



# REBREATHERS



## A study on the behaviour of passive addition, RMV-keyed SCR / Part 2



V1.1/18.3.06

von  
Beat A. Müller

Msc. (Mech. Eng.) ETH Zurich

[btmueller@bluewin.ch](mailto:btmueller@bluewin.ch)

[www.swiss-cave-diving.ch](http://www.swiss-cave-diving.ch)



# REBREATHERS



## Ziel und Zweck einer parametrischen Studie

Die vorliegende Arbeit ist eine PARAMETRISCHE STUDIE, d.h. es geht hier überhaupt nicht um die Genauigkeit nach dem Dezimalpunkt, sondern vielmehr darum,

- a) die verschiedenen Einflussgrößen (Parameter) aufzuzeigen
- b) und ihre Beziehungen zueinander mathematisch zu formulieren
- c) die numerischen Ergebnisse in Form verständlicher graphischer Darstellungen im Sinne von TRENDS für den mathematisch unverbildeten Leser aufzuzeigen

Gerade weil einige Parameter in Abhängigkeit vom Anwender und dessen Tagesform stark variieren können (z.B. AMV,  $K_E$ ) ist es umso wichtiger, aufzuzeigen, welche Folgen dies z.B. TENDENZIELL auf den Verlauf des  $p_{O_2}$  haben kann.

Da es um eine *parametrische* Studie geht, ist die ganze Problematik der Handhabung bewusst ausgeklammert. Dies ist ein Thema für die Ausbildung und eine parametrische Studie kann per Definition keine Kursunterlage sein!

Es ist auch nicht die Aufgabe einer solchen Studie, den GMV (gesunder Menschenverstand) bei der Interpretation der Resultate zu ersetzen.



# REBREATHERS



## Haftungsausschluss / Disclaimer

Der Autor hält ausdrücklich fest, dass die vorliegende Arbeit, insbesondere die präsentierten Berechnungsverfahren, eine theoretische Studie darstellt und trotz aller Sorgfalt noch Fehler enthalten kann, sei dies in gedruckten Text, in den numerischen Resultaten oder den graphischen Darstellungen.

Das in einem ersten Schritt verwendete Modell ist ein sehr stark vereinfachtes. Nichtsdestotrotz wird es überall wegen der mathematischen Einfachheit herangezogen (s. Internet). Für grundsätzliche Aussagen genügt es vollkommen. Es ist absurd, wenn selbsternannte Gurus dieses Modell als *falsch* bezeichnen, gleichzeitig aber O<sub>2</sub>-Drop Tabellen publizieren, die exakt auf diesem *angeblich falschen* Modell basieren.

Verfeinerte Modelle sind bereits in Erarbeitung und werden zu gegebener Zeit vom Autor präsentiert.

**Alle Schlussfolgerungen, die der Leser aus der Studie zieht und alle Handlungen, die er darauf basierend vornimmt, tut er auf eigene Gefahr. Der Autor lehnt jegliche Haftung ab.**

**Die Studie selber stellt keine Ausbildung für SCR Geräte dar und ersetzt keinen gerätespezifischen Ausbildungskurs.**

**Die Studie stellt keine Aufforderung dar, mit SCR zu tauchen.**



# REBREATHERS



## Gliederung

- **Einführung**
  - Haftungsausschluss / Disclaimer**
  - Über den Autor**
  - Management-Summary**
  - Terminologie (Lexikon)**
- **Teil 1: Gliederung, Terminologie, Aufbau, Komponenten und Funktion von passiven, AMV-gesteuerten SCR mit konstantem Auswurfvolumen**
- **Teil 2: Rechnerische Untersuchung zu den physikalischen Besonderheiten**
- **Teil 3: Auslegung für tiefenkompensierten, variablen Auswurf**
- **Teil 4: Anatomie eines SCR-Unfalles**
- **Teil 5: Vergleich Rechnung - Messungen**



# REBREATHERS



## Teil 2

**Rechnerische Untersuchung zu den physikalischen Besonderheiten von passiven, AMV gesteuerten SCR mit konstantem Dump-Ratio**



# REBREATHERS



## Inhaltsverzeichnis

- Physiologie
- **Verwendete Berechnungs-Parameter**
- **Das Berechnungsmodell /Basis-Parameter**
- **Herleitung des Gleichgewichtszustandes**
- **Weitere wichtige Berechnungsparameter**
- **Berechnung des Gleichgewichtszustandes sowie der Minimalwerte für  $F_{\text{mixO}_2}$  und  $K_r$**
- **Dynamischer Verlauf des  $p_{\text{O}_2}$**
- **Quasi-stationäre Berechnung von Rampen**
- **Berechnung des Abstiegs- und Aufstiegsrampeneffektes**
- **Effekte der Spülung**
- **Verlauf des  $p_{\text{O}_2}$ -Abfalles /  $\text{O}_2$ -Drop Tabelle**
- **Berechnungen zu den Einflüssen von  $K_r$ , AMV,  $K_E$  und  $V_{\text{sys}}$**
- **Wechsel von/auf offenes Bailout**
- **Folgerungen aus den numerischen Resultaten**



# REBREATHERS



## Physiologie (1): O<sub>2</sub>-Verbrauch

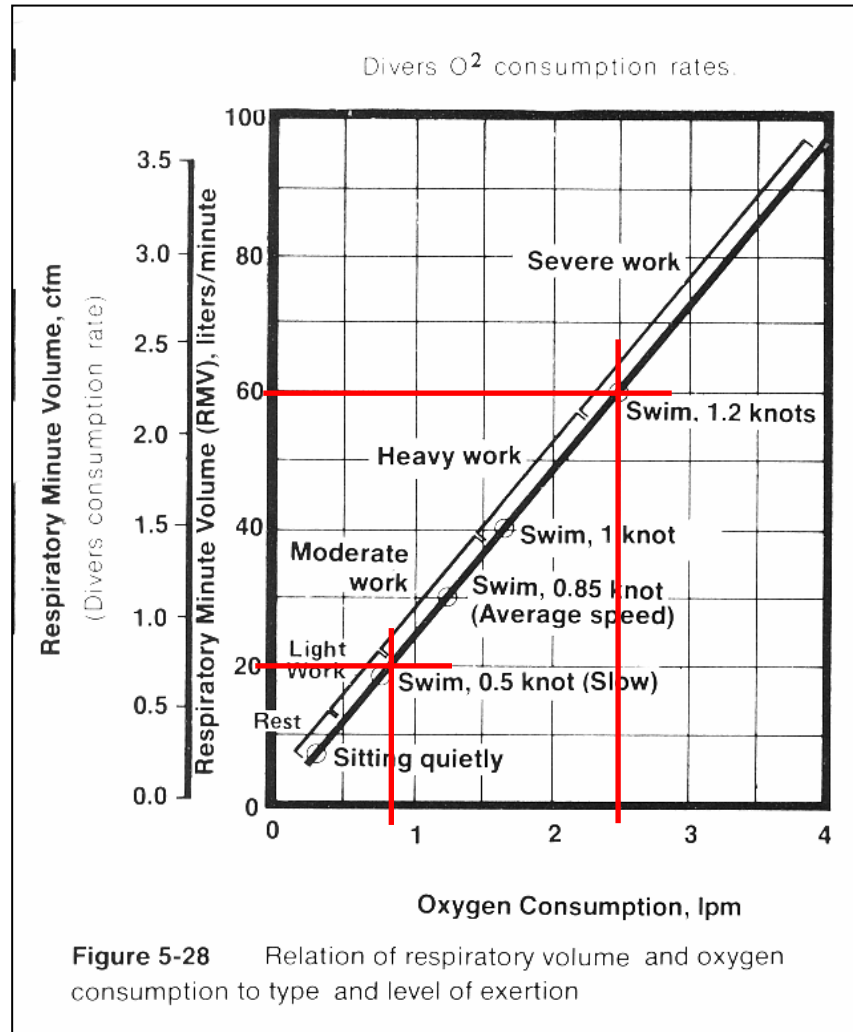
**1**  
VOLUME AIR DIVING  
U S NAVY DIVING MANUAL  
NAVSEA 0994-LP-001-9010



Navy Department  
Washington, D.C. 20362

Published by  
BEST PUBLISHING CO.  
23005/2 South Avalon Boulevard  
Carson, California 90745, U.S.A.

Quelle:  
**US Navy Diving Manual**



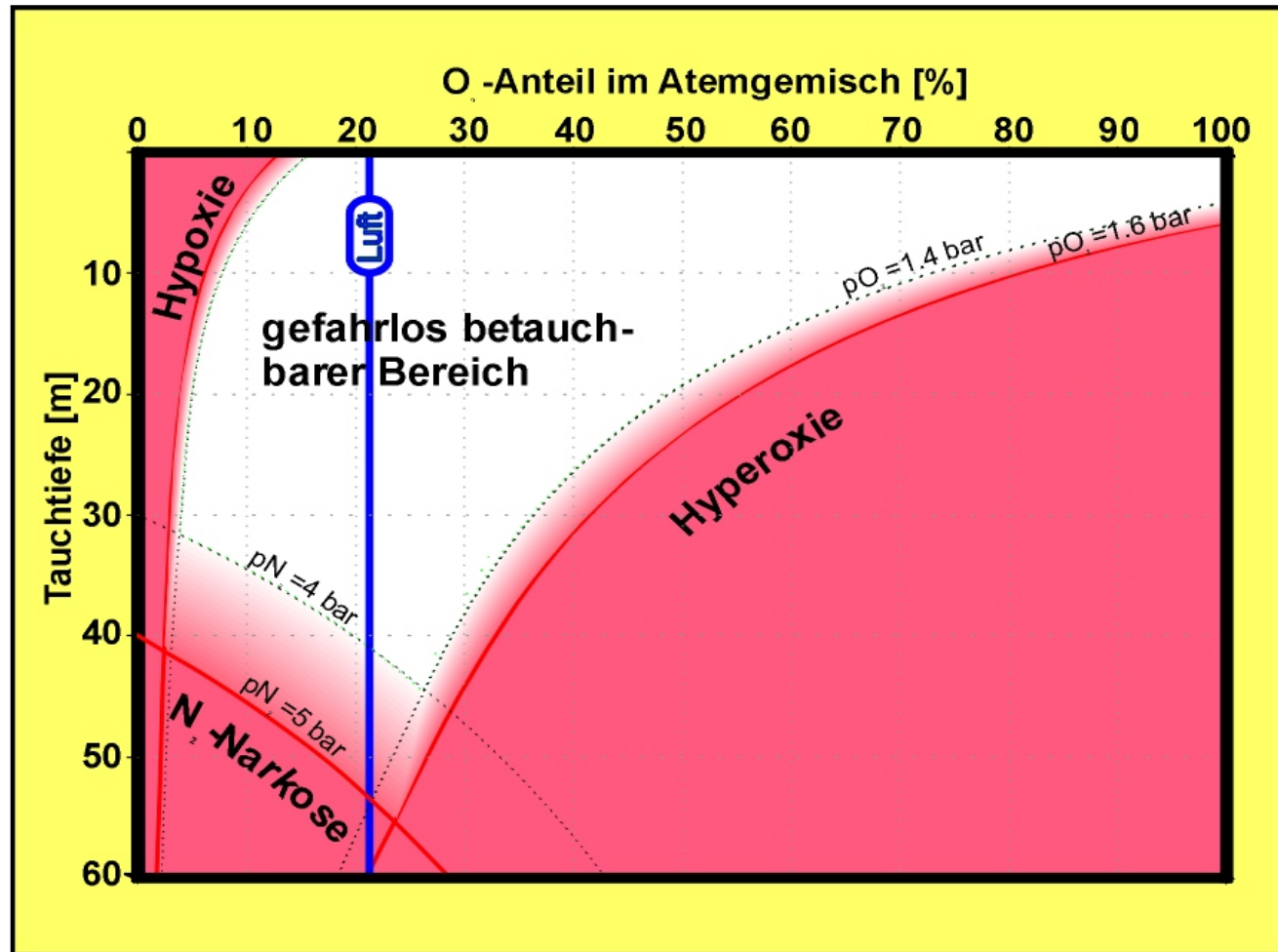
$$\dot{V}_{O_2} = \frac{AMV}{K_E} \quad [1b]$$

aus 2 Messpunkten  
AMV = 20 l/min und  
AMV = 60 l/min  
ergibt sich:

$$K_E \approx 23.53$$

# REBREATHERS

## Physiologie (2): tauchbarer Bereich



Quelle: Nitrox Diver von CMAS.CH





# REBREATHERS



## Verwendete Berechnungs-Parameter (1)

<b>AMV</b>	<b>AtemMinutenVolumen</b> (engl.: <b>RMV</b> , respiratory minute volume), in Liter pro Minute an der Oberfläche (12...20l/min/1 bar)
<b>V<sub>od.</sub> V<sub>sys</sub></b>	Gesamtes, gasgefülltes Volumen des Systems (=Loop)
<b><math>\dot{V}_{O_2}</math></b>	Metabolisch konsumiertes O <sub>2</sub> Minutenvolumen; ist tiefen-unabhängig und praktisch nur eine Fkt. der Anstrengung.
<b>Q<sub>dump</sub></b>	Minutenvolumen des an die Umgebung abgegebenen Gases (ohne Spülung).
<b><math>\dot{V}_{Spül}</math></b>	Spülvolumen pro Zeiteinheit (z.B. wenn durch den Mund ein- durch die Nase aber in die Umgebung ausgeatmet wird).
<b><math>\dot{V}_{BM}</math></b>	Volumenveränderung pro Zeiteinheit durch Druckveränderung (Boyle-Mariotte).
<b>KE</b>	Verhältnis zwischen AMV und V <sub>O<sub>2</sub></sub> (20.....25; d.h. 5% bis 4%)
<b>K<sub>r</sub></b>	Eliminationsrate im Verhältnis zum AMV (1:6.....bis 1:14; d.h. 16% bis 7%); bei nicht tiefenkompensierten Geräten konstant, bei tiefenkompensierten eine Funktion des Umgebungsdruckes



# REBREATHERS



## Verwendete Berechnungs-Parameter (2)

$F_{mixO2}$	Anteil Sauerstoff im Speisegas
$F_{O2}$	Anteil Sauerstoff im System; vereinfachende Annahme, dass vollständige Durchmischung vorliegt, was in Realität nicht ganz der Fall ist.
$F_{O2Start}$	Anteil Sauerstoff im System unmittelbar bei Beginn eines Berechnungszyklus', resp. eines Zeitintervalls $dt$ (also für $t=0$ ).
$F_{O2GG}$	Anteil Sauerstoff im System, nachdem der Gleichgewichtszustand erreicht worden ist (rein mathematisch für $t=unendlich$ ).
$p_{ambSurf}$	Totaldruck (ambient pressure) an der Oberfläche
$p_{amb}$ (Tiefe)	Totaldruck auf der Tiefe
$dpdT$	Drucksteigerungsfaktor pro m H <sub>2</sub> O oder pro 10m H <sub>2</sub> O. (Süßwasser: ca. 0.98bar/10m H <sub>2</sub> O).
$\lambda_{GG}$	Relativer Erreichungsgrad des Gleichgewichtszustandes bezügl. $F_{O2GG}$ , ausgehend von einem definierten Anfangszustand $F_{O2Start}$ an.
$t_{\lambda_{GG}}$	Zeit bis zum Erreichen eine bestimmten Grades des Gleichgewichts



# REBREATHERS



## Modelle: vom Einfachen zum Komplexen (1)

- Modelle .....** ....sind der meist vereinfachende Versuch des Wissenschaftlers und Technikers, komplexe Vorgänge in der Natur und der Technik in physikalisch-mathematisch handhabbaren und der numerischen Berechnung zugänglichen Formulierungen zu beschreiben.
- ....sollten reproduzierbare Ergebnisse von reproduzierbaren Prozessen liefern
  - ... sollten die massgebenden Parameter beinhalten
  - ...sollten zumindest zuverlässige TRENDANGABEN liefern
  - ...müssen **nicht zwingend** ganz exakt jeden einzelnen Mikroprozess abbilden und aufs letzte Komma genau berechnen können, solange die Berechnungen als Endergebnis einer Folge von Prozessen mit den realen Trends und Messdaten ausreichend genau korrelieren (bestes Beispiel: Kompartimentsmodell in der Deko-Berechnung).



# REBREATHERS



## Modelle: vom Einfachen zum Komplexen (2)

### Schritt 1: das stark vereinfachte Allerweltsmodell:

Das Gerät wird als „grosser Kübel“ betrachtet mit Zu- und Wegführungen von Gas-Massenströmen.

Annahme, dass  $F_{O_2}$  überall im System uniform (vollständige Durchmischung).

Annahme, dass kein injiziertes Frischgas direkt (ungenutzt) in die Ausatmungsgegenlunge strömt.

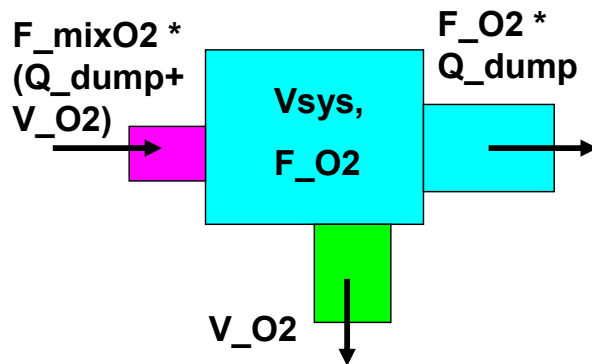
Keine Strömungs- und Energieverluste (Verwirbelungen) im System.

Grundgleichungen abgeleitet aus einer einfachen Massenbilanz und leicht verständlich.

Eine einzige, einfache Differentialgleichung; Lösung gut geeignet für numerische Berechnungen (z.B. mit Excel) und parametrische Studien wie die Vorliegende.

Ueberprüfungen zeigen gute Uebereinstimmung für TREND-Aussagen und Grundlagenuntersuchungen!

### O<sub>2</sub>-Massenbilanz





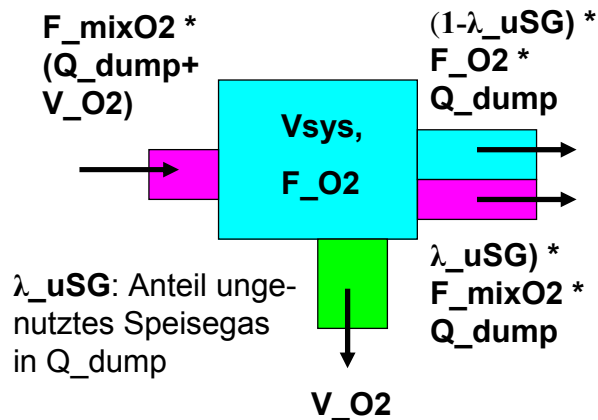
# REBREATHERS



## Modelle: vom Einfachen zum Komplexen (3)

### Schritt 2: das verfeinerte vereinfachte Allerweltsmodell:

#### O<sub>2</sub>-Massenbilanz



Modell wie in Schritt 1, aber insofern verfeinert als miteinbezogen wird, dass ein Teil des injizierten Frischgases direkt und ungenutzt in die Ausatemungsgegenlunge strömen kann (muss nicht bei entsprechender konstruktiver Auslegung).

Weiterhin nur eine übersichtliche und gut zu lösende Differentialgleichung; numerische Integration ist gut zu handhaben (z.B. mit Excel).

Der Anteil des ungenutzten Frischgases im Dump-Volumen sollte entweder messtechnisch bestimmt werden, wenn die numerische übereinstimmende Korrelation mit tatsächlichen Profilen gesucht wird, oder dadurch, dass alle andern direkt messbaren Variablen gemessen werden und die finale Korrelation durch numerische Variation des ungenutzten Anteil durch trial and error „errechnet“ wird.

## Modelle: vom Einfachen zum Komplexen (4)

### Schritt 3: das Mehrfach-Kompartimentsmodell (parallel/seriell)

Das Gerät wird in eine Reihe Kompartimente zerlegt die parallel und / oder seriell zueinander geschaltet sind (auch grössere Schläuche).

Jedes Kompartiment ist definiert durch Grösse, eigene Gaskonzentrationen und strömungstechnische Randbedingungen an Ein- und Ausgang.

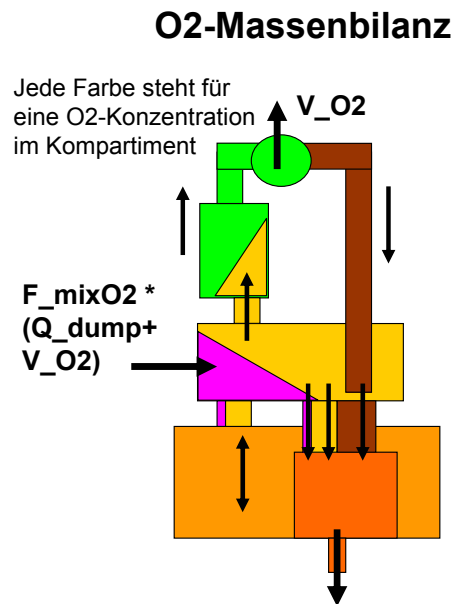
An jedem Uebergang von einem Kompartiment zum andern ist eine Massenbilanz zu erstellen.

Dieses Modell führt zwingend zu einem System von gekoppelten Differentialgleichungen und ist hochkomplex.

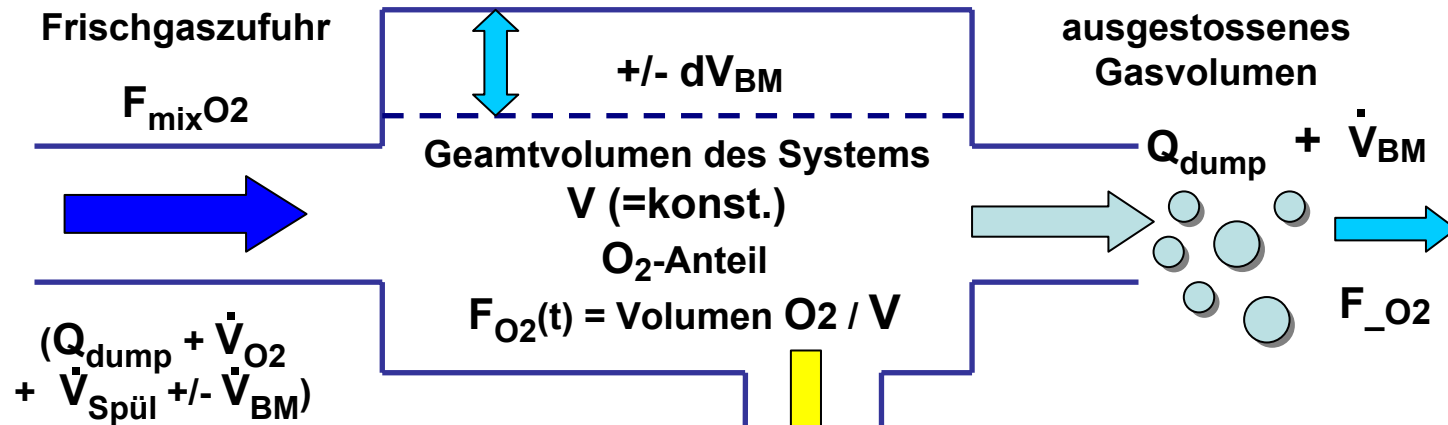
Erfordert zuverlässige Kenntnisse der Strömungs-Parameter in allen gasführenden Teilen.

Hat entsprechend viele Freiheitsgrade, die das Herausmessen von einzelnen Grössen fast unmöglich machen.

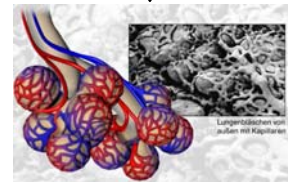
Numerische Integration erfordert multiple Iterationen, ein entsprechendes Programm und liegt weit, weit ausserhalb vom Scope z.B. von Excel.



## Das Berechnungsmodell Nr. 1



- $F_{mixO_2}$ : O<sub>2</sub>-Anteil im Frischgas (= konst.)
- $Q_{dump}$ : ausgestossenes Gasvolumen pro Zeit [NL / dt]
- $\dot{V}_{O_2}$ : metabolischer O<sub>2</sub>-Verbrauch des Tauchers [NL/dt]
- $\dot{V}$ : Gesamtvolumen des Systems (Kreislauf) in [NL]; konst.
- $F_{O_2}(t)$ : zeitabhängiger O<sub>2</sub>-Anteil im Atemkreislauf
- $\dot{V}_{Spül}$ : Spülvolumen [NL / dt]
- $\dot{V}_{BM}$ : Volumenveränderung durch Boyle-Mariotte [NL / dt]



abtauchen:  $\dot{V}_{BM} > 0$ ; auftauchen:  $\dot{V}_{BM} < 0$



# REBREATHERS



## Basis-Parameter

Ventilationskoeffizient

$$K_E = \frac{AMV}{\dot{V}_{O_2}}$$

[1a]

resp.

$$\dot{V}_{O_2} = \frac{AMV}{K_E}$$

[1b]

$K_E = \text{ca. } 17 \dots 20 \dots \underline{25}$

Eliminationsrate

$$K_r = \frac{Q_{dump}}{AMV}$$

[2]

$K_r = 7\% \dots 10\%$  also  $\underline{1:14} \dots 1:10$



extremer Wert

$Q_{dump}$  lässt sich in Funkt. von  $K_r$ , der Umgebungsdrücke und des  $AMV$  wie folgt schreiben:

$$Q_{dump} = AMV \cdot K_r \cdot \frac{p_{amb}(Tiefe)}{p_{ambSurf}}$$

[3]

Druck und Tiefe

$$p_{amb}(Tiefe) = p_{ambSurf} + dpdT \cdot Tiefe$$

[4]





# REBREATHERS



## Herleitung des Gleichgewichtszustandes (1)

Der Gleichgewichtszustand ist derjenige Zustand, bei dem sich bei konstantem Umgebungsdruck nach einiger Zeit (theoretisch nach unendlich langer Zeit) der O<sub>2</sub>-Anteil im System nicht mehr verändert.

