



REBREATHERS



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



V1.4/29.3.06

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 und diskutiert.

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**
- **Teil 1: Gliederung, Terminologie, Aufbau, Komponenten und Funktion von passiven, AMV-gesteuerten SCR mit konstantem Auswurfvolumen**
- **Teil 2: Rechnerische Untersuchung zu den physikalischen Besonderheiten; Modell Nr. 1**
- **Teil 2a: Wie Teil 2, aber mit Modell Nr. 2**
- **Teil 3: Auslegung für tiefenkompensierten, variablen Auswurf**
- **Teil 4: Anatomie eines SCR-Unfalles**
- **Teil 5: Vergleich Rechnung - Messungen**



REBREATHERS



Teil 2a

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

(Modell 2)



REBREATHERS



Inhaltsverzeichnis

- Problem der Frischgasverluste / Massnahmen
- Einführung zum Modell Nr. 2
- Das Berechnungsmodell Nr. 2
- Herleitung des Gleichgewichtszustandes
- Berechnung des Gleichgewichtszustandes sowie der Minimalwerte für F_{mixO_2} und K_r
- Dynamischer Verlauf des p_{O_2} 29.3.06
- 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



Hinweis zu den numerischen Rechnungen

Einige Leser mit Erfahrung im Umgang mit pSCR werden sich bestimmt wundern, warum immer wieder bei den Berechnungen ein Gemisch mit gerade nur 21% O₂-Anteil verwendet wird.

Das geht doch gar nicht (vor allem in Oberflächennähe) werden sie sagen.

Sie haben recht! Es geht tatsächlich nicht! Genau diese Tatsache, resp. das fehlende Wissen dazu, hat letztes Jahr einem Taucher das Leben gekostet.

Da ein Teil dieser Studie (Teil 4) den Untersuchungsbehörden zugestellt worden ist, war es naheliegend für den Autor, bei den parametrischen Berechnungen auch immer wieder dieses „unmögliche“ Gemisch einzusetzen um eben zu zeigen, dass es tatsächlich NICHT geht.

Der zweite Grund ist der: es sollen nur TRENDS aufgezeigt und gleichzeitig vermieden werden, dass unbedarfte Leser irgendwelche Resultate einfach mal so abschreiben und damit Tauchgänge planen oder durchführen.



REBREATHERS



Das Problem der Frischgasverluste

Diskussion:

Frischgas, das nicht genutzt wird, resp. nicht genutzt werden kann, senkt den p_{O_2} im Loop.

Durch konstruktive Massnahmen wird deshalb meist versucht, das Frischgas vom Altgas zu trennen und dafür zu sorgen, dass alles Frischgas möglichst in den „Upstream“-Teil des Loops gelangt. Eine Vermischung mit Altgas (residual gas) ist grundsätzlich nicht erwünscht. Nur wenn das Frischgas NACH dem Scrubber zugeführt wird, ist eine möglichst homogene Durchmischung mit dem bereits von CO₂ gereinigten Restgas erforderlich (wird durch radiale Einspeisung erreicht; Vortex-Bildung).

