

# Berechnung der Maximaltiefe für unbeschränkte Aufenthaltsdauer („ewige Nullzeitentiefe“)

von Beat A. Müller, #NAUI 7708 \*)

## Einleitung

In diesem Papier wird die Berechnung der Maximaltiefe für eine unbeschränkte Expositionsdauer (Aufenthaltszeit auf der Tiefe) hergeleitet (in verschiedenen Publikationen zu diesem Thema auch „ewige Nullzeitentiefe“ genannt).

Es werden die historischen Bezüge zu den Annahmen von Haldane hergestellt, die wesentlichen Berechnungsgrößen aufgrund der neuen Erkenntnisse aufgezeigt und die abzuleitenden Schlussfolgerungen aus konkreten Berechnungsergebnissen erläutert.

## Historischer Rückblick

Haldane ging 1908 davon aus, dass zu jedem Zeitpunkt einer Ueberdruck-Exposition der Umgebungsdruck jeweils symptomlos halbiert werden könne. Gleichzeitig ging er von der weiteren falschen Ueberzeugung aus, dass alle in seinem Modell verwendeten Gewebegruppen (Kompartimente) dieselben Uebersättigungstoleranzen besitzen.

Mathematisch formuliert hiesse das:

$$p_{tot1} / p_{tot2} \leq 2.0 = \text{konstant (alle Gewebe)}$$

oder (bezogen auf den Gewebe-Inertgasdruck):

$$p_{TIGmax} / p_{amb.tol.} \leq 1.58 = \text{konstant}$$

bei Verwendung von Luft ( $\alpha_{IG}$  entspricht  $\alpha_{N_2} = 0.79$ ).

Auf Meereshöhe heisst das ferner, dass von einer Tiefe von 10m (= ca. 2 bar Totaldruck) immer, auch nach extrem langer Ueberdruckexposition, direkt an die Oberfläche (= ca. 1 bar Totaldruck) aufgetaucht werden könnte.

Haldane machte seine Aussagen immer in Bezug auf Meereshöhe. Ueberdruckexpositionen bei vermindertem Oberflächendruck (d.h. Tauchen in anderen Höhenlagen) standen damals nicht zur Diskussion.

Beide Annahmen von Haldane, das hat bereits die Dekompressionsforschung der 50er-Jahre gezeigt, sind falsch. Sowohl die US-NAVY und später auch Bühlmann benutzen einen, auf Versuchen basierenden, linearen Zusammenhang zwischen dem Gewebe-Inertgasdruck und dem nicht zu unterschreitenden tolerierten Umgebungsdruck.

Im wesentlichen kann festgestellt werden, dass

- die Toleranzwerte abhängig sind von der Kompartiments-Halbwertszeit und kleiner werden mit längerer Halbwertszeit
- die Toleranzwerte mit zunehmender Höhenlage (abnehmendem Oberflächendruck) kleiner werden
- zwischen dem Inertgas-Kompartimentsdruck und dem gerade noch symptomlos ertragenen Umgebungsdruck jeweils eine lineare Beziehung besteht (s. Abb. 1a,b)

Zur weiteren Veranschaulichung dieser Zusammenhänge wurden in Abb. 2a,b für die Totaldrücke von 1.013 bar (Meereshöhe), 0.931 bar (700m ü.M.) und 0.750 bar (2500m ü.M.) die nach den Modellen von Haldane (1908) und Bühlmann (ZHL-12/16, 1986-88) zugrundeliegenden zulässigen Gewebe-Inertgasdrücke berechnet und graphisch dargestellt.

\*) B. Müller ist dipl. Masch.Ing.ETH, Tauchlehrer und ehemaliger freier Mitarbeiter von Prof. Dr. A.A. Bühlmann

# Berechnung der Maximaltiefe für unbeschränkte Aufenthaltsdauer („ewige Nullzeitentiefe“)

## Verwendete physikalische Größen

### a) Größen aus dem Bühlmann-Modell ZHL-12 / -16 (graphische Darstellungen s. Abb. 1a,b):

- $a$ : Nullpunktverschiebung der Geraden in Abb. 1a,b (Zusammenhang zwischen  $p_{amb.tol}$  und  $p_{TIG}$ )  
Einheit: bar
- $b$ : Mass für die Steigung der Geraden in Abb. 1a,b (Zusammenhang zwischen  $p_{amb.tol}$  und  $p_{TIG}$ )  
Einheit: dimensionslos
- $p_{IGalv}$ : alveolärer Inertgasdruck (in bar); wird nach Dalton berechnet
- $p_{TIG}$ : Inertgasdruck (in bar) in einer Gewebegruppe (Kompartiment, charakterisiert durch seine Halbwertszeit)
- $p_{amb.tol}$ : kleinster, symptomlos tolerierter Umgebungsdruck (in bar) für eine Gewebegruppe, resp. für die Gesamtheit aller im Modell verwendeten Gewebegruppen

### b) atemphysiologische Größen:

- $p_{H2Oalv}$ : Wasserdampfdruck in den Alveolen  
= 0.0628 bar bei  $T=37^{\circ}\text{C}$
- $p_{CO2alv}$ :  $\text{CO}_2$ -Partialdruck in den Alveolen  
= 0.0544 bar
- $\lambda_{resp}$ : Respirationskoeffizient (u.a. ernährungsabhängig); dimensionslos  
= ca. 0.8 (als Mittelwert)
- $\alpha_{IG}$ : Inertgasanteil im Gemisch; dimensionslos  
= 0.21 bei Luft (für  $\text{N}_2$ )

### c) „Umwelt“-Parameter:

- $\delta_{H2O}$ : Drucksteigerungsfaktor; Einheit bar / m Wassersäule  
Für die Berechnung wurde ein Wert von 0.1 bar / 1m Wassersäule angenommen, was für Salzwasser einen Fehler von ca. -1% und für Süßwasser einen solchen von ca. +2% ergibt.  
Korreakterweise müsste er mit  $\rho_{H2O} * g * \frac{1}{k}$  berechnet werden, wobei
- $\rho_{H2O}$ : Dichte des Wassers (ca. 0.99 ... 1.03 kg/liter)  
 $g$ : Erdbeschleunigung (ca. 9.81 m/sec<sup>2</sup>)  
 $k$ : Umrechnungskonstante auf bar ( $10^5$  Newton/m<sup>2</sup> pro bar)
- $p_{tot.Surf}(H)$ : Totaldruck an der Oberfläche in Funktion der Höhenlage (m ü. M.). Der Ansatz für die IACO-Standardatmosphäre lautet:
- $$p_{tot}(H) = p_{tot}(H_0) * e^{\{-1/k * \rho_L * g * H * 1/p_{tot}(H_0)\}}$$
- dabei ist  $p_{tot}(H_0)$ : Standard-Totaldruck auf Meereshöhe  
= 1.013 bar
- $\rho_L$ : Dichte der Luft; ca. 1.24 kg/m<sup>3</sup>  
 $g$ : Erdbeschleunigung (s. oben)

# Berechnung der Maximaltiefe für unbeschränkte Aufenthaltsdauer („ewige Nullzeitentiefe“)

$H$ : Höhe in m ü.M.  
 $k$ : Umrechnungskonstante (s. oben)  
 $e$ : Basis der natürlichen Logarithmen  
= 2.71828183.....

Die Abb. 3 zeigt die damit erhaltenen Werte für verschiedene Höhenlagen.