**Ansatz:**  
**Was volumenmässig an O<sub>2</sub> aus dem System hinausgeht, muss volumenmässig durch neues O<sub>2</sub> ersetzt werden**

Metabolischer O<sub>2</sub>-Verbrauch  
+  
Volumenanteil O<sub>2</sub> im  
ausgestossenen Gas  
=  
Anteil O<sub>2</sub> im nachströmendem  
Mix

$$\begin{aligned} & \dot{V}_{O_2} \\ & + \\ & F_{O_2}(t) \cdot (Q_{\text{dump}} + \dot{V}_{\text{Spül}} + \dot{V}_{\text{BM}}) \\ & = \\ & F_{\text{mix}O_2} \cdot (Q_{\text{dump}} + \dot{V}_{O_2} + \dot{V}_{\text{Spül}} + \dot{V}_{\text{BM}}) \end{aligned}$$

[5]



# REBREATHERS



## Herleitung des Gleichgewichtszustandes (2)

Beim Gleichgewichtszustand werden vorausgesetzt:

- a) konstanter  $p_{amb}$  (gleiche Tiefe);  $\rightarrow dV_{BM} = 0$
- b) keine Spülung;  $\rightarrow \dot{V}_{Spül} = 0$

Damit lässt sich der O<sub>2</sub>-Anteil im Gleichgewichtszustand aus [5] wie folgt berechnen:

$$F_{O_2 GG} = \frac{\left[ F_{mixO_2} \cdot (Q_{dump} + \dot{V}_{O_2}) - \dot{V}_{O_2} \right]}{Q_{dump}}$$

[6]

Durch Substitution durch die Basis-Parameter erhält man:

$$F_{O_2 GG} = F_{mixO_2} + \left[ \frac{(F_{mixO_2} - 1) \cdot p_{ambSurf}}{K_E \cdot K_r \cdot p_{amb} (Tiefe)} \right]$$

[6']



# REBREATHERS



## Weitere wichtige Berechnungs-Parameter

Der Zusammenhang zwischen  $F_{O2min}$ ,  $p_{O2min}$  und der **Tiefe** sieht wie folgt aus:

$$p_{O2min} = F_{O2min} \cdot p_{amb} (Tiefe) \quad [7a]$$

resp. 
$$F_{O2min} = \frac{p_{O2min}}{p_{amb} (Tiefe)} \quad [7b]$$

mit Gl. [4]:

$$p_{O2min} = F_{O2min} \cdot (p_{ambSurf} + dpdT \cdot Tiefe) \quad [7c]$$

aufgelöst nach  $F_{O2min}$  ergibt:

$$F_{O2min} = \frac{p_{O2min}}{(p_{ambSurf} + dpdT \cdot Tiefe)} \quad [7d]$$



# REBREATHERS



## Berechnung des minimalen $F_{mixO2}$ (1)

Damit kann nun folgende Frage geklärt werden:

**Welchen minimalen Anteil O<sub>2</sub> ( $F_{mixO2}$ ) muss das Speisegas enthalten, damit ich mich auf einer bestimmten Tiefe (ev. bis an die Oberfläche) gefahrlos möglichst lange (idealerweise unbeschränkt) aufhalten kann?**

Die Lösung ergibt aus der „Gleichgewichts-Gleichung“ [6]. Aufgelöst nach  $F_{mixO2}$ :

$$F_{mixO2} = \frac{\left[ F_{O2min} \cdot Q_{dump} + \dot{V}_{O2} \right]}{\left( Q_{dump} + \dot{V}_{O2} \right)} \quad [8a]$$

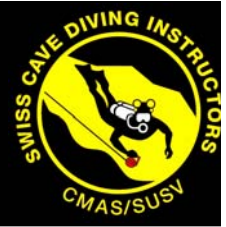
Nach ersetzen von  $F_{O2min}$ ,  $Q_{dump}$  und  $V_{O2}$  erhält man:

$$F_{mixO2} = \frac{\left[ K_r \cdot K_E \cdot p_{O2min} + p_{ambSurf} \right]}{\left[ K_r \cdot K_E \cdot p_{amb} (Tiefe) + p_{ambSurf} \right]} \quad [8b]$$

Der Anwender muss festlegen, welchen **minimalen  $p_{O2min}$**  im System er nicht unterschritten haben möchte (z.B. 0.20 bar, ggf. auch etwas darunter bis 0.16 bar als absolutes Minimum) .



# REBREATHERS



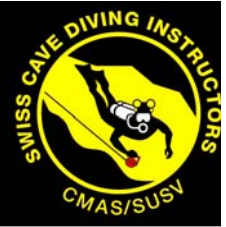
## Berechnung des minimalen $F_{mixO_2}$ (3)

AMV	AtemMinutenVolumen	18 l/min
K_E	Ventilationskoeffizient	20 (5%)
Kr	Eliminationsrate des SCR	7.00% (1:14)
P_ambSurf	Totaldruck an der Oberfläche	1.000 bar
dpdT	Drucksteigerungsfaktor des Wassers	0.98 bar/10m
p_O2_min	gewünschter minimaler p_O2 auf Tiefe	0.20 bar

			min. Tiefe 1	min. Tiefe 2	min. Tiefe 3	min. Tiefe 4	min. Tiefe 5	min. Tiefe 6	min. Tiefe 7	min. Tiefe 8	min. Tiefe 9
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
			0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	20.0	30.0	40.0
Totaldruck	P_ambT	bar	1.000	1.196	1.392	1.588	1.784	1.980	2.960	3.940	4.920
Atemminutenvolumen	AMV (Tiefe)	l/min	18.0	21.5	25.1	28.6	32.1	35.6	53.3	70.9	88.6
metabolisch verbrauchtes O2	V_O2	l/min	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
ausgestossenes Gasvol. auf Tiefe T	Q_dump	l/min	1.26	1.51	1.75	2.00	2.25	2.49	3.73	4.96	6.20
min. erford. O2- Anteil im System	F_O2min	---	0.200	0.167	0.144	0.126	0.112	0.101	0.068	0.051	0.041
min. erford. O2- Anteil im Speisegas	F_mix min	---	0.533	0.479	0.434	0.397	0.366	0.339	0.249	0.196	0.162
		in %	53.33%	47.86%	43.41%	39.71%	36.60%	33.93%	24.88%	19.64%	16.23%



# REBREATHERS



## Berechnung des minimalen $F_{mixO_2}$ (4)

AMV	AtemMinutenVolumen	18 l/min
K_E	Ventilationskoeffizient	20 (5%)
Kr	Eliminationsrate des SCR	7.00% (1:14)
P_ambSurf	Totaldruck an der Oberfläche	1.000 bar
dpdT	Drucksteigerungsfaktor des Wassers	0.98 bar/10m
p_O2_min	gewünschter minimaler p_O2 auf Tiefe	0.16 bar



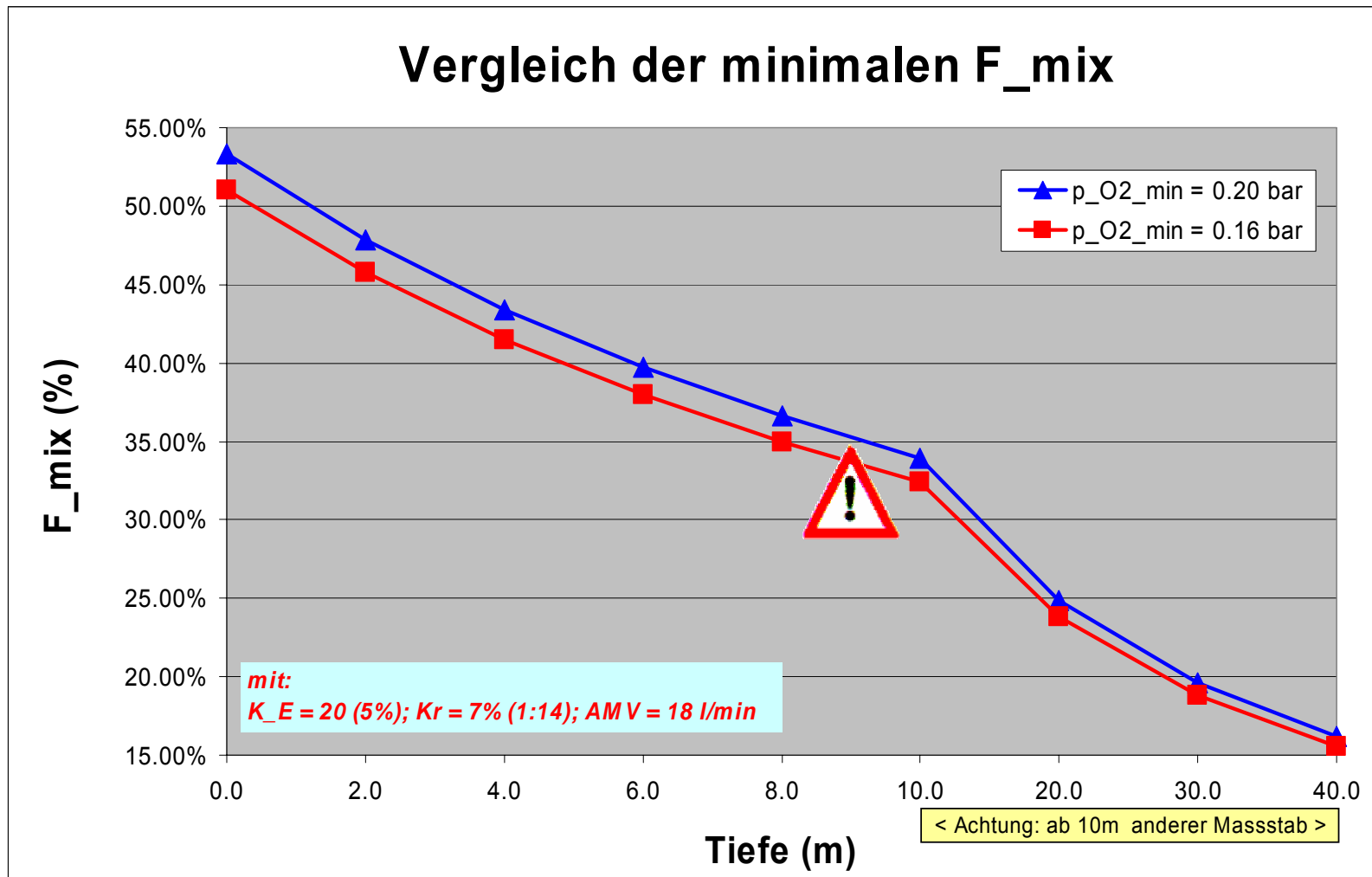
			min. Tiefe 1	min. Tiefe 2	min. Tiefe 3	min. Tiefe 4	min. Tiefe 5	min. Tiefe 6	min. Tiefe 7	min. Tiefe 8	min. Tiefe 9
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
			0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	20.0	30.0	40.0
Totaldruck	P_ambT	bar	1.000	1.196	1.392	1.588	1.784	1.980	2.960	3.940	4.920
Atemminutenvolumen	AMV (Tiefe)	l/min	18.0	21.5	25.1	28.6	32.1	35.6	53.3	70.9	88.6
metabolisch verbrauchtes O2	V_O2	l/min	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
ausgestossenes Gasvol. auf Tiefe T	Q_dump	l/min	1.26	1.51	1.75	2.00	2.25	2.49	3.73	4.96	6.20
min. erford. O2- Anteil im System	F_O2min	---	0.160	0.134	0.115	0.101	0.090	0.081	0.054	0.041	0.033
min. erford. O2- Anteil im Speisegas	F_mix min	---	0.510	0.458	0.415	0.380	0.350	0.324	0.238	0.188	0.155
		in %	51.00%	45.77%	41.51%	37.97%	35.00%	32.45%	23.79%	18.78%	15.52%



# REBREATHERS



## Berechnung des minimalen $F_{mixO_2}$ (5)





# REBREATHERS



## Berechnung des erforderlichen minimalen $K_r$ (1)

Man kann die Frage zu  $F_{mixO2}$  auch umgekehrt stellen:

***Welches ist die minimale erforderliche Eliminationsrate  $K_r$ , um bei einem gegebenen  $F_{mixO2}$  des Speisegases und einer gegebenen Tiefe noch einen gewünschten minimalen  $p_{O2min}$  aufrecht erhalten können?***

Die Lösung ergibt sich wiederum durch Umstellung der „Gleichgewichts-Gleichung“ [6'] und aufgelöst nach  $K_r$ :

$$K_{r\_min} = \frac{(F_{mixO2} - 1)}{K_E \cdot (F_{O2} - F_{mixO2})} \cdot \frac{p_{ambSurf}}{p_{amb}(Tiefe)}$$

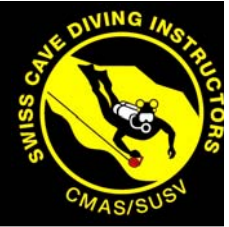
[9]

Hier ist noch  $p_{amb}(Tiefe)$  aus [4] einzusetzen. Ist der  $p_{O2}$  vorgegeben, kann  $F_{O2}$  durch den Ausdruck aus Gl. [7d] ersetzt werden.





# REBREATHERS



## Berechnung des erforderlichen minimalen $K_r$ (2)

AMV	AtemMinutenVolumen	18 l/min
$K_E$	Ventilationskoeffizient	20 (5%)
$F_{mix}$	O2-Anteil im Speisegas	21.0%
$P_{ambSurf}$	Totaldruck an der Oberfläche	1.000 bar
dpdT	Drucksteigerungsfaktor des Wassers	0.98 bar/10m

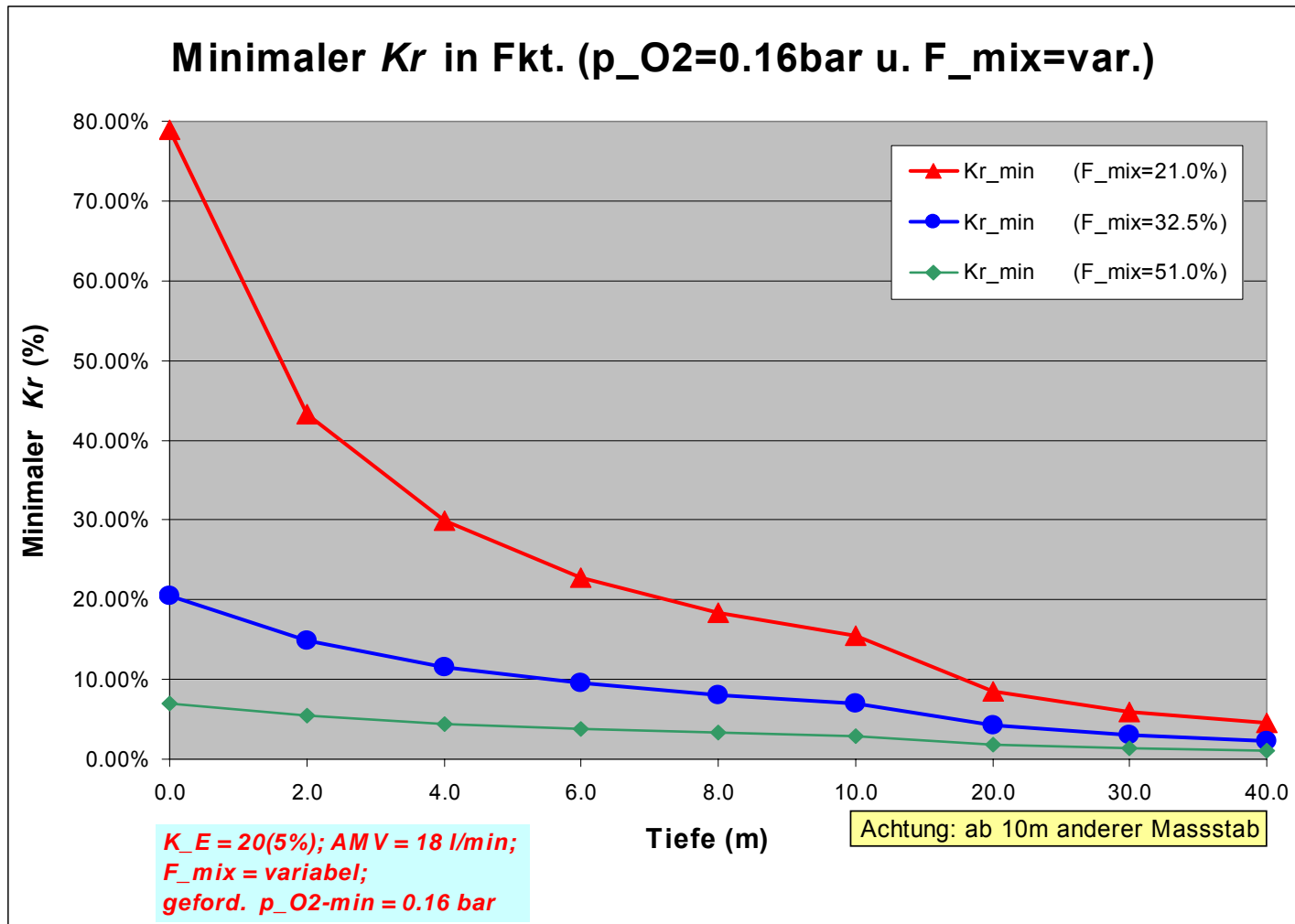
			min. Tiefe 1	min. Tiefe 2	min. Tiefe 3	min. Tiefe 4	min. Tiefe 5	min. Tiefe 6	min. Tiefe 7	min. Tiefe 8	min. Tiefe 9
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
			0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	20.0	30.0	40.0
Totaldruck	$P_{ambT}$ bar		1.000	1.196	1.392	1.588	1.784	1.980	2.960	3.940	4.920
Atemminutenvolumen	AMV (Tiefe) l/min		18.0	21.5	25.1	28.6	32.1	35.6	53.3	70.9	88.6
metabolisch verbrauchtes O2	$V_{O2}$ l/min		0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
<b>bei minimalem <math>p_{O2}</math> = 0.16 bar</b>			<b><math>F_{mix} = 21.0%</math></b>								
result. minimaler O2-Anteil	$F_{O2}$ ---		16.00%	13.38%	11.49%	10.08%	8.97%	8.08%	5.41%	4.06%	3.25%
<b>minimal erforderliches</b>	<b><math>K_r_{min}</math> ---</b>		<b>0.790</b>	<b>0.433</b>	<b>0.299</b>	<b>0.228</b>	<b>0.184</b>	<b>0.154</b>	<b>0.086</b>	<b>0.059</b>	<b>0.045</b>
<b>Eliminationsverhältnis</b>	<b>(<math>F_{mix}=21.0%</math>) in %</b>		<b>79.00%</b>	<b>43.33%</b>	<b>29.85%</b>	<b>22.77%</b>	<b>18.40%</b>	<b>15.44%</b>	<b>8.56%</b>	<b>5.92%</b>	<b>4.52%</b>
<b>bei minimalem <math>p_{O2}</math> = 0.16 bar</b>			<b><math>F_{mix} = 32.5%</math></b>								
result. minimaler O2-Anteil	$F_{O2}$ ---		16.00%	13.38%	11.49%	10.08%	8.97%	8.08%	5.41%	4.06%	3.25%
<b>minimal erforderliches</b>	<b><math>K_r_{min}</math> ---</b>		<b>0.205</b>	<b>0.148</b>	<b>0.116</b>	<b>0.095</b>	<b>0.081</b>	<b>0.070</b>	<b>0.042</b>	<b>0.030</b>	<b>0.024</b>
<b>Eliminationsverhältnis</b>	<b>(<math>F_{mix}=32.5%</math>) in %</b>		<b>20.53%</b>	<b>14.81%</b>	<b>11.58%</b>	<b>9.51%</b>	<b>8.06%</b>	<b>7.00%</b>	<b>4.22%</b>	<b>3.02%</b>	<b>2.35%</b>
<b>bei minimalem <math>p_{O2}</math> = 0.16 bar</b>			<b><math>F_{mix} = 51.0%</math></b>								
result. minimaler O2-Anteil	$F_{O2}$ ---		16.00%	13.38%	11.49%	10.08%	8.97%	8.08%	5.41%	4.06%	3.25%
<b>minimal erforderliches</b>	<b><math>K_r_{min}</math> ---</b>		<b>0.070</b>	<b>0.054</b>	<b>0.045</b>	<b>0.038</b>	<b>0.033</b>	<b>0.029</b>	<b>0.018</b>	<b>0.013</b>	<b>0.010</b>
<b>Eliminationsverhältnis</b>	<b>(<math>F_{mix}=51.0%</math>) in %</b>		<b>7.00%</b>	<b>5.44%</b>	<b>4.46%</b>	<b>3.77%</b>	<b>3.27%</b>	<b>2.88%</b>	<b>1.82%</b>	<b>1.32%</b>	<b>1.04%</b>



# REBREATHERS



## Berechnung des erforderlichen minimalen $K_r$ (3)





# REBREATHERS



## Dynamischer Verlauf des $p_{O_2}$ (1)

Die Veränderung des  $O_2$ -Anteils  $dF_{O_2}$  im System im Zeitinkrement  $dt$  kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$V \cdot \Delta F_{O_2} = (F_{mixO_2} \cdot (Q_{dump} + \dot{V}_{O_2} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM}) - \dot{V}_{O_2} - F_{O_2}(t) \cdot (Q_{dump} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM})) \cdot \Delta t$$

[10]

Durch Ableitung nach der Zeit  $t$  erhält man die folgende Differentialgleichung:

$$\frac{dF_{O_2}}{dt} = \frac{1}{V} \cdot \left[ F_{mixO_2} \cdot (Q_{dump} + \dot{V}_{O_2} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM}) - \dot{V}_{O_2} - F_{O_2}(t) \cdot (Q_{dump} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM}) \right]$$

[11]

Diese führt zu folgender **Lösung**:

$$F_{O_2}(t) = C + (F_{O_2start} - C) \cdot e^{\left[ \frac{-(Q_{dump} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM})}{V} \cdot t \right]}$$

[12]



# REBREATHERS



## Dynamischer Verlauf des $p_{O_2}$ (2)

Dabei ist  $C$ :

$$C = \frac{\left[ F_{mixO_2} \cdot (Q_{dump} + \dot{V}_{O_2} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM}) - \dot{V}_{O_2} \right]}{(Q_{dump} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM})} \quad [13]$$

Der Zähler des Bruches repräsentiert den Netto-Zufluss von  $O_2$  in das System hinein, der Nenner den aus dem Kreislauf ins Wasser ausgestossene Gasstrom

Für  $t=0$  wird der Term  $e^{-kt}$  in Gl. [12] = 1; damit wird

$$F_{O_2}(t=0) = C + (F_{O_2start} - C) \cdot 1 = F_{O_2start} \quad [12a]$$

Für  $t = \infty$  wird der Term  $e^{-kt}$  in Gl. [12] = 0; damit wird

$$F_{O_2}(t = \infty) = C = F_{O_2-GG} \quad [12b]$$

s. dazu Gl. [5]; d.h.  $F_{O_2}$  hat ein stabiles Gleichgewicht erreicht, das für jeden Umgebungsdruck und Zusammensetzung des Speisegases einen anderen Wert hat.



# REBREATHERS



## Verlauf des $p_{O_2}$ -Abfalls bei $p_{amb} = \text{const.}$ (1)

Aus den Gleichungen zum  $p_{O_2}$ -Verlauf im System ist erkennbar, dass der  $O_2$ -Gehalt im Loop immer kleiner ist, als der des Speisegases. Der zeitliche Abfall des  $F_{O_2}$  bis zum Erreichen eines statischen Gleichgewichtszustandes kann berechnet werden.

Mit Hilfe der Gl. [12] und [13] soll nun für einen stationären Umgebungszustand der zeitliche Verlauf des  $F_{O_2}$ , resp. des  $p_{O_2}$  verfolgt werden.