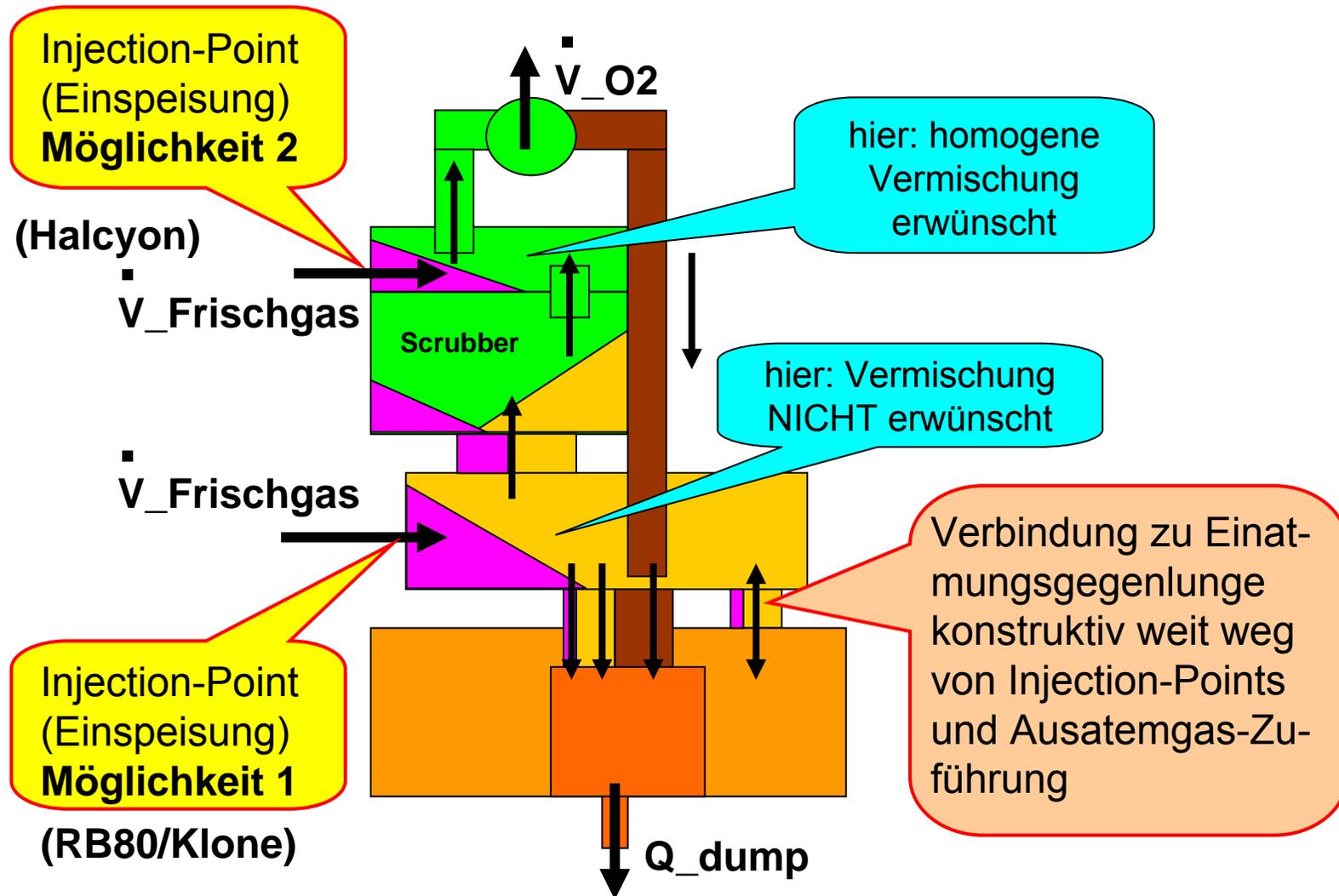
Die Trennung kann durch räumlich Distanzierung geschehen zw. Injektions-Ort und allen Wegleitungen, welche NICHT direkt in den Scrubber führen, durch Leitbleche zur Führung der Gasströme, durch Injektion des Frischgases zum spätest möglichen Zeitpunkt (sowohl räumlich, Bsp. Halcyon, wie zeitlich, wenn beide Gegenlungen kollabiert sind!).

(diese Prinzipien werden übrigens 1:1 bei Verbrennungsmotoren auch angewendet).

Beim „alten“ Halcyon (Injektion nach dem Scrubber) dürfte der ungenutzte Frischgasanteil λ_{uSG} sehr nahe bei Null gewesen sein, also optimal.

REBREATHERS

Massnahmen zur Reduktion d. Frischgasverluste





REBREATHERS



Einführung zum Modell Nr. 2

Im Teil 2 der Studie wurden 4 Modelle vorgestellt. Modell Nr. 1, das einfachste davon, wurde zur ersten parametrischen Untersuchung weiterverwendet. Es ist einfach, gut überblickbar, gut berechenbar und gibt alle wichtigen Trends korrekt wieder.

Für den Leser, der sich langsam in die Materie einarbeiten will, und ein solides Verständnis aufbauen möchte, gerade richtig.