$T_{NZmax}$ : gesuchte maximale Tiefe für unbeschränkt lange Exposition (in m)

## Ansatz zur Berechnung

Unbeschränkte Expositionsdauer ist gleichbedeutend mit vollständiger Adaption, d.h. dass alle Gewebe den Inertgas-Partialdruck des Atemgas-Gemisches auf der gesuchten Tiefe erreicht haben:

$$p_{TIG}(\text{alle}) = p_{IGalv}(T_{NZmax}) \quad (\text{Gl. 1})$$

Im Sinne einer worst-case Betrachtung kann ferner von einem zeitlosen Aufstieg ausgegangen werden.

Da sich schon aus der Definition der *unbeschränkten* Aufenthaltsdauer ergibt, dass diese unendlich viel grösser ist als jede reale Aufstiegszeit, kann diese Annahme ohne Genauigkeitseinbusse getroffen werden (d.h. die mögliche Entsättigung während des Aufstiegs wird vernachlässigt).

Dies wiederum bedeutet, dass der Inertgas-Partialdruck in der betrachteten Gewebegruppe beim Erreichen der Oberfläche  $p_{TIG}$  (Surf.) gleich gross ist, wie zuvor im Sättigungszustand auf der gesuchten Tiefe  $T_{NZmax}$ :

$$p_{TIG}(\text{Surf.}) = p_{TIG}(T_{NZmax}) \quad (\text{Gl. 2})$$

Als Gewebegruppe muss diejenige gewählt werden, welche

- einerseits die tiefstmöglichen Uebersättigungstoleranzen hat
  - andererseits die grösstmögliche Halbwertszeit hat
- (bei sehr kurzen Halbwertszeiten kann bei geeigneter Aufstiegs geschwindigkeit die Entsättigung während dieser Phase recht bedeutsam sein und würde den Wert der „ewigen Nullzeitentiefe“ in Richtung grössere Tiefe beeinflussen.)

Diese Kriterien sind mit Kompartiment Nr. 16 im Bühlmann'schen Modell hinlänglich erfüllt (HWZ bei  $N_2$ : = 635 min) .

## Berechnung

Einerseits gilt der Ansatz von Bühlmann, dass der Umgebungsdruck des momentanen Aufenthalts  $p_{amb}$  zu jedem Zeitpunkt grösser oder gleich sein muss wie der nach dem Modell gerade noch symptomlos ertragene tolerierte Umgebungsdruck  $p_{amb.tol.}$  bei einem gegebenen Inertgasdruck  $p_{TIG}$  im Gewebe:

$$p_{amb} \geq p_{amb.tol.} = b * (p_{TIG} - a) \quad (\text{Gl. 3})$$

aufgelöst nach  $p_{TIG}$ :

$$p_{TIG} = \frac{p_{amb.tol.}}{b} + a \quad (\text{Gl. 4})$$

Damit direkt an die Oberfläche aufgestiegen werden kann muss gelten:

# Berechnung der Maximaltiefe für unbeschränkte Aufenthaltsdauer („ewige Nullzeitentiefe“)

---

$$p_{amb.tol.} \leq p_{tot.Surf}(H) \quad (Gl. 5)$$

Andererseits ist gleichzeitig wegen der vollständige Adaption auf der Tiefe:

$$p_{TIG}(T_{NZmax}) = p_{IGalv}(T_{NZmax}) \quad (Gl. 6)$$

und dem zeitlosen Aufstieg:  $p_{TIG}(T_{NZmax}) = p_{TIG}(Surf.) \quad (Gl. 6')$

Nach Dalton kann der alveoläre Inertgas-Partialdruck wie folgt gerechnet werden:

$$p_{IGalv}(T_{NZmax}) = \alpha_{IG} * \left\{ p_{tot.Surf}(H) + T_{NZmax} * \delta_{H2O} - p_{H2Oalv} + \frac{(1 - \lambda_{resp})}{\lambda_{resp}} * p_{CO2alv} \right\} \quad (Gl. 7)$$

Wir setzen  $p_{IGalv}(T_{NZmax})$  aus Gl. 7 in Gl. 6 ein und ersetzen gleichzeitig in Gl. 6  $p_{TIG}(T_{NZmax})$  durch  $p_{TIG}$  aus Gl. 4: Damit erhalten wir:

$$\frac{p_{amb.tol.}}{b} + a = \alpha_{IG} * \left\{ p_{tot.Surf}(H) + T_{NZmax} * \delta_{H2O} - p_{H2Oalv} + \frac{(1 - \lambda_{resp})}{\lambda_{resp}} * p_{CO2alv} \right\} \quad (Gl. 8)$$

Durch Ersetzen von  $p_{amb.tol.}$  durch  $p_{tot.Surf}$  (s. Gl. 5) und auflösen nach der bisher unbekanntem Tiefe  $T_{NZmax}$  erhalten wir das folgende Resultat:

$$T_{NZmax} = \frac{1}{\delta_{H2O}} * \left[ \frac{1}{\alpha_{IG}} * \left\{ \frac{p_{tot.Surf}(H)}{b} + a \right\} - p_{tot.Surf}(H) + p_{H2Oalv} - \frac{(1 - \lambda_{resp})}{\lambda_{resp}} * p_{CO2alv} \right] \quad (Gl. 9)$$

Auf den beiliegenden Excel-Sheets wurden mit diesen mathematischen Zusammenhängen die Maximaltiefen für unbeschränkt lange Exposition auf verschiedenen Höhenlagen bei Verwendung von **Luft** (Abb. 4a,b), **Nitrox36** [36% O<sub>2</sub>] (Abb. 5a,b) und **Nitrox50** [50% O<sub>2</sub>] (Abb. 6a,b) berechnet.

Zum einfacheren Lesen wurden die Resultate sowohl für ZHL-12 wie für ZHL-16 in den nachfolgenden 2 Tabellen zusammengefasst:

# Berechnung der Maximaltiefe für unbeschränkte Aufenthaltsdauer („ewige Nullzeitentiefe“)

Max. Tiefenwerte für unbeschränkte Exposition				
Höhe [m ü.M.]	Luft (21% O <sub>2</sub> )	Nitrox32	Nitrox36	Nitrox50
0	6.9	9.6	10.8	16.5
400	6.8	9.3	10.5	16.0
700	6.7	9.2	10.3	15.6
1500	6.4	8.7	9.8	14.7
2500	6.1	8.2	9.2	13.7

Tabelle 1: Werte von  $T_{NZmax}$  [in m] nach ZHL-12

Max. Tiefenwerte für unbeschränkte Exposition				
Höhe [m ü.M.]	Luft (21% O <sub>2</sub> )	Nitrox32	Nitrox36	Nitrox50
0	6.6	9.2	10.4	16.0
400	6.4	9.0	10.1	15.5
700	6.3	8.8	9.9	15.1
1500	6.1	8.3	9.4	14.2
2500	5.8	7.8	8.8	13.2

Tabelle 2: Werte von  $T_{NZmax}$  [in m] nach ZHL-16

## Schlussfolgerungen

Aus den mathematischen Beziehungen in der Gleichung, sowie den zahlenmässigen Ergebnissen lassen sich u.a. die nachfolgenden Schlüsse ziehen :

### 1. Die Maximaltiefe für eine unbeschränkte Expositionsdauer ist im wesentlichen abhängig von

- ◆ der Höhe über Meer, resp. dem *Absolutdruck* an der *Oberfläche*
- ◆ dem verwendeten Atemgasgemisch (*Inertgas-Anteil*)
- ◆ der Gewebegruppe mit den *kleinsten* Uebersättigungskoeffizienten und gleichzeitig *längster* Halbwertszeit (bei zeitlosem Aufstieg spielt der zweite Faktor keine Rolle)

