



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

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 O₂-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_{mixO_2} und K_r**
- **Dynamischer Verlauf des p_{O_2}**
- **Quasi-stationäre Berechnung von Rampen**
- **Berechnung des Abstiegs- und Aufstiegsrampeneffektes**
- **Effekte der Spülung**
- **Verlauf des p_{O_2} -Abfalles / O_2 -Drop Tabelle**
- **Berechnungen zu den Einflüssen von K_r , AMV, K_E und V_{sys}**
- **Wechsel von/auf offenes Bailout**
- **Folgerungen aus den numerischen Resultaten**



REBREATHERS



Physiologie (1): O₂-Verbrauch

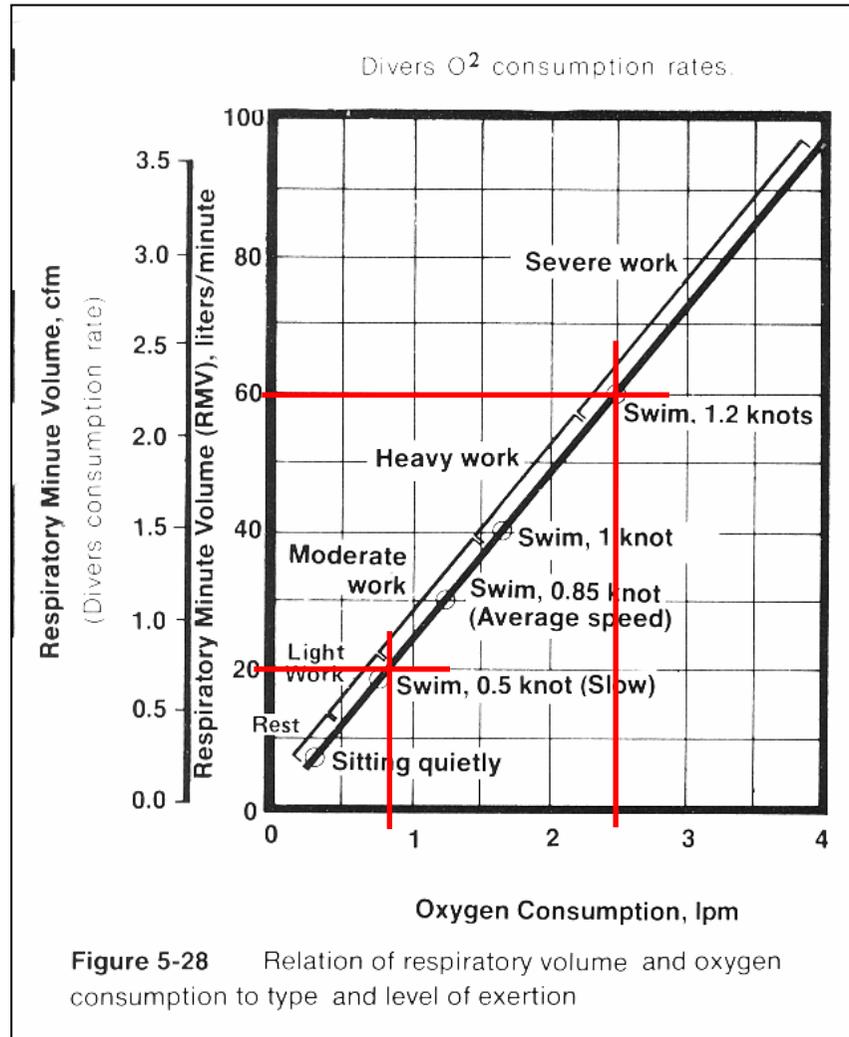
1
VOLUME AIR DIVING
U S NAVY DIVING MANUAL
NAVSEA 0994-LP-001-9010



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



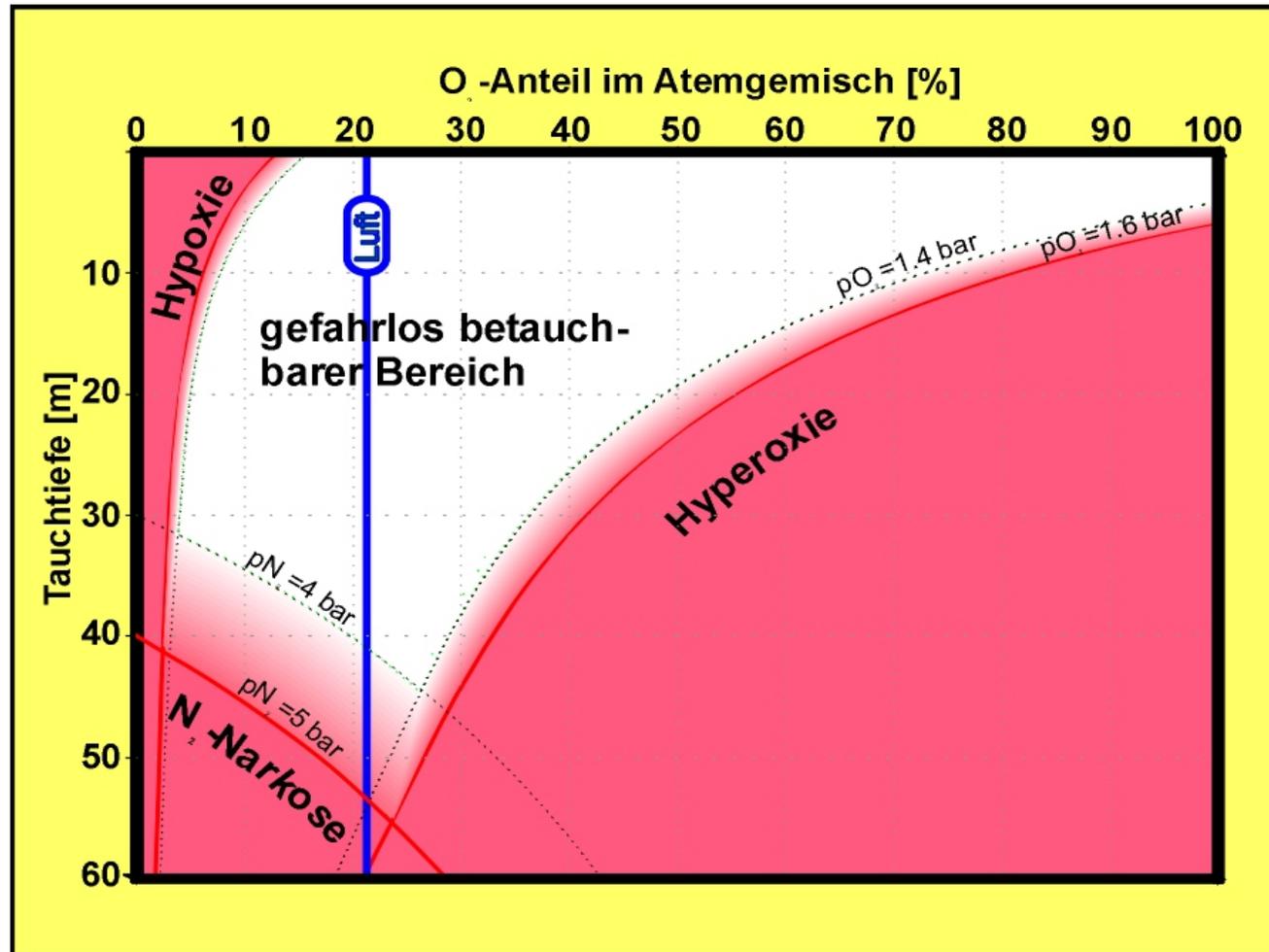
$$\dot{V}_{O_2} = \frac{AMV}{K_E} \quad [1b]$$

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)

AMV	AtemMinutenVolumen (engl.: RMV , respiratory minute volume), in Liter pro Minute an der Oberfläche (12...20l/min/1 bar)
V_{od.} V_{Sys}	Gesamtes, gasgefülltes Volumen des Systems (=Loop)
\dot{V}_{O_2}	Metabolisch konsumiertes O ₂ Minutenvolumen; ist tiefen-unabhängig und praktisch nur eine Fkt. der Anstrengung.
Q_{dump}	Minutenvolumen des an die Umgebung abgegebenen Gases (ohne Spülung).
$\dot{V}_{Spül}$	Spülvolumen pro Zeiteinheit (z.B. wenn durch den Mund ein- durch die Nase aber in die Umgebung ausgeatmet wird).
\dot{V}_{BM}	Volumenveränderung pro Zeiteinheit durch Druckveränderung (Boyle-Mariotte).
KE	Verhältnis zwischen AMV und V _{O₂} (20.....25; d.h. 5% bis 4%)
K_r	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 ₂ O oder pro 10m H ₂ O. (Süßwasser: ca. 0.98bar/10m H ₂ O).
λ_{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 Ausatemgegenlunge strömt.

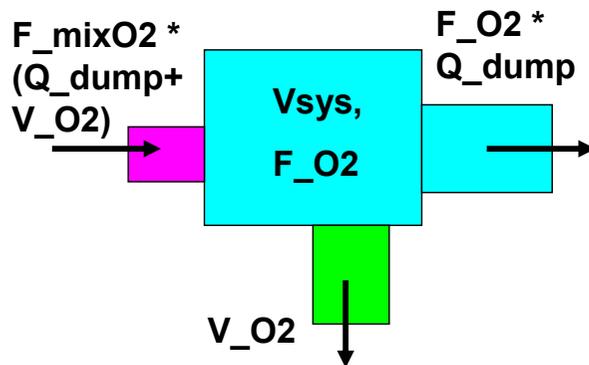
Keine Strömungs- und Energieverluste (Verwirbelungen) im System.

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!

O₂-Massenbilanz





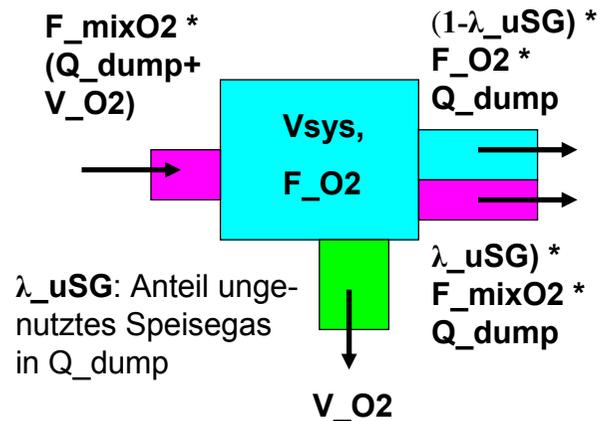
REBREATHERS



Modelle: vom Einfachen zum Komplexen (3)

Schritt 2: das verfeinerte vereinfachte Allerweltsmodell:

O₂-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.

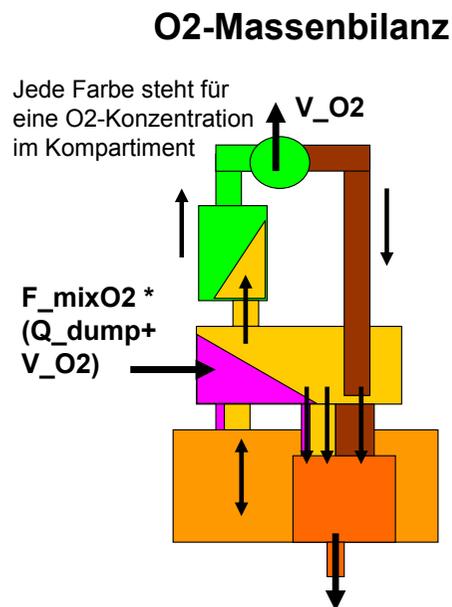
An jedem Uebergang von einem Kompartiment zum andern ist eine Massenbilanz zu erstellen.

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

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

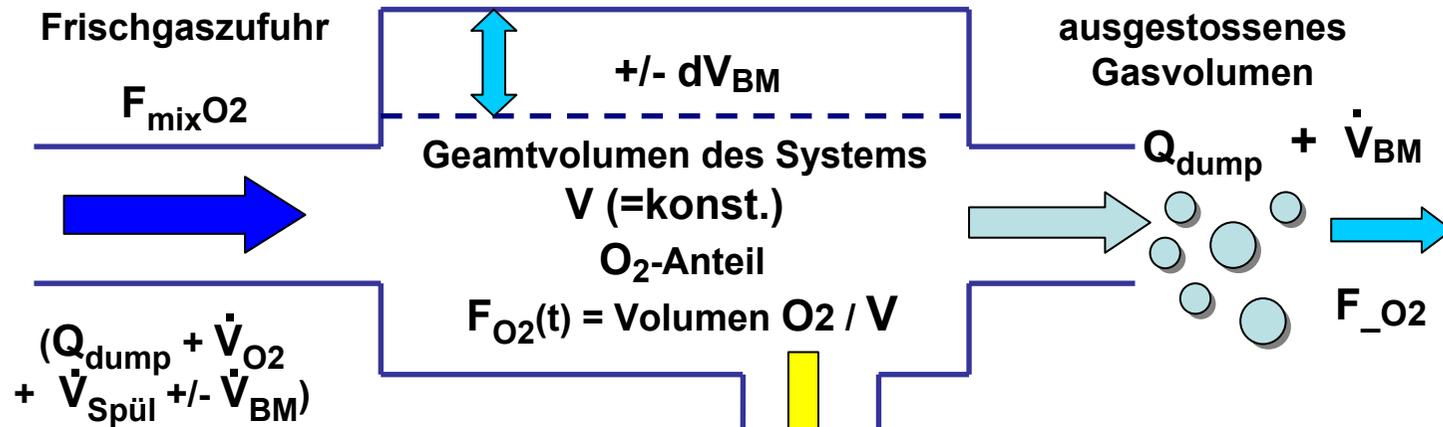
Hat entsprechend viele Freiheitsgrade, die das Herausmessen von einzelnen Grössen fast unmöglich machen.

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

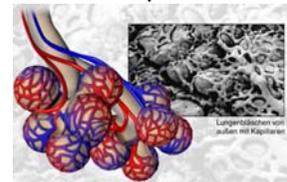


REBREATHERS

Das Berechnungsmodell Nr. 1



- F_{mixO_2} : O_2 -Anteil im Frischgas (= konst.)
- Q_{dump} : ausgestossenes Gasvolumen pro Zeit [NL / dt]
- \dot{V}_{O_2} : metabolischer O_2 -Verbrauch des Tauchers [NL/dt]
- \dot{V} : Gesamtvolumen des Systems (Kreislauf) in [NL]; konst.
- $F_{O_2}(t)$: zeitabhängiger O_2 -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 O₂-Anteil im System nicht mehr verändert.

Ansatz:
Was volumenmässig an O₂ aus dem System hinausgeht, muss volumenmässig durch neues O₂ ersetzt werden

Metabolischer O₂-Verbrauch
+
Volumenanteil O₂ im
ausgestossenen Gas
=
Anteil O₂ 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:

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

Damit lässt sich der O₂-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 O₂ (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?

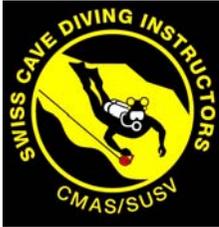
Die Lösung ergibt aus der „Gleichgewichts-Gleichung“ [6]. Aufgelöst nach F_{mixO2} :

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

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) .