Je höher die Anforderungen an die Genauigkeit der numerischen Resultate, desto genauer muss im allgemeinen das Modell die realen Prozesse beschreiben.

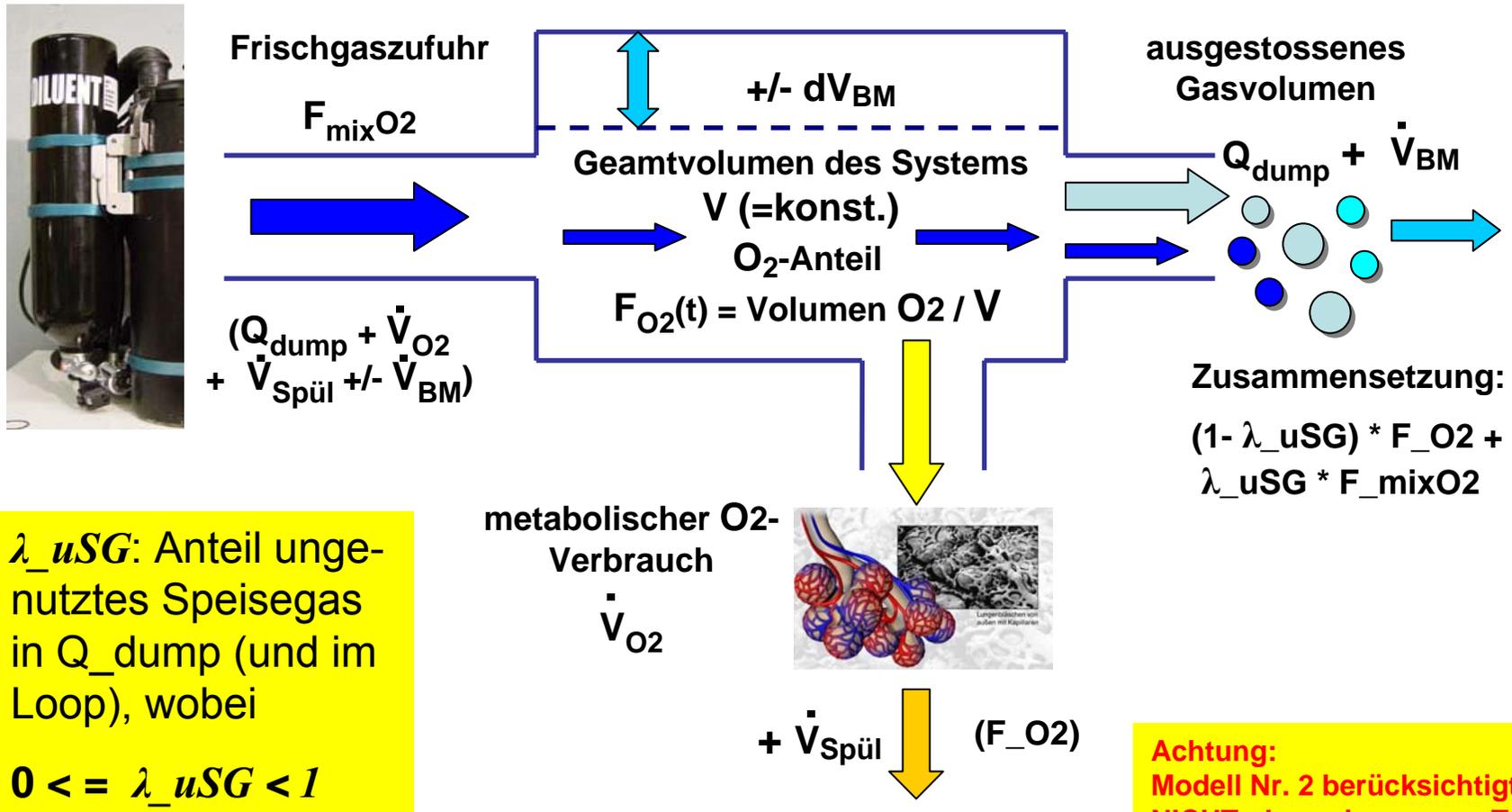
Mit Modell Nr. 2 wird schon einmal berücksichtigt, dass es konstruktiv praktisch unvermeidbar ist, dass ein (kleiner) Teil des injizierten Frischgases ungenutzt direkt in die Ausatemgegenlunge entweicht.