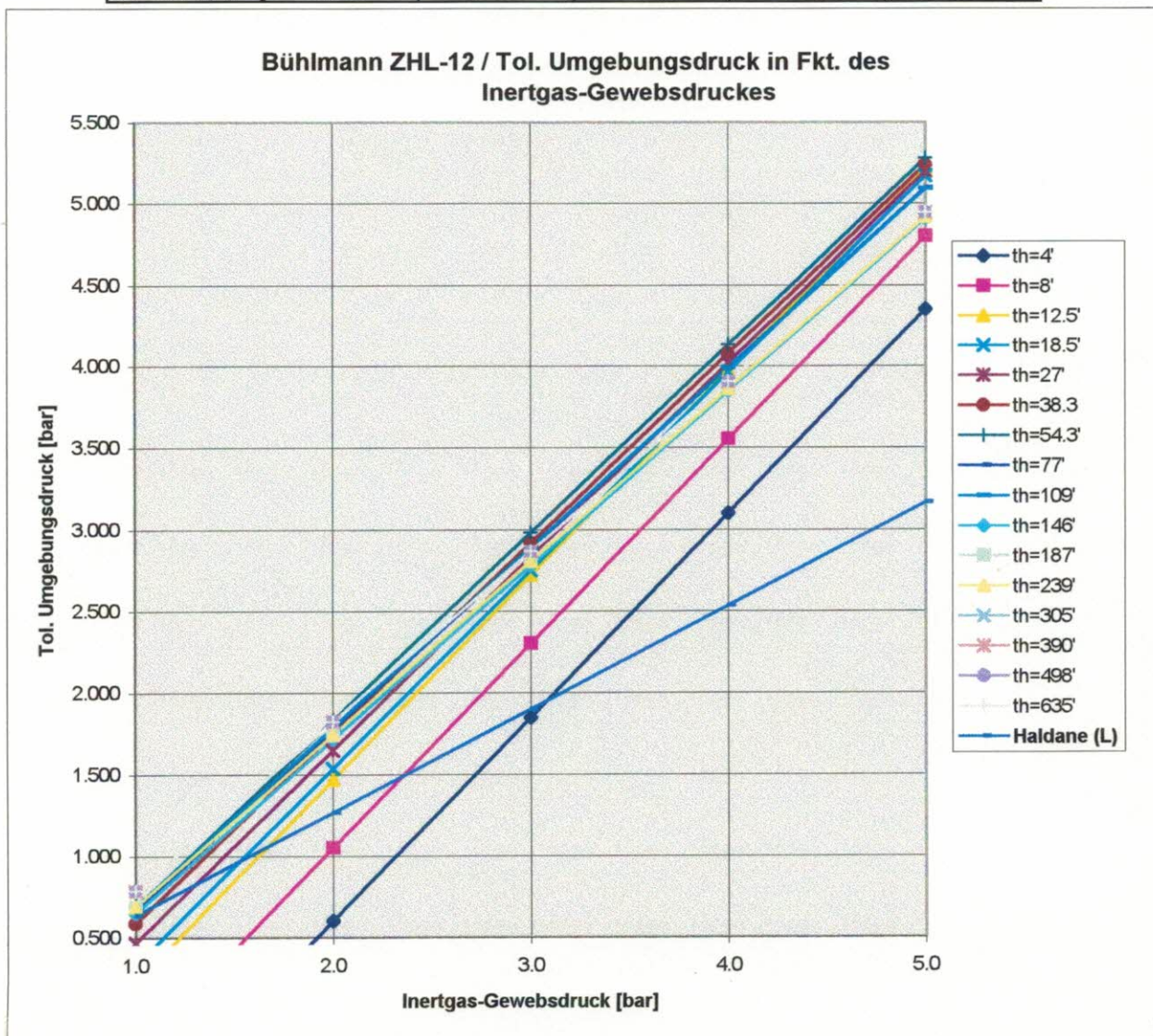
# **Berechnung der Maximaltiefe für unbeschränkte Aufenthaltsdauer („ewige Nullzeitentiefe“)**

---

- 2. die Maximaltiefe für unbeschränkt lange Exposition nimmt mit zunehmender Höhenlage (kleiner werdendem Oberflächendruck) *ab***
- 3. erwartungsgemäss wird die Maximaltiefe mit abnehmendem Inertgas-Anteil *grösser***
- 4. insbesondere ist die Maximaltiefe sowohl *merklich kleiner* als Haldane postuliert hatte als auch kleiner als bei der alten US-NAVY Tabelle angenommen wurde (30 ft; ca. 9m): Diese wird leider immer noch von verschiedenen amerikanischen Tauchverbänden wider besseres Wissen benutzt.**
- 5. Die Toleranzwerte sind im Modell ZHL-16 (zumindest für die untersuchte Gewebegruppe) etwas konservativer als in der Version ZHL-12.**
- 6. Mit Nitrox36 kann immerhin bereits bis 10m, mit Nitrox50 bereits bis 15m unbeschränkt lange getaucht werden, ohne den kritischen Sauerstoffpartialdruck zu überschreiten.**

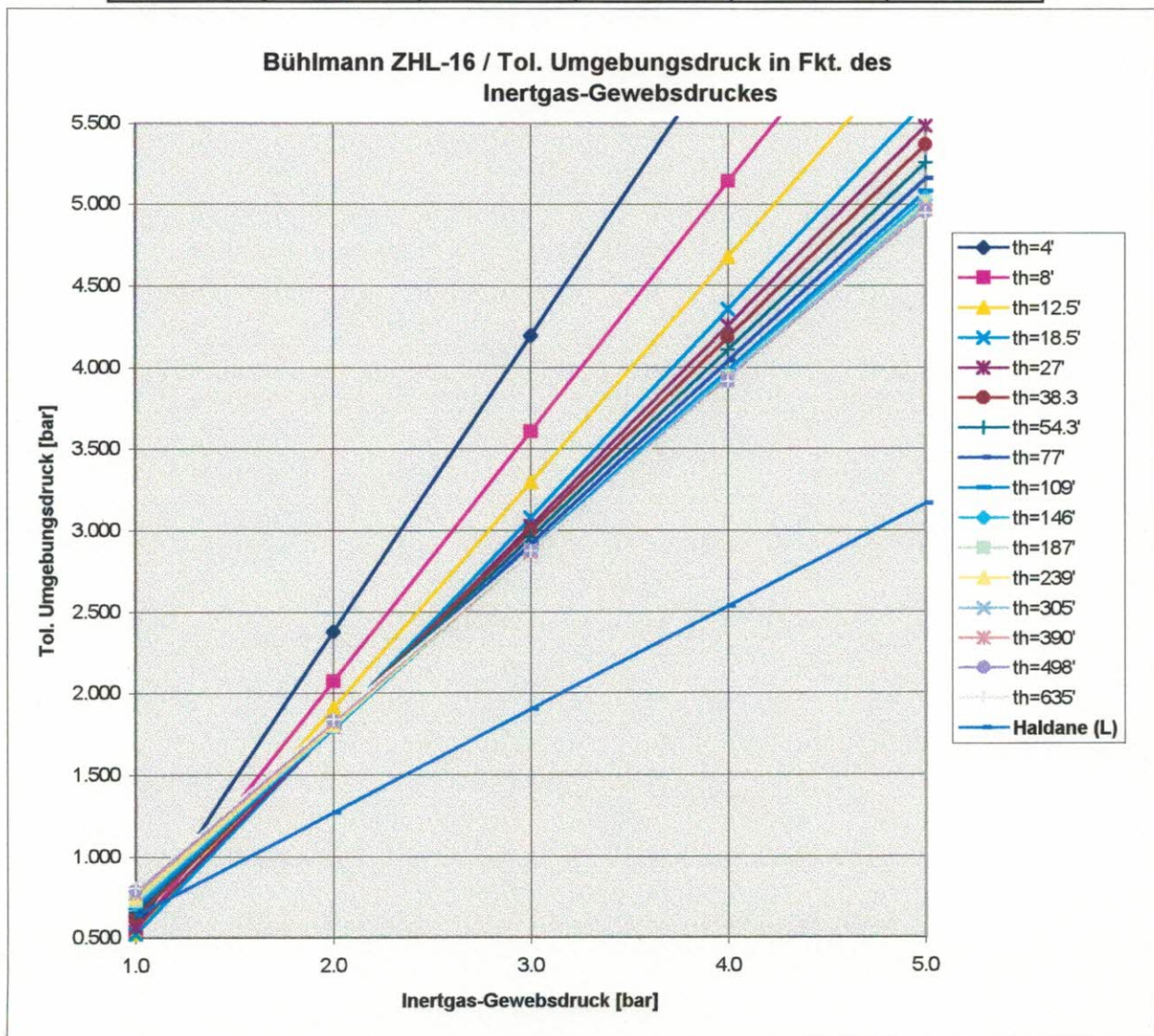
## Abb. 1a: Bühlmann ZHL-12 / Tot. Umgebungsdruck in Fkt. des Inertgas-Gewebsdruckes