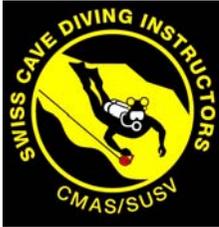
REBREATHERS



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)								
			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



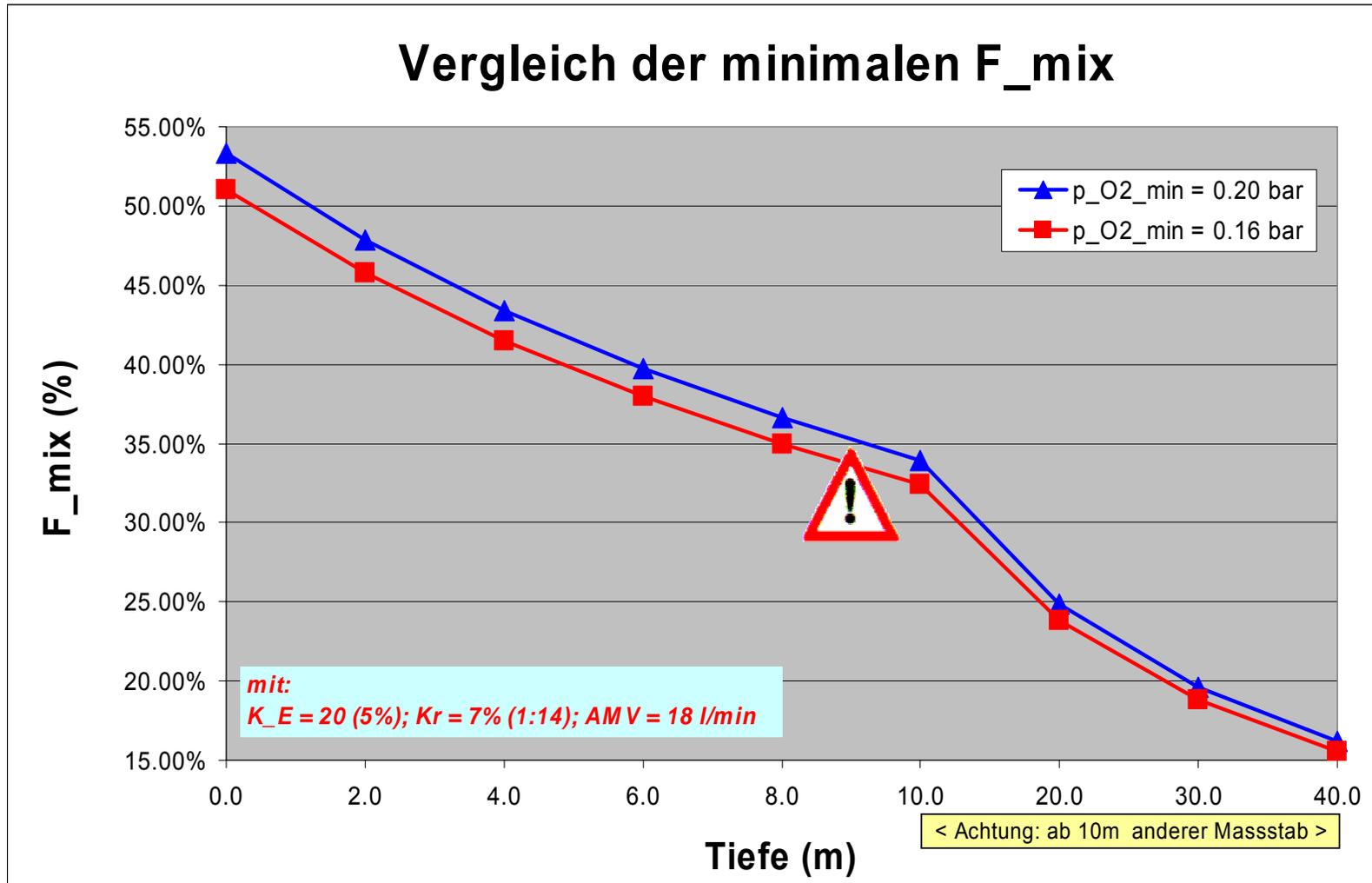
			min. Tiefe 1	min. Tiefe 2	min. Tiefe 3	min. Tiefe 4	min. Tiefe 5	min. Tiefe 6	min. Tiefe 7	min. Tiefe 8	min. Tiefe 9
			(m)								
			0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	20.0	30.0	40.0
Totaldruck	P_ambT	bar	1.000	1.196	1.392	1.588	1.784	1.980	2.960	3.940	4.920
Atemminutenvolumen	AMV (Tiefe)	l/min	18.0	21.5	25.1	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:

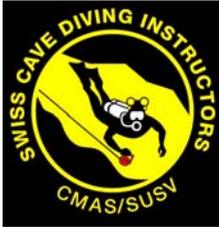
Welches ist die minimale erforderliche Eliminationsrate K_r , um bei einem gegebenen F_{mixO2} des Speisegases und einer gegebenen Tiefe noch einen gewünschten minimalen p_{O2min} aufrecht erhalten können?

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

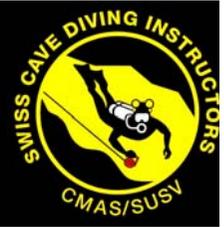
$$K_{r_min} = \frac{(F_{mixO2} - 1)}{K_E \cdot (F_{O2} - F_{mixO2})} \cdot \frac{p_{ambSurf}}{p_{amb}(Tiefe)}$$

[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

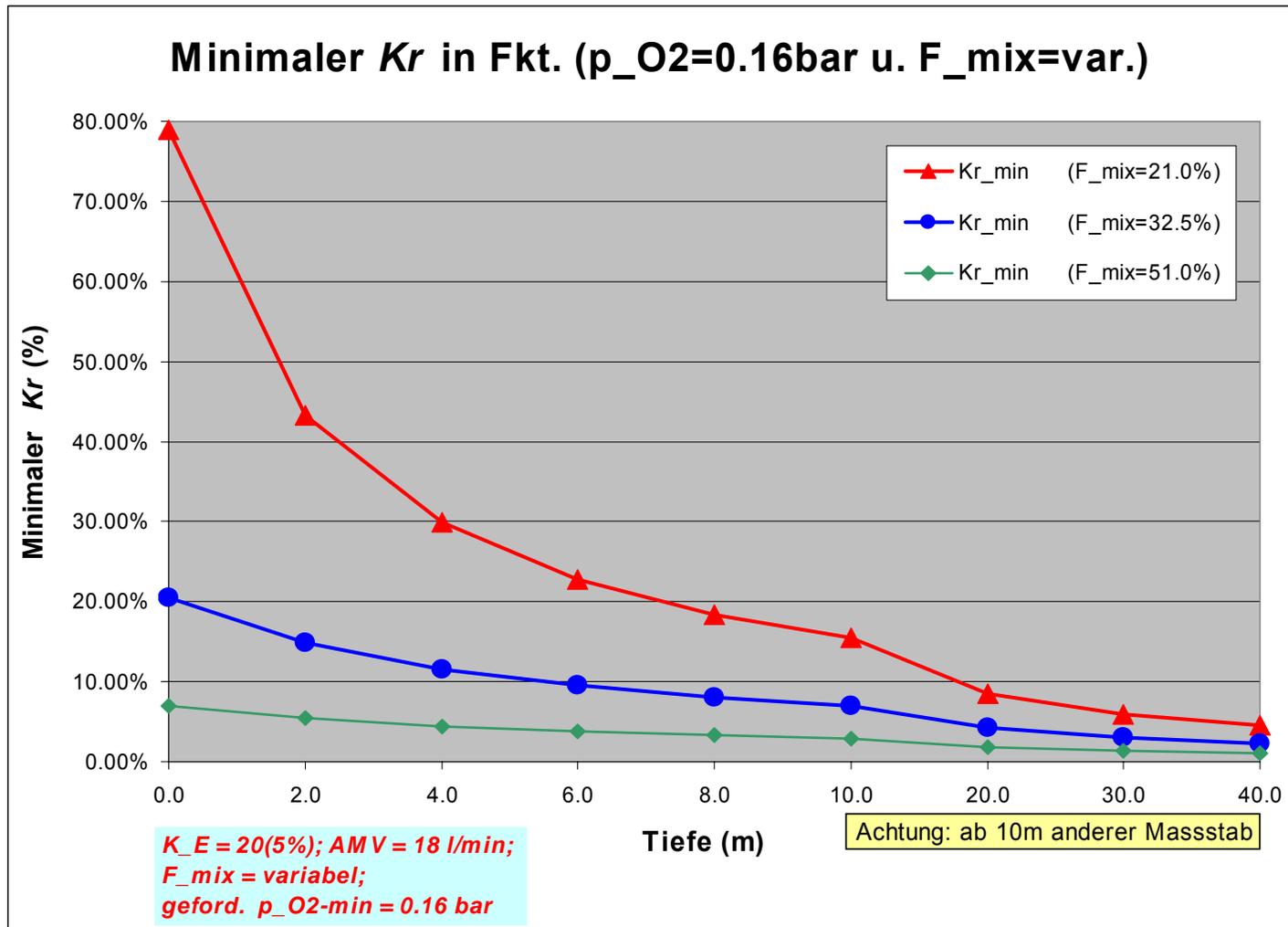
			min. Tiefe 1	min. Tiefe 2	min. Tiefe 3	min. Tiefe 4	min. Tiefe 5	min. Tiefe 6	min. Tiefe 7	min. Tiefe 8	min. Tiefe 9
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
			0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	20.0	30.0	40.0
Totaldruck	P_{ambT} bar		1.000	1.196	1.392	1.588	1.784	1.980	2.960	3.940	4.920
Atemminutenvolumen	AMV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



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:

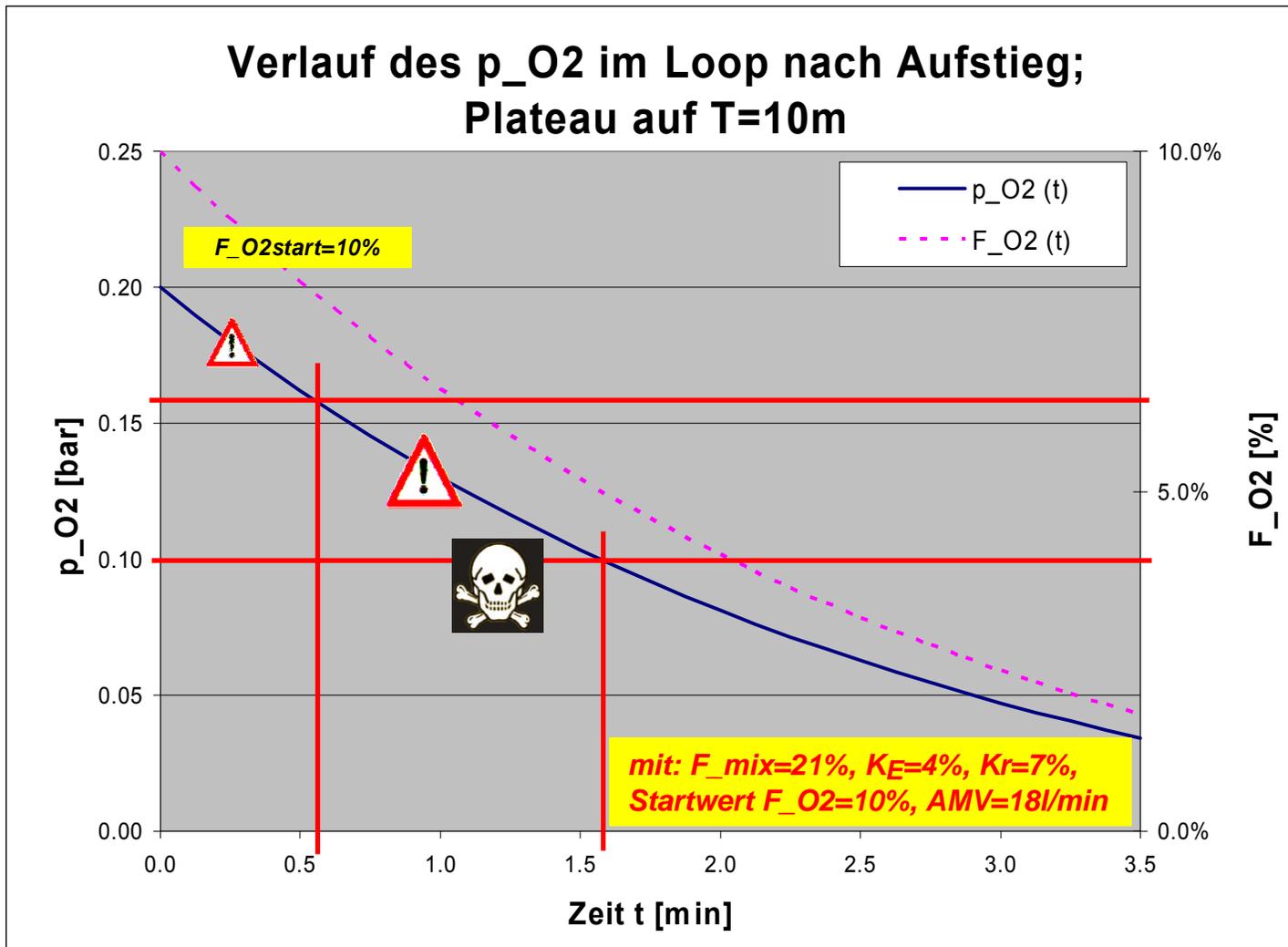
- Tiefe ca. 10m
- Startwert F_{O_2} ca. 10% (nach Aufstieg mit wenig Spülung)

Start-Parameter:

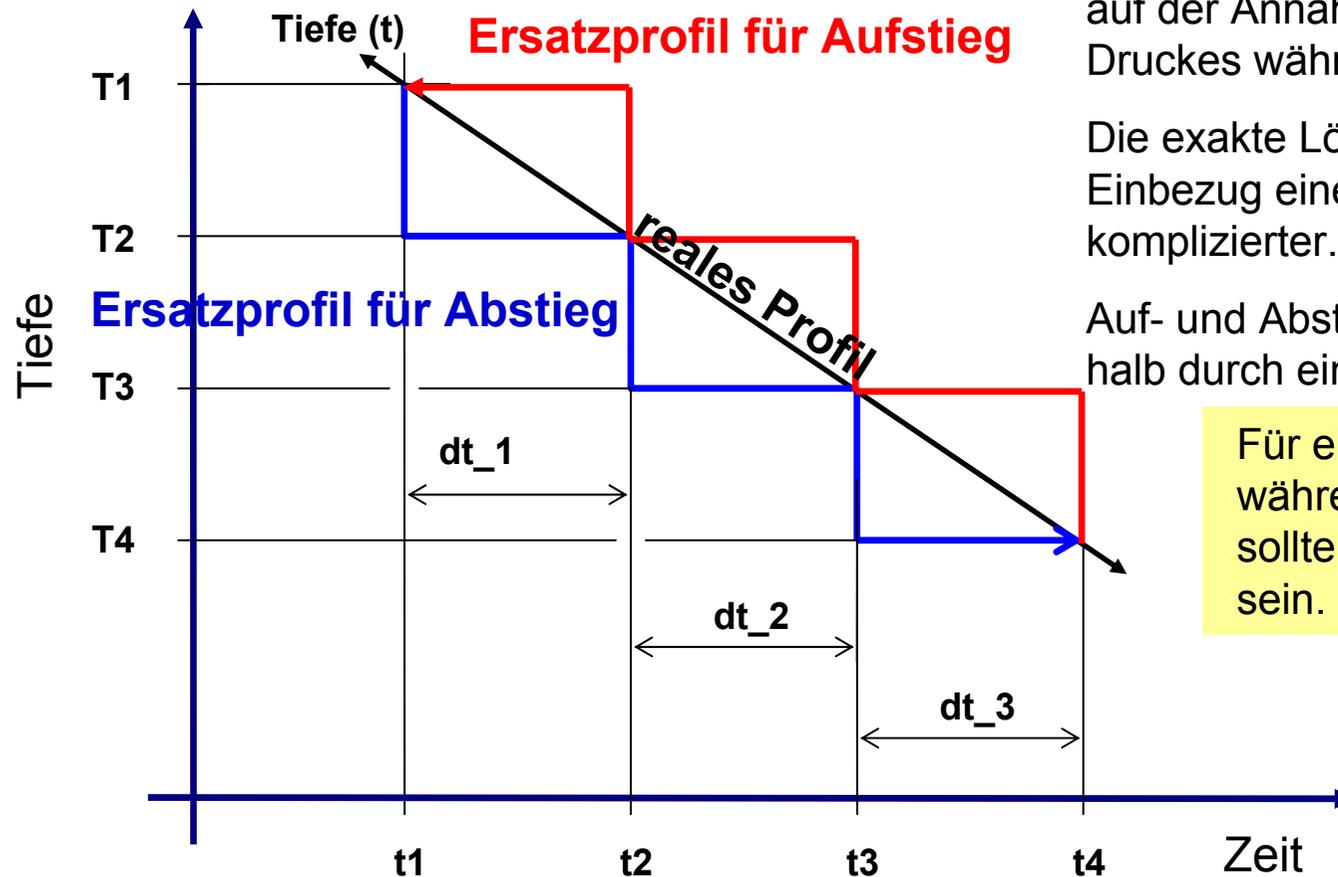
$F_{O_2\text{-init}}$	Initialanteil O_2 im Loop zu Beginn Zyklus	10.0%
$F_{\text{mix}O_2}$	Anteil O_2 im Speisegas (F_{O_2} Flasche)	21.0%
AMV	AtemMinutenVolumen	18.0 l/min
V_{O_2}	metabolisch verbrauchtes O_2	4.0% * AMV
K_e	Ventilationskoeffizient 17...20...25	25.0
K_r	Eliminationsrate des SCR	7.0% (1:14)
V	Gesamtvolumen des Systems	7.0 l
p_{ambSurf}	Totaldruck an der Oberfläche	1.0 bar
T	Tiefe	10.0 m
p_{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 O₂ 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)

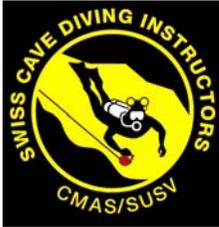
Der so zusätzlich pro dt eingebrachte O₂-Volumenstrom beträgt:

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

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 O₂-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.