### Annahmen zum vorangegangenen Profil:

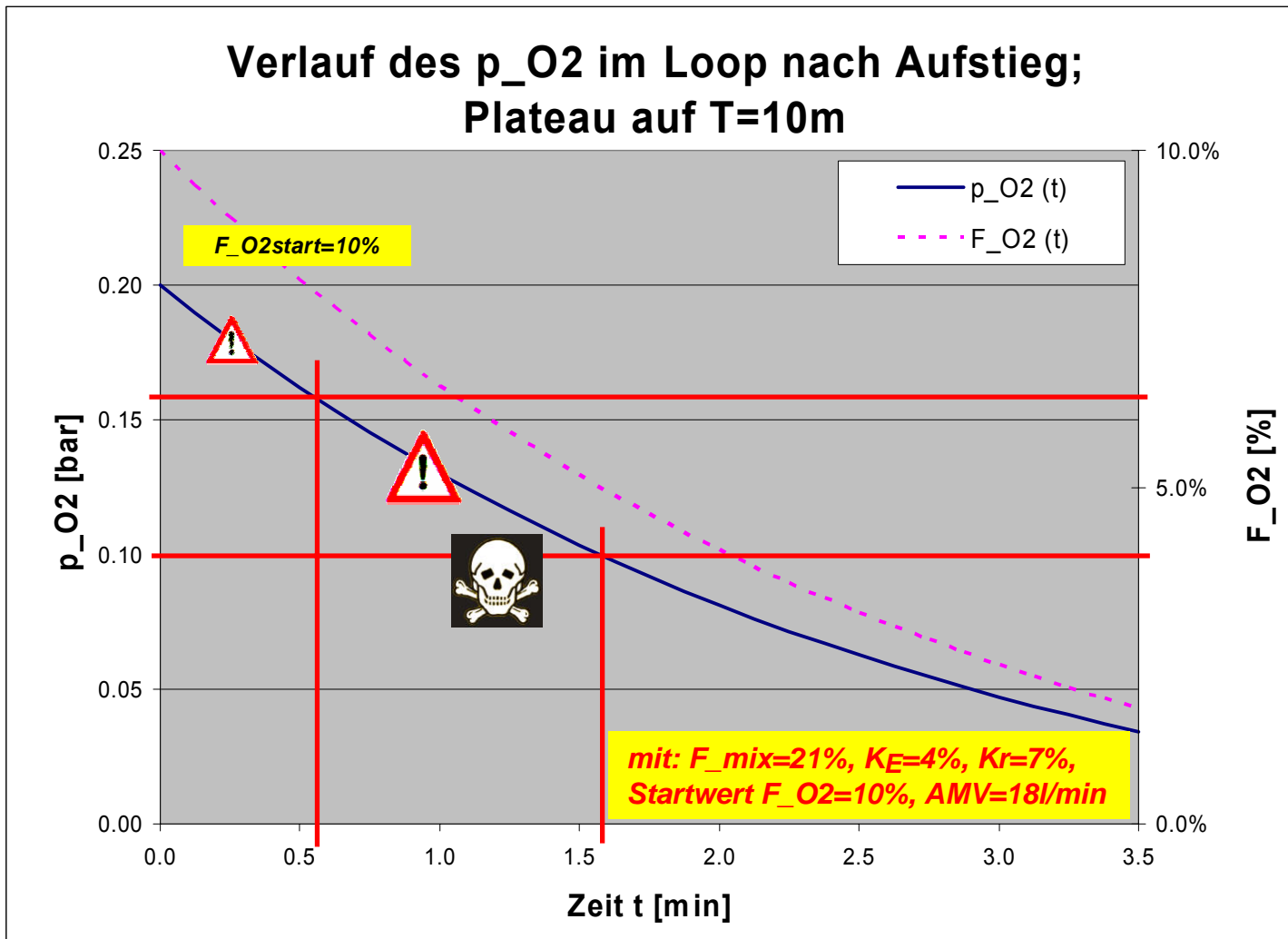
- Tiefe ca. 10m
- Startwert  $F_{O_2}$  ca. 10% (nach Aufstieg mit wenig Spülung)

### Start-Parameter:

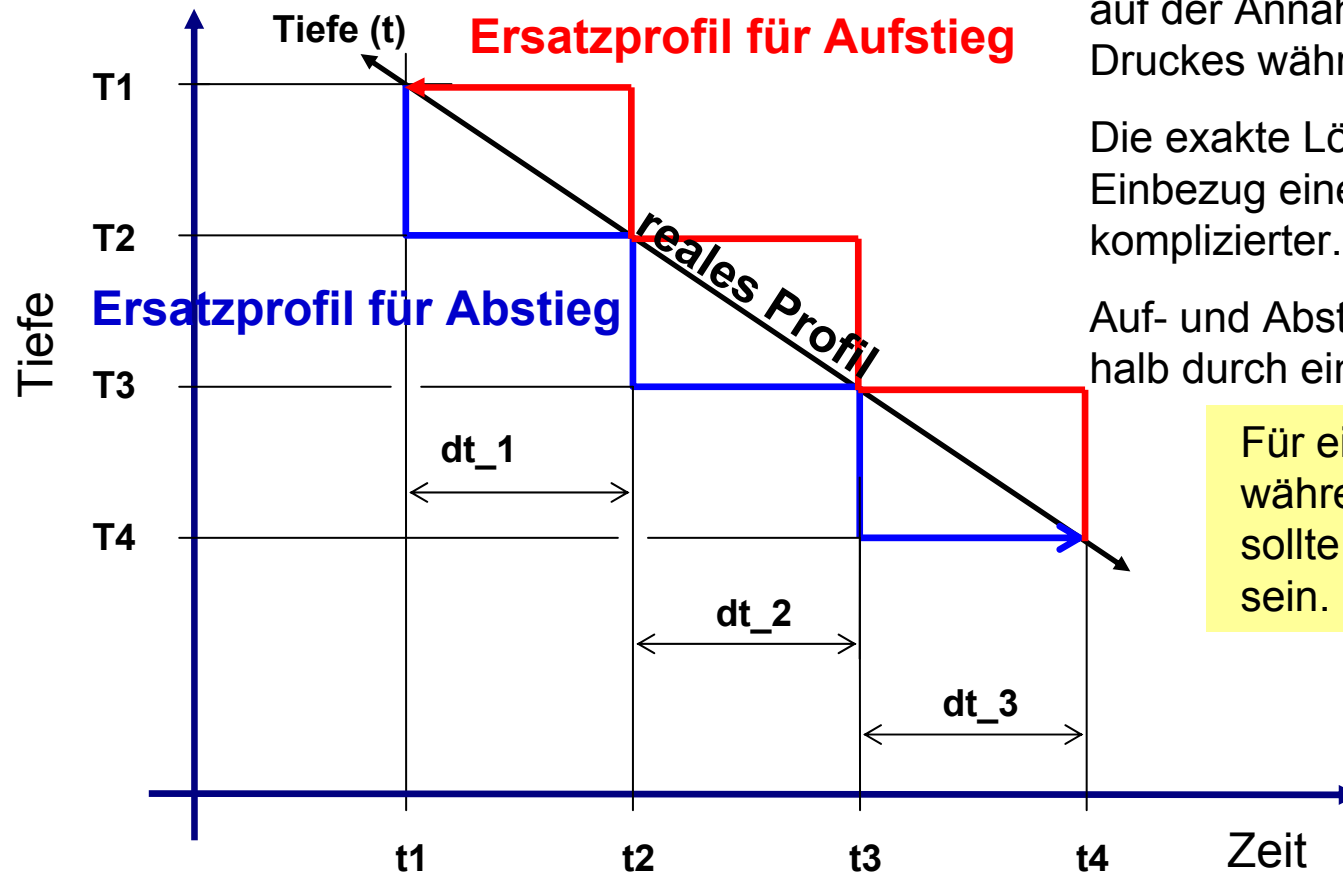
$F_{O_2\text{-init}}$	Initialanteil $O_2$ im Loop zu Beginn Zyklus	10.0%
$F_{\text{mix}O_2}$	Anteil $O_2$ im Speisegas ( $F_{O_2}$ Flasche)	21.0%
AMV	AtemMinutenVolumen	18.0 l/min
$V_{O_2}$	metabolisch verbrauchtes $O_2$	4.0% * AMV
$K_e$	Ventilationskoeffizient 17...20...25	25.0
$K_r$	Eliminationsrate des SCR	7.0% (1:14)
V	Gesamtvolumen des Systems	7.0 l
$p_{\text{ambSurf}}$	Totaldruck an der Oberfläche	1.0 bar
T	Tiefe	10.0 m
$p_{\text{ambT}}$	Totaldruck auf der Tiefe	2.0 bar

# REBREATHERS

## Verlauf des $p_{O_2}$ -Abfalls bei $p_{amb} = \text{const.}$ (2)



## Quasi-stationäre Berechnung von Rampen



Die Lösung der Differentialgl. [12] beruht auf der Annahme eines konstanten Druckes während der Zeitperiode.

Die exakte Lösung der Differentialgl. mit Einbezug einer Rampe wäre sehr viel komplizierter.

Auf- und Abstiegsrampen werden deshalb durch ein Treppenprofil ersetzt.

Für eine gute Genauigkeit während Auf- und Abstiegen sollte  $dt = \text{ca. } \frac{1}{2}\text{-}\frac{1}{4}$  Minute sein.



# REBREATHERS



## Berechnung des Abstiegs-Rampeneffektes (1)

Beim Abstieg verkleinert sich das Systemvolumen durch den zunehmenden Druck (Effekt von Boyle-Mariotte). Das entstehende Volumendefizit wird ausgeglichen durch zusätzlich einströmendes Speisegas. Damit steht mehr O<sub>2</sub> im Kreislauf zur Verfügung,  $F_{O_2}$  und  $p_{O_2}$  steigen.

Dabei wird zur *Berechnung* angenommen, dass sich das Fehlvolumen innerhalb des Zeitintervall  $dt$  (0.25 bis 1 Minute) wieder durch Speisegas auffüllt. Je grösser die Tiefe, desto kleiner die Volumenänderung im *Verhältnis* zum ventilierten Gasvolumen und desto kleiner der Effekt!

$$dV_{BM} = V_{sys} \cdot p_{amb}(T_n) - V_{sys} \cdot p_{amb}(T_{n-1}) \quad [13]$$

$$dV_{BM} = V_{sys} \cdot (p_{amb}(T_n) - p_{amb}(T_{n-1})) \quad [13']$$

$$\dot{V}_{BM} = \frac{dV_{BM}}{\Delta t} \quad [14]$$

$$\dot{V}_{BM} = \frac{V_{sys} \cdot (p_{amb}(T_n) - p_{amb}(T_{n-1}))}{(t_n - t_{n-1})}$$

[14a]

**Beachte: beim Abstieg ist  $\dot{V}_{BM}$  POSITIV !**





# REBREATHERS



## Berechnung des Abstiegs-Rampeneffektes (2)

Der so zusätzlich pro dt eingebrachte O<sub>2</sub>-Volumenstrom beträgt:

$$\dot{V}_{O_2BM} = \dot{V}_{BM} \cdot F_{mixO_2} \quad [15]$$

Damit verändert sich die Gleichung [6] für das Gleichgewicht wie folgt:

$$F_{O_2GG} = \frac{\left[ F_{mixO_2} \cdot (Q_{dump} + \dot{V}_{O_2} + \dot{V}_{BM}) - \dot{V}_{O_2} \right]}{(Q_{dump} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM})} \quad [16]$$

**Resultat:** Da  $\dot{V}_{O_2BM}$  beim Abtauchen positiv ist, sinkt der O<sub>2</sub>-Anteil weniger stark ab, der  $F_{O_2GG}$  liegt höher !



# REBREATHERS

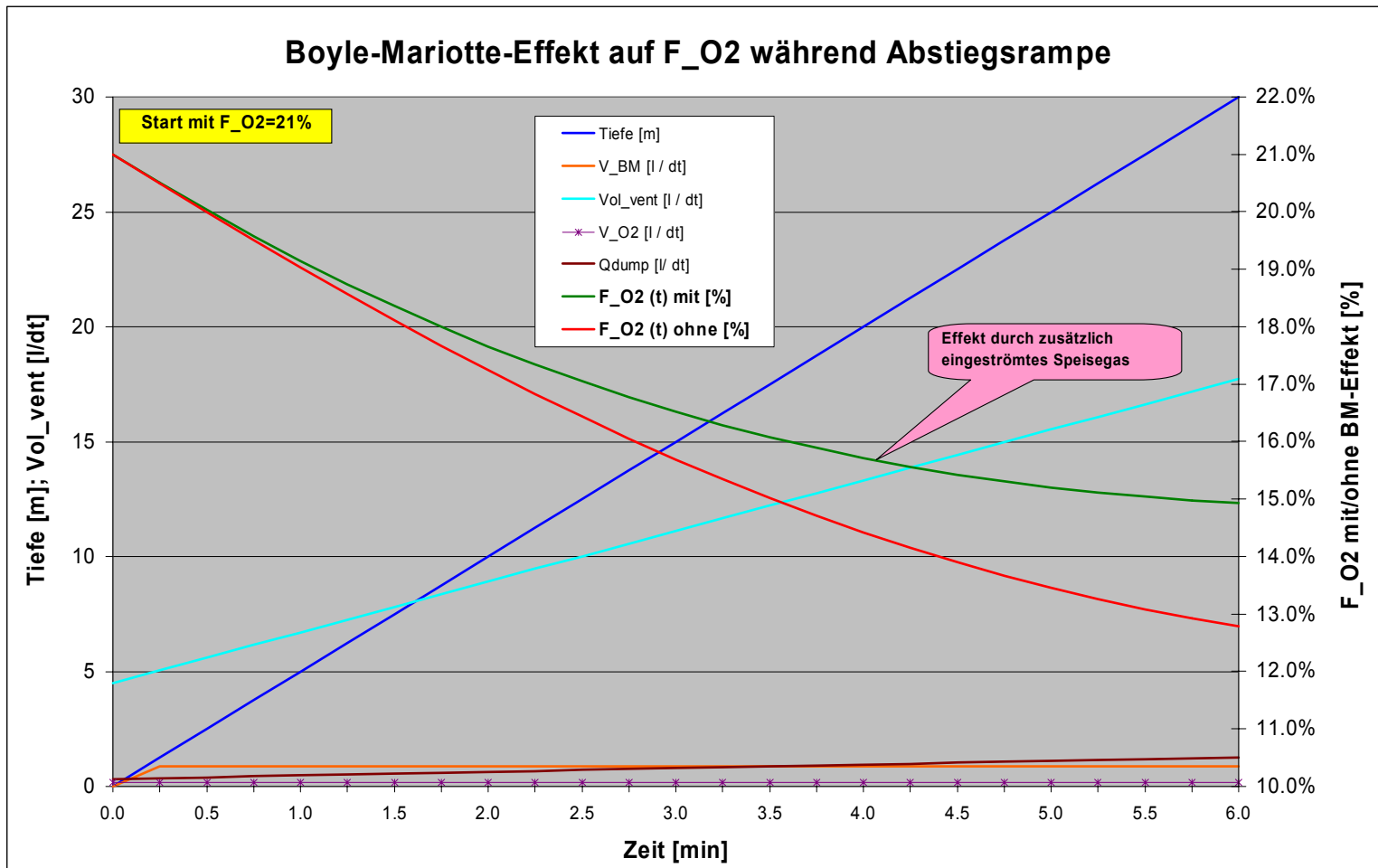


## Berechnung des Abstiegs-Rampeneffektes (3)

Am Beispiel einer **Abstiegsrampe von 0m auf 30m** wird dieser Effekt gezeigt.

									ohne BM-Effekt			mit BM-Effekt		
Zeit t	dt	Tiefe	Druck	AZVsurf	n AZ	AMVsurf	n AZ_tot	Vol_vent	dVBM	F_O2 (t)	p_O2 (t)	dVBM	F_O2 (t)	p_O2 (t)
[min]	[min]	[m]	[bar]	[l]	[l / 1min]	[l / 1min]	[l / dt]	[l / dt]	[l / dt]	[--]	[bar]	[l / dt]	[--]	[bar]
0.0	0.3	0	1	1.5	12	18.0	3	4.5	0	21.00%	0.21	0	21.00%	0.21
0.250	0.250	1.250	1.123	1.5	12	18.0	3	5.051	0.000	20.50%	0.23	0.858	20.50%	0.23
0.500	0.250	2.500	1.245	1.5	12	18.0	3	5.603	0.000	20.00%	0.25	0.858	20.03%	0.25
0.750	0.250	3.750	1.368	1.5	12	18.0	3	6.154	0.000	19.51%	0.27	0.857	19.58%	0.27
1.000	0.250	5.000	1.490	1.5	12	18.0	3	6.705	0.000	19.03%	0.28	0.858	19.15%	0.29
1.250	0.250	6.250	1.613	1.5	12	18.0	3	7.256	0.000	18.56%	0.30	0.858	18.74%	0.30
1.500	0.250	7.500	1.735	1.5	12	18.0	3	7.808	0.000	18.11%	0.31	0.857	18.36%	0.32
1.750	0.250	8.750	1.858	1.5	12	18.0	3	8.359	0.000	17.67%	0.33	0.858	17.99%	0.33
2.000	0.250	10.000	1.980	1.5	12	18.0	3	8.910	0.000	17.24%	0.34	0.858	17.66%	0.35
2.250	0.250	11.250	2.103	1.5	12	18.0	3	9.461	0.000	16.83%	0.35	0.858	17.34%	0.36
2.500	0.250	12.500	2.225	1.5	12	18.0	3	10.013	0.000	16.43%	0.37	0.858	17.05%	0.38
2.750	0.250	13.750	2.348	1.5	12	18.0	3	10.564	0.000	16.05%	0.38	0.858	16.77%	0.39
3.000	0.250	15.000	2.470	1.5	12	18.0	3	11.115	0.000	15.69%	0.39	0.857	16.52%	0.41
3.250	0.250	16.250	2.593	1.5	12	18.0	3	11.666	0.000	15.35%	0.40	0.858	16.29%	0.42
3.500	0.250	17.500	2.715	1.5	12	18.0	3	12.218	0.000	15.02%	0.41	0.858	16.08%	0.44
3.750	0.250	18.750	2.838	1.5	12	18.0	3	12.769	0.000	14.71%	0.42	0.858	15.89%	0.45
4.000	0.250	20.000	2.960	1.5	12	18.0	3	13.320	0.000	14.42%	0.43	0.858	15.72%	0.47
4.250	0.250	21.250	3.083	1.5	12	18.0	3	13.871	0.000	14.15%	0.44	0.858	15.56%	0.48
4.500	0.250	22.500	3.205	1.5	12	18.0	3	14.423	0.000	13.90%	0.45	0.858	15.43%	0.49
4.750	0.250	23.750	3.328	1.5	12	18.0	3	14.974	0.000	13.67%	0.45	0.857	15.31%	0.51
5.000	0.250	25.000	3.450	1.5	12	18.0	3	15.525	0.000	13.46%	0.46	0.858	15.20%	0.52
5.250	0.250	26.250	3.573	1.5	12	18.0	3	16.076	0.000	13.26%	0.47	0.857	15.11%	0.54
5.500	0.250	27.500	3.695	1.5	12	18.0	3	16.628	0.000	13.08%	0.48	0.858	15.04%	0.56
5.750	0.250	28.750	3.818	1.5	12	18.0	3	17.179	0.000	12.93%	0.49	0.858	14.98%	0.57
6.000	0.250	30.000	3.940	1.5	12	18.0	3	17.730	0.000	12.79%	0.50	0.858	14.93%	0.59

## Berechnung des Abstiegs-Rampeneffektes (4)



**Resultat: der O<sub>2</sub>-Anteil (F<sub>O2</sub>) sinkt *weniger* stark ab!**



# REBREATHERS



## Berechnung des Aufstiegs-Rampeneffektes (1)

Beim Aufstieg dehnt sich das im System befindliche Gas aus, der Druck steigt und kompensiert zu einem grossen Teil den Druckabfall durch die geringer werdende Tiefe. Damit strömt weniger oder gar kein Speisegas nach. Resultat: der  $F_{O_2}$  fällt stark ab und führt mit dem gleichzeitig ebenfalls abfallenden Umgebungsdruck zu einem dramatischen Abfall des  $p_{O_2}$ . Wenn nicht intensiv gespült wird, kann rasch eine lebensbedrohliche Situation entstehen.

Es strömt nur noch soviel Speisegas nach, wie die Differenz aus  $Q_{dump} + \dot{V}_{O_2}$  und  $\dot{V}_{BM}$  ausmacht. Solange die Volumenausdehnung mindestens gleich gross ist wie das gedumpte Gas, wird kein  $O_2$  nachströmen! Ist die Volumenausdehnung grösser als  $Q_{dump} + \dot{V}_{O_2}$  wird dieses Gas über das Auslassventil in der inneren Gegenlunge oder ein Ueberdruckventil in die Umgebung abströmen.

Je geringer die Tiefe, desto grösser die Volumenänderung im *Verhältnis* zum ventilierten Gasvolumen und desto grösser der Effekt!

Es gelten dieselben physikalisch-mathematischen Beziehungen wie bei der Abstiegsrampe:

$$\dot{V}_{BM} = \frac{V_{sys} \cdot (p_{amb}(T_n) - p_{amb}(T_{n-1}))}{(t_n - t_{n-1})}$$

[14a]

**Beachte: beim Aufstieg ist  $\dot{V}_{BM}$  NEGATIV !**

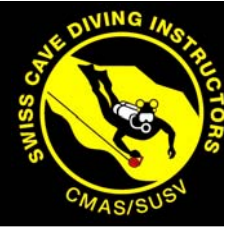
$$F_{O_2GG} = \frac{[F_{mixO_2} \cdot (Q_{dump} + \dot{V}_{O_2} + \dot{V}_{BM}) - \dot{V}_{O_2}]}{Q_{dump}}$$

[16]

**Resultat: Da  $\dot{V}_{O_2BM}$  beim Auftauchen negativ ist, sinkt der  $O_2$ -Anteil zusätzlich ab, der  $F_{O_2GG}$  liegt tiefer !**



# REBREATHERS



## Berechnung des Aufstiegs-Rampeneffektes (2)

Anhand einer **Aufstiegsrampe** von 30m auf 10m wird dieser Effekt gezeigt.

(Start Aufstieg mit  $F_{O_2}=25\%$ )

Zeit t [min]	dt [min]	Tiefe [m]	Druck [bar]
0.000	1.000	60.000	6.880
1.000	1.000	55.000	6.390
2.000	1.000	50.000	5.900
3.000	1.000	45.000	5.410
4.000	1.000	40.000	4.920
5.000	1.000	35.000	4.430
6.000	1.000	30.000	3.940
7.000	1.000	25.000	3.450
8.000	1.000	20.000	2.960

AZVsurf [l]	n AZ [1 / 1min]	AMVsurf [l / 1min]	n AZ_tot [1 / dt]	Vol_vent [l / dt]
1.5	12	18.0	12	123.840
1.5	12	18.0	12	115.020
1.5	12	18.0	12	106.200
1.5	12	18.0	12	97.380
1.5	12	18.0	12	88.560
1.5	12	18.0	12	79.740
1.5	12	18.0	12	70.920
1.5	12	18.0	12	62.100
1.5	12	18.0	12	53.280

ohne BM-Effekt

dVBM [l / dt]	F_O2 (t) [---]	p_O2 (t) [bar]
0.000	25.00%	1.72
0.000	20.46%	1.31
0.000	18.75%	1.11
0.000	17.80%	0.96
0.000	17.00%	0.84
0.000	16.18%	0.72
0.000	15.23%	0.60
0.000	14.10%	0.49
0.000	12.72%	0.38

mit BM-Effekt

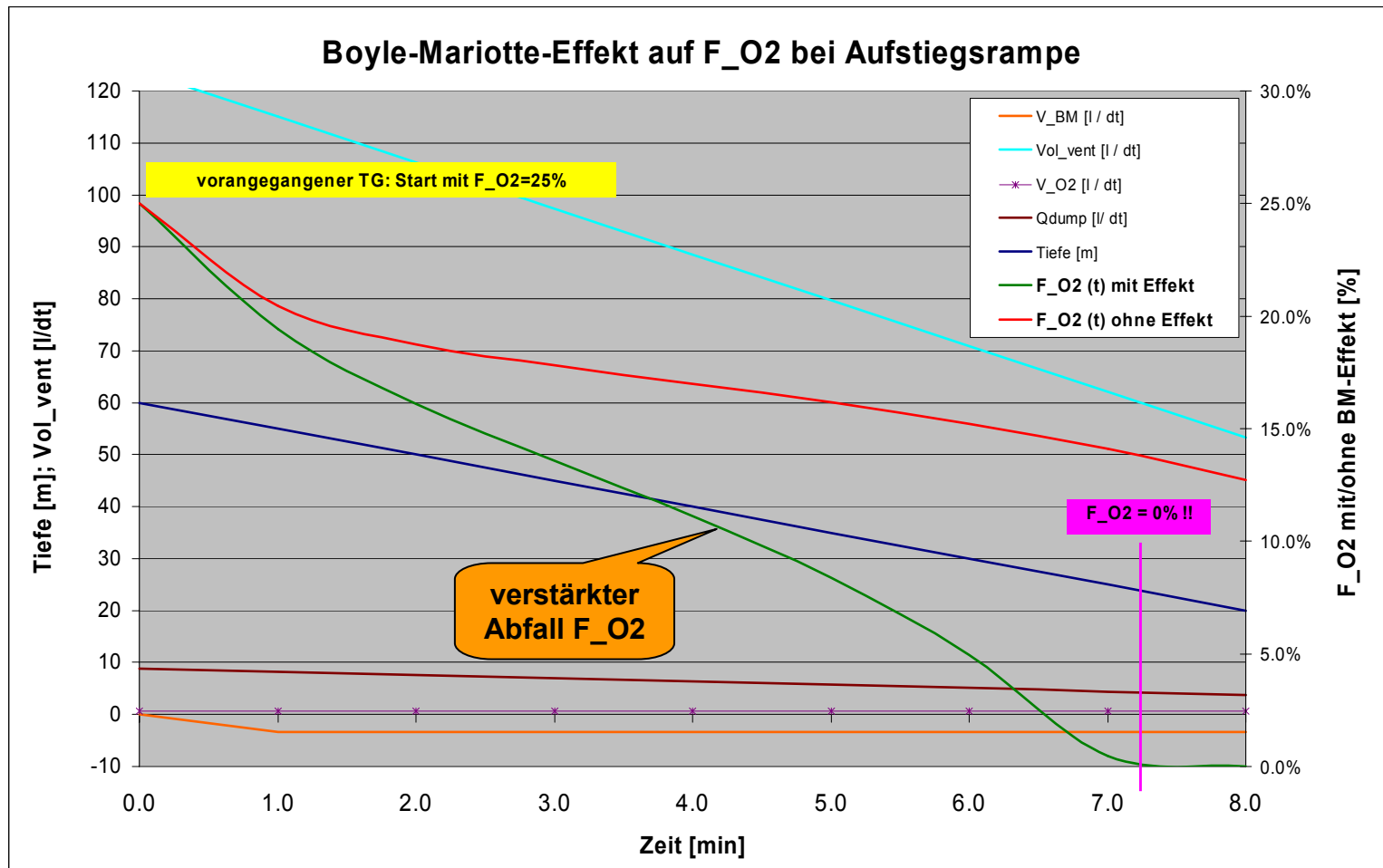
dVBM [l / dt]	F_O2 (t) [---]	p_O2 (t) [bar]
0.000	25.00%	1.72
-3.430	19.41%	1.24
-3.430	16.10%	0.95
-3.430	13.56%	0.73
-3.430	11.12%	0.55
-3.430	8.37%	0.37
-3.430	4.95%	0.20
-3.430	0.45%	0.02
-3.430	0.00%	0.00