In diesem Teil der Studie wird nun dargelegt, welche Auswirkungen eine Veränderung dieses ungenutzten Anteil auf die übrigen Resultate hat. Zudem kann jedes Mal ein guter Plausibilitäts-Vergleich mit den Resultaten aus Modell Nr. 1 gezogen werden.

Ein Abgleich der numerischen Resultate der Modellrechnungen mit durchgeführten Messungen wird in Teil 5 präsentiert werden.

REBREATHERS

Das Berechnungsmodell Nr. 2



λ_{uSG} : Anteil ungenutztes Speisegas in Q_{dump} (und im Loop), wobei $0 \leq \lambda_{uSG} < 1$

Gute Kontrollmöglichkeit: mit $\lambda_{uSG} = 0$ müssen die selben Resultate erhalten werden wie mit Modell Nr. 1.

Achtung: Modell Nr. 2 berücksichtigt NICHT, dass ein grosser Teil des Ausatemgases konstruktiv direkt in die Ausatemgegend geleitet wird!



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

$$\begin{aligned} & \dot{V}_{O_2} \\ & + \\ & F_{O_2}(t) \cdot (\dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM}) + \\ & F_{mixO_2} \cdot \lambda_{uSG} \cdot Q_{dump} + \\ & F_{O_2}(t) \cdot (1 - \lambda_{uSG}) \cdot Q_{dump} \\ & = \\ & F_{mixO_2} \cdot (Q_{dump} + \dot{V}_{O_2} + \dot{V}_{Spül} + \\ & \dot{V}_{BM}) \end{aligned}$$

[5-Nr. 2]



REBREATHERS



Herleitung des Gleichgewichtszustandes (2)

Beim Gleichgewichtszustand werden vorausgesetzt:

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

Damit lässt sich der O₂-Anteil im Gleichgewichtszustand aus [5-Nr.2] wie folgt berechnen:

$$F_{O_2-GG} = \left[F'_{O_2GG} - \lambda_{uSG} \cdot F_{mixO_2} \right] \cdot \frac{1}{(1 - \lambda_{uSG})}$$

[6-Nr.2]

Wobei F'_{O_2GG} nichts anderes ist als der bereits bekannte Ausdruck (Gl. 5) für F_{O_2GG} mit dem vereinfachten Modell Nr. 1:

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

[5 mit Modell 1]



REBREATHERS



Herleitung des Gleichgewichtszustandes (3)

Durch Substitution durch die Basis-Parameter erhält man:

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

[6'-Nr.2]

Es ist offensichtlich, dass λ_{uSG} nie 1 werden darf, weil es sonst beim letzten Term in der Gleichung eine Division durch Null gibt: $\lambda_{uSG} = 0$ macht aber auch keinen Sinn von der Gerätefunktion her: dies würde bedeuten, dass ALLES Frischgas ungenutzt wieder an die Umgebung gedumpt wird, ein Betrieb also unmöglich ist.



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} und nach Ersetzen von F_{O2min} , Q_{dump} und \dot{V}_{O2} erhält man:

$$F_{mixO2}^{(min)} = \frac{\left[p_{surf} + Kr \cdot KE \cdot (\lambda_{uSG} \cdot p_{amb}(Tiefe) + p_{O2min} - \lambda_{uSG} \cdot p_{O2min}) \right]}{\left[Kr \cdot KE \cdot p_{amb}(Tiefe) + p_{surf} \right]}$$

Der Anwender muss festlegen, welchen minimalen p_{O2min} im System er nicht unterschritten haben möchte (z.B. 0.20 bar).

[8b-Nr. 2]

Querkontrolle:

Mit $p_{surf} = 1$ bar, $p_{amb}(Tiefe) = 1$ bar (Oberfl.), $K_E = 20$, $K_r = 7\%$, sowie $p_{O2min} = 0.20$ bar, UND $\lambda_{uSG} = 0$ erhalten wir:

$$F_{O2mix}^{(min)} = 0.0533 \text{ (53.3\%)}$$



Dies **stimmt exakt** überein mit dem entsprechenden Ergebnis aus Teil 2 (Modell 1)!