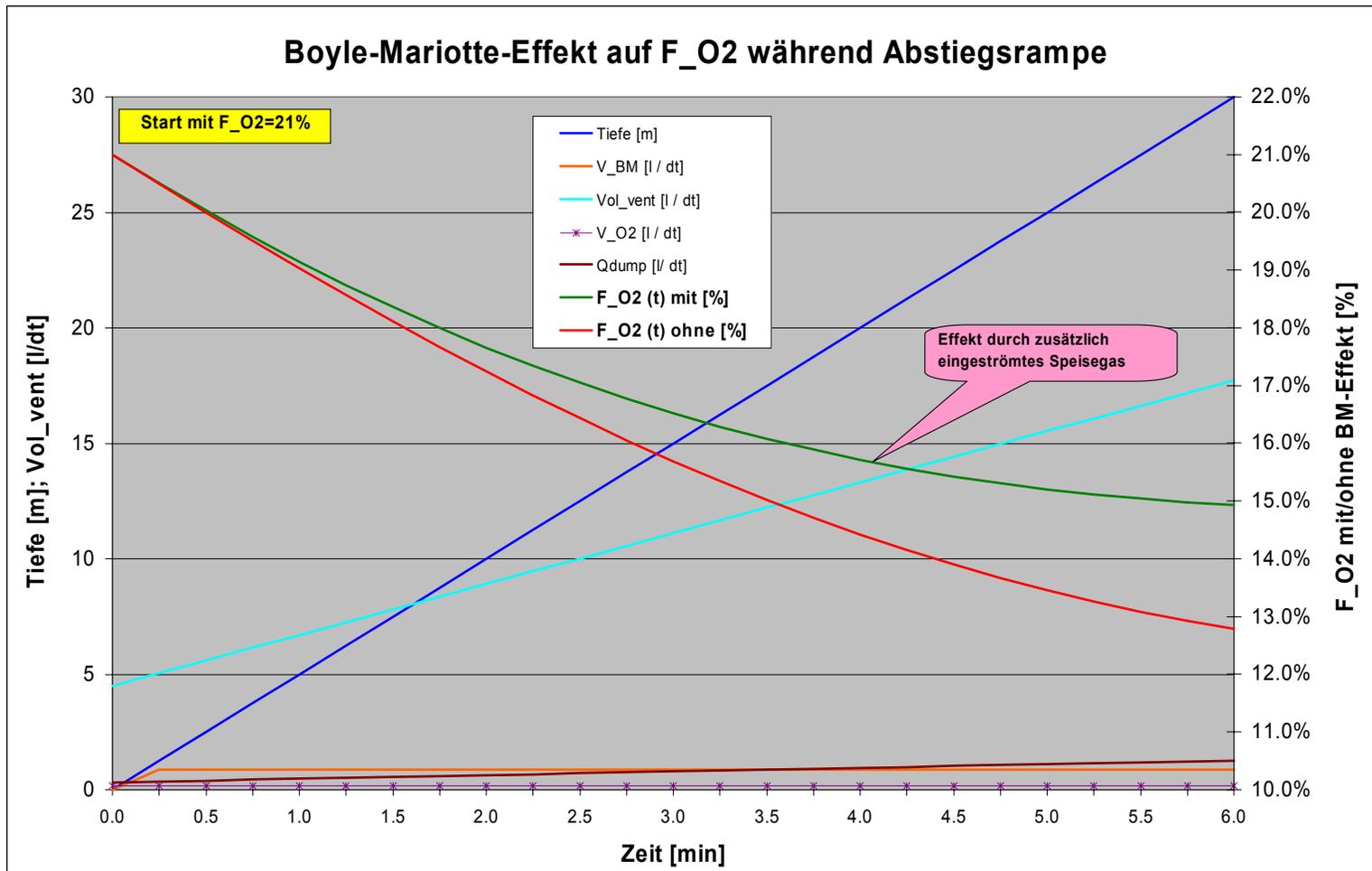
									ohne BM-Effekt			mit BM-Effekt		
Zeit t	dt	Tiefe	Druck	AZVsurf	n AZ	AMVsurf	n AZ_tot	Vol_vent	dVBM	F_O2 (t)	p_O2 (t)	dVBM	F_O2 (t)	p_O2 (t)
[min]	[min]	[m]	[bar]	[l]	[l / 1min]	[l / 1min]	[l / dt]	[l / dt]	[l / dt]	[---]	[bar]	[l / dt]	[---]	[bar]
0.0	0.3	0	1	1.5	12	18.0	3	4.5	0	21.00%	0.21	0	21.00%	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



REBREATHERS



Berechnung des Abstiegs-Rampeneffektes (4)



Resultat: der O_2 -Anteil (F_{O_2}) 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 !

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

[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

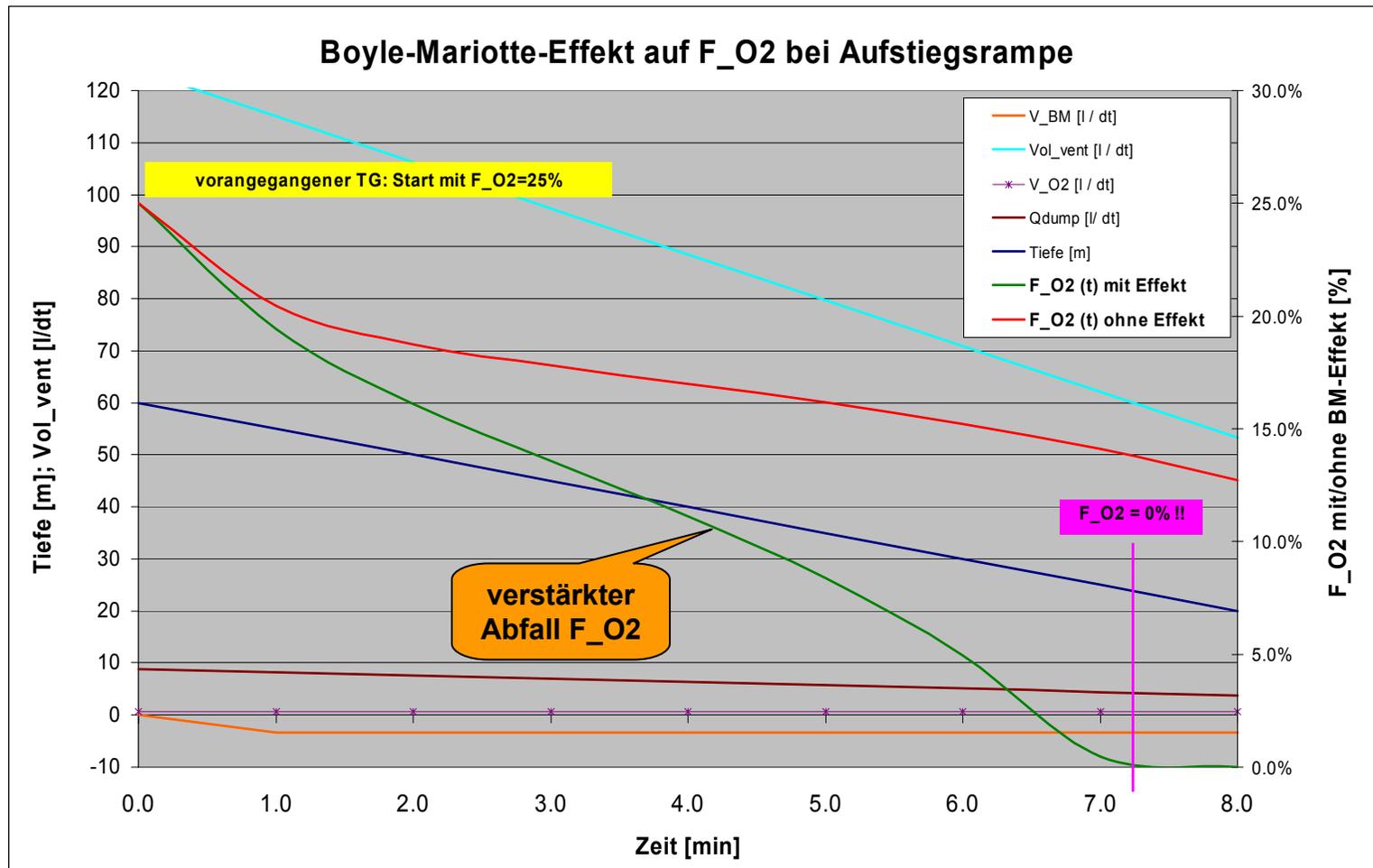
dVBM [l / dt]	F_O2 (t) [---]	p_O2 (t) [bar]
0.000	25.00%	1.72
-3.430	19.41%	1.24
-3.430	16.10%	0.95
-3.430	13.56%	0.73
-3.430	11.12%	0.55
-3.430	8.37%	0.37
-3.430	4.95%	0.20
-3.430	0.45%	0.02
-3.430	0.00%	0.00



REBREATHERS



Berechnung des Aufstiegs-Rampeneffektes (3)



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



REBREATHERS

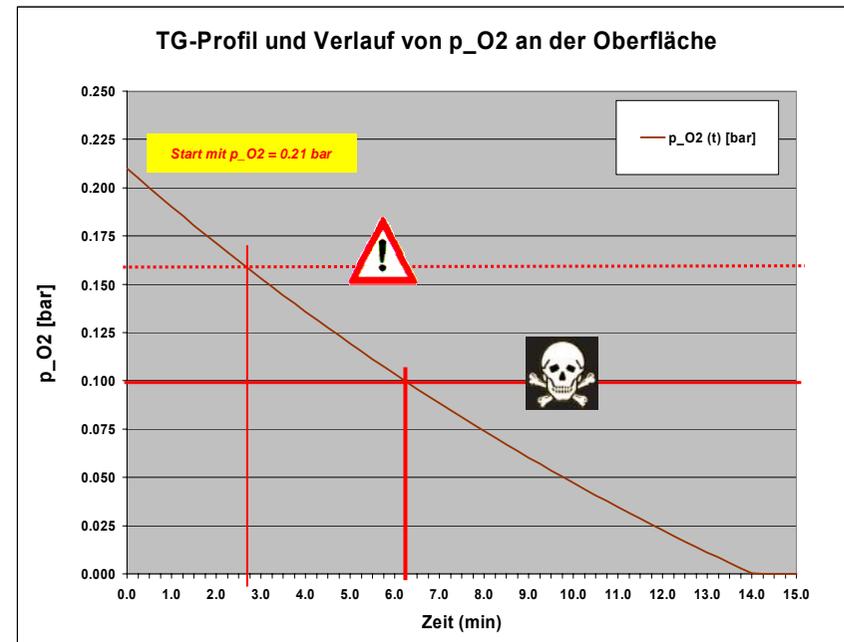


Berechnung des Spülungs-Effektes (1)

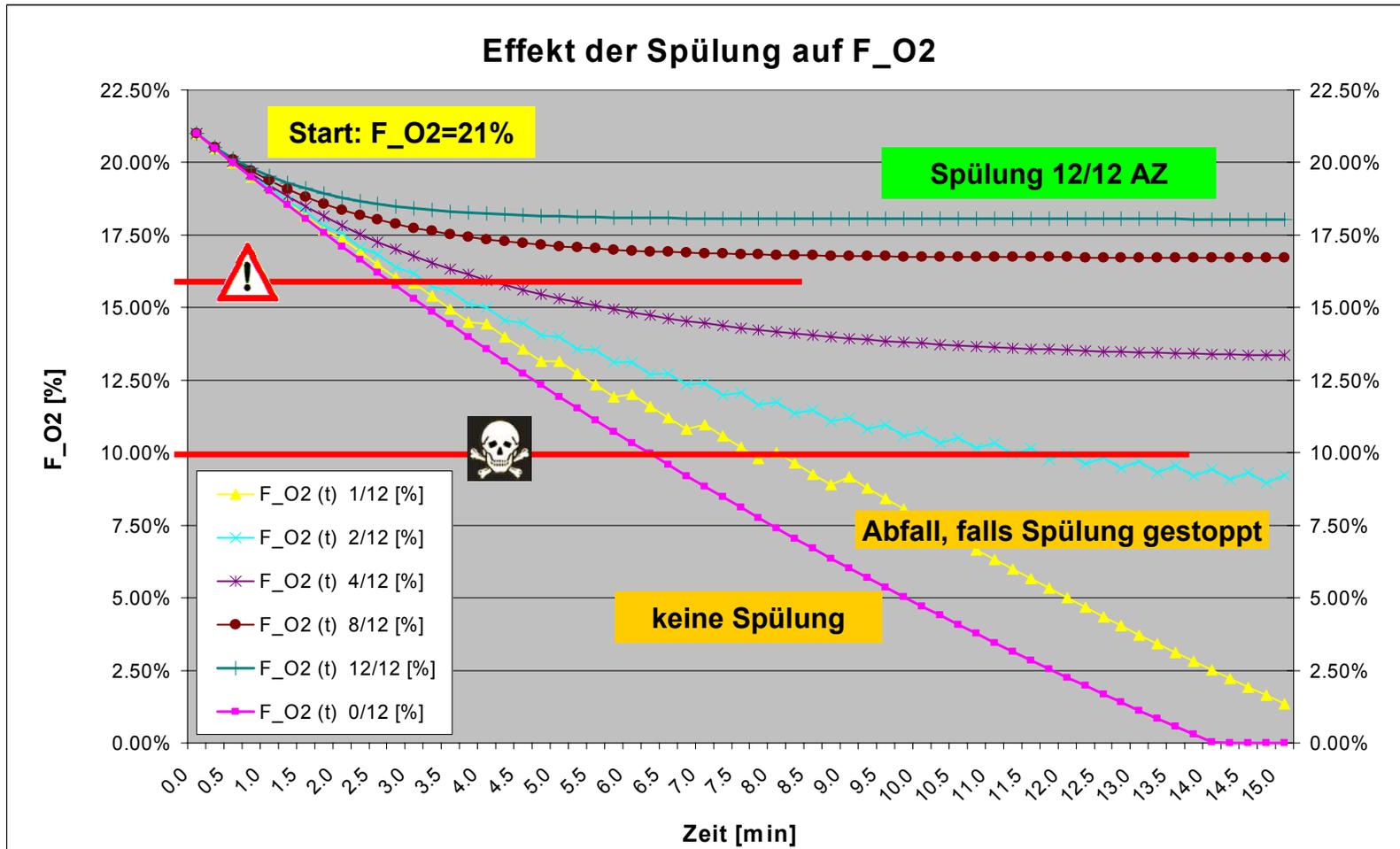
Um den O₂-Anteil anzuheben, besonders während einer Aufstiegs, wird das System gespült. Dies kann manuell durch ein Bypass-Ventil geschehen (manual override) oder dadurch dass das eingeatmete Gas durch die Nase in die Umgebung ausgeatmet wird. Zur Deckung des Volumendefizits wird entsprechend zusätzliches 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_{O₂} im Loop führen würde. Dann wird mit verschiedenen Frequenzen jeweils ein Atemzug gespült.