# REBREATHERS



## Berechnung des Aufstiegs-Rampeneffektes (3)



**Resultat: der  $O_2$ -Anteil ( $F_{O_2}$ ) sinkt zusätzlich!**



# REBREATHERS

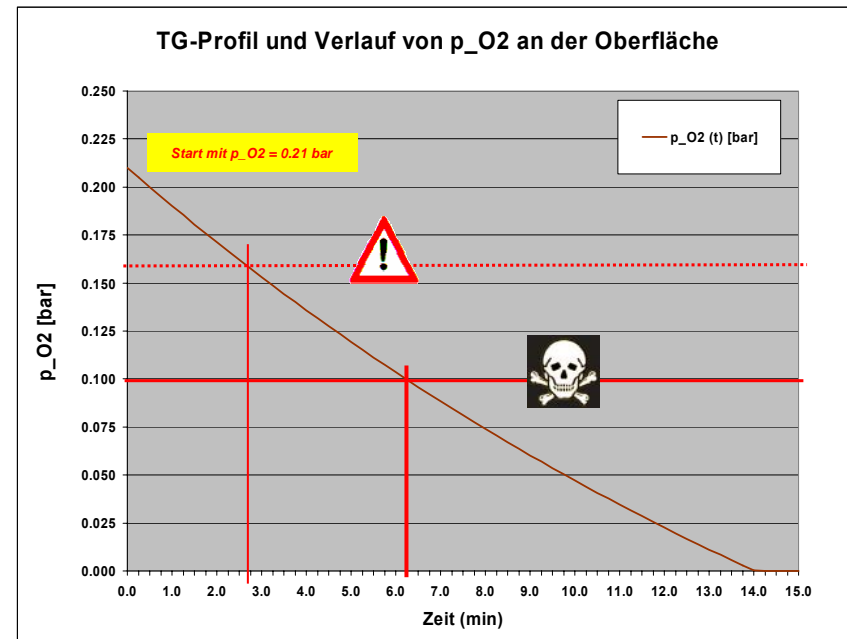


## Berechnung des Spülungs-Effektes (1)

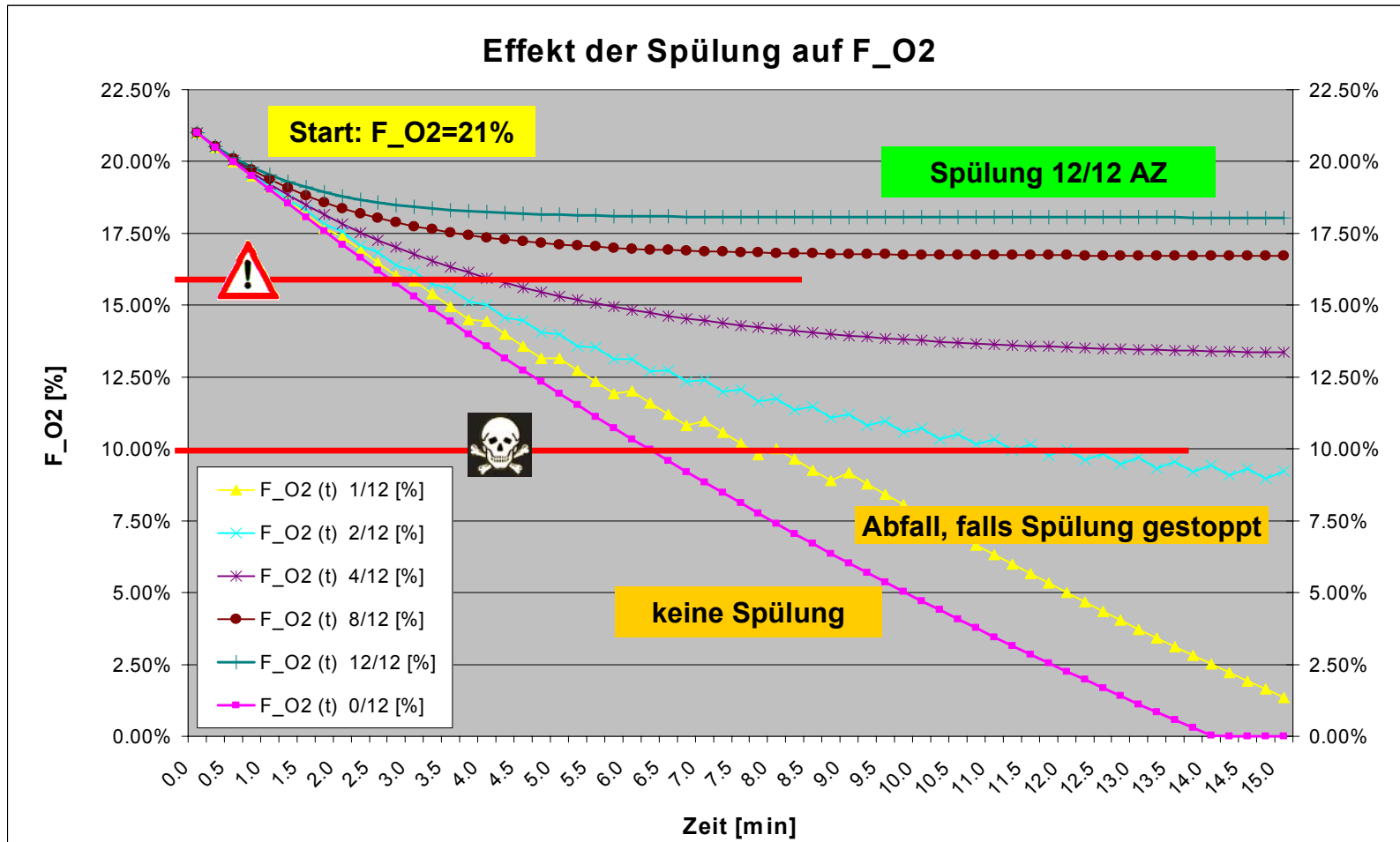
Um den O<sub>2</sub>-Anteil anzuheben, besonders während einer Aufstiegs, wird das System gespült. Dies kann manuell durch ein Bypass-Ventil geschehen (manual override) oder dadurch dass das eingeatmete Gas durch die Nase in die Umgebung ausgeatmet wird. Zur Deckung des Volumendefizits wird entsprechend zusätzliches Speisegas nachströmen.

Zur Illustrierung des Effektes wird ein Gemisch (Luft) als Speisegas verwendet, das an der Oberfläche nach kürzester Zeit zu einem lebensbedrohlich tiefen p<sub>O<sub>2</sub></sub> im Loop führen würde. Dann wird mit verschiedenen Frequenzen jeweils ein Atemzug gespült.

Initialanteil O <sub>2</sub> im Loop zu Beginn Zyklus	21.0%	
Anteil O <sub>2</sub> im Speisegas (F <sub>O<sub>2</sub></sub> Flasche)	21.0%	
AtemMinutenVolumen	18.0 l/min / 1 bar	
metabolisch verbrauchtes O <sub>2</sub>	4%...5% * AMV	
Ventilationskoeffizient 17...20...25	25.0	
Eliminationsrate des SCR	= 1: 14.0	= 7.1%
Gesamtvolumen des Systems	7.0 l	
Max. Inspirationsvol. (=Gegenlungenvolumen)	4.5 l	
Totaldruck an der Oberfläche	1.0 bar	
Drucksteigerungsfaktor	1.000 bar/10m H <sub>2</sub> O	



## Berechnung des Spülungs-Effektes (2)



**Resultate: 1)der O2-Anteil (F<sub>O2</sub>) kann signifikant angehoben werden!  
 2) mit Kr=7% kann F<sub>O2</sub> =18% erst bei 12 Spülungen/12 AZ gehalten werden.**





# REBREATHERS



## Effekt eines Gaswechsels (1)

Um einen Gaswechsel unter Wasser modellieren zu können, wird wieder die Grundüberlegung aus Gl. [10] übernommen (d.h. es wird eine Massenbilanz angestellt):

Die Veränderung des Inertgas-Anteils  $dF_{IG}$  im System im Zeitinkrement  $dt$  kann dann wie folgt ausgedrückt werden:

$$V \cdot \Delta F_{IG} = ( F_{mixIG} \cdot ( Q_{dump} + \dot{V}_{O_2} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM} ) - \dot{F}_{IG}(t) \cdot ( Q_{dump} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM} ) ) \cdot \Delta t$$

[17]

Durch Ableitung nach der Zeit  $t$  erhält man analog Gl. [12] eine Differentialgleichung mit folgender Lösung für den Verlauf des Inertgas-Anteils:

$$F_{IG}(t) = C + (F_{IG-start} - C) \cdot e^{\left[ \frac{-(Q_{dump} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM})}{V} \cdot t \right]}$$

[18]

Dabei ist  $F_{mixIG}$  der Inertgas-Anteil im Speisegas,  $F_{IG}$  derjenige im Loop



# REBREATHERS



## Effekt eines Gaswechsels (2)

Dabei ist  $C$  der sog. Gleichgewichtszustand:

$$C = \frac{F_{mixIG} \cdot (Q_{dump} + \dot{V}_{O_2} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM})}{(Q_{dump} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM})} \quad [19]$$

Der Zähler des Bruches repräsentiert den Netto-Zufluss von Inertgas in das System hinein, der Nenner den aus dem Kreislauf ins Wasser ausgestossene Gasstrom.

Wenn auf **reinen Sauerstoff gewechselt** wird, wird damit  $F_{mixIG} = 0$  ! Damit wird  $C = 0$  !

Für  $t=0$  wird der Term  $e^{-kt}$  in Gl. [18] = 1; damit wird

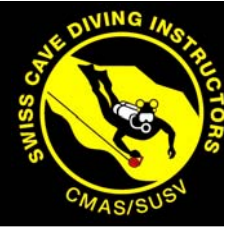
$$F_{IG}(t=0) = C + (F_{IG-start} - C) \cdot 1 = F_{IG-start} \quad [18a]$$

Für  $t = \infty$  wird der Term  $e^{-kt}$  in Gl. [18] = 0; damit wird

$$F_{IG}(t = \infty) = C = F_{IG-GG} \quad [18b]$$



# REBREATHERS

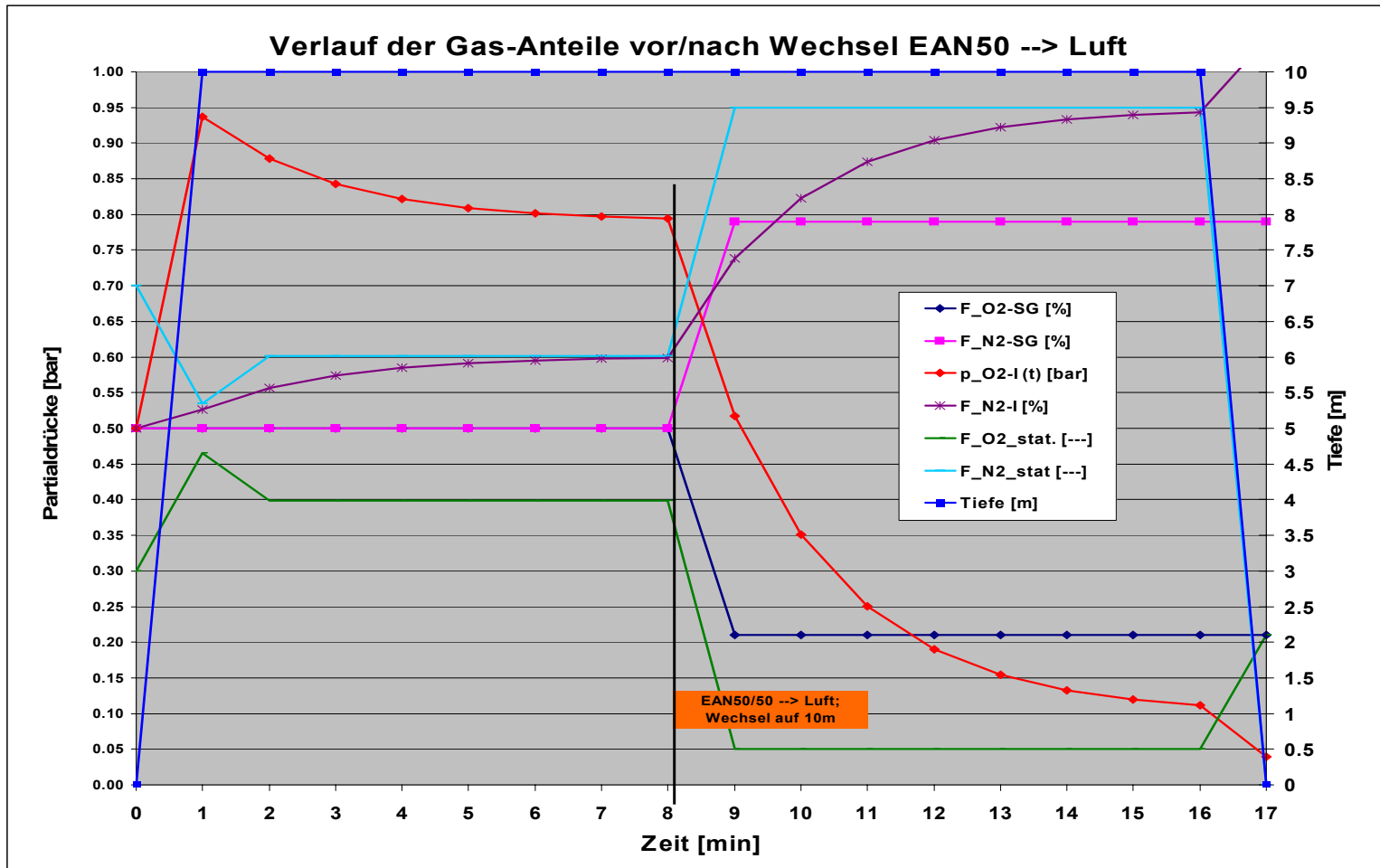


## Effekt eines Gaswechsels (3)

F_O2-init	Initialanteil O2 im Loop zu Beginn Zyklus		21.0%
AMV	AtemMinutenVolumen		12.....20 l/min bei 1 bar; variabel
V_O2	metabolisch verbrauchtes O2		4%...5% * AMV
Ke	Ventilationskoeffizient 17...20...25		25.0
Kr_surf	Eliminationsrate des SCR an Oberfläche	= 1:	10 = 10.00%
dKrdT	Aenderung der Eliminationsrate		0.000000 1 / m
V	Gesamtvolumen des Systems		7.0 l
V_bellow	Max. Inspirationsvol. (=Gegenlungenvolumen)		4.5 l
P_ambSurf	Totaldruck an der Oberfläche		1.0 bar
dpdT	Drucksteigerungsfaktor		0.980 bar / 10m H2O

Zeit t [min]	Tiefe [m]	Speisegas			AMVsurf [l / 1min]	Spülvol. [l / dt]	Verbrauch / Dump			F_O2 (t) [%]	p_O2-I (t) [bar]	F_N2-I [%]
		F_O2-SG [%]	F_N2-SG [%]	F_He-SG [%]			V_O2 [l / dt]	Kr [---]	Qdump [l / dt]			
0.0	0	50.0%	50.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	1.80	50.00%	0.50	0.500
1.000	10.000	50.0%	50.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	47.33%	0.94	0.527
2.000	10.000	50.0%	50.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	44.36%	0.88	0.556
3.000	10.000	50.0%	50.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	42.58%	0.84	0.574
4.000	10.000	50.0%	50.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	41.51%	0.82	0.585
5.000	10.000	50.0%	50.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	40.87%	0.81	0.591
6.000	10.000	50.0%	50.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	40.48%	0.80	0.595
7.000	10.000	50.0%	50.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	40.25%	0.80	0.598
8.000	10.000	50.0%	50.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	40.11%	0.79	0.599
9.000	10.000	21.0%	79.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	26.12%	0.52	0.739
10.000	10.000	21.0%	79.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	17.71%	0.35	0.823
11.000	10.000	21.0%	79.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	12.65%	0.25	0.873
12.000	10.000	21.0%	79.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	9.62%	0.19	0.904
13.000	10.000	21.0%	79.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	7.79%	0.15	0.922
14.000	10.000	21.0%	79.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	6.69%	0.13	0.933
15.000	10.000	21.0%	79.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	6.03%	0.12	0.940
16.000	10.000	21.0%	79.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	3.56	5.64%	0.11	0.944
17.000	0.000	21.0%	79.0%	0.0%	18.0	0.00	0.72	10.0%	1.80	3.97%	0.04	1.046

## Effekt eines Gaswechsels (4)

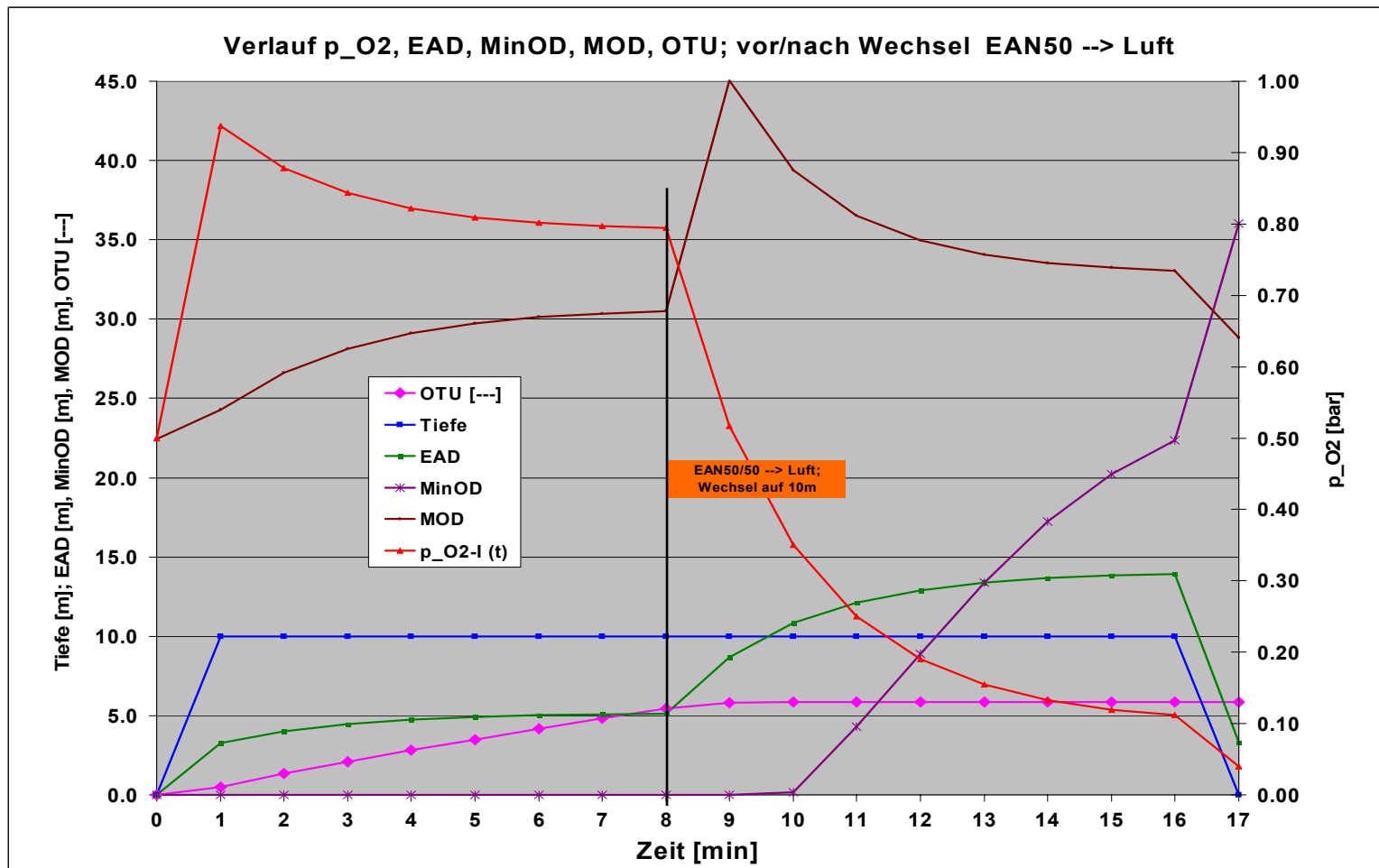




# REBREATHERS



## Effekt eines Gaswechsels (5)

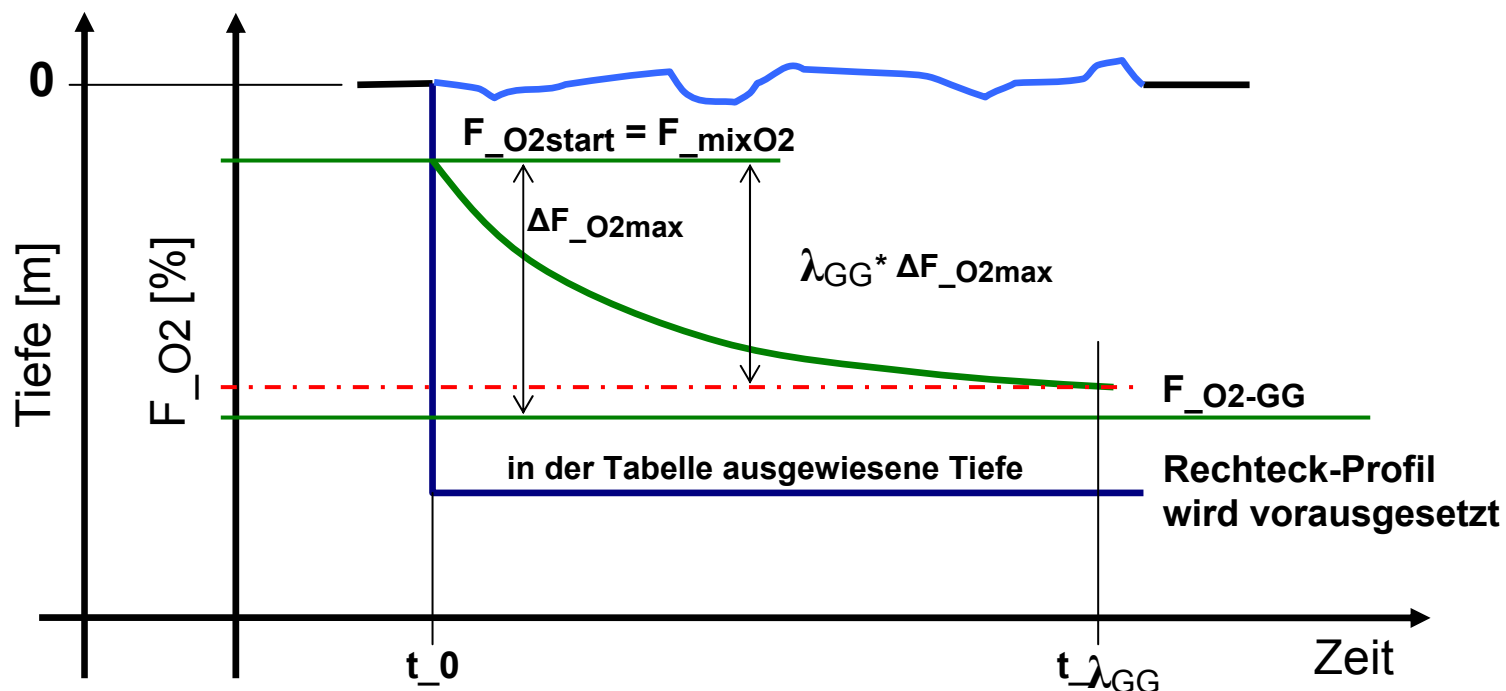


## O2-Drop Tabelle (1)

Es ist eine gerätetechnisch unvermeidbare Tatsache, dass der  $p_{O_2}$  im System immer tiefer ist als derjenige im Speisegas. Er wird sofort nach Inbetriebnahme vom ursprünglichen Startwert ( $=F_{mixO_2}$ ) abfallen und nach einer gewissen Zeit einen stabilen Gleichgewichtswert ( $F_{O_2-GG}$ ) erreichen, der für jede Tiefe und jede Gaszusammensetzung anders ist.

Die so berechneten Werte können in einer sog. **O2-Drop-Tabelle** dargestellt werden.

**Muster-Profil:**





# REBREATHERS



## O<sub>2</sub>-Drop Tabelle (2)

Es ist auch interessant, die Zeit zu kennen, nach der auf einer bestimmten Tiefe, mit einem bestimmten Gemisch etc. der Gleichgewichtszustand ANNAEHERND (z.B. zu 98%, 99% etc. erreicht wird.. [Rein mathematisch wird ein 100%-Gleichgewichtszustand erst nach unendlich langer Zeit erreicht! ]

Dabei werden konstante Umgebungsbedingungen vorausgesetzt und auch kein Spülung.

$$\lambda_{GG}(t) = \frac{\Delta F_{O_2}(t)}{\Delta F_{O_2max}} = \frac{(F_{O_2start} - F_{O_2}(t))}{(F_{O_2start} - F_{O_2GG})} \quad [19]$$

Aus Gleichungen [12] und [13], sowie [6'] lassen sich  $F_{O_2}(t)$  und  $F_{O_2GG}$  substituieren. Es gilt die Logarithmierungsregel:

$$\text{wenn } C = e^{(-k \cdot t)} \text{ dann: } \ln(C) = -k \cdot t \text{ oder: } t = \frac{\ln(C)}{-k}$$

Anschliessend wird durch umformen weiteres umformen und auflösen nach  $t$  gezeigt, dass gilt:

$$t_{\lambda_{GG}} = \frac{(-1) \cdot V_{(Sys)}}{Q_{dump}} \cdot \ln \left[ 1 - \lambda_{GG} \right] \quad [20]$$



# REBREATHERS



## O2-Drop Tabelle (3)

Durch Substitution der Grundparameter in  $Q_{dump}$  erhält man:

$$t_{-\lambda_{GG}} = \frac{(-1) \cdot V_{(Sys)} \cdot p_{ambSurf}}{AMV \cdot Kr \cdot p_{amb}(Tiefe)} \cdot \ln \left[ 1 - \lambda_{GG} \right] \quad [20']$$

Dabei ist  $\lambda_{GG}$  der prozentuale Erreichungsgrad bis zum Gleichgewichtszustand. Dessen Wert beträgt zw. 0%....100%, resp. zw. 0....1.