Halbwertszeit	p_TIG [bar]= 1.0	p_TIG [bar]= 2.0	p_TIG [bar]= 3.0	p_TIG [bar]= 4.0	p_TIG [bar]= 5.0
th=4'	-0.650	0.600	1.850	3.100	4.350
th=8'	-0.200	1.050	2.300	3.550	4.800
th=12.5'	0.220	1.470	2.720	3.970	5.220
th=18.5'	0.329	1.539	2.750	3.961	5.171
th=27'	0.466	1.650	2.833	4.017	5.200
th=38.3	0.588	1.751	2.913	4.076	5.239
th=54.3'	0.681	1.831	2.980	4.130	5.279
th=77'	0.666	1.774	2.881	3.989	5.096
th=109'	0.686	1.788	2.889	3.990	5.092
th=146'	0.649	1.714	2.779	3.844	4.909
th=187'	0.688	1.745	2.802	3.859	4.916
th=239'	0.688	1.745	2.802	3.859	4.916
th=305'	0.785	1.824	2.864	3.903	4.943
th=390'	0.785	1.824	2.864	3.903	4.943
th=498'	0.785	1.824	2.864	3.903	4.943
th=635'	0.785	1.824	2.864	3.903	4.943
Haldane (L)	0.633	1.266	1.899	2.532	3.165



## Abb. 1b: Bühlmann ZHL-16 / Tot. Umgebungsdruck in Fkt. des Inertgas-Gewebsdruckes

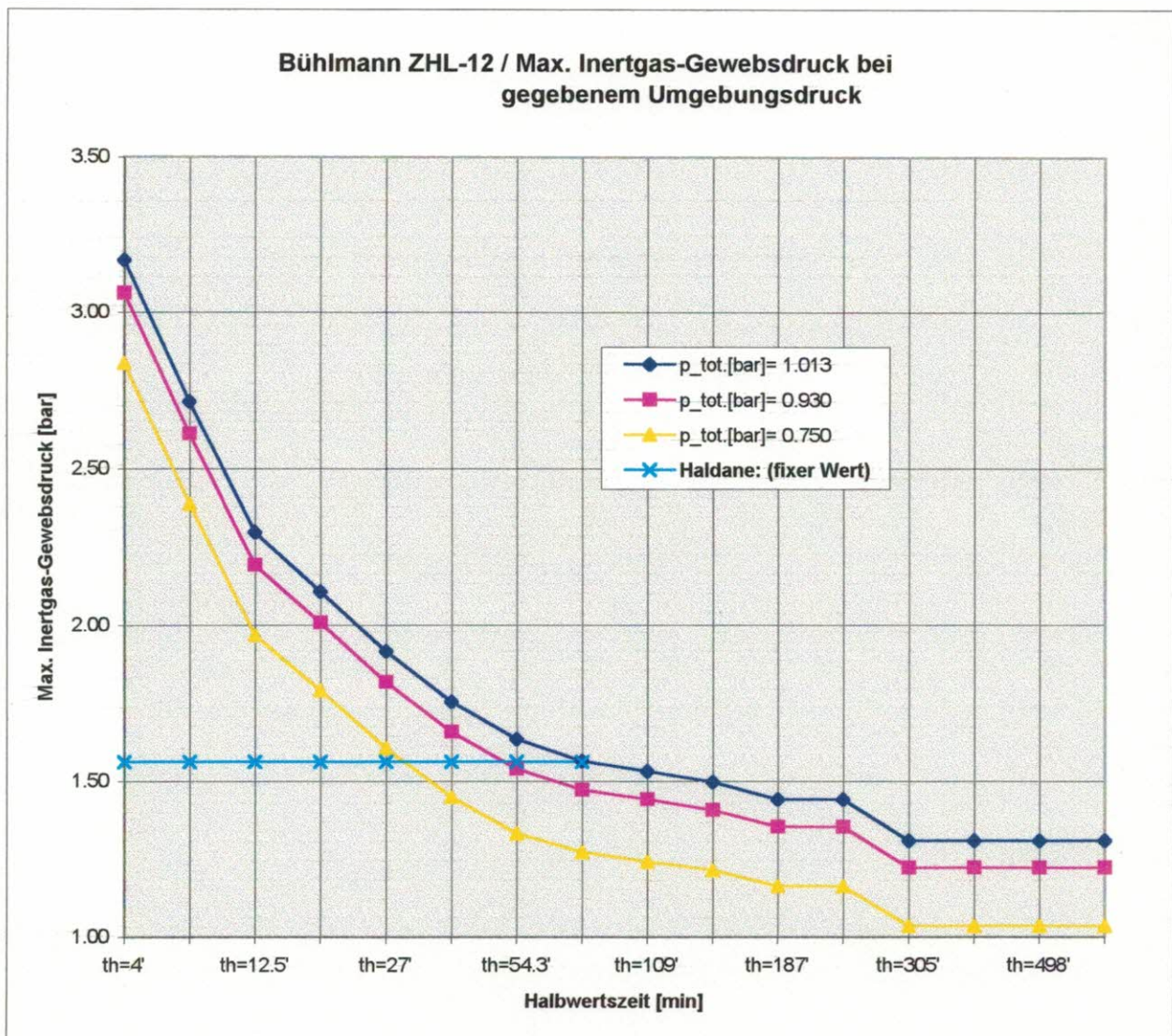
	p_TIG [bar]= 1.0	p_TIG [bar]= 2.0	p_TIG [bar]= 3.0	p_TIG [bar]= 4.0	p_TIG [bar]= 5.0
Halbwertszeit					
th=4'	0.558	2.376	4.195	6.013	7.831
th=8'	0.535	2.070	3.605	5.141	6.676
th=12.5'	0.523	1.908	3.292	4.677	6.061
th=18.5'	0.522	1.800	3.078	4.356	5.634
th=27'	0.564	1.795	3.025	4.256	5.486
th=38.3'	0.626	1.811	2.997	4.183	5.368
th=54.3'	0.656	1.806	2.956	4.107	5.257
th=77'	0.672	1.795	2.917	4.039	5.162
th=109'	0.681	1.781	2.881	3.981	5.081
th=146'	0.705	1.789	2.873	3.958	5.042
th=187'	0.723	1.796	2.870	3.943	5.016
th=239'	0.741	1.805	2.868	3.932	4.995
th=305'	0.770	1.825	2.881	3.936	4.991
th=390'	0.774	1.822	2.870	3.917	4.965
th=498'	0.789	1.831	2.872	3.913	4.955
th=635'	0.803	1.839	2.875	3.911	4.947
Haldane (L)	0.633	1.266	1.899	2.532	3.165