Initialanteil O ₂ im Loop zu Beginn Zyklus	21.0%	
Anteil O ₂ im Speisegas (F _{O₂} Flasche)	21.0%	
AtemMinutenVolumen	18.0 l/min / 1 bar	
metabolisch verbrauchtes O ₂	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 ₂ O	



Berechnung des Spülungs-Effektes (2)



**Resultate: 1)der O2-Anteil (F_{O2}) kann signifikant angehoben werden!
 2) mit Kr=7% kann F_{O2} =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.

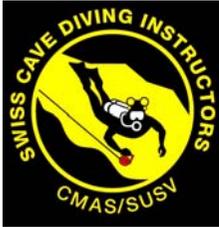
Wenn auf **reinen Sauerstoff gewechselt** wird, wird damit $F_{mixIG} = 0$! Damit wird $C = 0$!

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

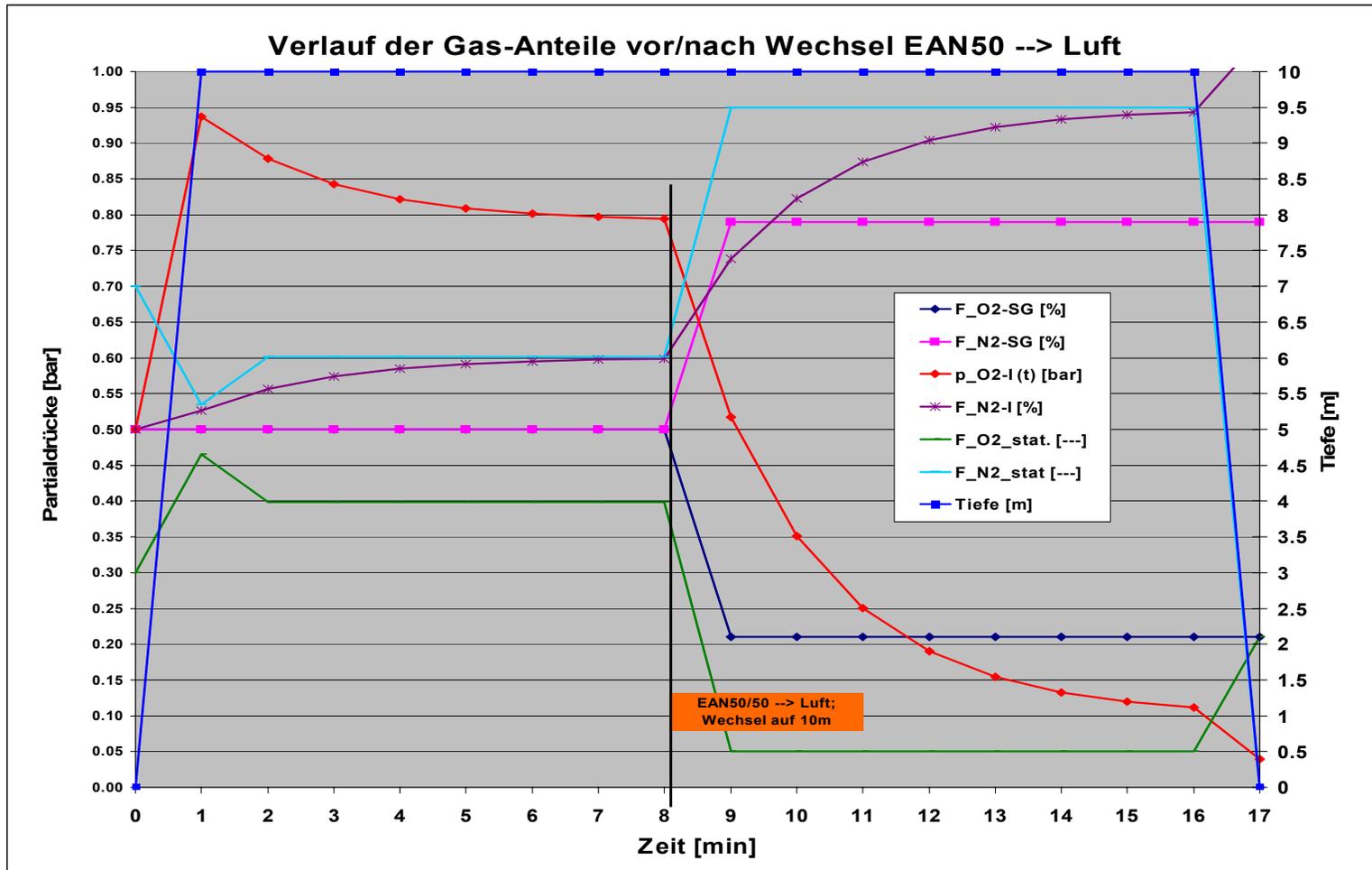


Effekt eines Gaswechsels (3)

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)

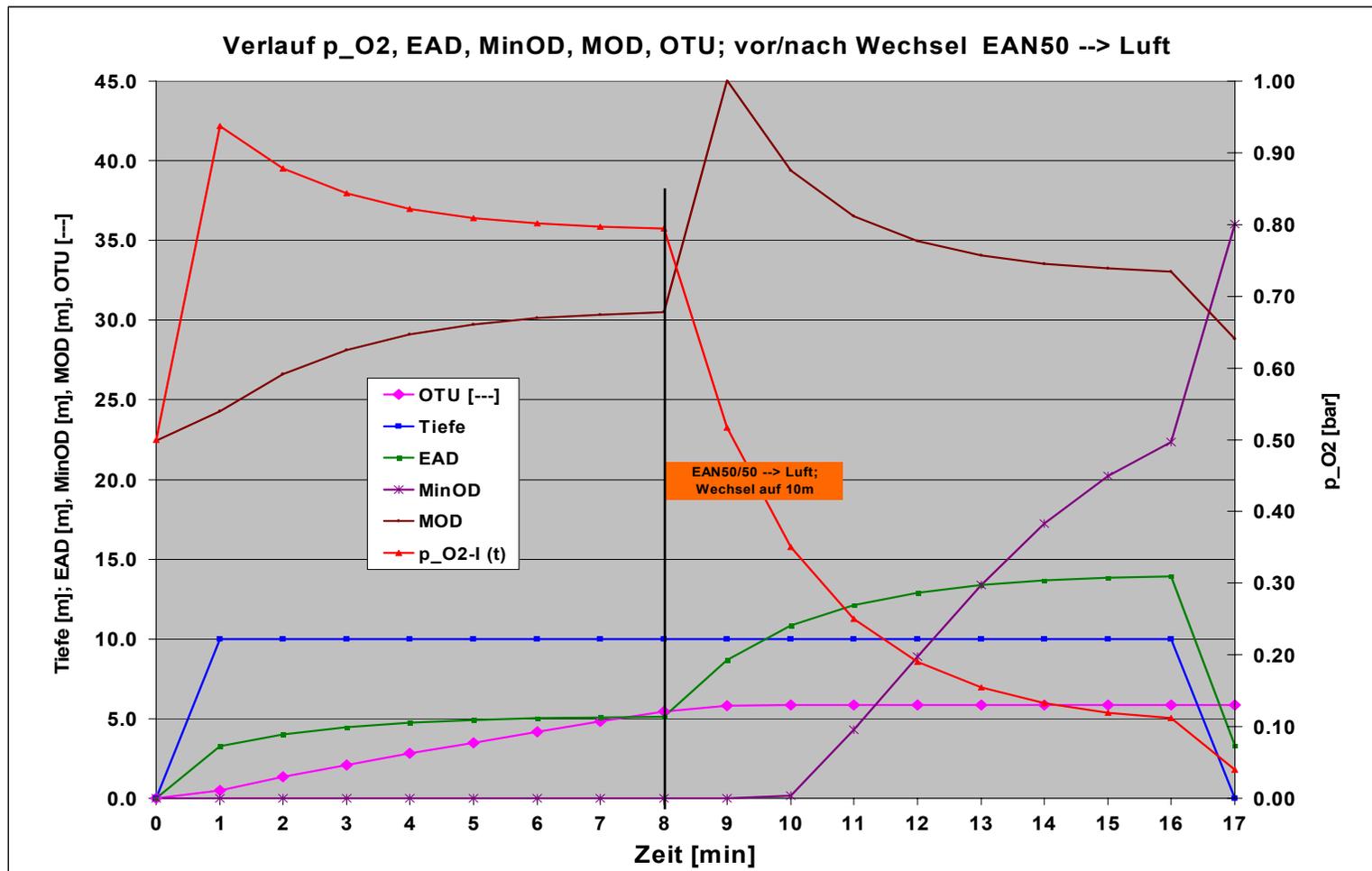




REBREATHERS



Effekt eines Gaswechsels (5)

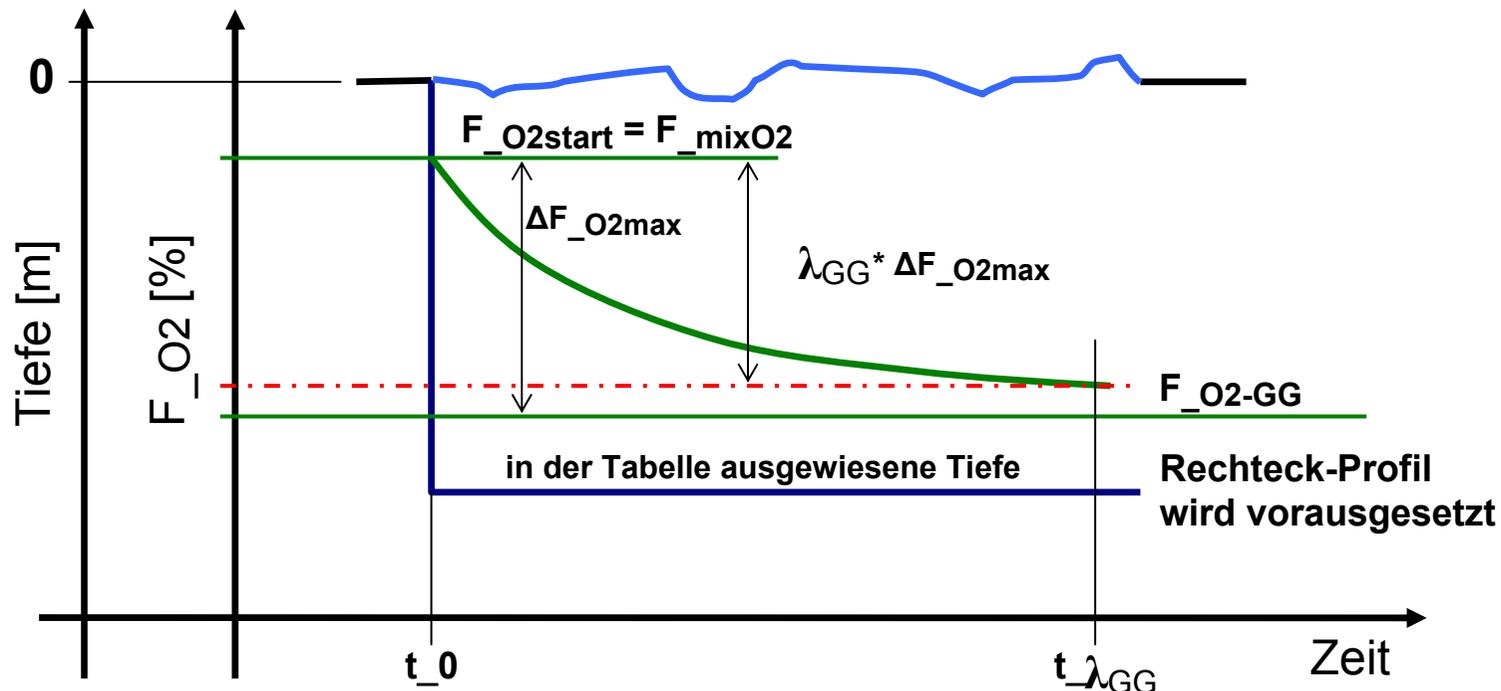


O₂-Drop Tabelle (1)

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



O₂-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:

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

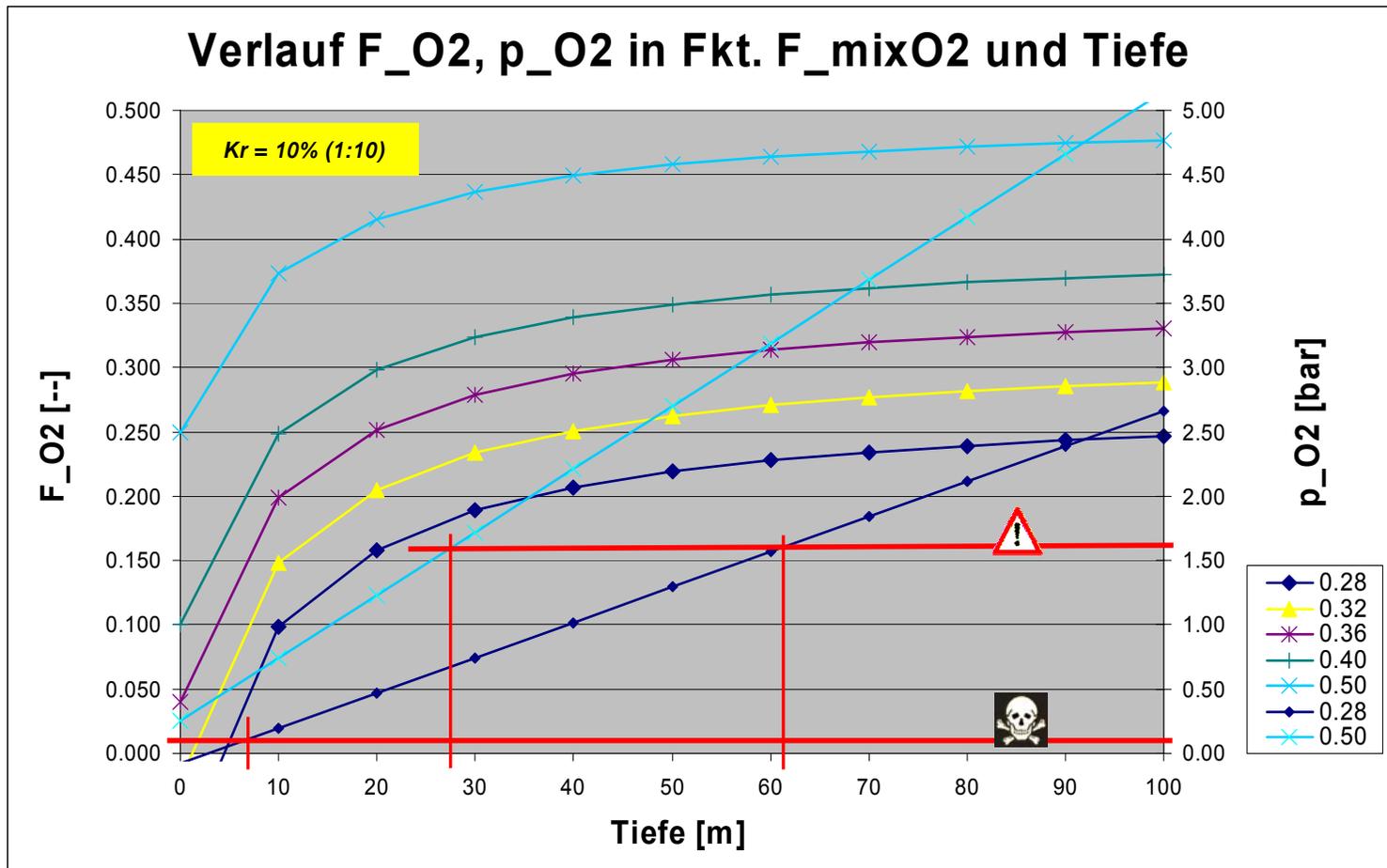
Dabei ist λ_{GG} der prozentuale Erreichungsgrad bis zum Gleichgewichtszustand. Dessen Wert beträgt zw. 0%....100%, resp. zw. 0....1.

Auf den ersten Blick erstaunlich ist die Zeit bis zum Erreichen eines bestimmten, relativen Erreichungsgrades λ_{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.

