auf 2,26 bar dekomprimiert werden muss.

Durch Umformen der bekannten Sättigungsgleichung erhalten wir:

36 **DECOBRAIN**
keine originalen ZH-CA2 Koef. Zichte!
Deco-Brain PEZ Koef. ! S. Deco Brain Handb. S. 21

$$f = -\frac{T_{1/2}}{\ln 2} \ln(1-f)$$

Do you know?

$$\frac{p_{i.g.t.}(tE) - p_{i.g.t.}(t0)}{p_{i.g.} - p_{i.g.t.}(t0)} = (1 - e^{-k \cdot tE})$$

$$\frac{2,26 - 2,62}{(1,3 \cdot 0,79) - 2,62} = 0,226 \quad f$$

Aus Tab. 2 können wir die Anzahl Perioden (t/T) entsprechend dem gefundenen Wert $(1 - e^{-k \cdot tE}) = 0,226$ leicht bestimmen:

Wir erhalten 0,37 Perioden, welche multipliziert mit der Halbsättigungszeit von 12,2 min einer Dekompressionszeit von 4,5 bzw. aufgerundet **5 min auf 3 m Tiefe** entsprechen.

Wann beginnt die Entsättigung?

Die Körpergewebe sättigen sich auch während des Aufstieges noch weiter auf, solange der inspiratorische Inertgasdruck höher ist, als derjenige im Gewebe.

Diese Tatsache ist in Spalte 6 von Tab. 5 deutlich ersichtlich.

Auf- bzw. Entsättigung während des Aufstieges

Die Auf- oder Entsättigung während des Aufstieges lässt sich mit ausreichender Genauigkeit berechnen, indem wir eine **mittlere Tiefe** bestimmen.

Rechnungsbeispiel:

Ein Gewebe mit $T_{N_2} = 26,5$ min weist auf 45 m Tiefe einen Inertgasdruck von 2,72 bar auf. Wie verhält es sich beim Aufstieg?

Zuerst berechnen wir den Beginn der Entsättigung:

2,72 bar : 0,79 = 3,44 bar entsprechend 24,4 m

Die Aufsättigung beim Aufstieg von 45-24,4 m berechnet sich folgendermaßen:

$$\text{Mittlere Tiefe} = \frac{45 \text{ m} + 24,4 \text{ m}}{2} = 34,7 \text{ m} = 4,47 \text{ bar}$$

$$\text{Aufstiegszeit} = 2,06 \text{ min (10 m/min)}$$

Aufgrund der uns bekannten Sättigungsgleichung erhalten wir auf 24,4 m einen Inertgasdruck von

$$p_{i.g.t.}(tE) = (2,72 + (3,5313 - 2,72) \cdot 0,054) = 2,764 \text{ bar}$$

Dieses Gewebe hat sich demzufolge während des Aufstieges bis 24,4 m um 0,044 bar aufgesättigt und beginnt sich erst ab dieser Tiefe zu entsättigen. Die Entsättigung während des Aufstieges errechnet sich nach demselben Verfahren.

Leitgewebe

Gewebe, welche die Aufstiegs- oder Abstiegsgeschwindigkeit oder die zeitliche Dauer der einzelnen Dekompressionsstufen bestimmen, werden als **Leit- oder Führungsgewebe** bezeichnet.

Während für die tieferen Dekompressionsstufen und die Aufstiegs- oder Abstiegsgeschwindigkeit die schnellen Gewebe (Komp. 1-5) führend sind, bestimmen die mittleren und langsamen Gewebe (Komp. 6-16) die Schlussdekompression auf 6 und 3 m.

Der Wechsel der Leitgewebe beim Aufstieg kommt im Rechnungsbeispiel auf Tab. 6 deutlich zum Ausdruck.

Dekompressionsstufen

Für die Dekompression von Sport- und Berufstauchern haben sich Austauschstufen in 3 m-Abständen (= 10 ft) durchgesetzt. Werden diese in größeren Abständen absolviert, nimmt die Gesamtdauer der Dekompression zu. Im Gegensatz dazu wird sie bei kleineren Abständen kürzer und genauer. Aufgrund des veränderten Druckgradienten ergeben sich bei Bergseetauchgängen unterschiedliche Dekompressionsstufen von 2, 4, 7, 10, 13 und 16 m.