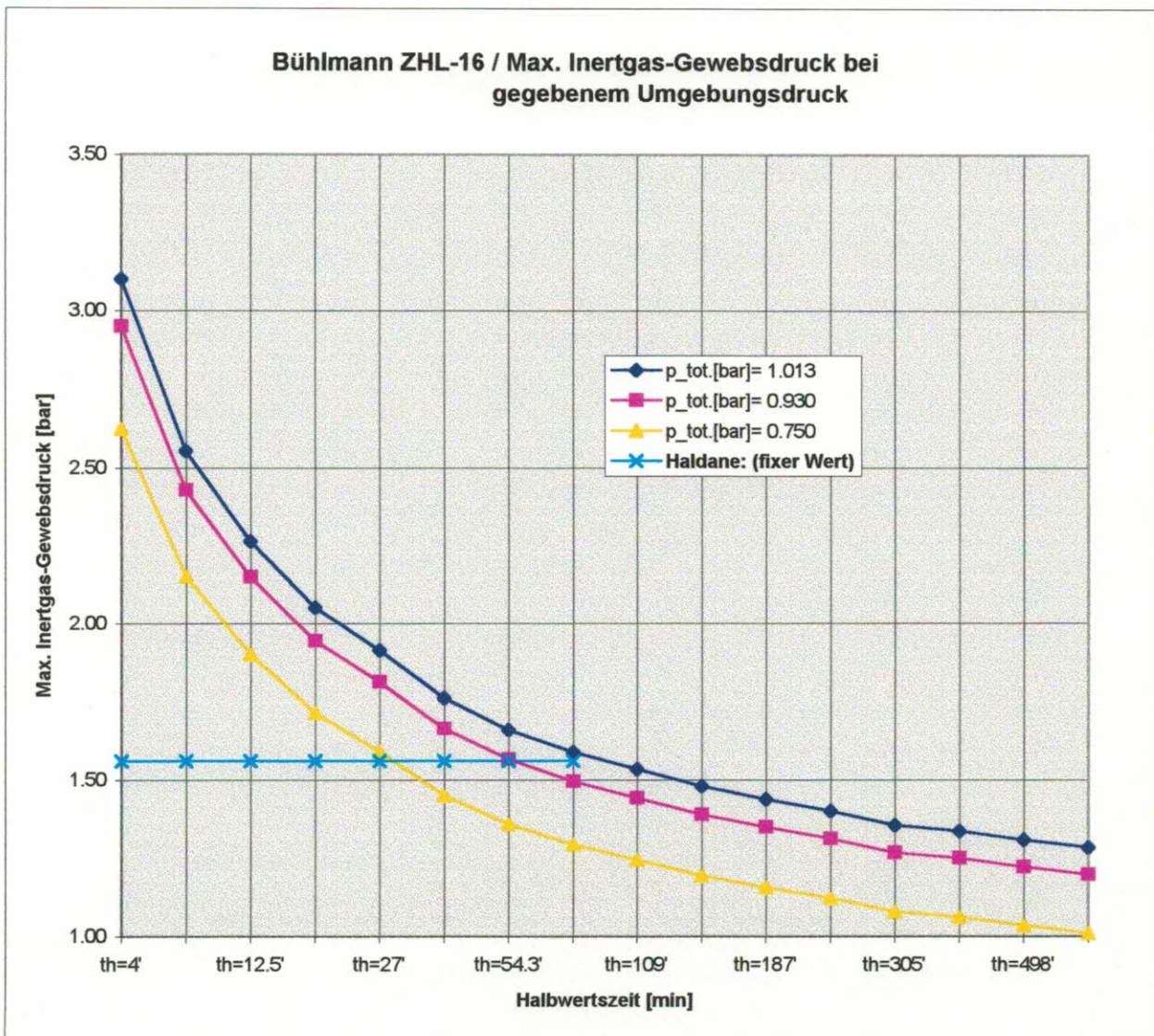
## Abb. 2a: Bühlmann ZHL-12 / Max. Inertgas-Gewebsdruck bei gegebenem Umgebungsdruck

Halbwertszeit	p_tot.[bar]= 1.013	p_tot.[bar]= 0.930	p_tot.[bar]= 0.750	Haldane: (fixer Wert)	verw. Halb- wertszeit
th=4'	3.166	3.063	2.838	1.56	5'
th=8'	2.716	2.613	2.388	1.56	10'
th=12.5'	2.296	2.193	1.968		
th=18.5'	2.108	2.008	1.790	1.56	20'
th=27'	1.916	1.818	1.605		
th=38.3'	1.753	1.656	1.447	1.56	40'
th=54.3'	1.632	1.537	1.330		
th=77'	1.563	1.471	1.272	1.56	75'
th=109'	1.531	1.439	1.241	keine weiteren Kompartimente mehr berücksichtigt	
th=146'	1.495	1.406	1.215		
th=187'	1.440	1.352	1.162		
th=239'	1.440	1.352	1.162		
th=305'	1.308	1.222	1.035		
th=390'	1.308	1.222	1.035		
th=498'	1.308	1.222	1.035		
th=635'	1.308	1.222	1.035		