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:





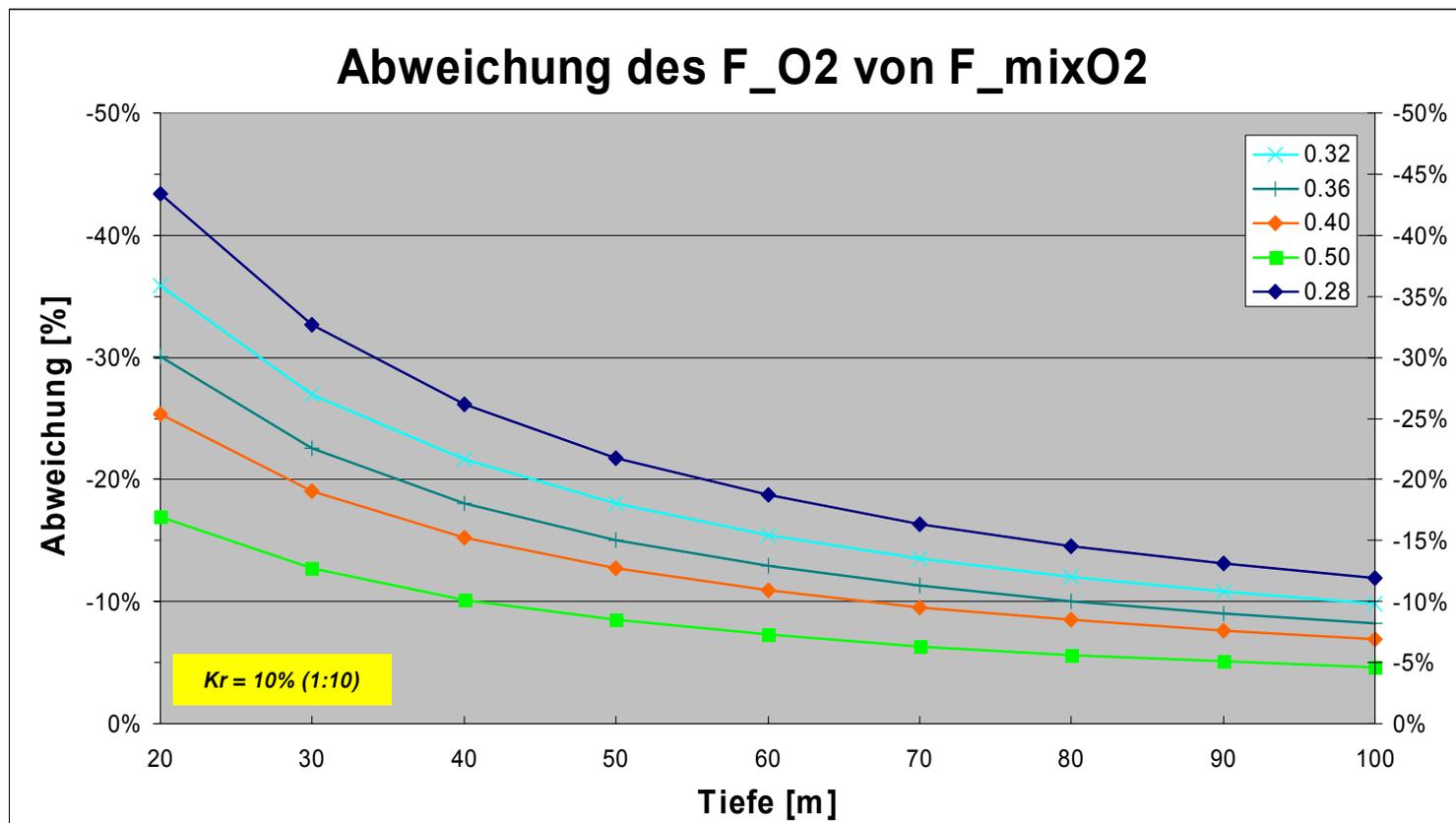
REBREATHERS

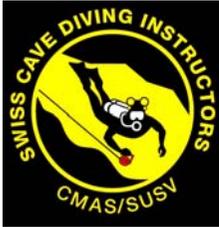


O₂-Drop Tabelle (6)

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 O₂-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 = Tmx21/35											
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)										
λ_{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

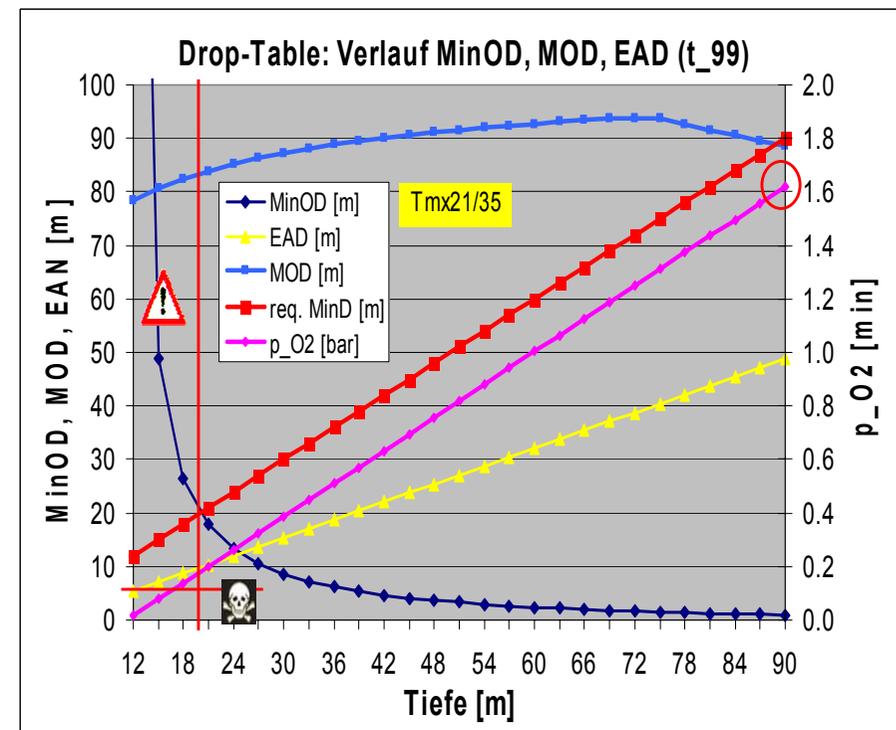
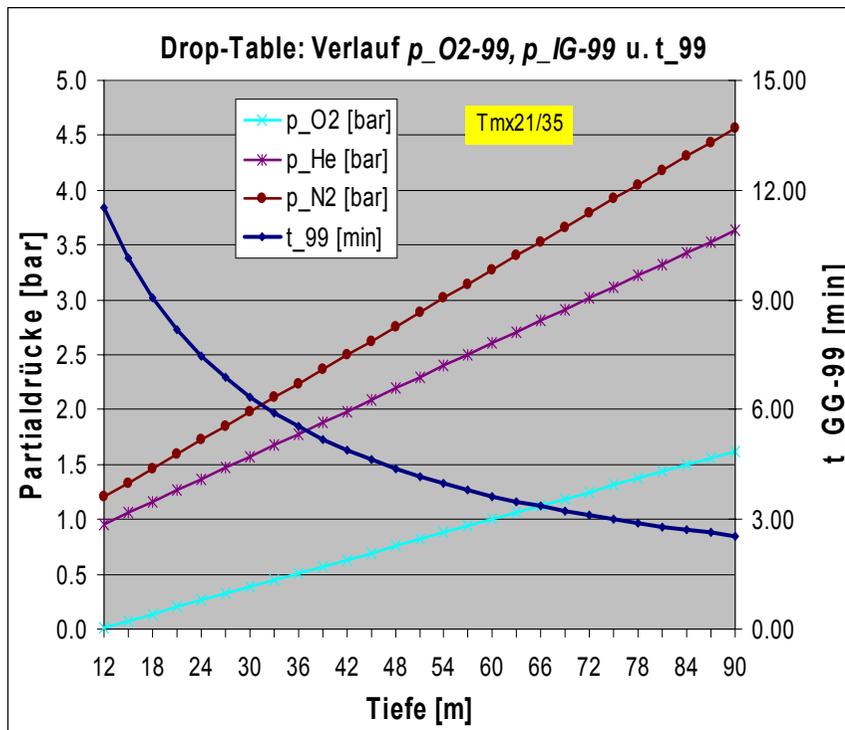


REBREATHERS



O2-Drop Tabelle (7b)

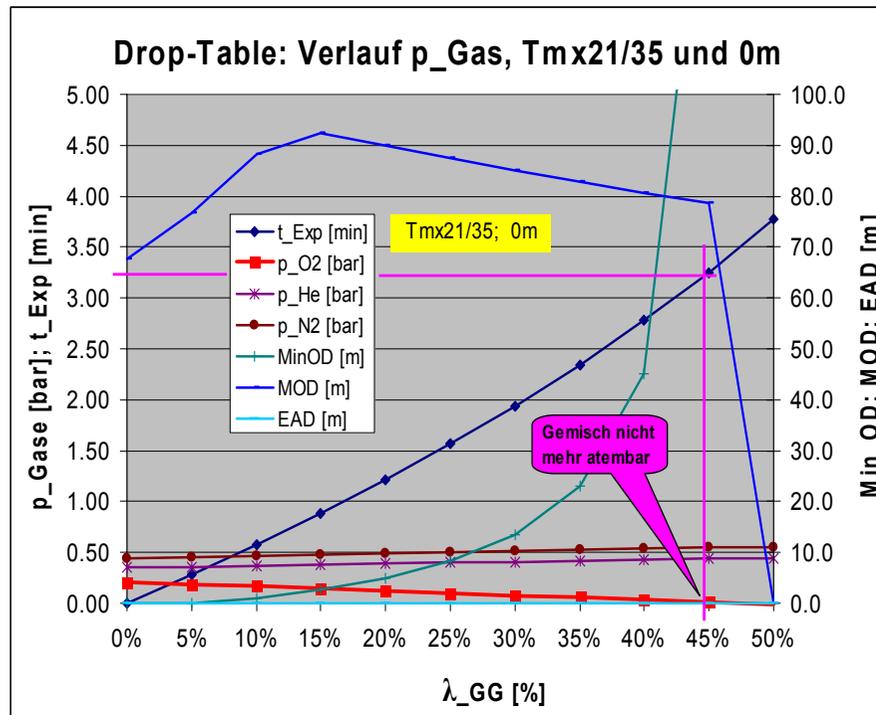
Die Resultate für Tmx21/35 (als Fkt. über die TIEFE) graphisch dargestellt:



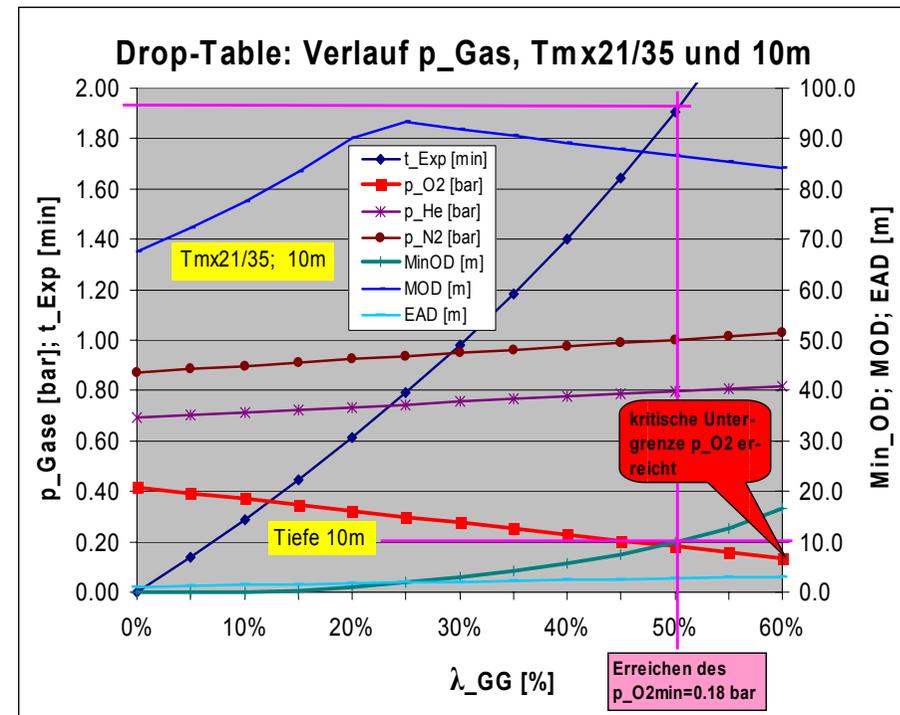
- oberhalb ca. 18-20m kein atembare Gleichgewichtszustand mehr

O2-Drop Tabelle (7c)

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



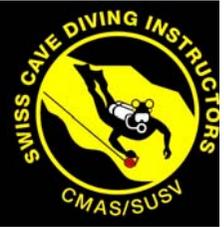
- Gemisch bei Erreichen von ca. 45% Gleichgewicht (ca. 3.2min) bereits nicht mehr atembar



- def. p_{O2min} (0.18bar) bei ca. 51% Gleichgewicht
- kritischer p_{O2} bei ca. 60% Gleichgewicht

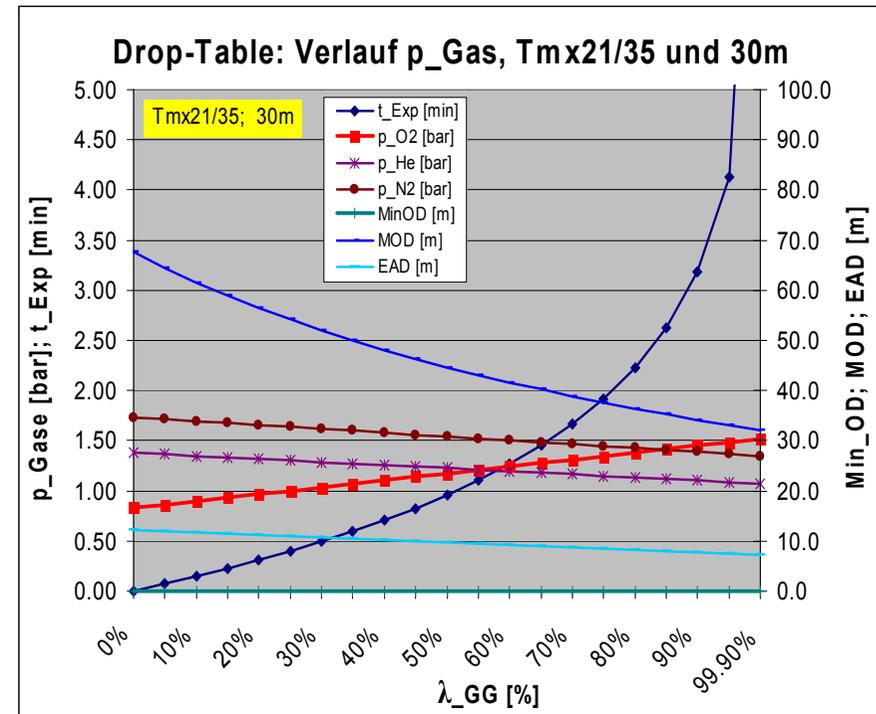
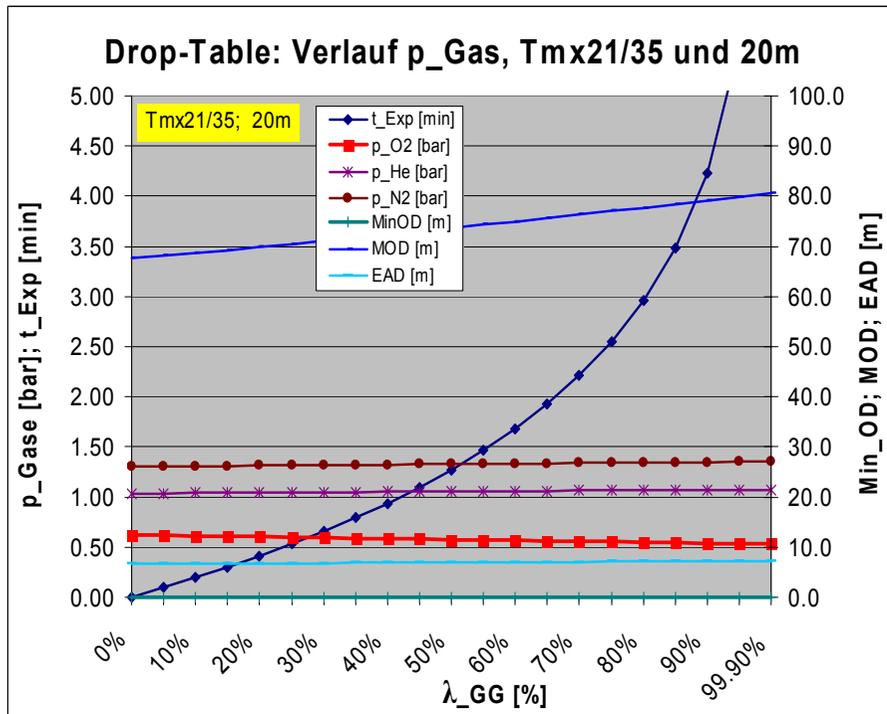