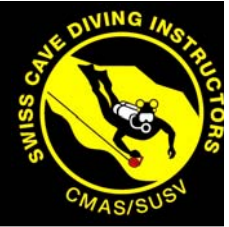
Auf den ersten Blick erstaunlich ist die Zeit bis zum Erreichen eines bestimmten, relativen Erreichungsgrades  $\lambda_{GG}$  nur abhängig von diesem selbst, sowie vom Systemvolumen  $V$  und von  $Q_{dump}$  und NICHT vom O2-Anteil im Speisegas.

Die physikalische Erklärung findet sich unter dem Punkt **Zeitkonstante**! Für die präsentierten O2-Drop-Tabellen wurde jeweils ein Erreichungsgrad von 99% vorausgesetzt. Es lässt sich zeigen, dass die benötigte Zeit zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes ca. 4.6 Zeitkonstanten entspricht, bis zum Erreichungsgrad von 95% sind 3 Zeitkonstanten nötig.





# REBREATHERS



## O2-Drop Tabelle (4)

Die nachfolgende Tabelle zeigt für eine Reihe von Gemischen und Tiefen den jeweiligen  $F_{O2}$  und  $p_{O2}$ , zusammen mit dem aktuellen  $MOD$ .

Wird auch nur einer der gelb unterlegten Werte geändert, so ändern sämtliche Werte in der Tabelle!

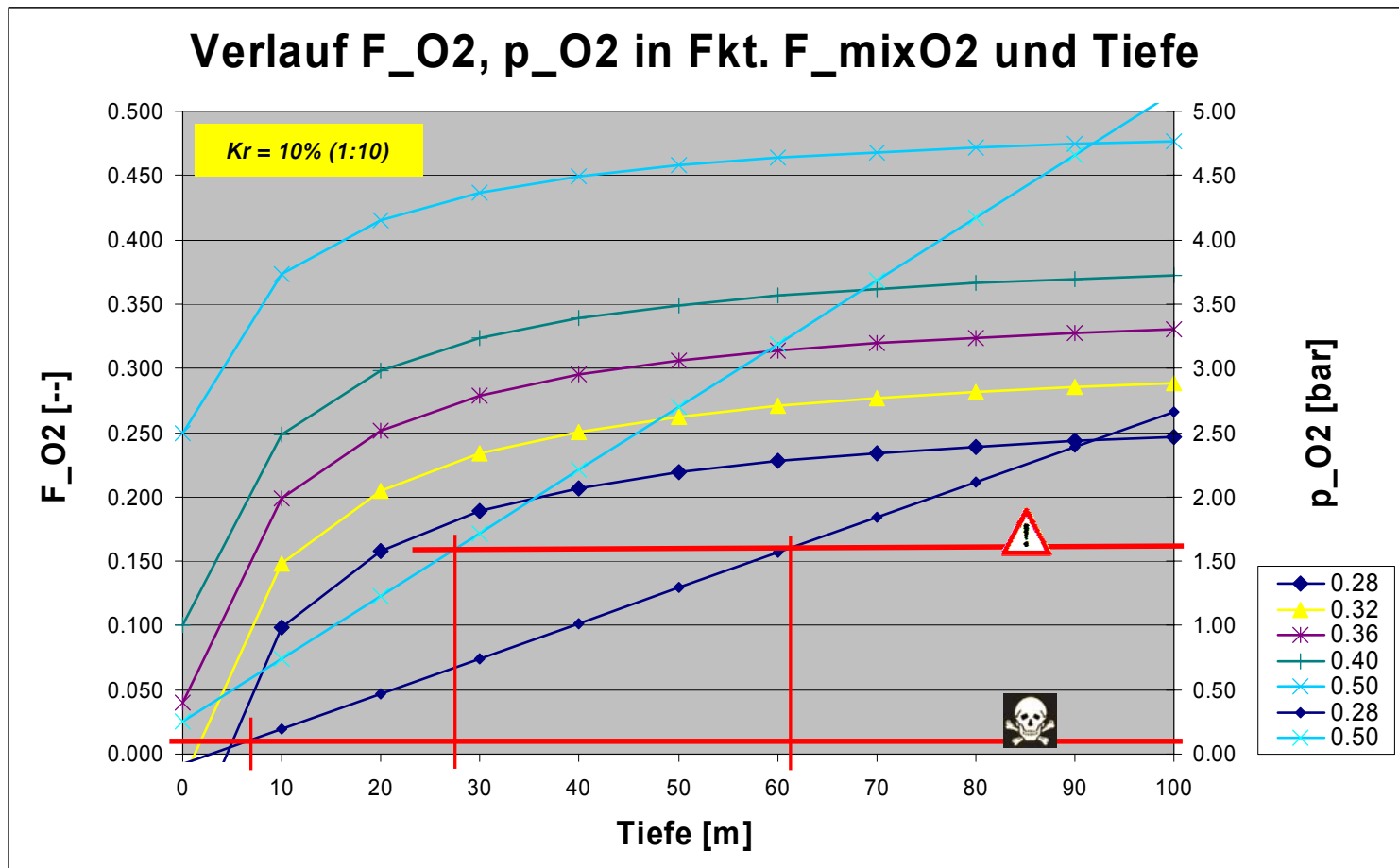
O2-Drop Table for passive, RMV-triggered, constant dump ratio SCR																										
		$p_{ambSurf}$	1	bar	Oberflächendruck																					
		$d_{pdT}$	0.98	bar/10m				Gas	Nitrox																	
		V	7	l (Systemvolumen)				$p_{O2max (MOD)}$	1.6	bar																
		AMV	18	l/min bei 1 bar				$p_{N2max (MOD)}$	4.8	bar	(50m Luft)															
		Kr	4	%				$\lambda_{GG}$	99.0%	proz. Erreichung des GG-Zustandes																
		$K_E$	10	%			= 1: 10.0	$F_{O2GG}$	F <sub>O2</sub> bei erreichen Gleichgewichtszustand																	
		$V_{O2}$	0.72	l/min absolut; druck-unabhängig				MOD	kleinerer Wert aus MOD <sub>O2</sub> und MOD <sub>N2</sub>																	
		$Q_{dump}$	1.8	l/min bei 1 bar				TG-Profil	Rechteck, zeitloser Abstieg																	
				$F_{mixO2} = 21.00\%$				$F_{mixO2} = 30.00\%$				$F_{mixO2} = 36.00\%$				$F_{mixO2} = 40.00\%$				$F_{mixO2} = 50.00\%$						
		MOD <sub>O2</sub>	67.5	m			MOD <sub>O2</sub>	44.2	m			MOD <sub>O2</sub>	35.1	m			MOD <sub>O2</sub>	30.6	m			MOD <sub>O2</sub>	22.4	m		
		MOD <sub>N2</sub>	51.8	m			MOD <sub>N2</sub>	59.8	m			MOD <sub>N2</sub>	66.3	m			MOD <sub>N2</sub>	71.4	m			MOD <sub>N2</sub>	87.8	m		
Tiefe [m]	Druck [bar]	$t_{99}$ [min]	$F_{O2GG}$ [%]	$p_{O2}$ [bar]	MOD [m]	$F_{O2GG}$ [%]	$p_{O2}$ [bar]	MOD [m]	$F_{O2GG}$ [%]	$p_{O2}$ [bar]	MOD [m]	$F_{O2GG}$ [%]	$p_{O2}$ [bar]	MOD [m]	$F_{O2GG}$ [%]	$p_{O2}$ [bar]	MOD [m]									
0	1.000	17.91				2.00%	0.020	39.8	10.40%	0.104	44.5	16.00%	0.160	48.1	30.00%	0.300	44.2									
3	1.294	13.84				8.36%	0.108	43.2	16.22%	0.210	48.3	21.45%	0.278	52.2	34.54%	0.447	37.1									
6	1.588	11.28				11.10%	0.017	39.3	19.88%	0.316	50.9	24.89%	0.395	55.0	37.41%	0.594	33.4									
9	1.882	9.52	4.21%	0.079	40.9	15.12%	0.285	47.5	22.40%	0.422	52.9	27.25%	0.513	49.7	39.37%	0.741	31.3									
12	2.176	8.23	6.48%	0.141	42.2	17.13%	0.373	48.9	24.24%	0.527	54.4	28.97%	0.630	46.2	40.81%	0.888	29.8									
15	2.470	7.25	8.21%	0.203	43.2	18.66%	0.461	50.0	25.64%	0.633	53.5	30.28%	0.748	43.7	41.90%	1.035	28.8									
18	2.764	6.48	9.57%	0.264	44.0	19.87%	0.549	50.9	26.74%	0.739	50.9	31.32%	0.866	41.9	42.76%	1.182	28.0									
21	3.058	5.86	10.67%	0.326	44.6	20.84%	0.637	51.7	27.63%	0.845	48.9	32.15%	0.983	40.6	43.46%	1.329	27.4									
24	3.352	5.34	11.57%	0.388	45.2	21.65%	0.726	52.3	28.36%	0.951	47.4	32.84%	1.101	39.5	44.03%	1.476	26.9									
27	3.646	4.91	12.33%	0.450	45.7	22.32%	0.814	52.8	28.98%	1.057	46.1	33.42%	1.218	38.7	44.51%	1.623	26.5									
30	3.940	4.55	12.98%	0.511	46.1	22.89%	0.902	53.3	29.50%	1.162	45.1	33.91%	1.336	37.9	44.92%	1.770	26.1									
33	4.234	4.23	13.54%	0.573	46.4	23.39%	0.990	53.7	29.95%	1.268	44.3	34.33%	1.454	37.4	45.28%	1.917	25.9									
36	4.528	3.96	14.02%	0.635	46.8	23.82%	1.078	54.1	30.35%	1.374	43.6	34.70%	1.571	36.8	45.58%	2.064	25.6									
39	4.822	3.71	14.45%	0.697	47.0	24.19%	1.167	54.4	30.69%	1.480	43.0	35.02%	1.689	36.4	45.85%	2.211	25.4									
42	5.116	3.50	14.82%	0.758	47.3	24.53%	1.255	54.7	31.00%	1.586	42.5	35.31%	1.806	36.0	46.09%	2.358	25.2									
45	5.410	3.31	15.16%	0.820	47.5	24.82%	1.343	54.9	31.27%	1.692	42.0	35.56%	1.924	35.7	46.30%	2.505	25.1									
48	5.704	3.14	15.46%	0.882	47.7	25.09%	1.431	54.9	31.51%	1.797	41.6	35.79%	2.042	35.4	46.49%	2.652	24.9									
51	5.998	2.99	15.73%	0.944	47.9	25.33%	1.519	54.2	31.73%	1.903	41.2	36.00%	2.159	35.1	46.67%	2.799	24.8									
54	6.292	2.85	15.98%	1.005	48.1	25.55%	1.608	53.7	31.93%	2.009	40.9	36.19%	2.277	34.9	46.82%	2.946	24.7									

copyright  
Beat A. Müller

Achtung: es dürfen keine Werte extra- oder interpoliert werden!

## O2-Drop Tabelle (5)

Der Zusammenhang zwischen Speisegas ( $F_{mixO_2}$ ), Tiefe und Endzustand (Gleichgewichtszustand), sowie den erreichten  $p_{O_2}$  zeigt die folgende Graphik:





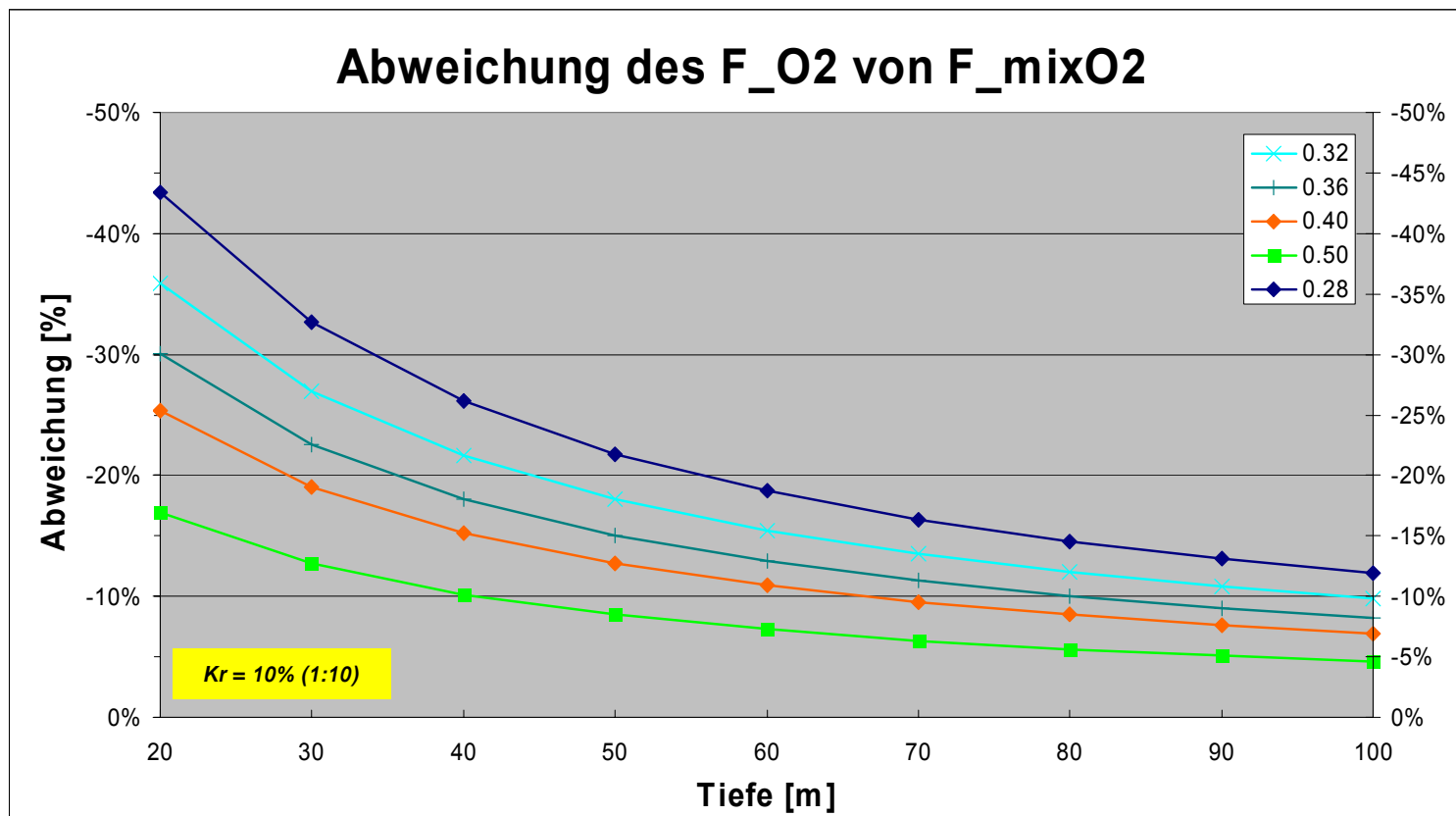
# REBREATHERS



## O<sub>2</sub>-Drop Tabelle (6)

Es kann festgestellt werden, dass die prozentuale Abweichung des  $F_{O_2}$  im System an  $F_{mixO_2}$  des Speisegases

- a) besser, also kleiner wird mit zunehmender Tiefe und mit höherem O<sub>2</sub>-Anteil im Speisegas
- b) bis 40m für alle Gemische die Abweichungen zw. -10% bis -44% betragen!





# REBREATHERS



## O2-Drop Tabelle (7a)

Für ein bestimmtes Gas (**Tmx21/35**) wurde die Drop-Tabelle bis auf 90m durchgerechnet, gleichzeitig mit MinOD. MOD, EAN. Es zeigt sich dabei, wie schnell die Zeit für das Erreichen einer 99%igen Annäherung an das Gleichgewicht mit grösserer Tiefe abfällt.

$p_{ambSurf}$	1 bar	Oberflächendruck										
$dpdT$	0.98	bar/10m										
$V$	7	l (Systemvolumen)										
$AMV$	18	l/min bei 1 bar										
$Kr$	4	%										
$K_E$	7.15	%	= 1: 14.0									
$V_{O2}$	0.72	l/min absolut; konstant										
$Q_{dump}$	1.287	l/min bei 1 bar										
$F_{mixO2}$	21.00%	} Gas = <b>Tmx21/35</b>										
$F_{mixHe}$	35.00%											
$F_{mixN2}$	44.00%											
$p_{O2min} (MinOD)$	0.18	bar										
$p_{O2max} (MOD)$	1.6	bar										
$p_{Hemax} (MOD)$	10	bar										
$p_{N2max} (MOD)$	4.8	bar	(50m Luft)									
$\lambda_{GG}$	99.0%	proz. des GGew.										
$F_{O2GG}$		$F_{O2}$ bei erreichen GGew.										
MOD		Min(MOD [O2, N2, He])										
TG-Profil		Rechteck, zeitloser Abstieg										
MOD_O2	67.5	m										
MOD_He	129.7	m										
MOD_N2	101.1	m										

Tiefe [m]	Druck [bar]	t_99 [min]	F_O2GG [%]	p_O2 [bar]	p_He [bar]	p_N2 [bar]	MinOD [m]	MOD [m]	EAD [m]	req. MinD [m]
12	2.176	11.51	0.69%	0.015	0.957	1.204	256.2	78.3	5.3	12
15	2.470	10.14	3.11%	0.077	1.060	1.333	48.91	80.6	7.0	15
18	2.764	9.06	5.01%	0.138	1.163	1.462	26.46	82.4	8.7	18
21	3.058	8.19	6.55%	0.200	1.266	1.592	17.85	83.9	10.4	21
24	3.352	7.47	7.82%	0.262	1.369	1.721	13.3	85.2	12.0	24
27	3.646	6.87	8.88%	0.324	1.472	1.850	10.5	86.3	13.7	27
30	3.940	6.36	9.78%	0.385	1.575	1.980	8.6	87.3	15.4	30
33	4.234	5.92	10.56%	0.447	1.678	2.109	7.2	88.1	17.0	33
36	4.528	5.53	11.24%	0.509	1.781	2.238	6.1	88.9	18.7	36
39	4.822	5.19	11.83%	0.571	1.884	2.368	5.3	89.5	20.4	39
42	5.116	4.90	12.36%	0.632	1.986	2.497	4.7	90.1	22.1	42
45	5.410	4.63	12.83%	0.694	2.089	2.627	4.1	90.7	23.7	45
48	5.704	4.39	13.25%	0.756	2.192	2.756	3.7	91.2	25.4	48
51	5.998	4.18	13.63%	0.818	2.295	2.885	3.3	91.6	27.1	51
54	6.292	3.98	13.98%	0.879	2.398	3.015	2.9	92.0	28.7	54
57	6.586	3.80	14.29%	0.941	2.501	3.144	2.6	92.4	30.4	57
60	6.880	3.64	14.58%	1.003	2.604	3.273	2.4	92.7	32.1	60
63	7.174	3.49	14.84%	1.065	2.707	3.403	2.2	93.1	33.7	63
66	7.468	3.35	15.08%	1.126	2.810	3.532	2.0	93.4	35.4	66
69	7.762	3.23	15.31%	1.188	2.913	3.661	1.8	93.6	37.1	69
72	8.056	3.11	15.51%	1.250	3.015	3.791	1.6	93.9	38.8	72
75	8.350	3.00	15.71%	1.312	3.118	3.920	1.5	93.7	40.4	75
78	8.644	2.90	15.89%	1.373	3.221	4.050	1.4	92.6	42.1	78
81	8.938	2.80	16.06%	1.435	3.324	4.179	1.2	91.5	43.8	81
84	9.232	2.71	16.21%	1.497	3.427	4.308	1.1	90.5	45.4	84
87	9.526	2.63	16.36%	1.559	3.530	4.438	1.0	89.6	47.1	87
90	9.820	2.55	16.50%	1.620	3.633	4.567	0.9	88.7	48.8	90

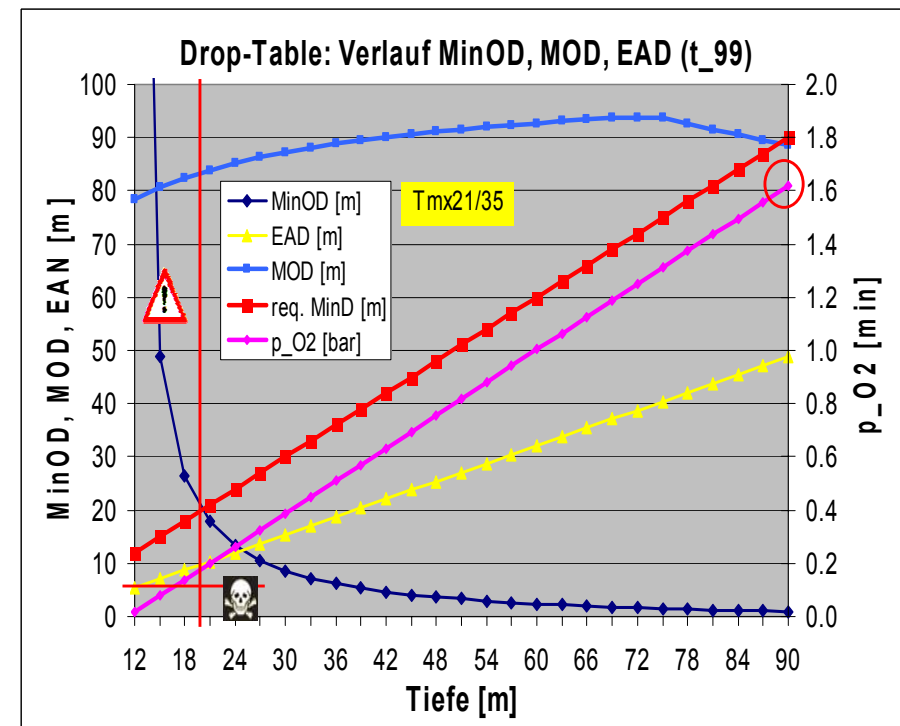
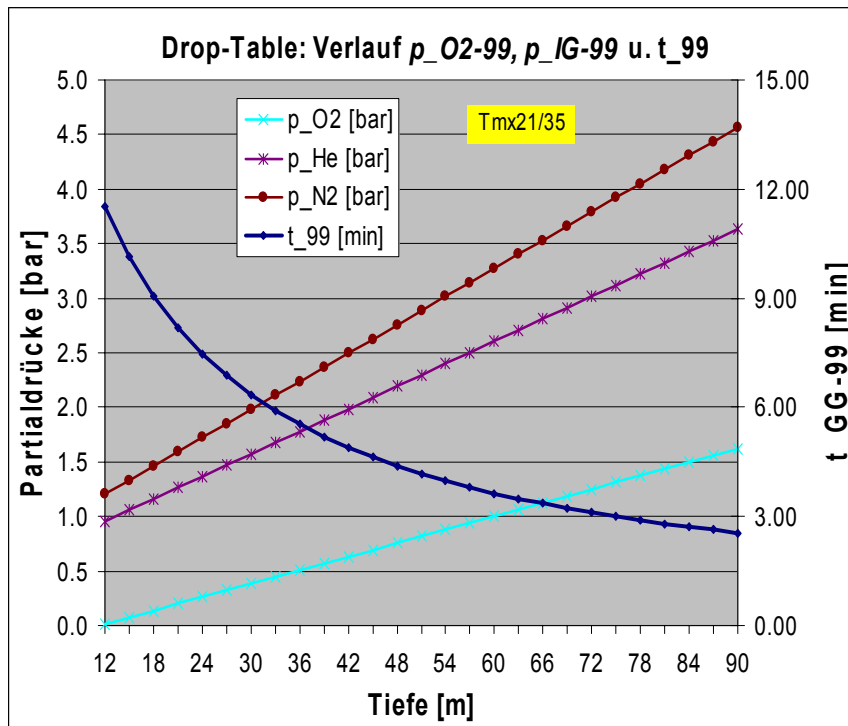