Ideal wäre eine stufenlose, kontinuierliche Dekompression, die jedoch nur durch einen den Entsättigungsvorgang genauestens simulierenden Tauchcomputer gewährleistet werden kann.

Berechnung eines Tauchgangsbeispiels

Die tabellarische Darstellungsart soll den interessierten Taucher auf verständliche Weise mit dem Vorgehen und den Problemen der Dekompressionsberechnung vertraut machen.

Da zur Berechnung der Entsättigung eine vereinfachte Rechnungsweise gewählt wurde, fallen die erhaltenen Dekompressionszeiten im Vergleich zu entsprechenden Tabellen oder Tauchcomputern etwas länger aus.

Rechnungsbeispiel:

Wie muss für einen Meertauchgang von 30 min auf 45 m Tiefe dekomprimiert werden?

Komp. Nr.	Halbsättigungszeit für N ₂	t/T	(1 - e ^{-k·tE})	p _{i.g.t.} (tE) bei Beginn Aufstieg	Beginn Entsätt. auf	Krit. Inertg.dr. auf	Aufsätt. während Aufstieg	p _{i.g.t.} (tE) bei Beginn Entsätt.	Krit. Inertg.dr. auf (korr.)
1	4,00	7,50	0,994	4,324	44,7m	10,1m	0,000	4,324	10,1m
2	7,94	3,78	0,927	4,085	41,7m	11,6m	0,005	4,090	11,6m
3	12,20	2,46	0,818	3,698	36,8m	12,0m	0,015	3,713	12,1m
4	18,50	1,62	0,675	3,190	30,4m	9,5m	0,031	3,221	9,7m
5	26,50	1,13	0,543	2,720	24,4m	7,4m	0,044	2,764	7,8m
6	37,00	0,81	0,430	2,319	19,4m	5,7m	0,048	2,366	6,1m
7	53,00	0,57	0,326	1,949	14,7m	3,5m	0,049	1,998	4,0m
8	79,00	0,38	0,232	1,615	10,4m	1,1m	0,037	1,652	1,5m
9	114,00	0,26	0,165	1,377	7,4m				
10	146,00	0,21	0,136	1,273	6,1m				
11	185,00	0,16	0,105	1,163	4,7m				
12	238,00	0,13	0,085	1,092	3,8m				
13	304,00	0,10	0,067	1,028	3,0m				
14	397,00	0,08	0,054	0,982	2,4m				
15	503,00	0,06	0,041	0,936	1,9m				
16	635,00	0,05	0,034	0,911	1,5m				

Tab. 5 : 30 min auf 45 m (Sättigungsphase)

Komp. Nr.	Halbsättigungszeit für N ₂	Entsättigung bis 1. Dekostufe	Inertgasdruck zu Beginn 12m-Stufe	Dekompression auf 12m	Inertgasdruck am Ende der 12m-St.	Dekompression auf 9m	Inertgasdruck am Ende der 9m-St.	Dekompression auf 6m	Inertgasdruck am Ende der 6m-St.	Dekompression auf 3m
1	4,00	- 0,562	3,762	-	2,942*	-	-	-	-	-
2	7,94	- 0,181	3,532	-	3,116	-	2,540*	-	-	-
3	12,20	- 0,128	3,585	3 min	3,291	4 min	2,892	4 min	1,957*	-
4	18,50	- 0,051	3,170	1 min	3,020	5 min	2,760	7 min	2,117	1 min
5	26,50	- 0,016	2,747	-	2,673	4 min	2,529	12 min	2,117	11 min
6	37,00	- 0,005	2,361	-	2,327	-	2,251	15 min	2,009	23 min
7	53,00	- 0,001	1,997	-	1,987	-	1,957	-	1,835	33 min
8	79,00	+	1,652	-	1,654	-	1,591	-	1,551	14 min
9	114,00	+								
10	146,00	+								
11	185,00	+								
12	238,00	+								
13	304,00	+								
14	397,00	+								
15	503,00	+								
16	635,00	+								