REBREATHERS



O2-Drop Tabelle (7d)

Die Resultate für Tmx21/35 für 2 weitere Tiefen als Fkt. von λ_{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 O₂-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. O₂-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 /	k_t
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]
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	0.225
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	0.182
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	0.153
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	0.131
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	0.115
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	0.093
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	0.072
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	0.058

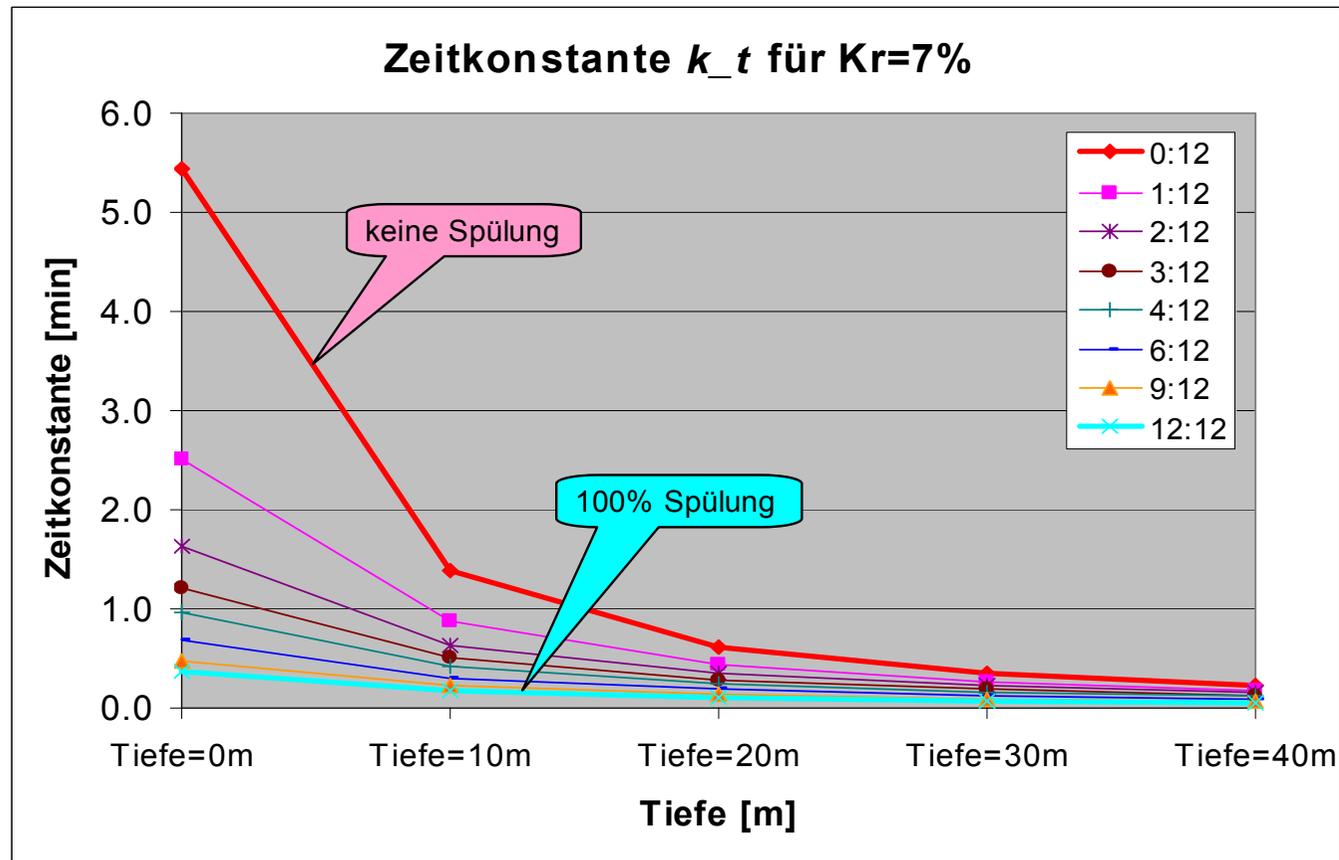


REBREATHERS

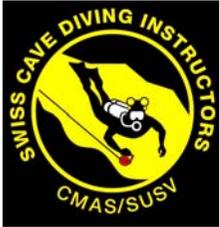


Zeitkonstante (3)

a) Einfluss der Spülung



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



REBREATHERS



Zeitkonstante (4)

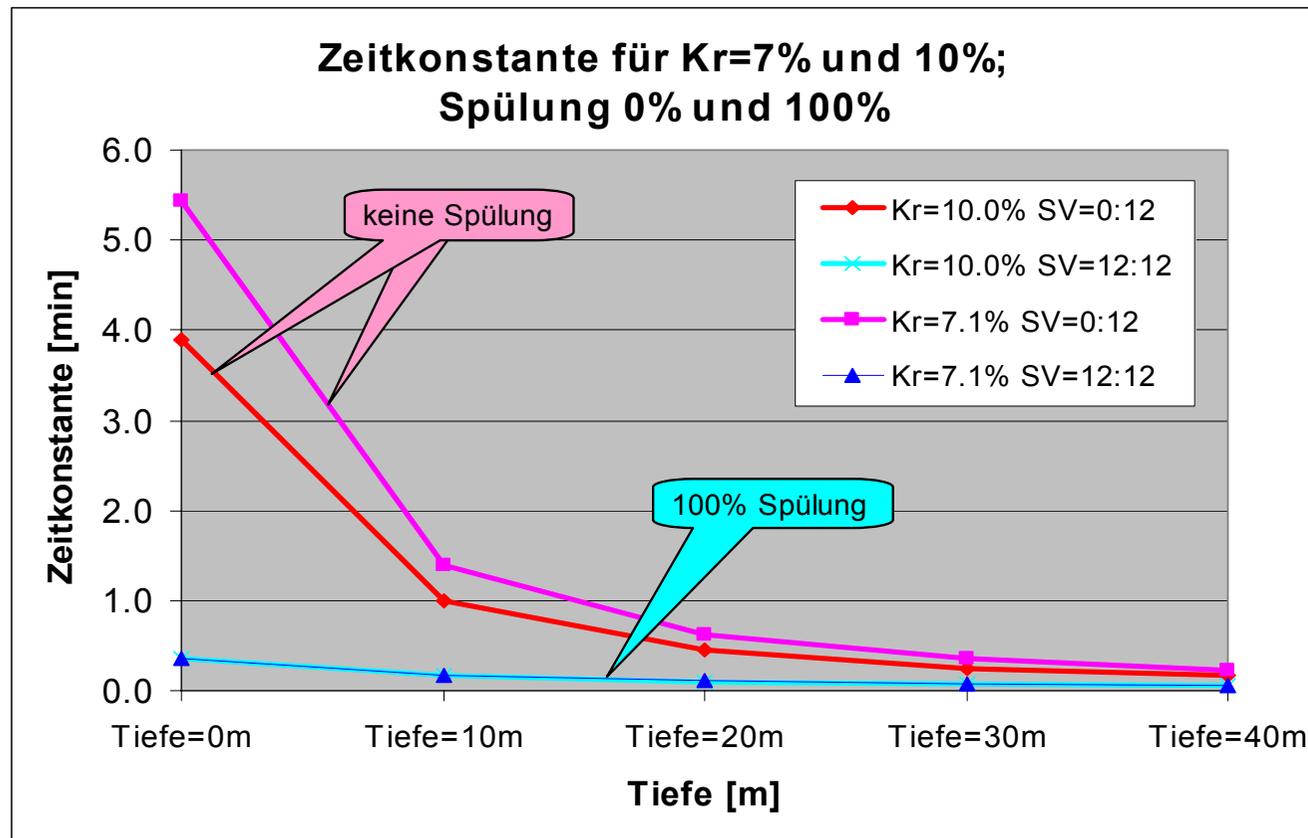
b) Einfluss des Dump-Ratios

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

																$K_r = 10.0\%$											
		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	1.80	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 /	k_t	V_spül	Vspül /	k_t	V_spül	Vspül /	k_t	V_spül	Vspül /	k_t	V_spül	Vspül /	k_t											
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]											
0 : 12		0.00	0.000	3.889	0.00	0.000	0.992	0.00	0.000	0.444	0.00	0.000	0.251	0.00	0.000	0.161											
12 : 12		18.00	10.000	0.354	35.64	5.051	0.164	53.28	3.378	0.101	70.92	2.538	0.071	88.56	2.033	0.053											
																$K_r = 7.1\%$											
		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 /	k_t											
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]											
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	0.225											
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	0.058											

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 O₂-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:

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

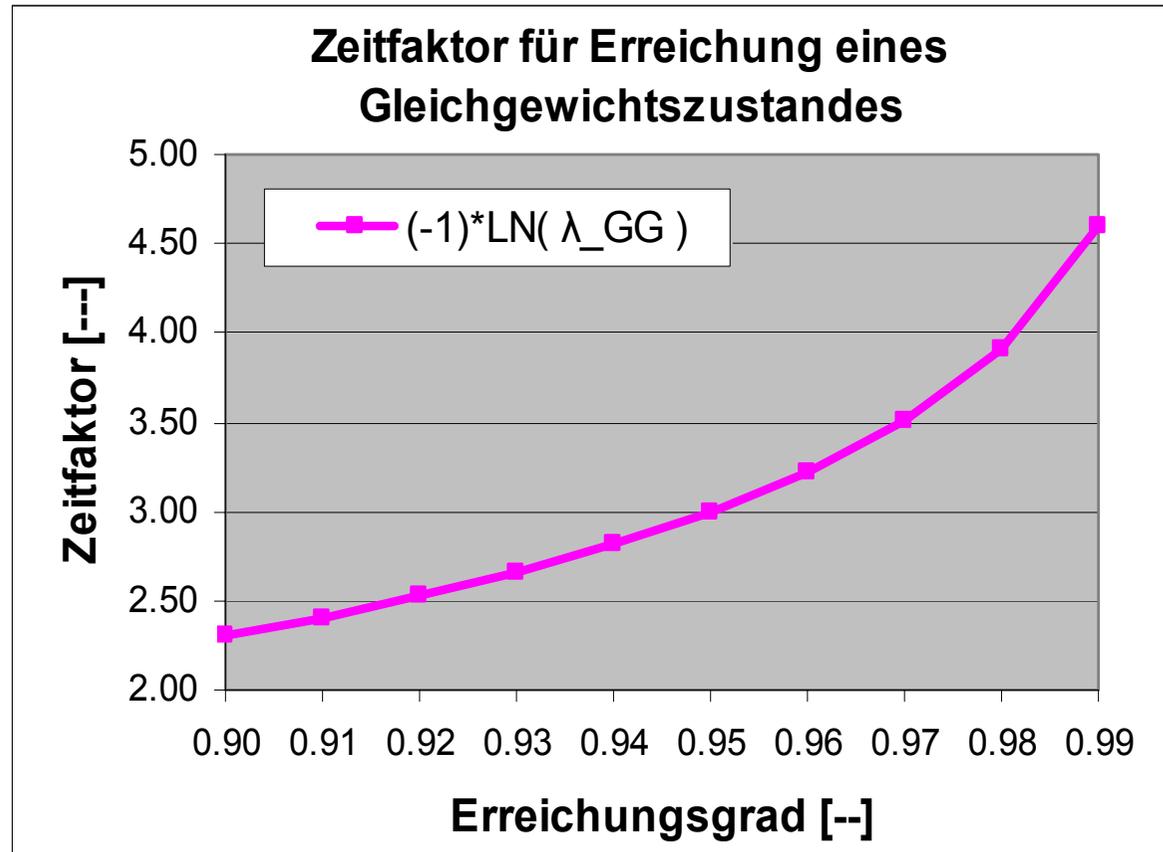


REBREATHERS



Zeitkonstante (7)

λ GG	$(-1)*\text{LN}(\lambda \text{ GG})$
0.90	2.30
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
0.95	3.00
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
0.995	5.30



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



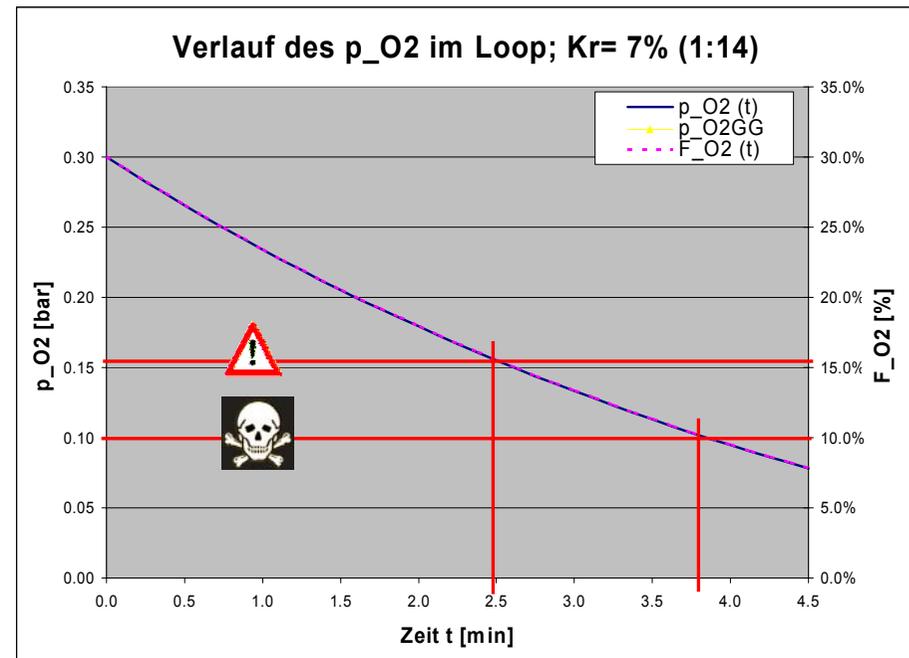
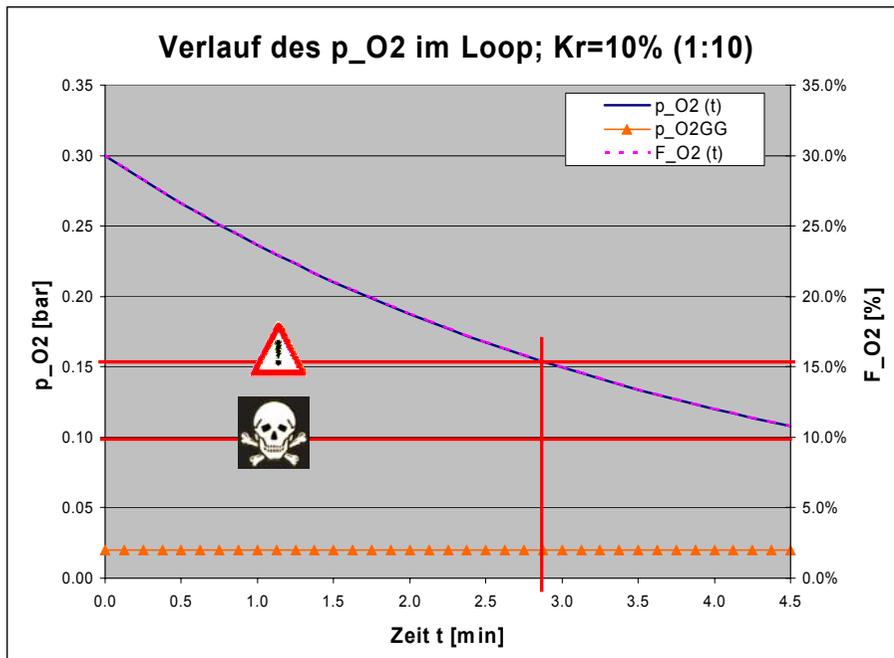
REBREATHERS