REBREATHERS



Berechnung des minimalen F_{mixO_2} (2)

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

		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
p_ambT	bar	1.000	1.198	1.392	1.588	1.784	1.980	2.960	3.940	4.920
AMV (Tiefe)	l/min	18.0	21.5	25.1	28.6	32.1	35.6	53.3	70.9	88.8
V_O2	l/min	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Q_dump	l/min	1.26	1.51	1.75	2.00	2.25	2.49	3.73	4.96	6.20
p_O2min	0.16									
F_O2min	---	0.160	0.134	0.115	0.101	0.090	0.081	0.054	0.041	0.033
Anteil ungenutztes Speisegas			0.0%							
F_mix min	in %	51.00%	45.77%	41.51%	37.97%	35.00%	32.45%	23.79%	18.78%	15.52%
Anteil ungenutztes Speisegas			10.0%							
F_mix min	in %	55.90%	51.19%	47.36%	44.18%	41.50%	39.20%	31.42%	26.91%	23.97%
Anteil ungenutztes Speisegas			20.0%							
F_mix min	in %	60.80%	56.61%	53.21%	50.38%	48.00%	45.96%	39.04%	35.03%	32.41%
Anteil ungenutztes Speisegas			30.0%							
F_mix min	in %	65.70%	62.04%	59.06%	56.58%	54.50%	52.71%	46.66%	43.15%	40.86%
p_O2min	0.20									
F_O2min	---	0.200	0.167	0.144	0.126	0.112	0.101	0.068	0.051	0.041
Anteil ungenutztes Speisegas			0.0%							
F_mix min	in %	53.33%	47.86%	43.41%	39.71%	36.60%	33.93%	24.88%	19.64%	16.23%
Anteil ungenutztes Speisegas			10.0%							
F_mix min	in %	58.00%	53.08%	49.07%	45.74%	42.94%	40.54%	32.40%	27.68%	24.60%
Anteil ungenutztes Speisegas			20.0%							
F_mix min	in %	62.67%	58.29%	54.73%	51.77%	49.28%	47.15%	39.91%	35.72%	32.98%
Anteil ungenutztes Speisegas			30.0%							
F_mix min	in %	67.33%	63.50%	60.39%	57.80%	55.62%	53.75%	47.42%	43.75%	41.36%