Tab. 6 : 30 min auf 45 m (Entsättigungsphase)

Fortsetzung auf Tab. 6

Vorgehen:

- (1) Bestimmen des Verhältnisses $\frac{t}{T} = \frac{\text{Expositionszeit}}{\text{Halbsätt.zeit}}$
- (2) Aufsättigungsrate für $\frac{t}{T}$ aus Tab. 2 entnehmen
- (3) Berechnen des Inertgasdruckes zu Beginn des Aufstieges gemäss Kap. «Berechnung der Auf- bzw. Entsättigung»
- (4) Ein Gewebe beginnt sich erst dann zu entsättigen, wenn der Inertgasdruck im Gewebe beim Aufstieg grösser wird als der inspiratorische. Dieser Zeitpunkt lässt sich folgendermassen berechnen:
$$\frac{p \text{ i.g.t. (tE) bei Beginn Aufstieg}}{\text{prozent. Anteil des Inertgases im Atemgemisch gesuchter Umgebungsdruck (Tiefe)}} =$$
- (5) Aufgrund der Formel $(p_{\text{amb.tol}} - a) \cdot b$ lässt sich bestimmen, in welcher Tiefe ein Gewebe beim Aufstieg seine kritische Übersättigung erreicht. (Die benötigten Faktoren a und b werden aus Tab. 3 entnommen).
- (6) Solange der inspiratorische Inertgasdruck grösser ist als derjenige im Gewebe läuft die Aufsättigung weiter. Sie kann für einen bestimmten Tiefenbereich anhand einer mittleren Tiefe annähernd bestimmt werden. (Siehe Kap. «Berechnung der Auf- bzw. Entsättigung während des Aufstieges»)
- (7) Der Inertgasdruck im Gewebe bei Beginn des Aufstieges wird um den Betrag der Aufsättigung während des Aufstieges erhöht und dient als Basis für die nun folgende Dekompressionsberechnung.
- (8) Durch die Aufsättigung während des Aufstieges verschieben sich die in (5) berechneten Tiefen der kritischen Übersättigung leicht in Richtung grösserer Tiefe. In unserem Beispiel darf mit einer Aufstiegsgeschwindigkeit von 10 m/min bis auf die erste Dekostufe in 12 m Tiefe aufgestiegen werden. Ohne Berücksichtigung der Entsättigung während des Aufstiegs würde Komp. 3 auf dieser Tiefe seine kritische Übersättigung erreichen. Vor dem Weiteraufstieg auf die 9 m-Stufe muss der in den Komp. 3 und 4 herrschende Inertgasdruck vorerst auf die in Tab. 4 angegebenen Werte abgebaut werden.
Die Komp. 9-16 können entsprechend den Werten von Tab. 4 direkt einem Umgebungsdruck von 1 bar ausgesetzt werden, ohne dass sie dabei kritisch werden. Sie fallen deshalb für die Berechnung der Dekompression dieses Tauchganges völlig ausser Betracht. Diese Kompartimente können jedoch insbesondere bei Wiederholungstauchgängen eine wichtige Rolle spielen.
- (9) Die Berechnung der Entsättigung während des Aufstieges von (4) bis zur ersten Dekompressionsstufe erfolgt analog (6). Die Kompartimente 8-16 sättigen sich auch auf den Dekostufen noch weiter auf (siehe (4)).
- (10) (7)-(9)
- (11) Die benötigte Dekompressionszeit wird gemäss der
- (13) umgeformten Sättigungsgleichung berechnet:
- (15) $\frac{p \text{ i.g.t. (tE)} - p \text{ i.g.t. (t0)}}{(1 - e^{-k \cdot t \cdot E})}$
- (17) $p \text{ I.g.} - p \text{ i.g.t. (t0)}$
(siehe Kap. «Kritischer Inertgasdruck»)
- (12) Der Inertgasdruck am Ende jeder Dekostufe wird wie
- (14) in Kap. «Berechnung der Auf- bzw. Entsättigung» be-
- (16) stimmt. Mit * bezeichnete Werte fallen für die Dekompressionsberechnung ausser Betracht, da sie eine Rückkehr an die Oberfläche erlauben, ohne dass das betreffende Gewebe kritisch wird.