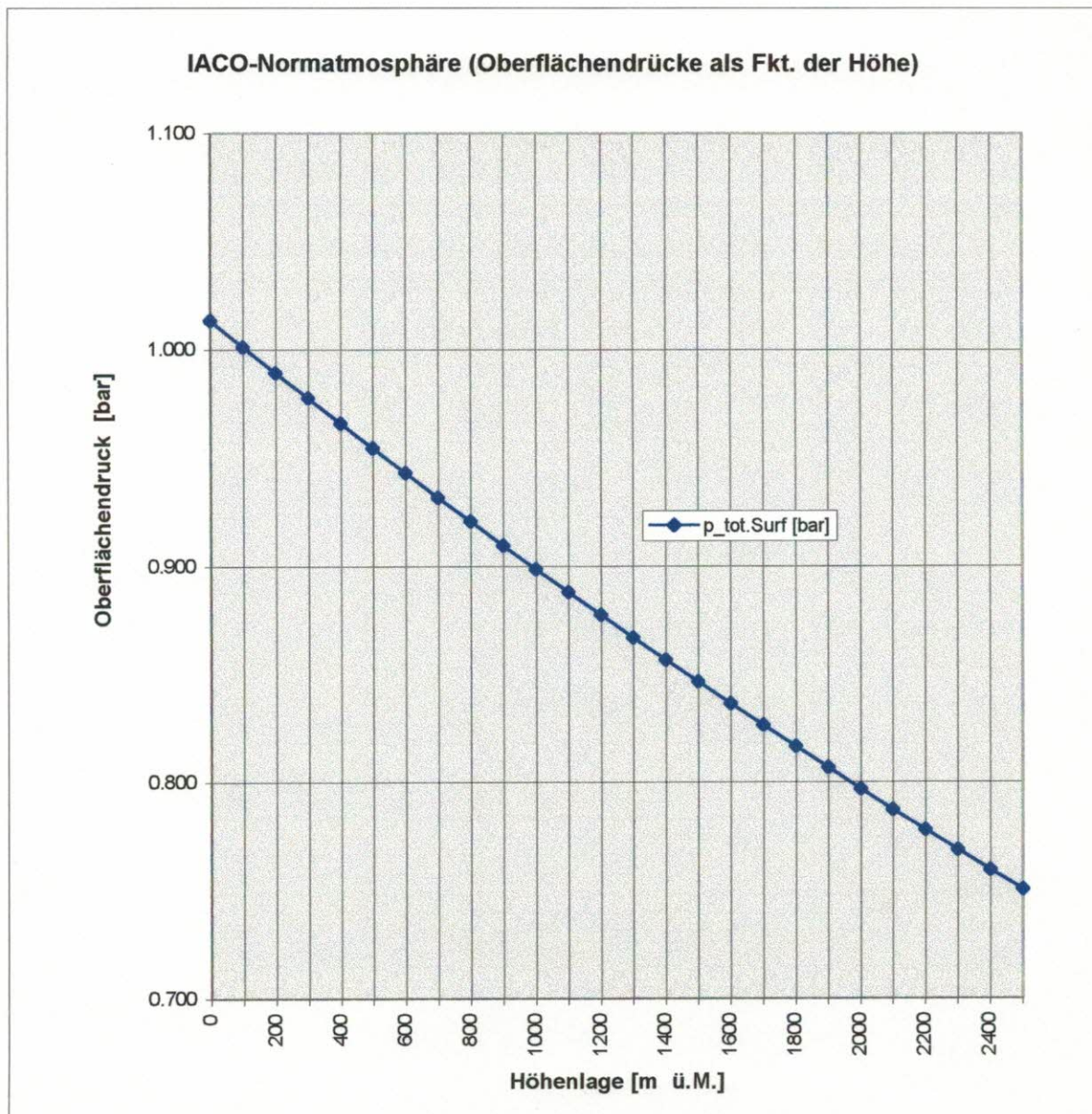
## Abb. 2b: Bühlmann ZHL-16 / Max. Inertgas-Gewebsdruck bei gegebenem Umgebungsdruck

Halbwertszeit	p_tot.[bar]= 1.013	p_tot.[bar]= 0.930	p_tot.[bar]= 0.750	Haldane: (fixer Wert)	verw. Halb- wertszeit
th=4'	3.102	2.951	2.624	1.56	5'
th=8'	2.555	2.428	2.151	1.56	10'
th=12.5'	2.264	2.150	1.900		
th=18.5'	2.051	1.945	1.715	1.56	20'
th=27'	1.913	1.811	1.590		
th=38.3	1.761	1.663	1.449	1.56	40'
th=54.3'	1.660	1.565	1.357		
th=77'	1.587	1.494	1.292	1.56	75'
th=109'	1.533	1.442	1.244	keine weiteren Kompartimente mehr berücksichtigt	
th=146'	1.478	1.388	1.193		
th=187'	1.437	1.348	1.155		
th=239'	1.400	1.311	1.120		
th=305'	1.354	1.266	1.076		
th=390'	1.335	1.248	1.060		
th=498'	1.307	1.221	1.033		
th=635'	1.282	1.196	1.010		



### Abb. 3 : IACO - Normatmosphäre (Oberflächendruck als Funktion der Höhe)

Höhe [m] ü.M.	p_tot.Surf [bar]	
0	1.013	<== Meereshöhe
300	0.977	
400	0.966	<== Höhe Zürichsee
500	0.954	
700	0.932	<== untere Höhe Bergseetabellen nach Bühlmann
1000	0.899	
1200	0.877	
1500	0.846	
2000	0.797	
2500	0.750	<== obere Höhe Bergseetabellen nach Bühlmann
3000	0.707	
4000	0.627	
5000	0.556	



# Abb. 4a: Berechnung der Maximaltiefe für eine unbeschränkte Aufenthaltsdauer

in Abhängigkeit von Modell (ZHL-12), Höhe, und Atemgasgemisch während des TG's

Physikalische Konstanten und Atemgas								
alf_N2surf	0.790	--	dp_H2O/dT	1.0000	bar/10m	p_H2O	0.0628	bar
alf_N2TG	0.790	--	k_resp	0.8	--	p_CO2	0.0544	bar

Gewebe Modell (ZHL-12)				
nr.	tH	a	b	k
--	min	bar	--	1 / min
16	635.0	0.2550	0.9620	0.001092

Umgebungsbedingungen													
		0	200	300	400	500	700	1000	1200	1500	2000	2500	3000
Höhe H	m ü.M.	0	200	300	400	500	700	1000	1200	1500	2000	2500	3000
psurf	[H] bar	1.0132	0.9892	0.9774	0.9657	0.9542	0.9315	0.8986	0.8773	0.8462	0.7969	0.7505	0.7068
pN2	[H] bar	0.7616	0.7426	0.7332	0.7240	0.7149	0.6970	0.6710	0.6542	0.6296	0.5907	0.5540	0.5195
pN2_TG	[H] bar	0.7616	0.7426	0.7332	0.7240	0.7149	0.6970	0.6710	0.6542	0.6296	0.5907	0.5540	0.5195
pTIGmax	[H] bar	1.3082	1.2832	1.2710	1.2588	1.2469	1.2233	1.1891	1.1669	1.1346	1.0834	1.0351	0.9897
Resultate (maximale Tiefe mit unbeschränkter Aufenthaltsdauer)													
max. Tiefe	m	6.9	6.8	6.8	6.8	6.7	6.7	6.6	6.5	6.4	6.2	6.1	6.0
ptot_T	[H] bar	1.7052	1.6735	1.6580	1.6427	1.6275	1.5977	1.5544	1.5263	1.4855	1.4206	1.3595	1.3020
pN2_T	[H] bar	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082
pO2_T	[H] bar	0.3478	0.3478	0.3478	0.3478	0.3478	0.3478	0.3478	0.3478	0.3478	0.3478	0.3478	0.3478

- Zu beachten:
1. TG-Profil ist absolut rechteckig
  2. entscheidend ist längste HWZ mit tiefsten Gewebe-Grenzwerten
  3. Vorsättigung ist unerheblich

# Abb. 4b: Berechnung der Maximaltiefe für eine unbeschränkte Aufenthaltsdauer

in Abhängigkeit von Modell (ZHL-16), Höhe, und Atemgasgemisch während des TG's

Physikalische Konstanten und Atemgas								
alf_N2surf	0.790	--	dp_H2O/dT	1.0000	bar/10m	p_H2O	0.0628	bar
alf_N2TG	0.790	--	k_resp	0.8	--	p_CO2	0.0544	bar