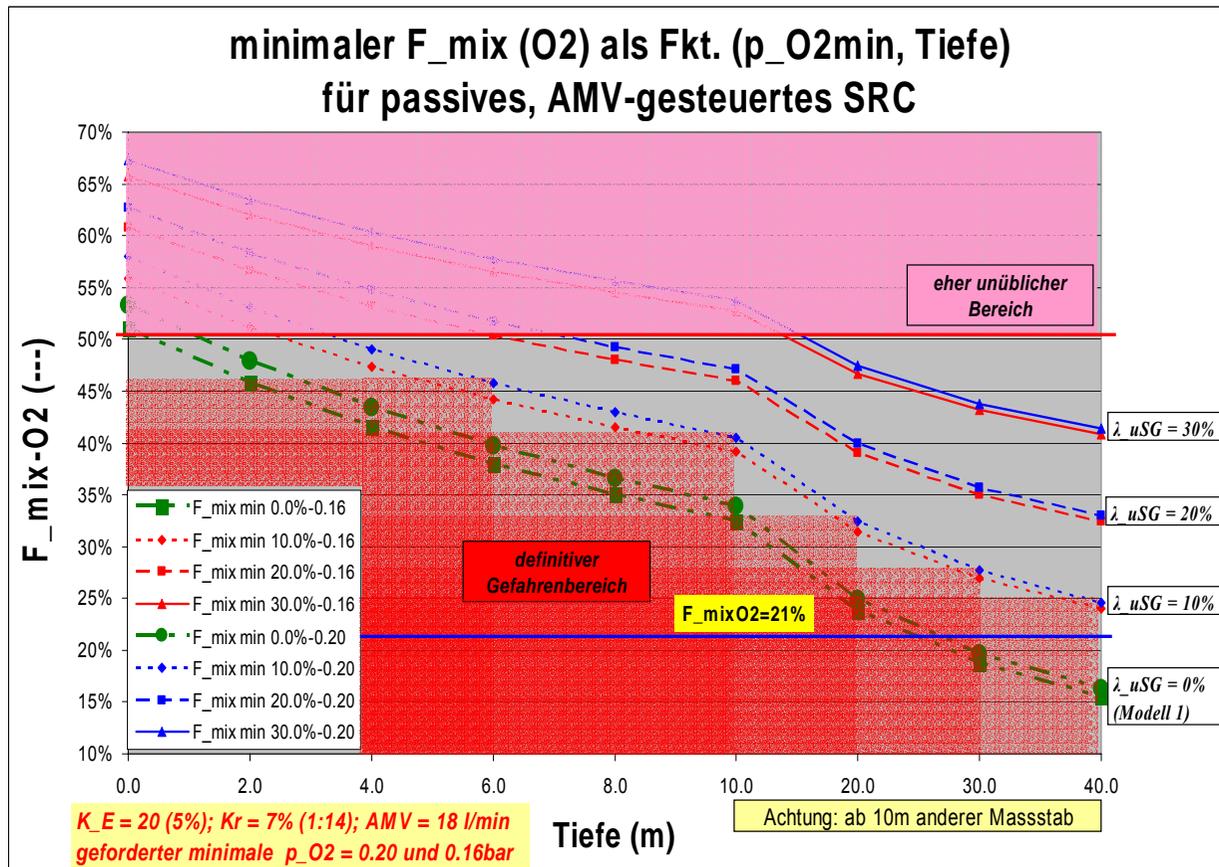


REBREATHERS



Berechnung des minimalen F_{mixO2} (3)

Die parametrische Untersuchung wird mit $\lambda_{uSG} = 0\%$ (Vergl. zu Modell 1), 10%, 20%, 30% und $K_E=20$, $K_r=7\%$ durchgeführt. Es werden dieselben Randbedingungen und übrigen Berechnungsparameter verwendet wie mit Modell 1, so dass immer ein Plausibilitätsvergleich angestellt werden kann.



Resultate:

- Oberfläche: 10% Erhöhung von λ_{uSG} ergibt ca. 8-10% Erhöhung des erforderlichen F_{mixO_2-min}
- auf 40m Tiefe: 10% Erhöhung von λ_{uSG} ergibt Erhöhung des erforderl. F_{mixO_2-min} um 25-60% !!
- bei fixem K_r steigt mit grösserem λ_{uSG} und der Tiefe der erforderliche F_{mixO_2} überproportional an!
- F_{mixO_2} unter 35% sind oberhalb ca. 18m nicht einsetzbar.



REBREATHERS



Berechnung des erforderlichen minimalen K_r (1)

Man kann die Frage zu F_{mixO_2} auch umgekehrt stellen:

Welches ist die minimale erforderliche Eliminationsrate K_r , um bei einem gegebenen F_{mixO_2} des Speisegases und einer gegebenen Tiefe noch einen gewünschten minimalen p_{O_2min} aufrecht erhalten können?

Die Lösung ergibt sich wiederum durch Umstellung der Gleichung [8b-Nr. 2] und aufgelöst nach K_r :

$$K_{r_min} = \frac{(1 - F_{mixO_2}) \cdot p_{ambSurf}}{K_E \cdot \left[F_{mixO_2} \cdot p_{amb}(Tiefe) - (\lambda_{uSG} \cdot p_{amb}(Tiefe) + p_{O_2min} \cdot (1 - \lambda_{uSG})) \right]}$$

[9-Nr. 2]

Querkontrolle:

Mit $p_{surf} = 1$ bar, p_{amb} (10m) = 1.98 bar, $K_E = 20$, $F_{mixO_2} = 32.5\%$ sowie $p_{O_2min} = 0.16$ bar, UND $\lambda_{uSG} = 0$ erhalten wir:

$$K_r (min) = 0.07 (7\%)$$



Dies **stimmt exakt** überein mit dem entsprechenden Ergebnis aus Teil 2 (Modell 1)!