Dekompressionstabellen

Dekompressionstabellen berücksichtigen Tauchtiefe, Tauchzeit und Luftdruck an der Wasseroberfläche (Höhenlage). Sie sind aus Gründen der praktischen Brauchbarkeit in gleichbleibenden Stufen eingeteilt, auf denen entsprechend des Sättigungsgrades der einzelnen Gewebe unterschiedlich lange verweilt werden muss. Für Bergseetauchgänge gelten spezielle Tabellen mit kürzeren Null- und längeren Dekompressionszeiten. Von der in Tauchbüchern noch oft beschriebenen Dekompressionsberechnung aufgrund einer für Meereshöhe geltenden Tabelle und einer luftdruckabhängigen fiktiven Tauchtiefe ist abzuraten.

Die vom Druckkammerlabor der Universität Zürich ausgearbeiteten Dekompressionstabellen mit einem breiten Spektrum von 16 Geweben eignen sich besonders bei Wiederholungstauchgängen (non limit Tauchen), wo die langsamen Kompartimente eine gewichtige Rolle spielen.

Die Anpassung von Tabellenwerten an komplizierte Tauchgänge mit häufig wechselnden Tiefen kann nicht optimal sein, da aus Gründen der Sicherheit nur rechteckige Tauchgangprofile aus Grundzeit und maximal erreichter Tiefe berechnet werden können. Das Ergebnis davon ist eine ungenaue und zu lange Dekompression.

Tauchcomputer

Um eine genaue, der effektiven Exposition angepasste Dekompression zu erhalten, müsste ein Tauchgang in kurze, aufeinanderfolgende Tauchgänge ohne jeweilige Dekompression aufgeteilt werden. Je feiner dieser Raster gewählt wird, desto genauer lässt sich die Sättigung bzw. Dekompression berechnen.

Da dieses Verfahren vom Taucher unter Wasser und mittels Tabellen nicht durchführbar ist, wurde oft zur regelwidrigen und gefährlichen Improvisation gegriffen. Erst mit dem ersten voll funktionsfähigen Tauchcomputer, dem DECO-BRAIN II von DIVETRONIC konnte die Forderung nach einer exakt auf den Tauchgang abgestimmten Dekompression erfüllt werden. Ein leistungsfähiger Mikroprozessor berechnet alle 2 sec für die 16 Kompartimente mit ihren Halbsättigungszeiten von 4-635 min die Inertgassättigungen als Funktionen von Druck und Tiefe und kann somit auch die kompliziertesten Tauchgangprofile genauestens erfassen. Aufgrund des momentanen Sättigungsgrades jedes einzelnen Kompartimentes und der vom Druckkammerlabor Zürich bestimmten Übersättigungsfaktoren (Tab. 3) wird dem Taucher die benötigte Dekompression zu jeder Zeit digital angezeigt.

Aber auch dieses Gerät kann die Forderung nach einer individuellen, auf den einzelnen Taucher abgestimmten Dekompression, noch nicht erfüllen, da Faktoren wie körperliche Konstitution und Belastung, sowie Kälteeinwirkung rechnerisch nur bedingt erfasst werden können. Erst dann, wenn ein Tauchcomputer den Zeitpunkt des Entstehens von Gasblasen im Körper in jedem Moment zuverlässig bestimmen kann, wird eine ideale Dekompression möglich sein!

Wir suchen Taucher, die sich an einer Schatztauchergesellschaft beteiligen und in ihrer Freizeit mittauchen.

Einlagen: DM 2000.- bis 3000.-.

Anfragen und Angebote: Chiffre Nr. 85.06.02