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

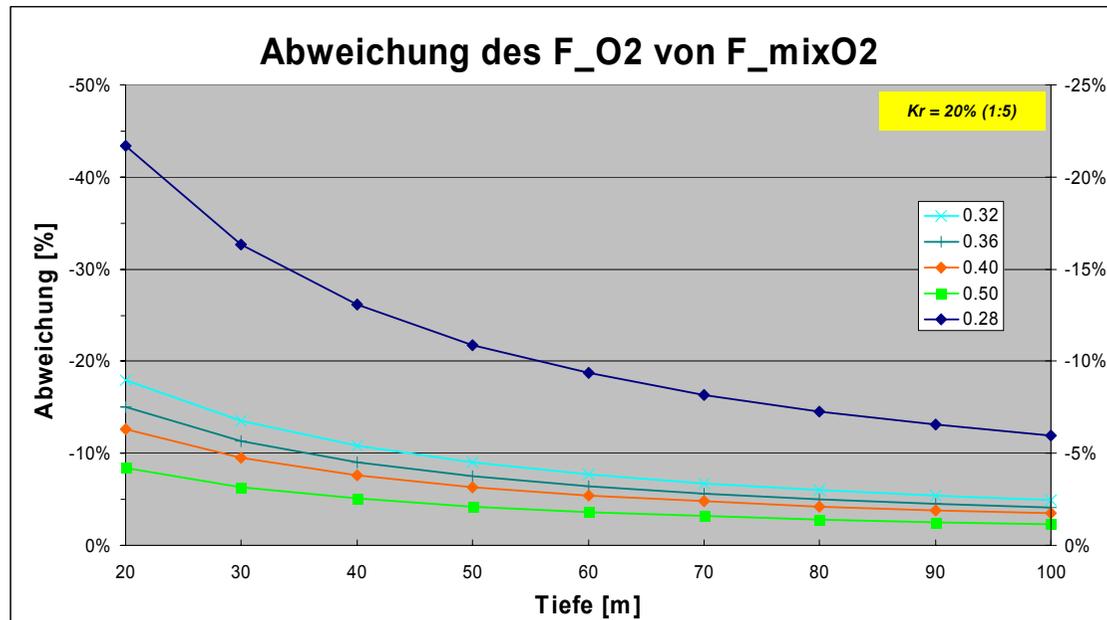


Einfluss der Eliminationsrate K_r (2a)

Die bereits bekannte O₂-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



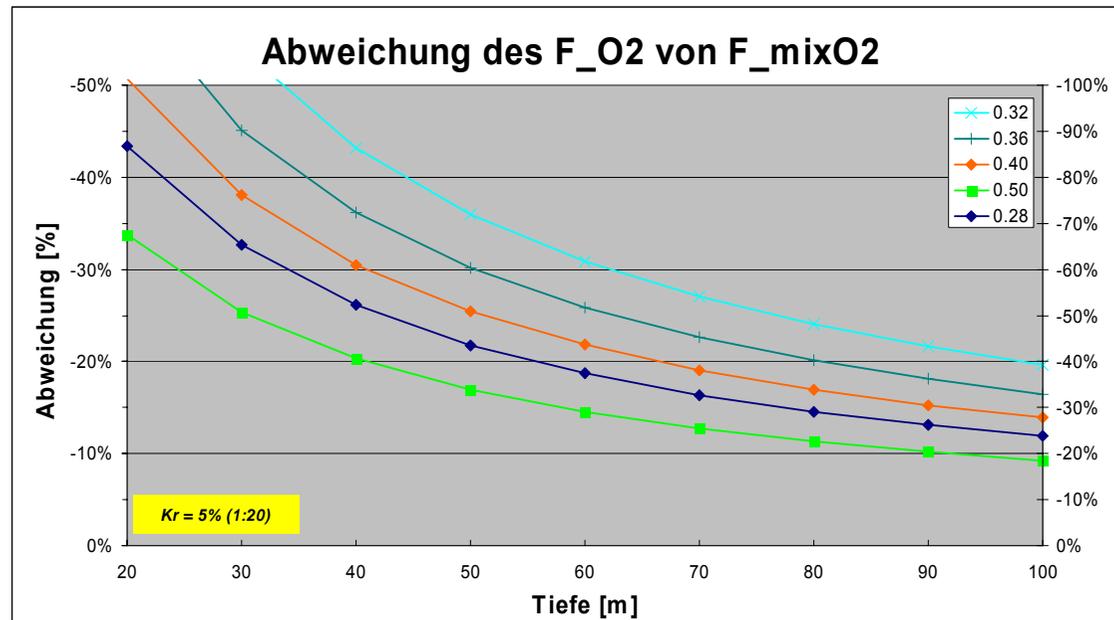
Einfluss der Eliminationsrate K_r (2b)

Die bereits bekannte O₂-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} .





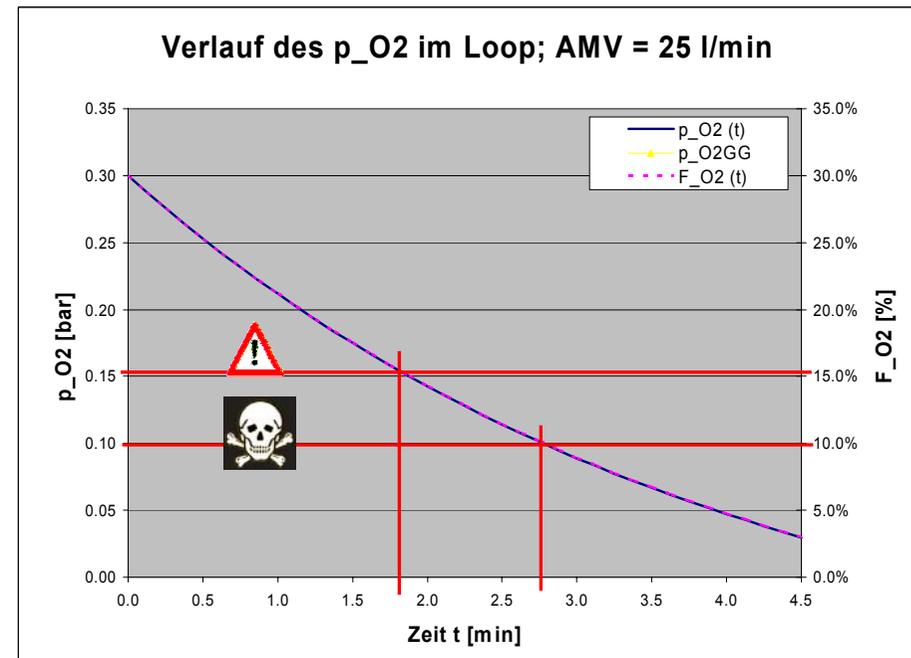
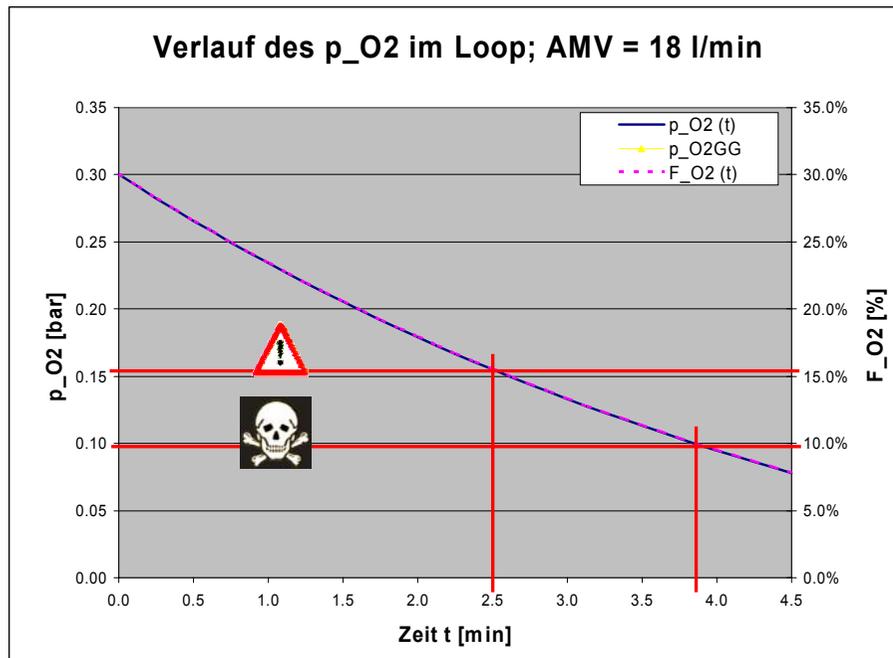
REBREATHERS



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!



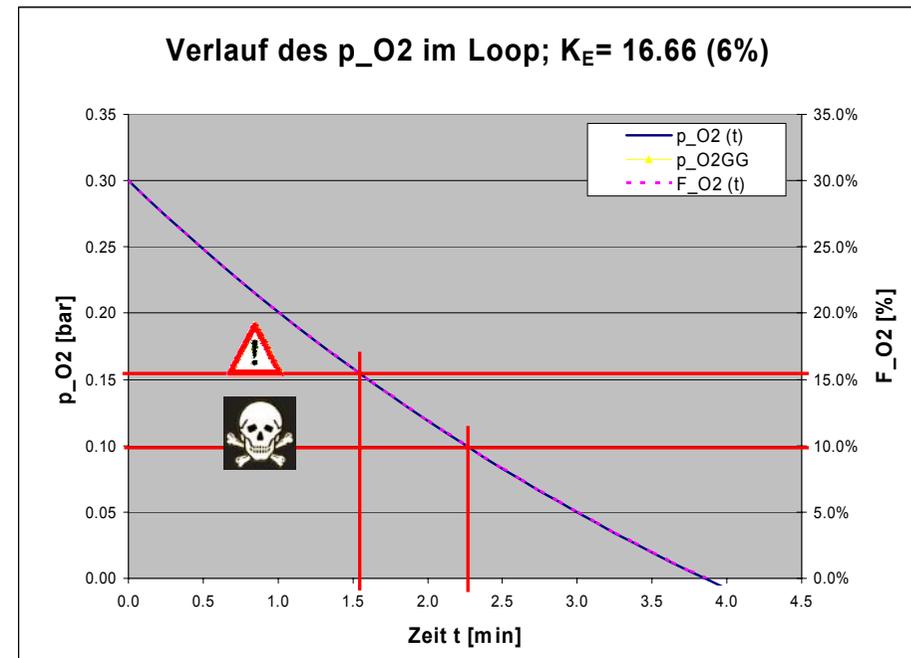
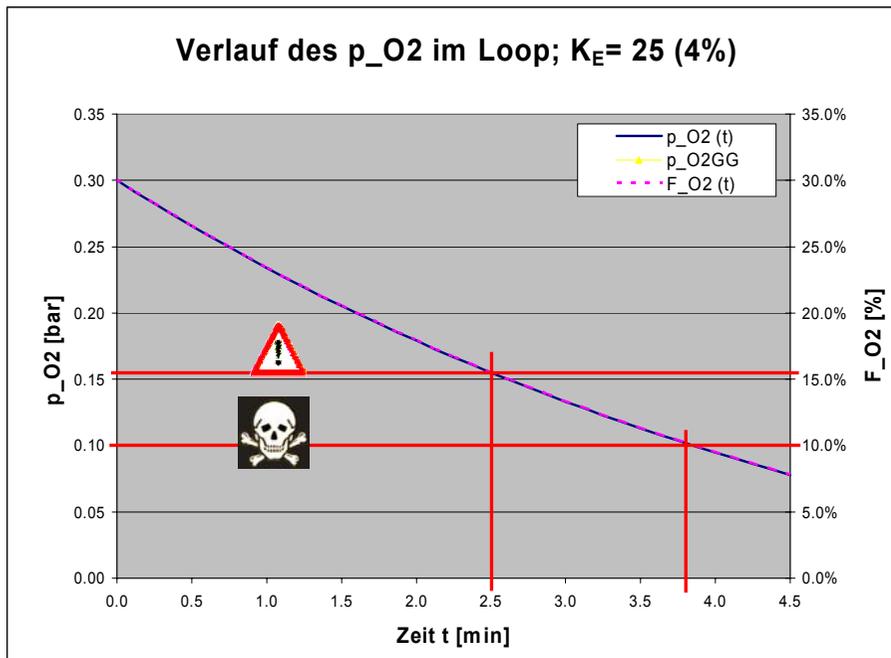
REBREATHERS



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!



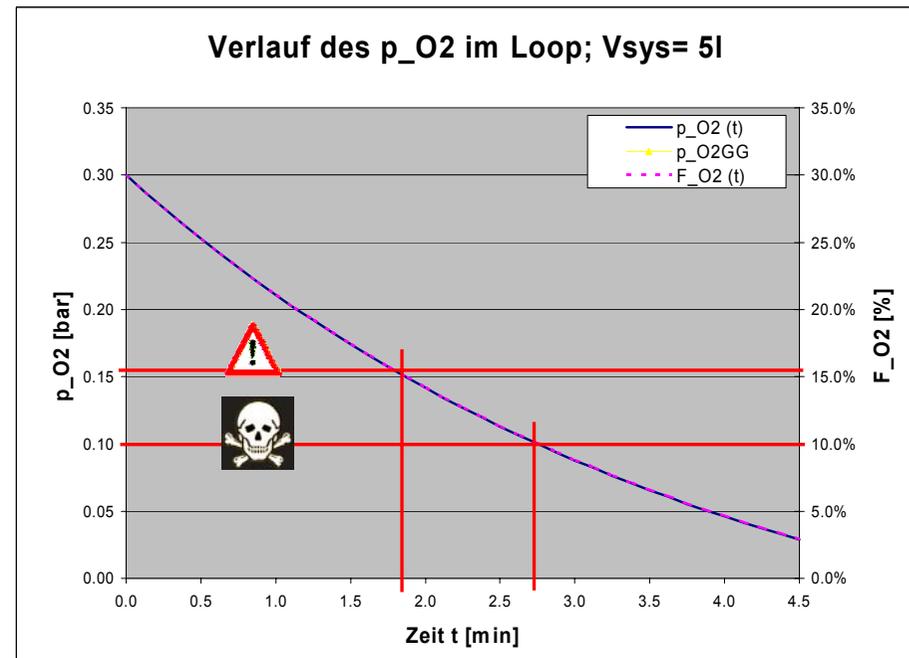
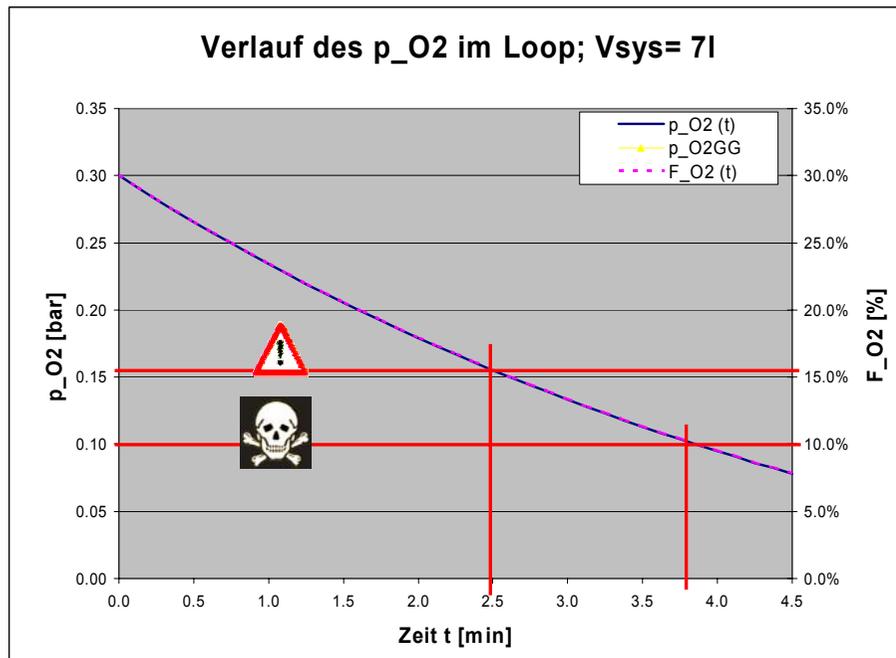
REBREATHERS