REBREATHERS



Berechnung des erforderlichen minimalen K_r (2)

Die parametrische Untersuchung wird mit $\lambda_{uSG} = 0\%$ (Vergleich zu Modell 1), 10%, 20%, 30% durchgeführt. Es werden dieselben Randbedingungen und übrigen Berechnungs-Parameter verwendet wie mit Modell 1, so dass immer ein Plausibilitätsvergleich angestellt werden kann.

AMV	AtemMinutenVolumen	18 l/min
K_E	Ventilationskoeffizient	20 (5%)
F_mix	O2-Anteil im Speisegas	51.0%
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
P_ambT	bar	1.000	1.196	1.392	1.588	1.784	1.980	2.960	3.940	4.920
AMV (Tiefe)	l/min	18.0	21.5	25.1	28.6	32.1	35.6	53.3	70.9	88.6
V_O2	l/min	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
p_O2min	0.16 bar									
F_O2	---	16.00%	13.38%	11.49%	10.08%	8.97%	8.08%	5.41%	4.06%	3.25%
λ_{uSG}	0.0%									
Kr_min	---	0.070	0.054	0.045	0.038	0.033	0.029	0.018	0.013	0.010
	in %	7.00%	5.44%	4.46%	3.77%	3.27%	2.88%	1.82%	1.32%	1.04%
λ_{uSG}	10.0%									
Kr_min	---	0.092	0.071	0.057	0.048	0.042	0.037	0.023	0.017	0.013
	in %	9.21%	7.07%	5.74%	4.83%	4.17%	3.67%	2.29%	1.67%	1.31%
λ_{uSG}	20.0%									
Kr_min	---	0.135	0.101	0.081	0.067	0.058	0.050	0.031	0.022	0.018
	in %	13.46%	10.09%	8.07%	6.73%	5.76%	5.04%	3.10%	2.24%	1.75%
λ_{uSG}	30.0%									
Kr_min	---	0.250	0.176	0.136	0.111	0.093	0.081	0.048	0.034	0.027
	in %	25.00%	17.61%	13.59%	11.06%	9.33%	8.06%	4.81%	3.42%	2.66%



REBREATHERS



Berechnung des erforderlichen minimalen K_r (3)

AMV	AtemMinutenVolumen	18 l/min
K_E	Ventilationskoeffizient	20 (5%)
F_{mix}	O2-Anteil im Speisegas	51.0% %
$p_{ambSurf}$	Totaldruck an der Oberfläche	1.000 bar
$dpdT$	Drucksteigerungsfaktor des Wassers	0.98 bar/10m