# REBREATHERS



## O2-Drop Tabelle (7b)

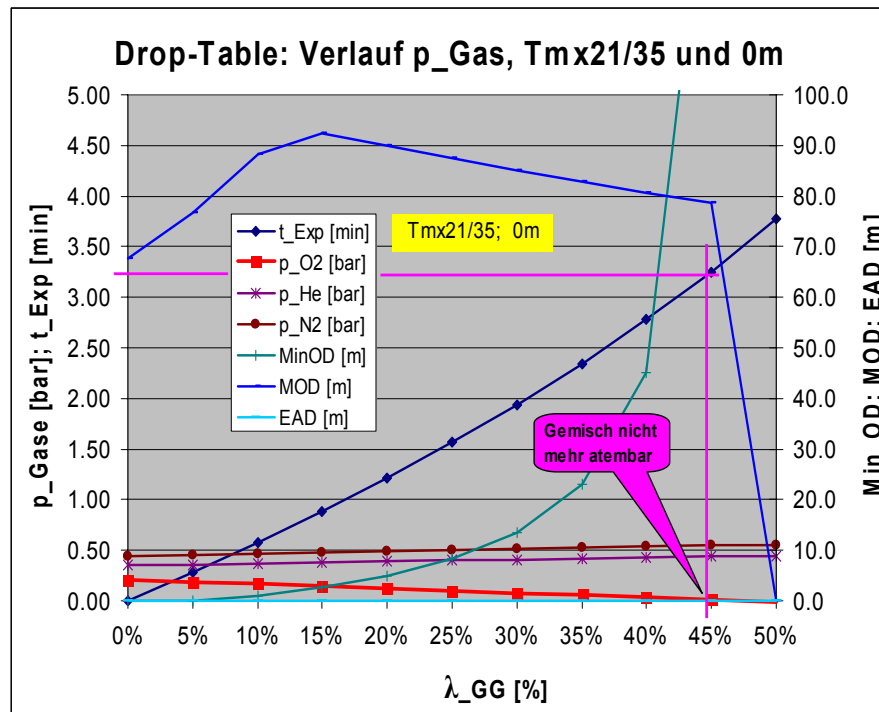
Die Resultate für Tmx21/35 (als Fkt. über die TIEFE) graphisch dargestellt:



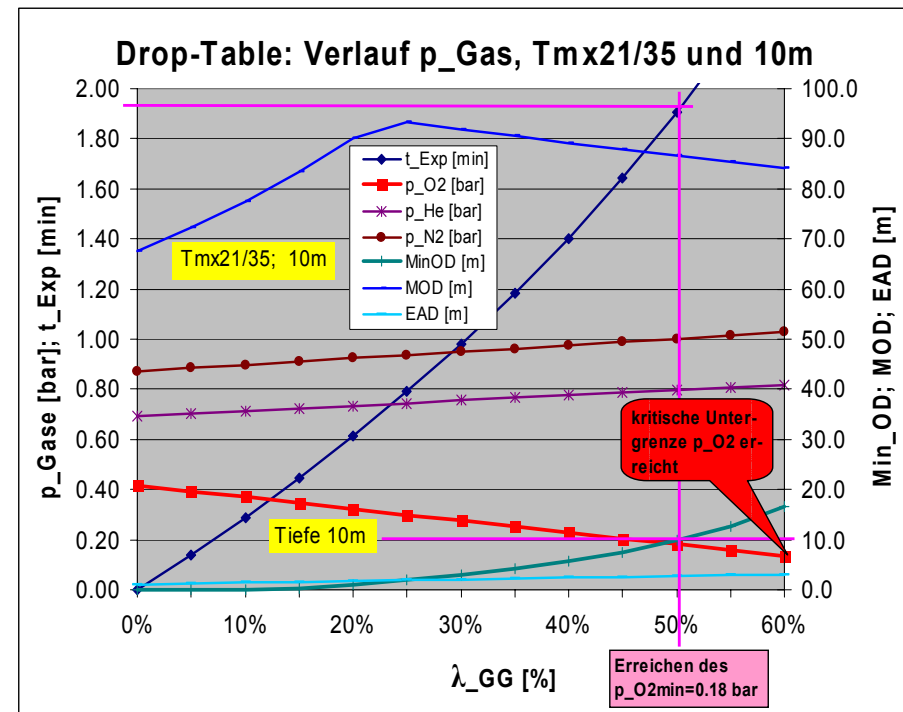
- oberhalb ca. 18-20m kein atembare Gleichgewichtszustand mehr

## O2-Drop Tabelle (7c)

Die Resultate für Tmx21/35 für 2 Tiefen als Fkt. von  $\lambda_{GG}$  graphisch dargestellt:



- Gemisch bei Erreichen von ca. 45% Gleichgewicht (ca. 3.2min) bereits nicht mehr atembar



- def.  $p_{O_2min}$  (0.18bar) bei ca. 51% Gleichgewicht  
 - kritischer  $p_{O_2}$  bei ca. 60% Gleichgewicht

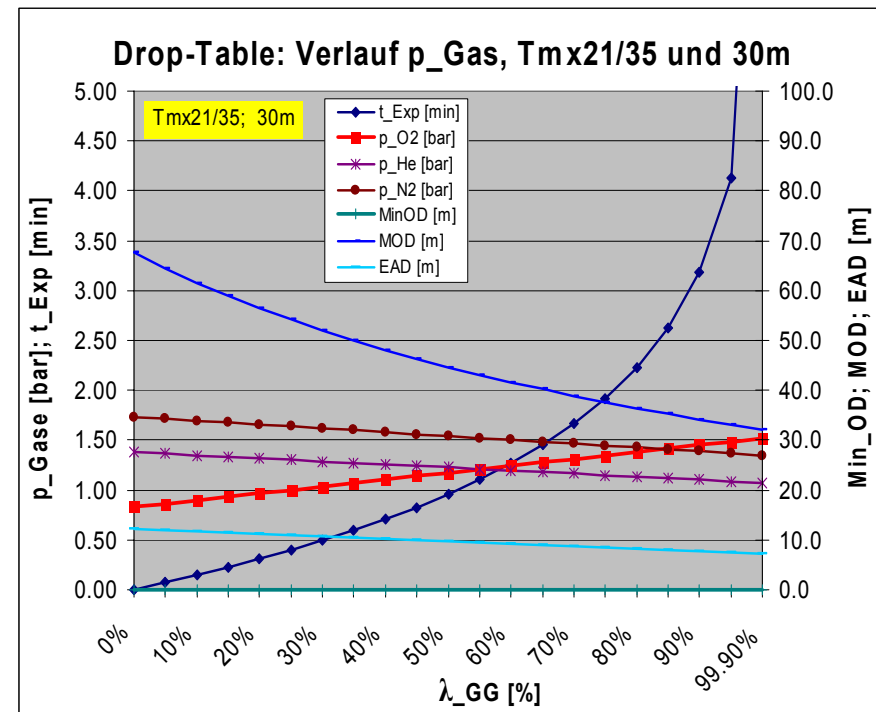
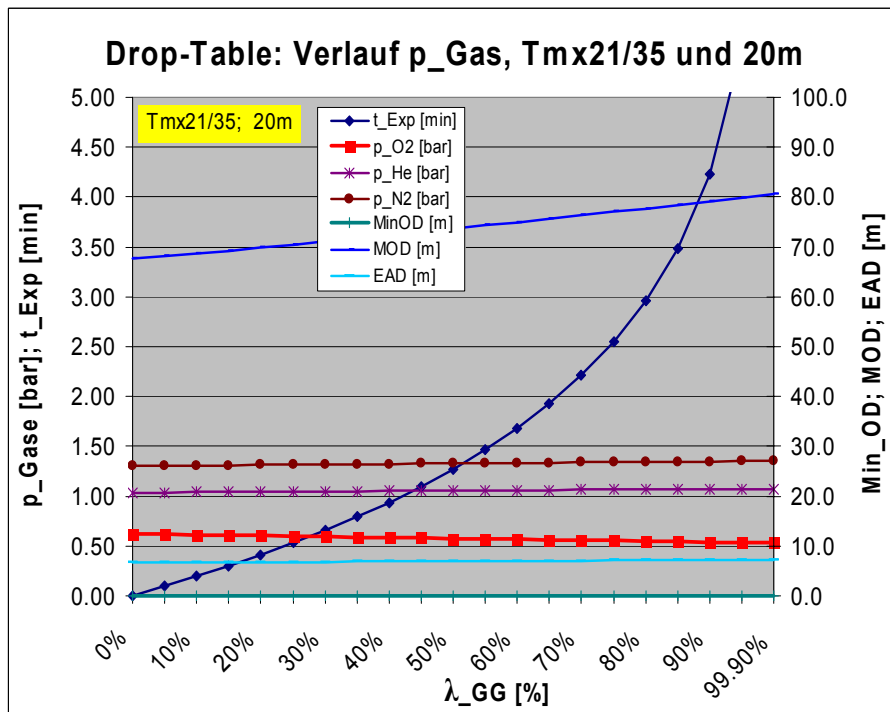


# REBREATHERS



## O2-Drop Tabelle (7d)

Die Resultate für Tmx21/35 für 2 weitere Tiefen als Fkt. von  $\lambda_{GG}$  graphisch dargestellt:



- auch bei 99.9% Gleichgewicht bleibt Gemisch atembar

- Tiefe bereits so gross, dass p\_O-GG höher liegt als Startwert



# REBREATHERS



## Zeitkonstante (1)

Die Zeitkonstante  $k_t$  ist ein Mass für die Schnelligkeit der Veränderung des O<sub>2</sub>-Gehalts im Loop, resp. für die Geschwindigkeit des Gasaustausches im System.

Normalerweise werden ca. **4-5 Zeitkonstanten** (=Perioden) benötigt, bis ein **Gleichgewichtszustand** erreicht worden ist (=Annäherung bis auf 1%). **Kontrolle dieser Aussage: s. O<sub>2</sub>-Drop-Tabelle!** (Achtung: nicht zu verwechseln mit den sog. Halbwertszeiten aus dem Bereich Sättigung/Entsättigung).

Die Zeitkonstante ist der inverse Werte des Exponenten in der Lösung der Differentialgleichung [Gl. 12]:

$$F_{O_2}(t) = C + (F_{O_2start} - C) \cdot e^{\left[ -\frac{(Q_{dump} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM})}{V_{sys}} \cdot t \right]} \quad [12]$$

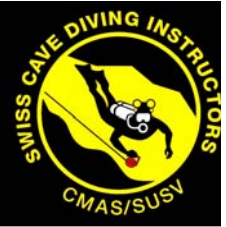
$$k_t = \frac{V_{sys}}{(Q_{dump} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM})} \quad [21]$$

Je höher  $Q_{dump}$  oder  $V_{spül}$ , oder je kleiner das Systemvolumen  $V_{sys}$ , desto kürzer die Austauschzeit.





# REBREATHERS



## Zeitkonstante (2)

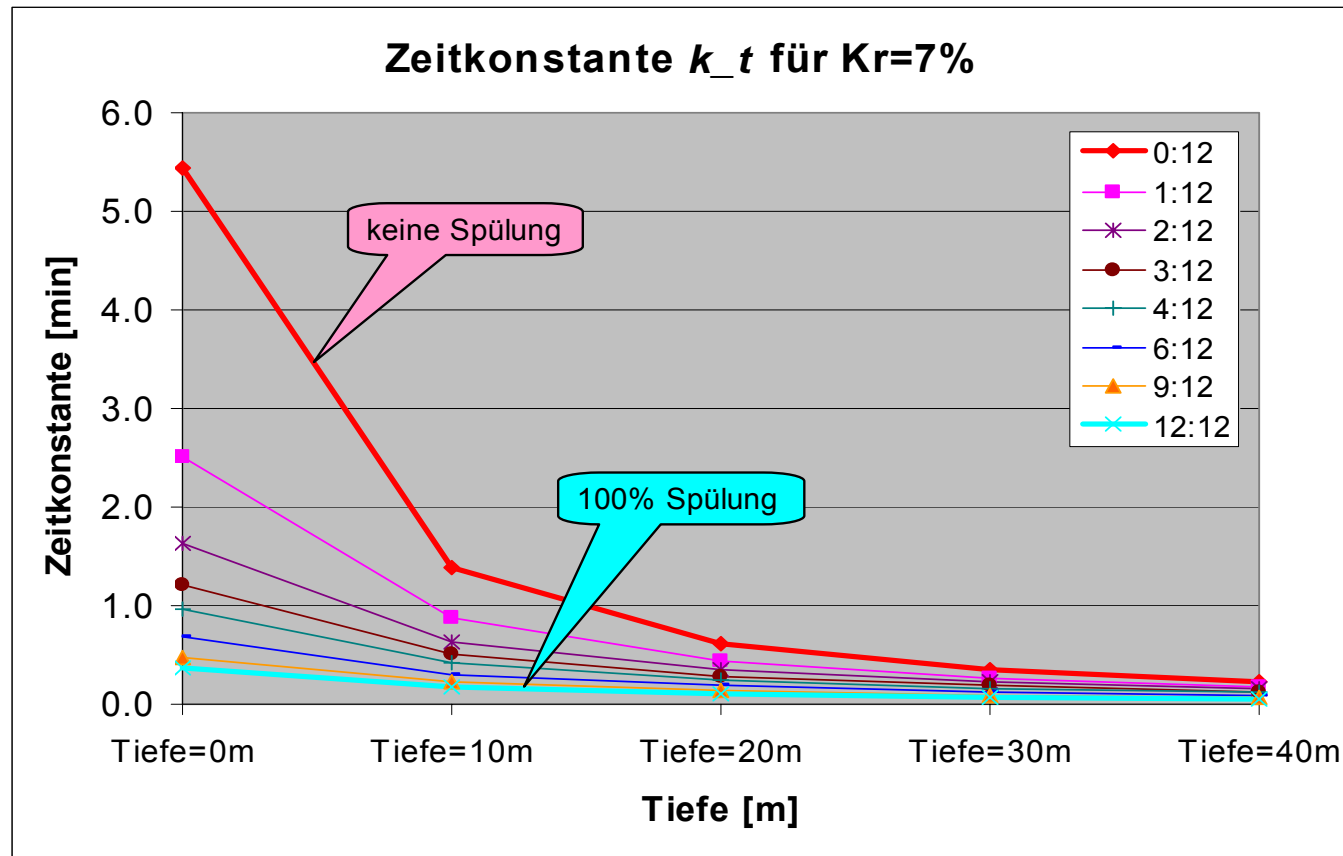
### a) Einfluss der Spülung

Im folgenden wird untersucht, welchen Einfluss bei konstantem Dump-Ratio  $K_r$  die Spülung hat.

nAZ /min	Atemzüge / Minute						12 l / min							
AZV	Atemzugvolumen						1.5 l							
AMV	AtemMinutenVolumen						18.0 l/min bei 1 bar							
AMV	AtemMinutenVolumen						12.....20 l/min bei 1 bar; variabel							
Kr_surf	Eliminationsrate des SCR an Oberfläche				= 1:		14		= 7.14%					
dKrdT	Steigerungsrate der Eliminationsrate						0.00000 l / m							
V	Gesamtvolumen des Systems						7.0 l							
V_bellow	Max. Inspirationsvol. (=Gegenlungenvolumen)						4.5 l							
P_ambSurf	Totaldruck an der Oberfläche						1.0 bar							
dPdT	Drucksteigerungsfaktor						0.980 bar / 10m H2O							
	Tiefe	0 m	Tiefe	10 m	Tiefe	20 m	Tiefe	30 m	Tiefe	40 m				
	p_amb	1 bar	p_amb	1.98 bar	p_amb	2.96 bar	p_amb	3.94 bar	p_amb	4.92 bar				
	AMV	18 l/min	AMV	35.64 l/min	AMV	53.28 l/min	AMV	70.92 l/min	AMV	88.56 l/min				
	Qdump	1.29 l/min	Qdump	5.04 l/min	Qdump	11.26 l/min	Qdump	19.96 l/min	Qdump	31.12 l/min				
	V_spül	Vspül /	k_t	V_spül	Vspül /	k_t	V_spül	Vspül /	k_t	V_spül	Vspül /	k_t	V_spül	Vspül /
Spülverh.	[l/min]	Q_dump	[min]	[l/min]	Q_dump	[min]	[l/min]	Q_dump	[min]	[l/min]	Q_dump	[min]	[l/min]	Q_dump
0 : 12	0.00	0.000	5.444	0.00	0.000	1.389	0.00	0.000	0.621	0.00	0.000	0.351	0.00	0.000
1 : 12	1.50	1.167	2.513	2.97	0.589	0.874	4.44	0.394	0.446	5.91	0.296	0.271	7.38	0.237
2 : 12	3.00	2.333	1.633	5.94	1.178	0.637	8.88	0.788	0.347	11.82	0.592	0.220	14.76	0.474
3 : 12	4.50	3.500	1.210	8.91	1.768	0.502	13.32	1.182	0.285	17.73	0.888	0.186	22.14	0.711
4 : 12	6.00	4.667	0.961	11.88	2.357	0.414	17.76	1.577	0.241	23.64	1.184	0.161	29.52	0.949
6 : 12	9.00	7.000	0.681	17.82	3.535	0.306	26.64	2.365	0.185	35.46	1.777	0.126	44.28	1.423
9 : 12	13.50	10.500	0.473	26.73	5.303	0.220	39.96	3.547	0.137	53.19	2.665	0.096	66.42	2.134
12 : 12	18.00	14.000	0.363	35.64	7.071	0.172	53.28	4.730	0.108	70.92	3.553	0.077	88.56	2.846

## Zeitkonstante (3)

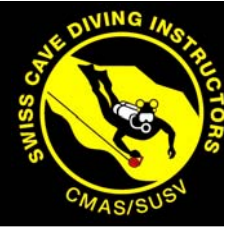
### a) Einfluss der Spülung



**Resultat:** - je höher der Spülanteil, desto kleiner die Zeitkonstante  
 - je grösser die Tiefe, desto kleiner die Zeitkonstante



# REBREATHERS



## Zeitkonstante (4)

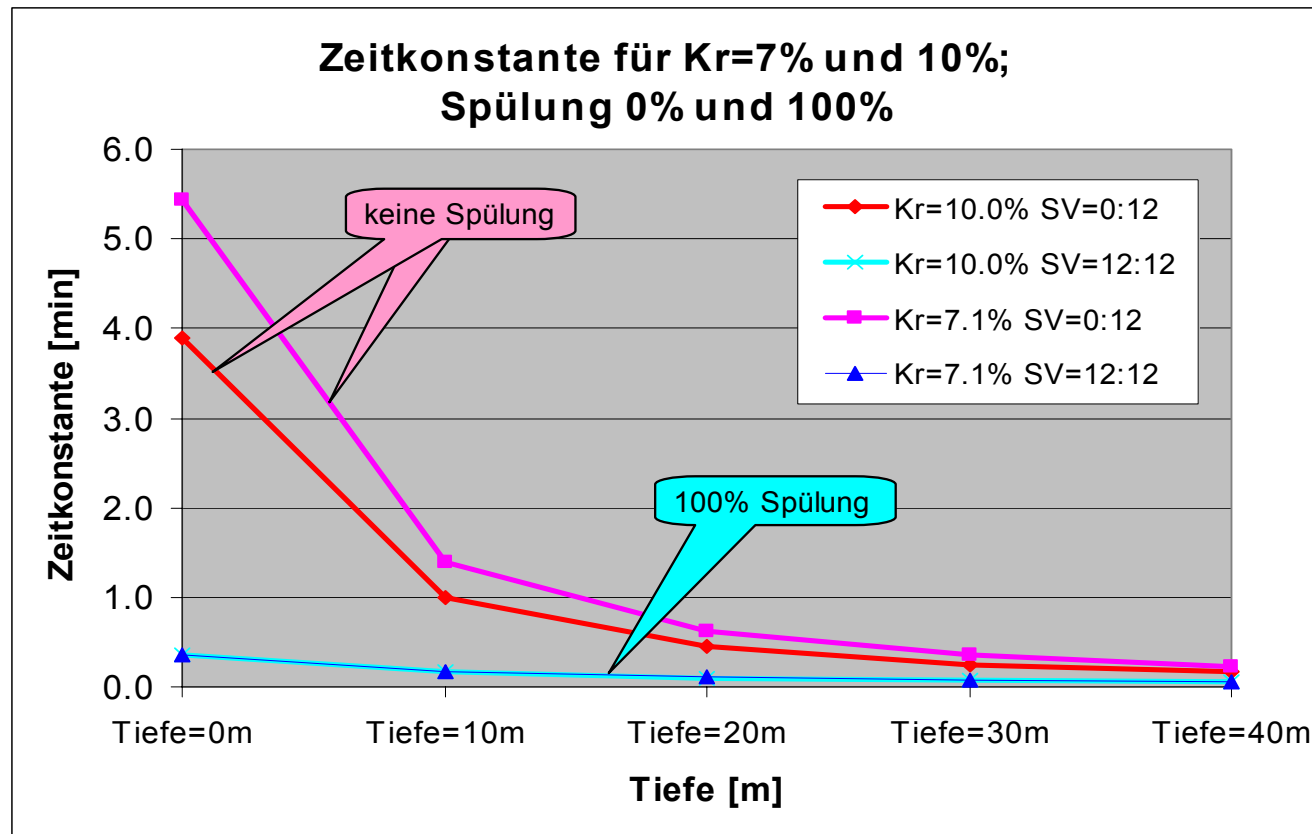
### b) Einfluss des Dump-Ratios

Die Untersuchung wurde mit 2 verschiedenen  $K_r$  (7% und 10%) durchgeführt

																<b><math>K_r = 10.0\%</math></b>											
		Tiefe	<b>0</b>	m	Tiefe	<b>10</b>	m	Tiefe	<b>20</b>	m	Tiefe	<b>30</b>	m	Tiefe	<b>40</b>	m											
		p_amb	1	bar	p_amb	1.98	bar	p_amb	2.96	bar	p_amb	3.94	bar	p_amb	4.92	bar											
		AMV	18	l/min	AMV	35.64	l/min	AMV	53.28	l/min	AMV	70.92	l/min	AMV	88.56	l/min											
		Qdump	1.80	l/min	Qdump	7.06	l/min	Qdump	15.77	l/min	Qdump	27.94	l/min	Qdump	43.57	l/min											
		V_spül	Vspül /	<b>k_t</b>	V_spül	Vspül /	<b>k_t</b>	V_spül	Vspül /	<b>k_t</b>	V_spül	Vspül /	<b>k_t</b>	V_spül	Vspül /	<b>k_t</b>											
Spülverh.		[l/min]	Q_dump	[min]	[l/min]	Q_dump	[min]	[l/min]	Q_dump	[min]	[l/min]	Q_dump	[min]	[l/min]	Q_dump	[min]											
<b>0 : 12</b>		0.00	0.000	<b>3.889</b>	0.00	0.000	<b>0.992</b>	0.00	0.000	<b>0.444</b>	0.00	0.000	<b>0.251</b>	0.00	0.000	<b>0.161</b>											
<b>12 : 12</b>		18.00	<b>10.000</b>	<b>0.354</b>	35.64	5.051	<b>0.164</b>	53.28	3.378	<b>0.101</b>	70.92	2.538	<b>0.071</b>	88.56	2.033	<b>0.053</b>											
																<b><math>K_r = 7.1\%</math></b>											
		Tiefe	<b>0</b>	m	Tiefe	<b>10</b>	m	Tiefe	<b>20</b>	m	Tiefe	<b>30</b>	m	Tiefe	<b>40</b>	m											
		p_amb	1	bar	p_amb	1.98	bar	p_amb	2.96	bar	p_amb	3.94	bar	p_amb	4.92	bar											
		AMV	18	l/min	AMV	35.64	l/min	AMV	53.28	l/min	AMV	70.92	l/min	AMV	88.56	l/min											
		Qdump	1.29	l/min	Qdump	5.04	l/min	Qdump	11.26	l/min	Qdump	19.96	l/min	Qdump	31.12	l/min											
		V_spül	Vspül /	<b>k_t</b>	V_spül	Vspül /	<b>k_t</b>	V_spül	Vspül /	<b>k_t</b>	V_spül	Vspül /	<b>k_t</b>	V_spül	Vspül /	<b>k_t</b>											
Spülverh.		[l/min]	Q_dump	[min]	[l/min]	Q_dump	[min]	[l/min]	Q_dump	[min]	[l/min]	Q_dump	[min]	[l/min]	Q_dump	[min]											
<b>0 : 12</b>		0.00	0.000	<b>5.444</b>	0.00	0.000	<b>1.389</b>	0.00	0.000	<b>0.621</b>	0.00	0.000	<b>0.351</b>	0.00	0.000	<b>0.225</b>											
<b>12 : 12</b>		18.00	<b>14.000</b>	<b>0.363</b>	35.64	7.071	<b>0.172</b>	53.28	4.730	<b>0.108</b>	70.92	3.553	<b>0.077</b>	88.56	2.846	<b>0.058</b>											

## Zeitkonstante (5)

### b) Einfluss des Dump-Ratios



**Resultat:** - je kleiner  $Kr$ , desto grösser die Zeitkonstante  
 - je höher der Spülanteil, desto kleiner die Unterschiede



# REBREATHERS



## Zeitkonstante (6)

Als letztes gilt es noch zu verifizieren, wie viele Zeitkonstanten benötigt werden, um einen Gleichgewichtszustand zu erreichen, d.h. den Bezug herzustellen zw. Erreichungsgrad und Anzahl Zeitkonstanten zu dessen Erreichung. Das Erreichen eines Gleichgewichtszustands wird z.B. bei der Berechnung der O<sub>2</sub>-Drop-Tabellen vorausgesetzt (s. dort).