Gewebemodell (ZHL-16Table)

nr.	tH	a	b	k
--	min	bar	--	1 / min
16	635.0	0.2327	0.9653	0.001092

Umgebungsbedingungen

Höhe H	m	ü.M.	0	200	300	400	500	700	1000	1200	1500	2000	2500	3000
psurf	[H]	bar	1.0132	0.9892	0.9774	0.9657	0.9542	0.9315	0.8986	0.8773	0.8462	0.7969	0.7505	0.7068
pN2	[H]	bar	0.7616	0.7426	0.7332	0.7240	0.7149	0.6970	0.6710	0.6542	0.6296	0.5907	0.5540	0.5195
pN2_TG	[H]	bar	0.7616	0.7426	0.7332	0.7240	0.7149	0.6970	0.6710	0.6542	0.6296	0.5907	0.5540	0.5195
pTIGmax	[H]	bar	1.2823	1.2574	1.2452	1.2331	1.2212	1.1977	1.1636	1.1415	1.1093	1.0583	1.0102	0.9649

Resultate (maximale Tiefe mit unbeschränkter Aufenthaltsdauer)

max. Tiefe	m	6.6	6.5	6.4	6.3	6.2	6.1	5.9	5.8	5.6				
ptot_T	[H]	bar	1.6724	1.6409	1.6254	1.6101	1.5950	1.5653	1.5221	1.4941	1.4534	1.3888	1.3279	1.2705
pN2_T	[H]	bar	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823
pO2_T	[H]	bar	0.3409	0.3409	0.3409	0.3409	0.3409	0.3409	0.3409	0.3409	0.3409	0.3409	0.3409	0.3409

Zu beachten:

1. TG-Profil ist absolut rechteckig
2. entscheidend ist längste HWZ mit tiefsten Gewebe-Grenzwerten
3. Vorsättigung ist unerheblich

# Abb. 5a: Berechnung der Maximaltiefe für eine unbeschränkte Aufenthaltsdauer

in Abhängigkeit von Modell (ZHL-12), Höhe, und Atemgasgemisch während des TG's

Physikalische Konstanten und Atemgas					
alf_N2surf	--	dp_H2O/dT	1.0000 bar/10m	p_H2O	0.0628 bar
alf_N2TG	--	k_resp	0.8	p_CO2	0.0544 bar

Gewebe Modell (ZHL-12)				
nr.	tH	a	b	k
--	min	bar	--	1 / min
16	635.0	0.2550	0.9620	0.001092

Umgebungsbedingungen														
Höhe H	m	ü.M.	0	200	300	400	500	700	1000	1200	1500	2000	2500	3000
psurf [H]	bar		1.0132	0.9892	0.9774	0.9657	0.9542	0.9315	0.8986	0.8773	0.8462	0.7969	0.7505	0.7068
pN2 [H]	bar		0.7616	0.7426	0.7332	0.7240	0.7149	0.6970	0.6710	0.6542	0.6296	0.5907	0.5540	0.5195
pN2_TG [H]	bar		0.6170	0.6016	0.5940	0.5866	0.5792	0.5647	0.5436	0.5300	0.5101	0.4785	0.4488	0.4208
pTIGmax [H]	bar		1.3082	1.2832	1.2710	1.2588	1.2469	1.2233	1.1891	1.1669	1.1346	1.0834	1.0351	0.9897
Resultate (maximale Tiefe mit unbeschränkter Aufenthaltsdauer)														
max. Tiefe	m		10.8	10.7	10.6	10.5	10.4	10.3	10.1	10.0	9.8	9.5	9.2	8.9
ptot_T [H]	bar		2.0933	2.0543	2.0351	2.0161	1.9974	1.9606	1.9071	1.8725	1.8221	1.7420	1.6666	1.5956
pN2_T [H]	bar		1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082
pO2_T [H]	bar		0.7359	0.7359	0.7359	0.7359	0.7359	0.7359	0.7359	0.7359	0.7359	0.7359	0.7359	0.7359

- Zu beachten:
1. TG-Profil ist absolut rechteckig
  2. entscheidend ist längste HWZ mit tiefsten Gewebe-Grenzwerten
  3. Vorsättigung ist unerheblich

# Abb. 5b: Berechnung der Maximaltiefe für eine unbeschränkte Aufenthaltsdauer

in Abhängigkeit von Modell (ZHL-16), Höhe, und Atemgasgemisch während des TG's

Physikalische Konstanten und Atemgas				
alf_N2surf	0.790	--	dp_H2O/dT	p_H2O
alf_N2TG	0.640	--	k_resp	p_CO2

Gewebe Modell (ZHL-16Table)				
nr.	th	a	b	k
--	min	bar	--	1 / min
16	635.0	0.2327	0.9653	0.001092

Umgebungsbedingungen													
Höhe H	m	ü.M.	0	200	300	400	500	700	1000	1500	2000	2500	3000
psurf	[H]	bar	1.0132	0.9892	0.9774	0.9657	0.9542	0.9315	0.8986	0.8773	0.7969	0.7505	0.7068
pN2	[H]	bar	0.7616	0.7426	0.7332	0.7240	0.7149	0.6970	0.6710	0.6542	0.5907	0.5540	0.5195
pN2_TG	[H]	bar	0.6170	0.6016	0.5940	0.5866	0.5792	0.5647	0.5436	0.5300	0.4785	0.4488	0.4208
pTIGmax	[H]	bar	1.2823	1.2574	1.2452	1.2331	1.2212	1.1977	1.1636	1.1415	1.0583	1.0102	0.9649
Resultate (maximale Tiefe mit unbeschränkter Aufenthaltsdauer)													
max. Tiefe	m		10.4	10.2	10.2	10.1	10.0	9.9	9.7	9.6	9.1	8.8	8.5
ptot_T	[H]	bar	2.0528	2.0139	1.9948	1.9759	1.9573	1.9206	1.8673	1.8328	1.7027	1.6276	1.5568
pN2_T	[H]	bar	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823
pO2_T	[H]	bar	0.7213	0.7213	0.7213	0.7213	0.7213	0.7213	0.7213	0.7213	0.7213	0.7213	0.7213

- Zu beachten:
1. TG-Profil ist absolut rechteckig
  2. entscheidend ist längste HWZ mit tiefsten Gewebe-Grenzwerten
  3. Vorsättigung ist unerheblich

# Abb. 6a: Berechnung der Maximaltiefe für eine unbeschränkte Aufenthaltsdauer

in Abhängigkeit von Modell (ZHL-12), Höhe, und Atemgasgemisch während des TG's

Physikalische Konstanten und Atemgas								
alf_N2surf	0.790	--	dp_H2O/dT	1.0000	bar/10m	p_H2O	0.0628	bar
alf_N2TG	0.500	--	k_resp	0.8	--	p_CO2	0.0544	bar

Gewebemodell (ZHL-12)					
nr.	th	a	b	k	
--	min	bar	--	1 / min	
16	635.0	0.2550	0.9620	0.001092	

Umgebungsbedingungen														
Höhe H	m	ü.M.	0	200	300	400	500	700	1000	1200	1500	2000	2500	3000
psurf [H]	bar		1.0132	0.9892	0.9774	0.9657	0.9542	0.9315	0.8986	0.8773	0.8462	0.7969	0.7505	0.7068
pN2 [H]	bar		0.7616	0.7426	0.7332	0.7240	0.7149	0.6970	0.6710	0.6542	0.6296	0.5907	0.5540	0.5195
pN2_TG [H]	bar		0.4820	0.4700	0.4641	0.4582	0.4525	0.4412	0.4247	0.4140	0.3985	0.3739	0.3506	0.3288
pTIGmax [H]	bar		1.3082	1.2832	1.2710	1.2588	1.2469	1.2233	1.1891	1.1669	1.1346	1.0834	1.0351	0.9897
Resultate (maximale Tiefe mit unbeschränkter Aufenthaltsdauer)														
max. Tiefe	m		16.5	16.3	16.1	16.0	15.9	15.6	15.3	15.1	14.7	14.2	13.7	13.2
ptot_T [H]	bar		2.6656	2.6157	2.5911	2.5669	2.5429	2.4959	2.4273	2.3830	2.3185	2.2160	2.1195	2.0286
pN2_T [H]	bar		1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082
pO2_T [H]	bar		1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082