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

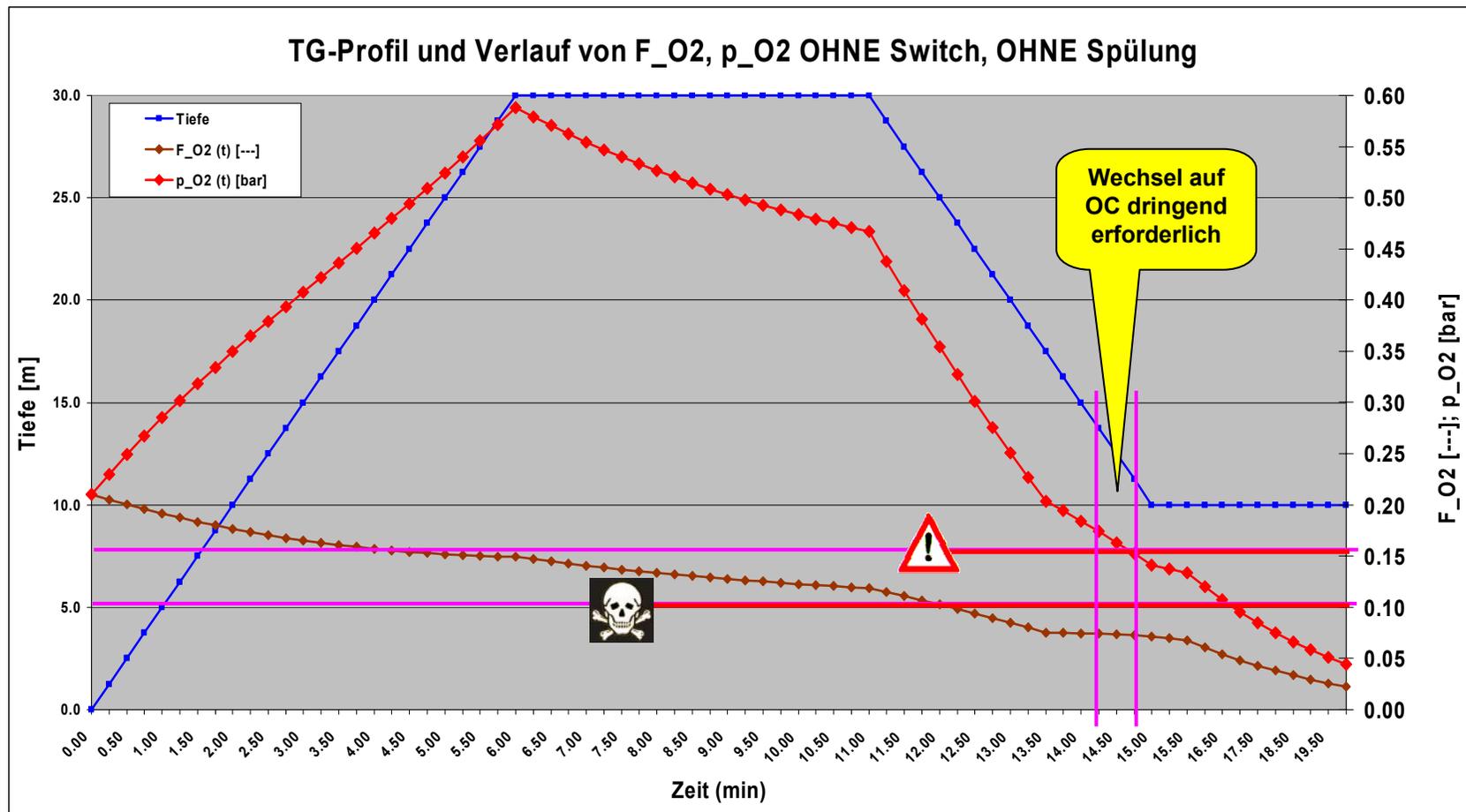
Initialanteil O2 im Loop zu Beginn Zyklus	30.0%
Anteil O2 im Speisegas (F_O2 Flasche)	30.0%
AtemMinutenVolumen	18.0 l/min
metabolisch verbrauchtes O2	4.0% * AMV
Ventilationskoeffizient 17...20...25	25.0
Eliminationsrate des SCR	7.0% (1:14)
Gesamtvolumen des Systems	5.0 l
Totaldruck an der Oberfläche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



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

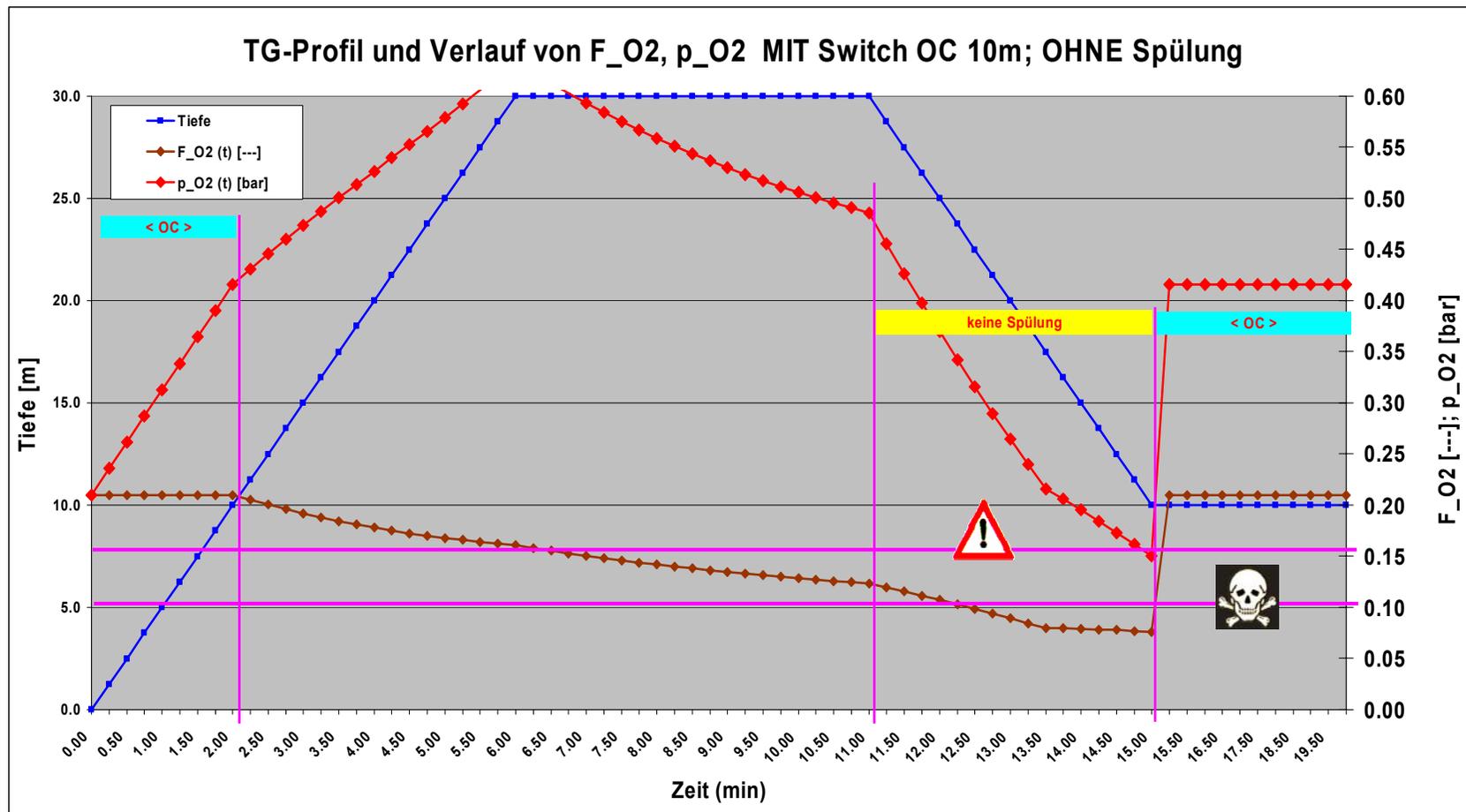
Wechsel von/auf offenes Bailout (1)

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.



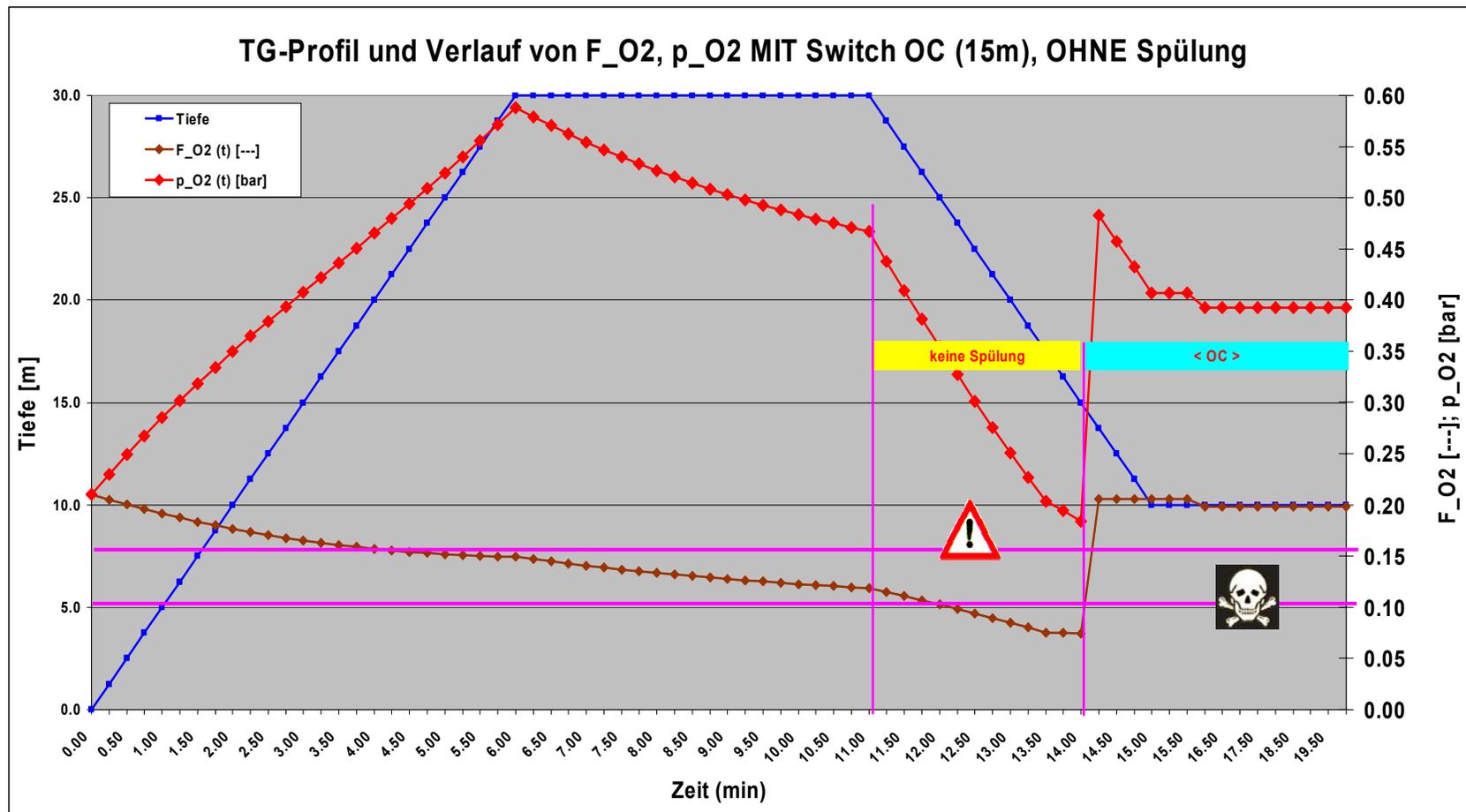


REBREATHERS



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.



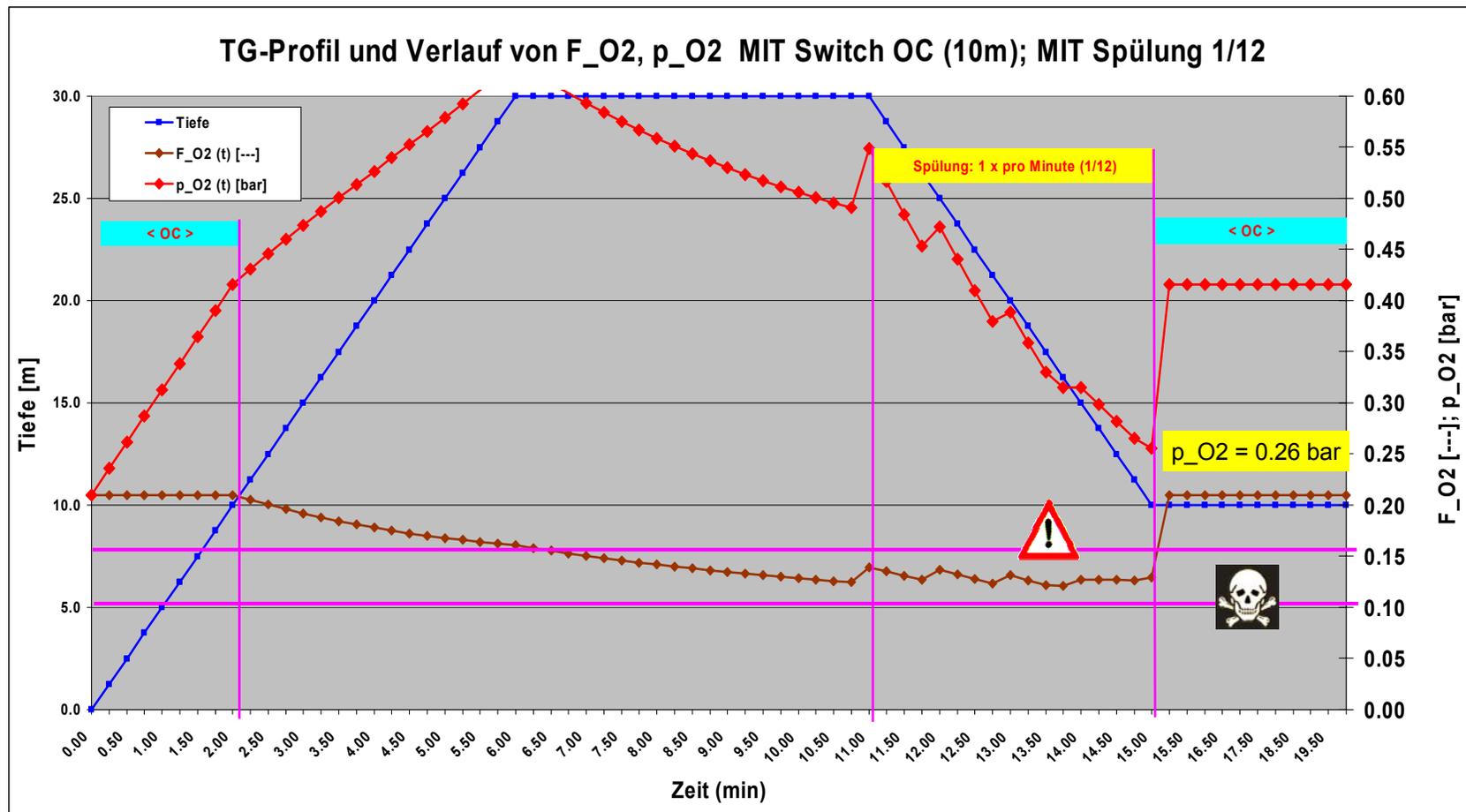


REBREATHERS



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!**