Aus Gl. [20] wissen wir, dass gilt:

$$t_{-\lambda_{GG}} = \frac{(-1) \cdot V_{(Sys)}}{Q_{dump}} \cdot \ln \left[ 1 - \lambda_{GG} \right] \quad [20]$$

Zeitkonstante  $k_t$

Damit kann Gl. [20] geschrieben werden:

$$t_{-\lambda_{GG}} = k_t \cdot (-1) \cdot \ln \left[ 1 - \lambda_{GG} \right] \quad [20a]$$

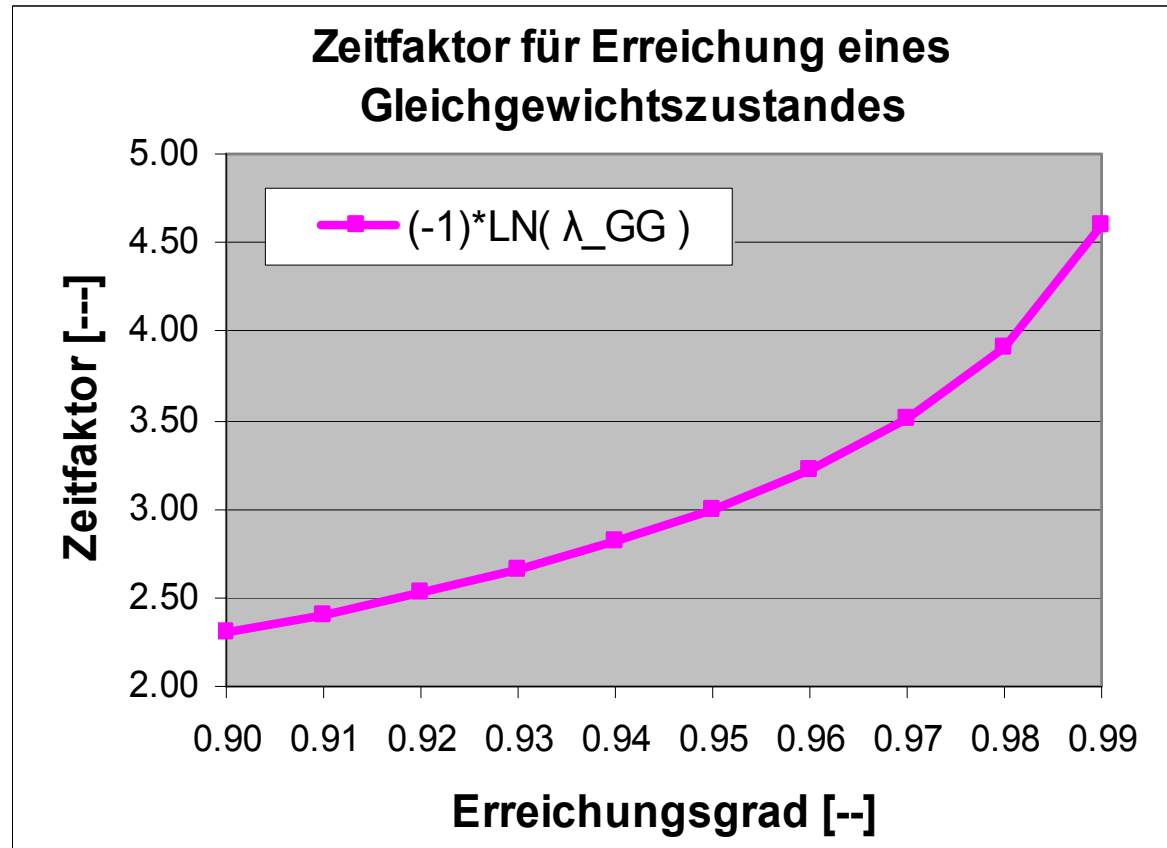


# REBREATHERS



## Zeitkonstante (7)

$\lambda$ GG	$(-1)*\text{LN}(\lambda \text{ GG})$
<b>0.90</b>	<b>2.30</b>
0.905	2.35
0.91	2.41
0.915	2.47
0.92	2.53
0.925	2.59
0.93	2.66
0.935	2.73
0.94	2.81
0.945	2.90
<b>0.95</b>	<b>3.00</b>
0.955	3.10
0.96	3.22
0.965	3.35
0.97	3.51
0.975	3.69
0.98	3.91
0.985	4.20
0.99	4.61
<b>0.995</b>	<b>5.30</b>



**Resultat:** für ein Erreichungsgrad von 0.95 (95%) sind ca. 3 Zeitkonstanten nötig, für einen Erreichungsgrad von 99% deren 4.6.



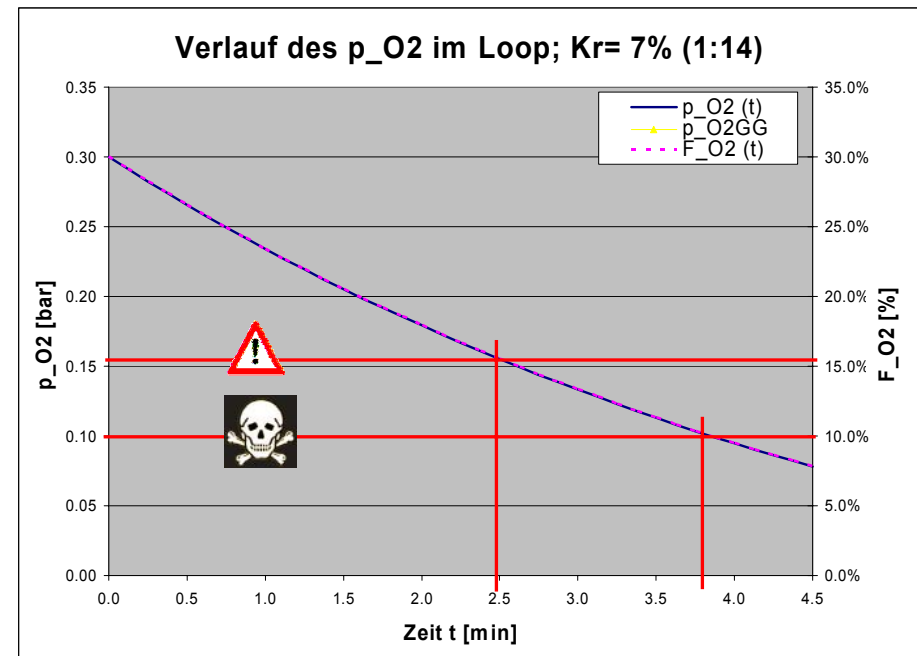
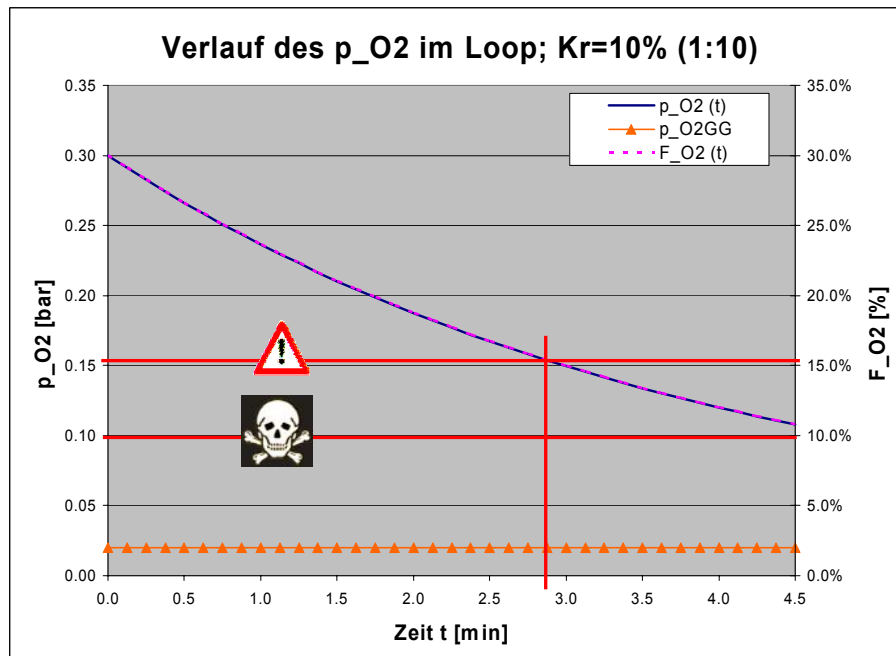
# REBREATHERS



## Einfluss der Eliminationsrate $K_r$ (1)

Initialanteil O2 im Loop zu Beginn Zyklus	30.0%
Anteil O2 im Speisegas (F_O2 Flasche)	30.0%
AtemMinutenVolumen	18.0 l/min
metabolisch verbrauchtes O2	4.0% * AMV
Ventilationskoeffizient 17...20...25	25.0
Eliminationsrate des SCR	10.0% (1:10)
Gesamtvolumen des Systems	7.0 l
Totaldruck an der Oberfläche	1.0 bar
Tiefe	0.0 m

Initialanteil O2 im Loop zu Beginn Zyklus	30.0%
Anteil O2 im Speisegas (F_O2 Flasche)	30.0%
AtemMinutenVolumen	18.0 l/min
metabolisch verbrauchtes O2	4.0% * AMV
Ventilationskoeffizient 17...20...25	25.0
Eliminationsrate des SCR	7.0% (1:14)
Gesamtvolumen des Systems	7.0 l
Totaldruck an der Oberfläche	1.0 bar
Tiefe	0.0 m



**Resultat: je kleiner  $K_r$ , desto schneller der p\_O2-Abfall!**



# REBREATHERS

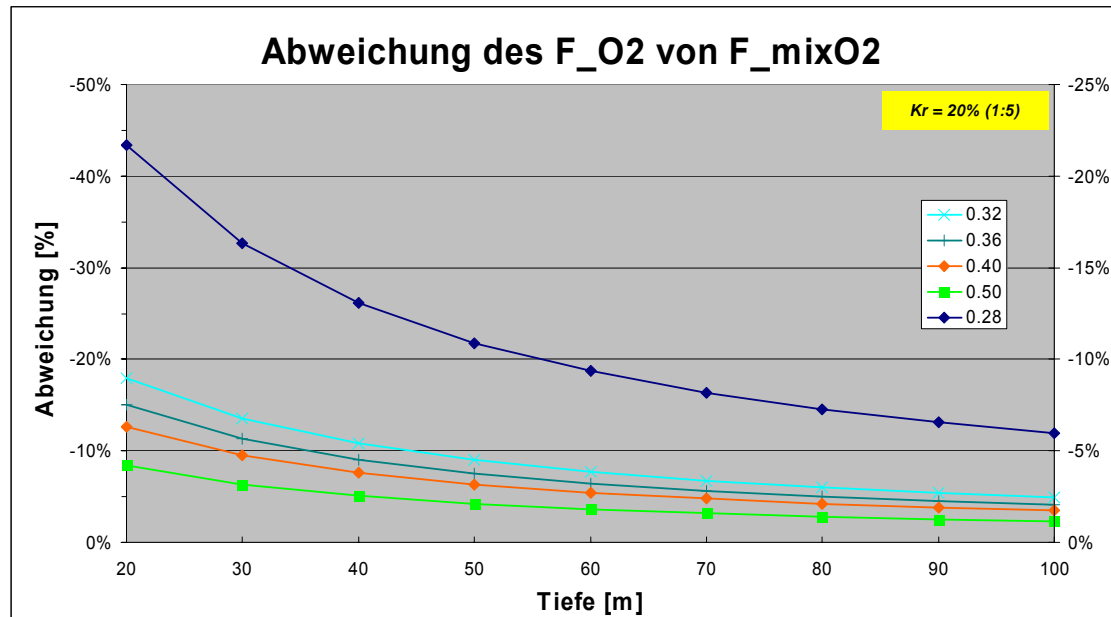


## Einfluss der Eliminationsrate $K_r$ (2a)

Die bereits bekannte O<sub>2</sub>-Drop-Tabelle wird mit zwei verschiedenen  $K_r$  gerechnet.

a)  $K_r = 0.20$  (1:5) und b)  $K_r = 0.05$  (1:20)

		$p_{surf} = 1 \text{ bar}$			$K_E = 20 \text{ [-]}$											
		$dpdT = 0.98 \text{ bar/10m}$			$K_r = 20.0\% (1:5)$											
		$F_{mixO_2} = 0.28$			$F_{mixO_2} = 0.32$			$F_{mixO_2} = 0.36$			$F_{mixO_2} = 0.40$			$F_{mixO_2} = 0.50$		
Tiefe [m]	$p_{amb}$ [bar]	$F_{O_2}$ [-]	$p_{O_2}$ [bar]	delta %	$F_{O_2}$ [-]	$p_{O_2}$ [bar]	delta %	$F_{O_2}$ [-]	$p_{O_2}$ [bar]	delta %	$F_{O_2}$ [-]	$p_{O_2}$ [bar]	delta %	$F_{O_2}$ [-]	$p_{O_2}$ [bar]	delta %
0	1.000	0.100	0.10	-64.3%	0.150	0.15	-53.13%	0.200	0.20	-44.4%	0.250	0.25	-37.5%	0.375	0.38	-25.0%
10	1.980	0.189	0.37	-32.5%	0.234	0.46	-26.83%	0.279	0.55	-22.4%	0.324	0.64	-18.9%	0.437	0.87	-12.6%
20	2.960	0.219	0.65	-21.7%	0.263	0.78	-17.95%	0.306	0.91	-15.0%	0.349	1.03	-12.7%	0.458	1.36	-8.4%
30	3.940	0.234	0.92	-16.3%	0.277	1.09	-13.48%	0.319	1.26	-11.3%	0.362	1.43	-9.5%	0.468	1.85	-6.3%
40	4.920	0.243	1.20	-13.1%	0.285	1.40	-10.80%	0.327	1.61	-9.0%	0.370	1.82	-7.6%	0.475	2.34	-5.1%
50	5.900	0.249	1.47	-10.9%	0.291	1.72	-9.00%	0.333	1.96	-7.5%	0.375	2.21	-6.4%	0.479	2.83	-4.2%







# REBREATHERS



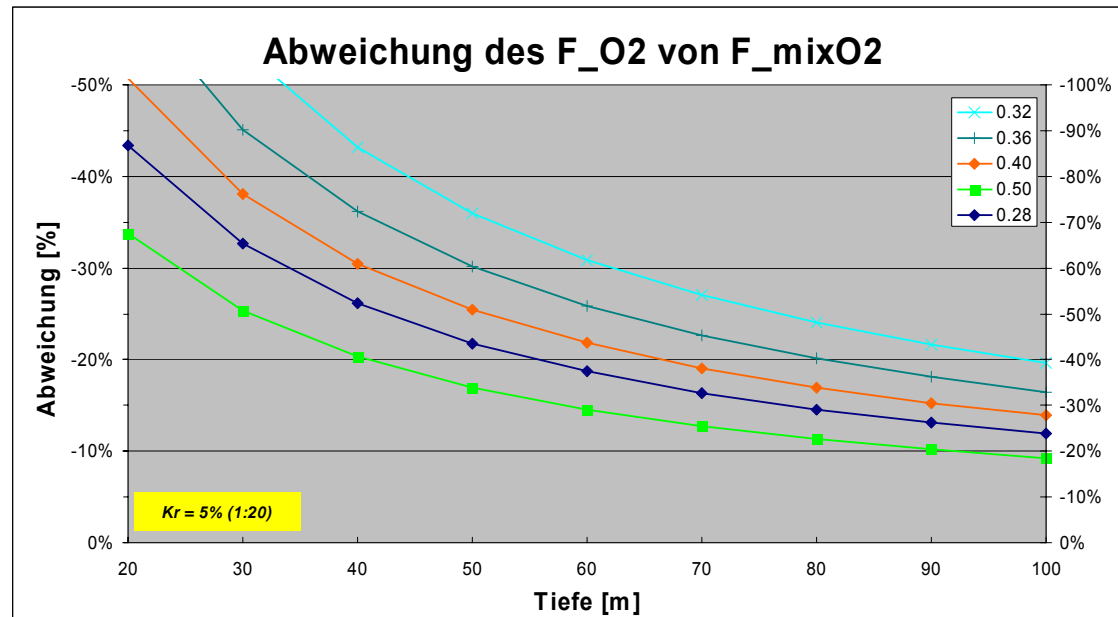
## Einfluss der Eliminationsrate $K_r$ (2b)

Die bereits bekannte O<sub>2</sub>-Drop-Tabelle wird mit zwei verschiedenen  $K_r$  gerechnet.

a)  $K_r = 0.20$  (1:5) und b)  $K_r = 0.05$  (1:20)

		$p_{surf} = 1$ bar			$K_E = 20$ [--]											
		$dpdT = 0.98$ bar/10m			$K_r = 5.0\%$ ( $\approx 1:20$ )											
		$F_{mixO_2} = 0.28$			$F_{mixO_2} = 0.32$			$F_{mixO_2} = 0.36$			$F_{mixO_2} = 0.40$			$F_{mixO_2} = 0.50$		
Tiefe [m]	$p_{amb}$ [bar]	$F_{O_2}$ [--]	$p_{O_2}$ [bar]	delta %	$F_{O_2}$ [--]	$p_{O_2}$ [bar]	delta %	$F_{O_2}$ [--]	$p_{O_2}$ [bar]	delta %	$F_{O_2}$ [--]	$p_{O_2}$ [bar]	delta %	$F_{O_2}$ [--]	$p_{O_2}$ [bar]	delta %
0	1.000	-0.440	-0.44	-257.1%	-0.360	-0.36	#####	-0.280	-0.28	-177.8%	-0.200	-0.20	-150.0%	0.000	0.00	-100.0%
10	1.980	-0.084	-0.17	-129.9%	-0.023	-0.05	#####	0.037	0.07	-89.8%	0.097	0.19	-75.8%	0.247	0.49	-50.5%
20	2.960	0.037	0.11	-86.9%	0.090	0.27	-71.79%	0.144	0.43	-60.1%	0.197	0.58	-50.7%	0.331	0.98	-33.8%
30	3.940	0.097	0.38	-65.3%	0.147	0.58	-53.93%	0.198	0.78	-45.1%	0.248	0.98	-38.1%	0.373	1.47	-25.4%
40	4.920	0.134	0.66	-52.3%	0.182	0.89	-43.19%	0.230	1.13	-36.1%	0.278	1.37	-30.5%	0.398	1.96	-20.3%
50	5.900	0.158	0.93	-43.6%	0.205	1.21	-36.02%	0.252	1.48	-30.1%	0.298	1.76	-25.4%	0.415	2.45	-16.9%

**Resultat:**  
je kleiner  $K_r$ ,  
desto grösser  
die negative  
Abweichung  
von  $F_{O_2}$   
zu  $F_{mixO_2}$ .





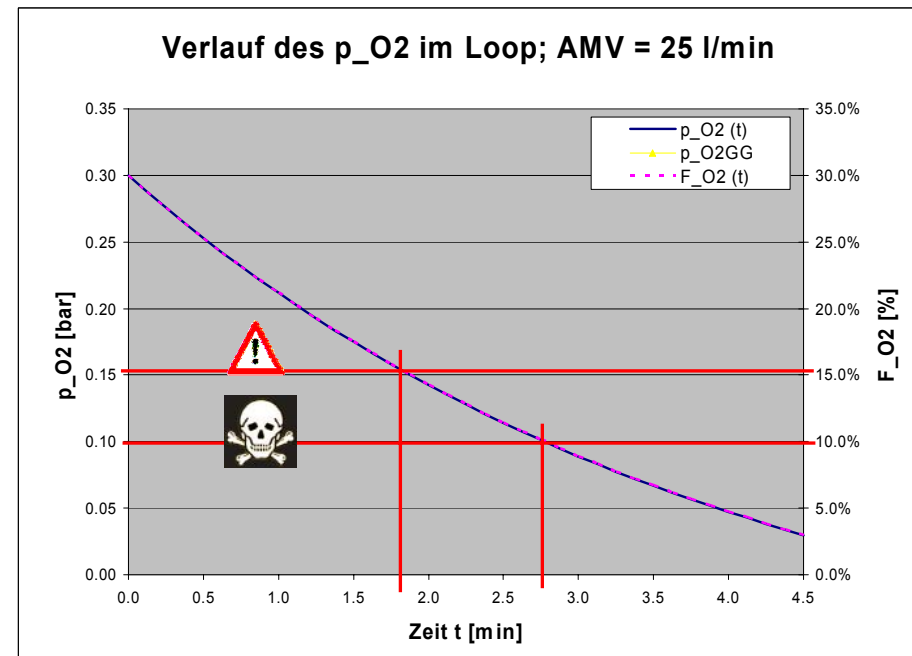
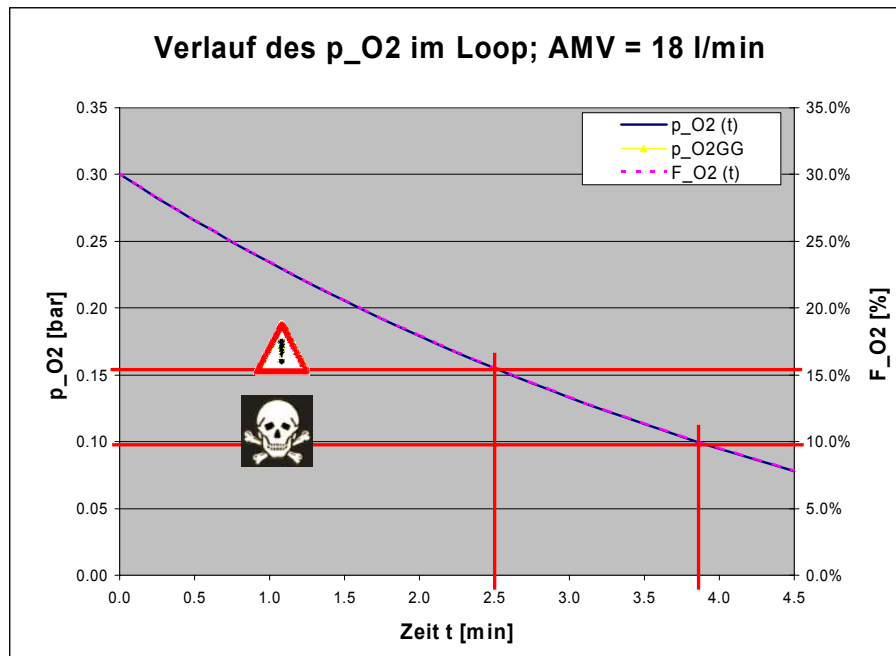
# REBREATHERS



## Einfluss des AtemMinutenVolumens AMV

Initialanteil O2 im Loop zu Beginn Zyklus	30.0%
Anteil O2 im Speisegas (F_O2 Flasche)	30.0%
AtemMinutenVolumen	18.0 l/min
metabolisch verbrauchtes O2	4.0% * AMV
Ventilationskoeffizient 17...20...25	25.0
Eliminationsrate des SCR	7.0% (1:14)
Gesamtvolumen des Systems	7.0 l
Totaldruck an der Oberfläche	1.0 bar
Tiefe	0.0 m

Initialanteil O2 im Loop zu Beginn Zyklus	30.0%
Anteil O2 im Speisegas (F_O2 Flasche)	30.0%
AtemMinutenVolumen	25.0 l/min
metabolisch verbrauchtes O2	4.0% * AMV
Ventilationskoeffizient 17...20...25	25.0
Eliminationsrate des SCR	7.0% (1:14)
Gesamtvolumen des Systems	7.0 l
Totaldruck an der Oberfläche	1.0 bar
Tiefe	0.0 m



**Resultat: mit steigendem AMV fällt der p\_O2 schneller und tiefer ab!**



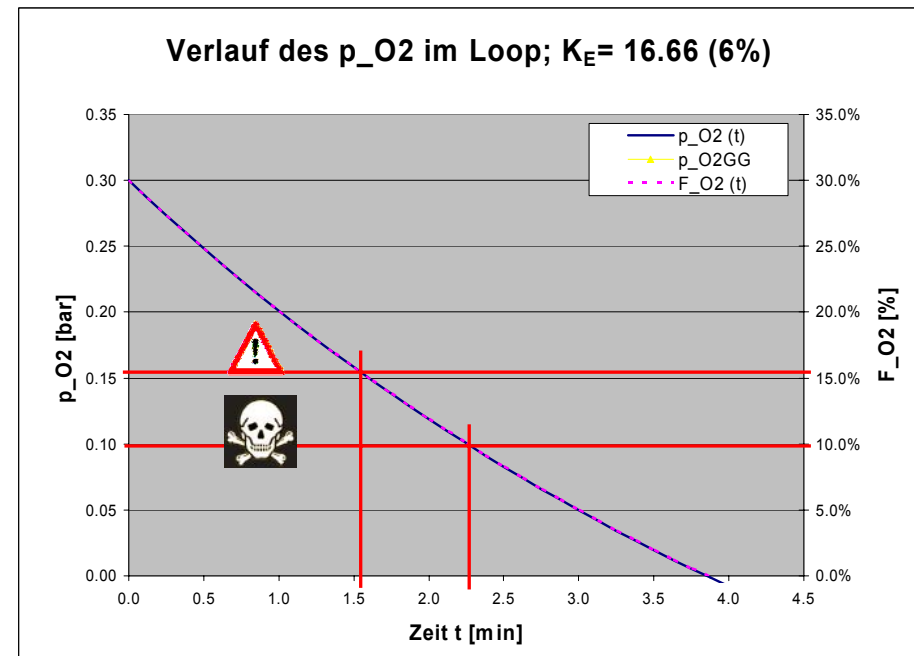
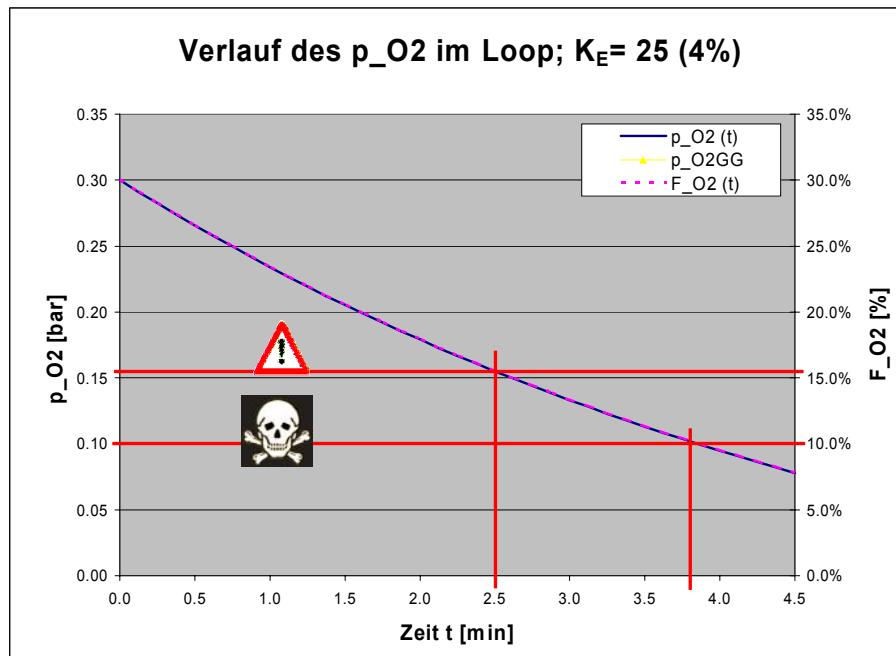
# REBREATHERS