- Zu beachten:
1. TG-Profil ist absolut rechteckig
  2. entscheidend ist längste HWZ mit tiefsten Gewebe-Grenzwerten
  3. Vorsättigung ist unerheblich



# Abb. 6b: Berechnung der Maximaltiefe für eine unbeschränkte Aufenthaltsdauer

in Abhängigkeit von Modell (ZHL-16), Höhe, und Atemgasgemisch während des TG's

Physikalische Konstanten und Atemgas								
alf_N2surf	0.790	--	dp_H2O/dT	1.0000	bar/10m	p_H2O	0.0628	bar
alf_N2TG	0.500	--	k_resp	0.8	--	p_CO2	0.0544	bar

Gewebemodell (ZHL-16Table)					
nr.	tH	a	b	k	
--	min	bar	--	1 / min	
16	635.0	0.2327	0.9653	0.001092	

Umgebungsbedingungen														
Höhe H	m	ü.M.	0	200	300	400	500	700	1000	1200	1500	2000	2500	3000
psurf	[H]	bar	1.0132	0.9892	0.9774	0.9657	0.9542	0.9315	0.8986	0.8773	0.8462	0.7969	0.7505	0.7068
pN2	[H]	bar	0.7616	0.7426	0.7332	0.7240	0.7149	0.6970	0.6710	0.6542	0.6296	0.5907	0.5540	0.5195
pN2_TG	[H]	bar	0.4820	0.4700	0.4641	0.4582	0.4525	0.4412	0.4247	0.4140	0.3985	0.3739	0.3506	0.3288
pTIGmax	[H]	bar	1.2823	1.2574	1.2452	1.2331	1.2212	1.1977	1.1636	1.1415	1.1093	1.0583	1.0102	0.9649
Resultate (maximale Tiefe mit unbeschränkter Aufenthaltsdauer)														
max. Tiefe	m		16.0	15.7	15.6	15.5	15.4	15.1	14.8	14.5	14.2	13.7	13.2	12.7
ptot_T	[H]	bar	2.6138	2.5640	2.5396	2.5154	2.4915	2.4446	2.3764	2.3322	2.2679	2.1657	2.0695	1.9789
pN2_T	[H]	bar	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823
pO2_T	[H]	bar	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823

- Zu beachten:
1. TG-Profil ist absolut rechteckig
  2. entscheidend ist längste HWZ mit tiefsten Gewebe-Grenzwerten
  3. Vorsättigung ist unerheblich

# Abb. 7a: Berechnung der Maximaltiefe für unbeschränkte Aufenthaltsdauer

in Abhängigkeit von Modell (ZHL-12), Höhe, und Atemgasgemisch während des TG's

Physikalische Konstanten und Atemgas								
alf_N2surf	0.790	--	dp_H2O/dT	1.0000	bar/10m	p_H2O	0.0628	bar
alf_N2TG	0.500	--	k_resp	0.8	--	p_CO2	0.0544	bar

NITROX50

Gewebemodell (ZHL-12)					
nr.	tH	a	b	k	
--	min	bar	--	1 / min	
16	635.0	0.2550	0.9620	0.001092	

Umgebungsbedingungen														
Höhe H	m	ü.M.	0	200	300	400	500	700	1000	1200	1500	2000	2500	3000
psurf [H]	bar		1.0132	0.9892	0.9774	0.9657	0.9542	0.9315	0.8986	0.8773	0.8462	0.7969	0.7505	0.7068
pN2 [H]	bar		0.7616	0.7426	0.7332	0.7240	0.7149	0.6970	0.6710	0.6542	0.6296	0.5907	0.5540	0.5195
pN2_TG [H]	bar		0.4820	0.4700	0.4641	0.4582	0.4525	0.4412	0.4247	0.4140	0.3985	0.3739	0.3506	0.3288
pTIGmax [H]	bar		1.3082	1.2832	1.2710	1.2588	1.2469	1.2233	1.1891	1.1669	1.1346	1.0834	1.0351	0.9897
Resultate (maximale Tiefe mit unbeschränkter Aufenthaltsdauer)														
max. Tiefe	m		16.5	16.3	16.1	16.0	15.9	15.6	15.3	15.1	14.7	14.2	13.7	13.2
ptot_T [H]	bar		2.6656	2.6157	2.5911	2.5669	2.5429	2.4959	2.4273	2.3830	2.3185	2.2160	2.1195	2.0286
pN2_T [H]	bar		1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082
pO2_T [H]	bar		1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082	1.3082

Zu beachten:

1. TG-Profil ist absolut rechteckig
2. entscheidend ist längste HWZ mit tiefsten Gewebe-Grenzwerten
3. Vorsättigung ist unerheblich

# Abb. 7b: Berechnung der Maximaltiefe für unbeschränkte Aufenthaltsdauer

in Abhängigkeit von Modell (ZHL-16), Höhe, und Atemgasemisch während des TG's

Physikalische Konstanten und Atemgas								
alf_N2surf	0.790	--	dp_H2O/dT	1.0000	bar/10m	p_H2O	0.0628	bar
alf_N2TG	0.500	--	k_resp	0.8	--	p_CO2	0.0544	bar

NITROX50

Gewebemodell (ZHL-16Table)					
nr.	tH	a	b	k	
--	min	bar	--	1 / min	
16	635.0	0.2327	0.9653	0.001092	

Umgebungsbedingungen														
Höhe H	m	ü.M.	0	200	300	400	500	700	1000	1200	1500	2000	2500	3000
psurf [H]	bar		1.0132	0.9892	0.9774	0.9657	0.9542	0.9315	0.8986	0.8773	0.8462	0.7969	0.7505	0.7068
pN2 [H]	bar		0.7616	0.7426	0.7332	0.7240	0.7149	0.6970	0.6710	0.6542	0.6296	0.5907	0.5540	0.5195
pN2_TG [H]	bar		0.4820	0.4700	0.4641	0.4582	0.4525	0.4412	0.4247	0.4140	0.3985	0.3739	0.3506	0.3288
pTIGmax [H]	bar		1.2823	1.2574	1.2452	1.2331	1.2212	1.1977	1.1636	1.1415	1.1093	1.0583	1.0102	0.9649

Resultate (maximale Tiefe mit unbeschränkter Aufenthaltsdauer)														
max. Tiefe	m		16.0	15.7	15.6	15.5	15.4	15.1	14.8	14.5	14.2	13.7	13.2	12.7
ptot_T [H]	bar		2.6138	2.5640	2.5396	2.5154	2.4915	2.4446	2.3764	2.3322	2.2679	2.1657	2.0695	1.9789
pN2_T [H]	bar		1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823
pO2_T [H]	bar		1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823	1.2823

- Zu beachten:
1. TG-Profil ist absolut rechteckig
  2. entscheidend ist längste HWZ mit tiefsten Gewebe-Grenzwerten
  3. Vorsättigung ist unerheblich