## Einfluss des Ventilationskoeffizienten $K_E$

Initialanteil O2 im Loop zu Beginn Zyklus	30.0%
Anteil O2 im Speisegas (F_O2 Flasche)	30.0%
AtemMinutenVolumen	18.0 l/min
metabolisch verbrauchtes O2	4.0% * AMV
Ventilationskoeffizient 17...20...25	25.0
Eliminationsrate des SCR	7.0% (1:14)
Gesamtvolumen des Systems	7.0 l
Totaldruck an der Oberfläche	1.0 bar
Tiefe	0.0 m

Initialanteil O2 im Loop zu Beginn Zyklus	30.0%
Anteil O2 im Speisegas (F_O2 Flasche)	30.0%
AtemMinutenVolumen	18.0 l/min
metabolisch verbrauchtes O2	6.0% * AMV
Ventilationskoeffizient 17...20...25	16.66
Eliminationsrate des SCR	7.0% (1:14)
Gesamtvolumen des Systems	7.0 l
Totaldruck an der Oberfläche	1.0 bar
Tiefe	0.0 m



**Resultat: mit sinkendem  $K_E$  fällt der  $p_{O_2}$  schneller und tiefer ab!**



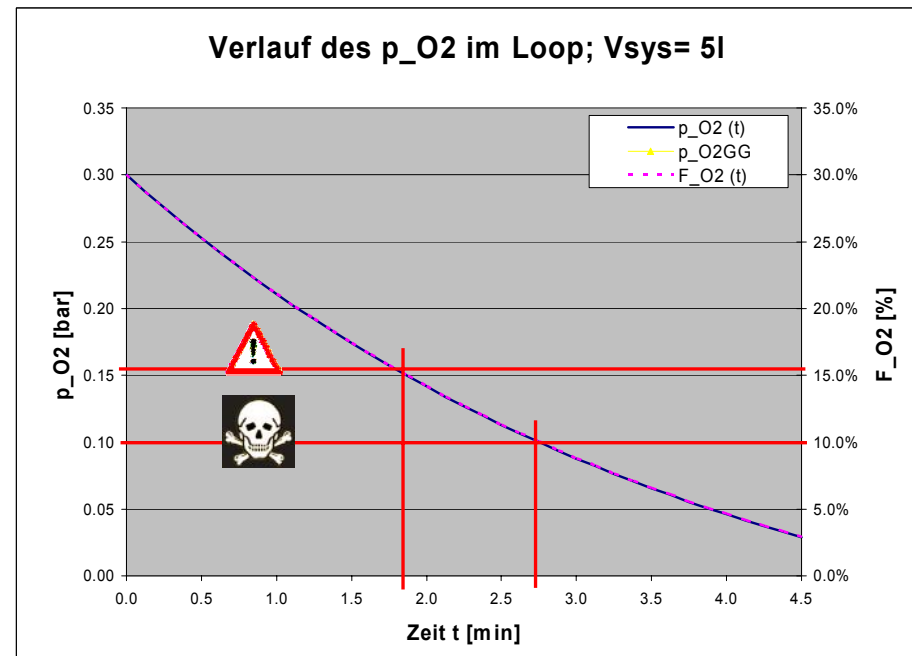
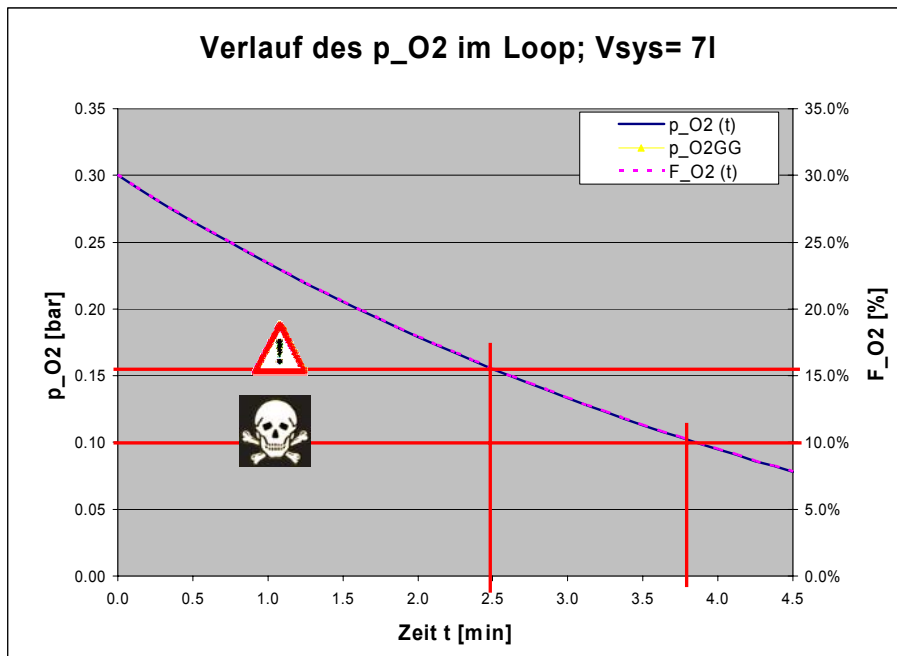
# REBREATHERS



## Einfluss des Systemvolumens $V_{sys}$

Initialanteil O2 im Loop zu Beginn Zyklus	30.0%
Anteil O2 im Speisegas (F_O2 Flasche)	30.0%
AtemMinutenVolumen	18.0 l/min
metabolisch verbrauchtes O2	4.0% * AMV
Ventilationskoeffizient 17...20...25	25.0
Eliminationsrate des SCR	7.0% (1:14)
Gesamtvolumen des Systems	7.0 l
Totaldruck an der Oberfläche	1.0 bar
Tiefe	0.0 m

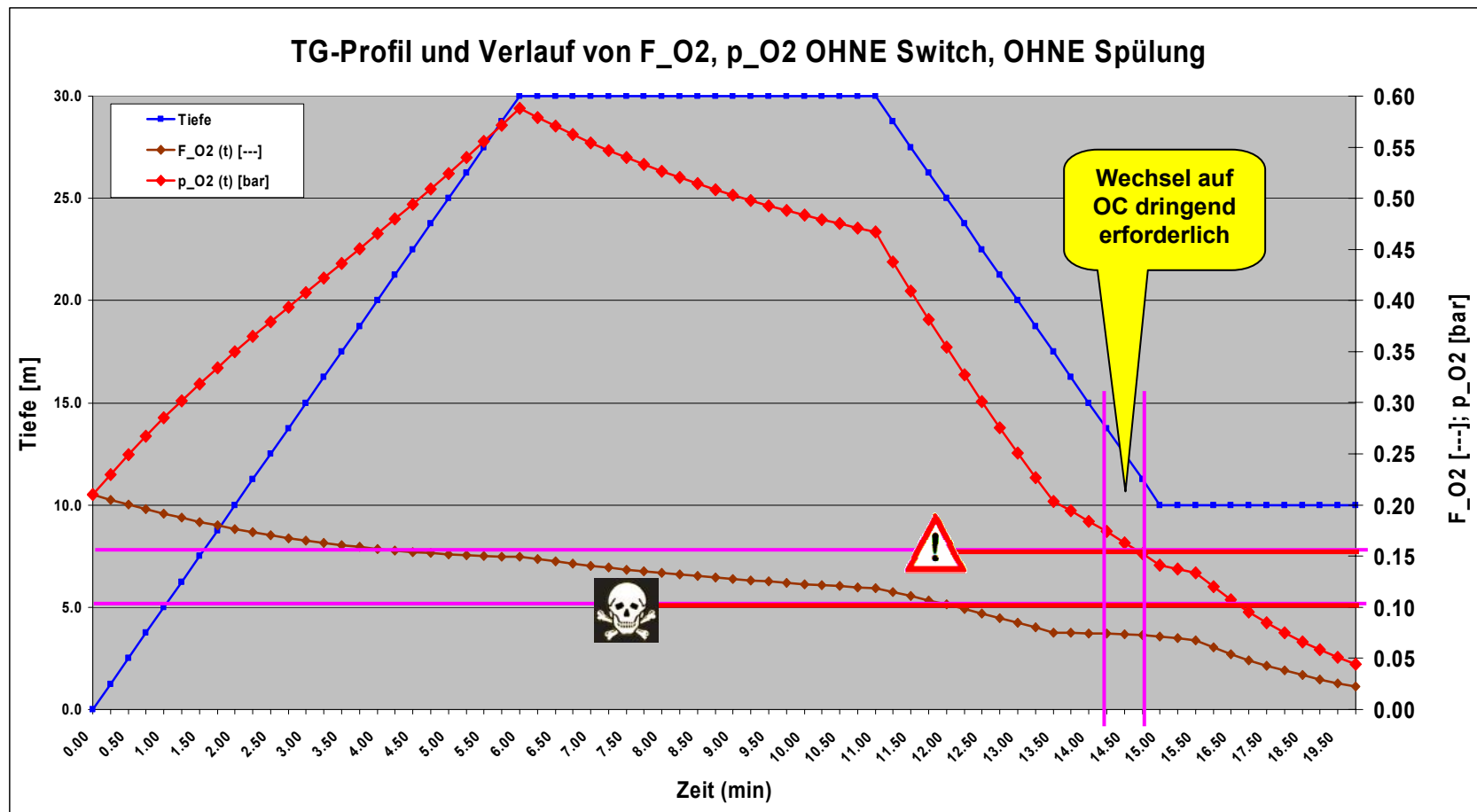
Initialanteil O2 im Loop zu Beginn Zyklus	30.0%
Anteil O2 im Speisegas (F_O2 Flasche)	30.0%
AtemMinutenVolumen	18.0 l/min
metabolisch verbrauchtes O2	4.0% * AMV
Ventilationskoeffizient 17...20...25	25.0
Eliminationsrate des SCR	7.0% (1:14)
Gesamtvolumen des Systems	5.0 l
Totaldruck an der Oberfläche	1.0 bar
Tiefe	0.0 m



**Resultat: mit sinkendem  $V_{sys}$  fällt der  $p_{O_2}$  schneller und tiefer ab!**

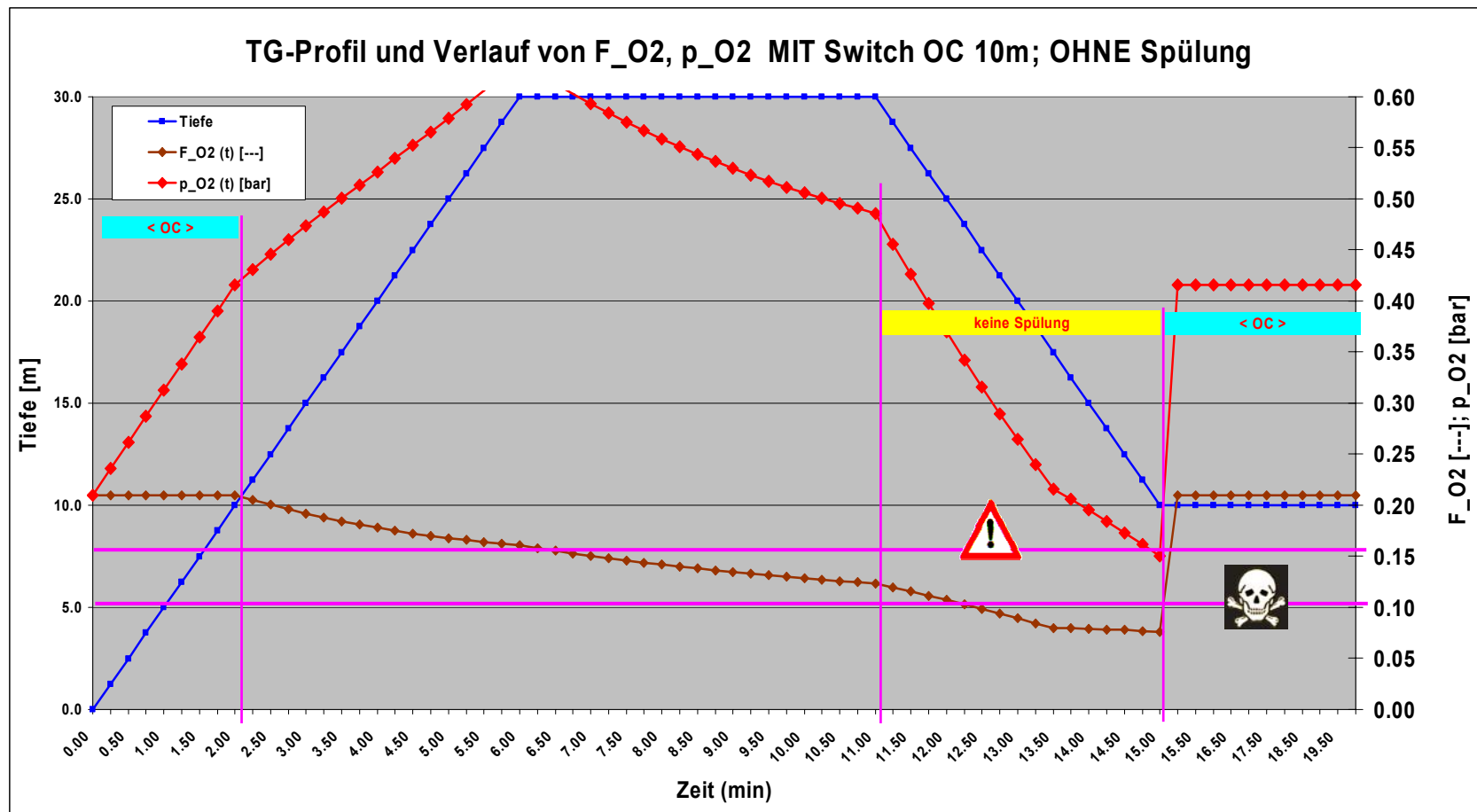
## Wechsel von/auf offenes Bailout (1)

Je nach Gemisch und Auslegung des SCR muss bis auf eine gewisse Minimaltiefe offen abgetaucht, resp. beim Aufstieg auf derselben Tiefe vom SCR zurück auf das OC zurückgewechselt werden.



## Wechsel von/auf offenes Bailout (2)

Der Wechsel auf offenes Bailout entspricht im Modell einem Wert von  $K_r = 1.0$  (100%). Wichtig: Der Wechsel muss vorausschauend durchgeführt werden, da der  $p_{O_2}$ -Anstieg im Blut und Organen auch Zeit beansprucht und bevor der Taucher wegen Hypoxie handlungsunfähig wird.



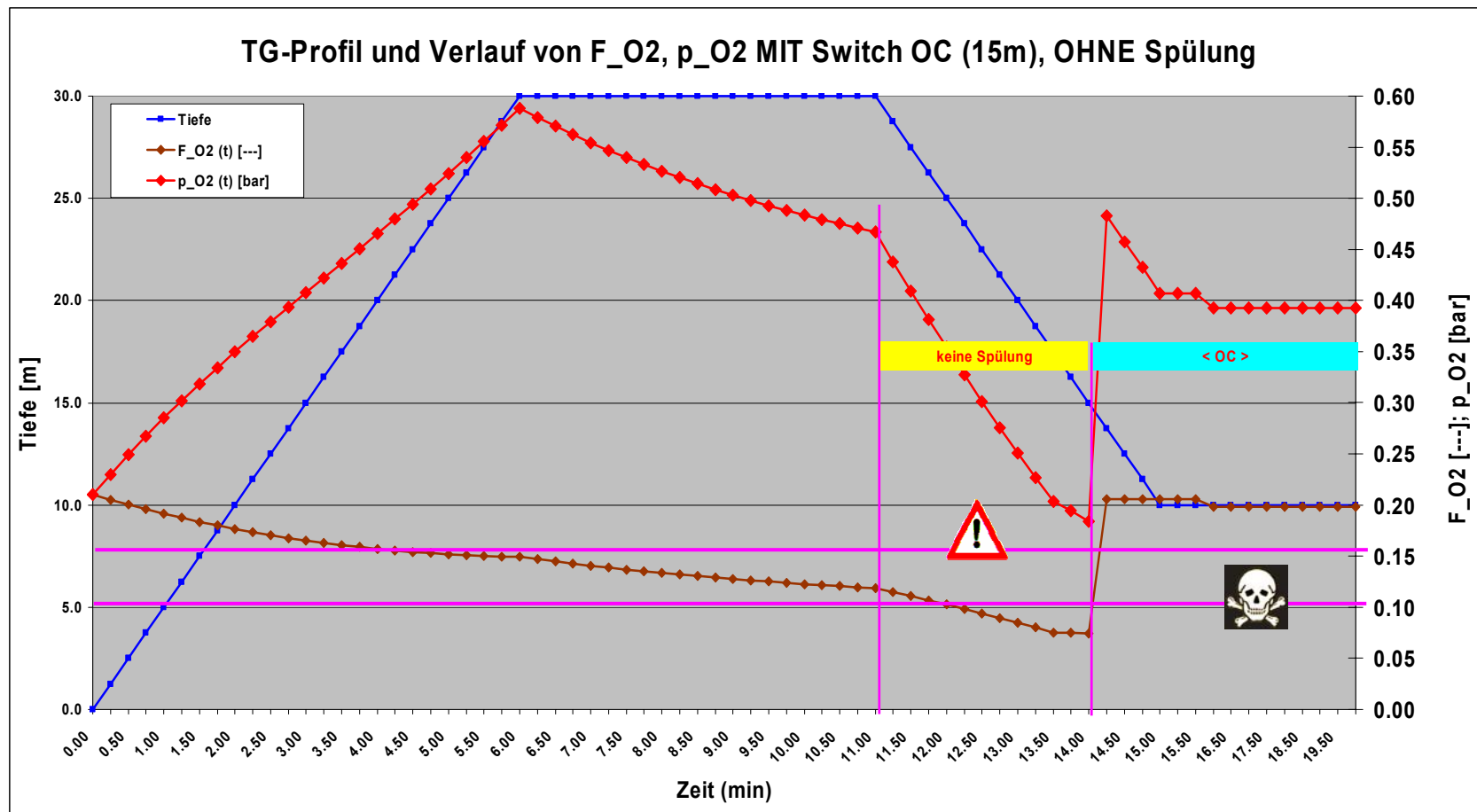


# REBREATHERS



## Wechsel von/auf offenes Bailout (3)

Der Wechsel zu TG-Beginn kann (muss aber nicht) weggelassen werden, da Abtauchrampe nicht kritisch. Jedoch wird beim Auftauchen prophylaktisch bereits auf 15m auf das offene Bailout gewechselt.



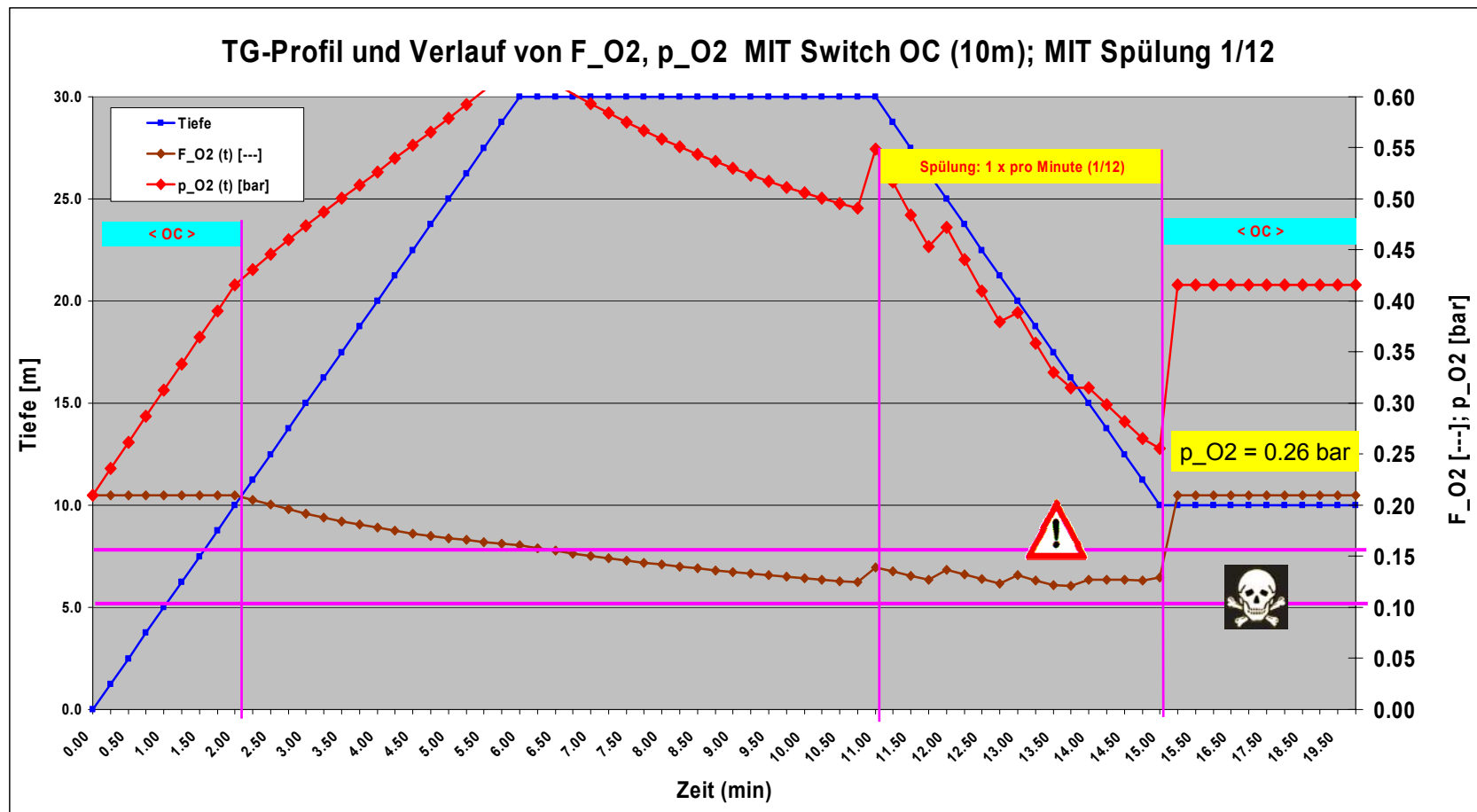


# REBREATHERS



## Wechsel von/auf offenes Bailout (4)

Der Abfall des  $p_{O_2}$  kann zusätzlich abgefedert werden durch Spülung während des Aufstiegs. Dabei genügt im Beispiel bereits 1 Spülung pro Minute (1/12).







# REBREATHERS



## Folgerungen aus den numerischen Resultaten (1)

### a) Für Gleichgewichtszustand bei konst. $p_{amb}$

(Niveau  $p_{O_2}$  nach langer Zeit)

- Ist unabhängig vom Systemvolumen  $V_{sys}$
- sinkt mit
  - kleinerer Eliminationsrate  $K_r$  (geringerer Gasaustausch),
  - höherem AtemMinutenVolumen  $AMV$  (*doppelt gefährlich, AMV steigt bei sinkendem  $p_{O_2}$ !*),
  - kleinerem Ventilationskoeffizient  $K_E$  (höherem  $O_2$ -Verbrauch),
  - tieferem  $O_2$ -Anteil im Speisegas  $F_{mixO_2}$

### b) Für den zeitlichen Verlauf des $p_{O_2}$ -Abfalls

- Abfall kommt schneller mit
  - kleinerem Systemvolumen  $V_{sys}$  (kleinere Buffer-Wirkung),
  - kleinerem  $K_r$  (geringerer Ausstoss, geringere Speisung),
  - höherem  $AMV$  (höherem  $O_2$ -Verbrauch),
  - kleinerem  $K_E$  (höherer  $O_2$ -Verbrauch)
- Der durch die Volumenänderung beim Aufstieg zusätzlich verursachte Abfall des  $p_{O_2}$  lässt ein Spülen grundsätzlich bei JEDEM Aufstieg als notwendig erscheinen.



# REBREATHERS



## Folgerungen aus den numerischen Resultaten (2)

### c) Sonstige Feststellungen

- Der zusätzliche Abfall des  $F_{O_2}/p_{O_2}$  im Loop während des Aufstiegs kann rasch gefährliche Formen annehmen. Ein langsamer Aufstieg, verbunden mit Spülung UND unter Kontrolle der  $p_{O_2}$ -Anzeige sollte immer die Regel sein.
- Die minimale Einsatztiefe des Gerätes ist für alle eingesetzten Gemische a) zuerst zu berechnen und b) unter Aufsicht im Wasser nachzumessen. Oberhalb dieser MinOD sollte grundsätzlich nur offen getaucht werden.
- Die andere Möglichkeit ist die Verwendung von Gemischen mit hohen  $O_2$ -Anteilen (40%-50%), zumindest im oberen Tiefenbereich, was einen Gaswechsel mit Switchblock voraussetzt.
- Schöne Papier-Lösungen wie Spülung mit steigender Frequenz sind unter Wasser kaum praktikabel, es ist einfacher und sicherer, frühzeitig einen Gaswechsel vorzunehmen.



# REBREATHERS



always remember:  
**Rebreathers can kill  
YOU!**