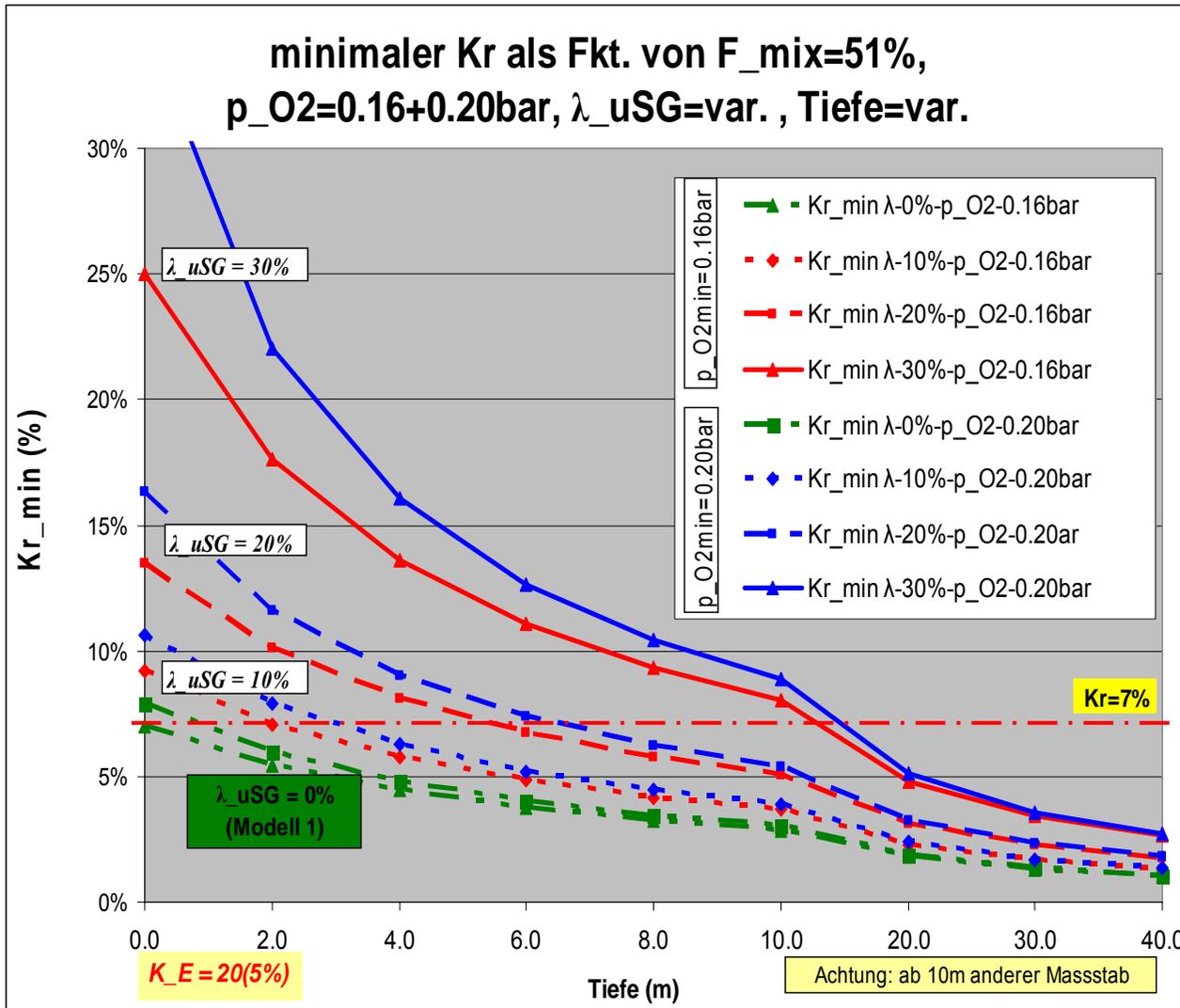
		min. Tiefe 1	min. Tiefe 2	min. Tiefe 3	min. Tiefe 4	min. Tiefe 5	min. Tiefe 6	min. Tiefe 7	min. Tiefe 8	min. Tiefe 9
		(m)								
		0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	20.0	30.0	40.0
P_{ambT}	bar	1.000	1.198	1.392	1.588	1.784	1.980	2.960	3.940	4.920
AMV (Tiefe)	l/min	18.0	21.5	25.1	28.6	32.1	35.6	53.3	70.9	88.6
V_{O2}	l/min	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

p_{O2min}	0.20 bar									
F_{O2}	---	20.00%	16.72%	14.37%	12.59%	11.21%	10.10%	6.76%	5.08%	4.07%
λ_{uSG}	0.0%									
Kr_{min}	---	0.079	0.060	0.048	0.040	0.035	0.030	0.019	0.014	0.011
	in %	7.90%	5.98%	4.80%	4.02%	3.45%	3.03%	1.87%	1.35%	1.06%
λ_{uSG}	10.0%									
Kr_{min}	---	0.107	0.079	0.063	0.052	0.044	0.039	0.024	0.017	0.013
	in %	10.65%	7.89%	6.27%	5.20%	4.44%	3.88%	2.37%	1.71%	1.33%
λ_{uSG}	20.0%									
Kr_{min}	---	0.163	0.116	0.090	0.074	0.062	0.054	0.032	0.023	0.018
	in %	16.33%	11.62%	9.02%	7.37%	6.23%	5.40%	3.23%	2.31%	1.79%
λ_{uSG}	30.0%									
Kr_{min}	---	0.350	0.220	0.161	0.127	0.104	0.089	0.051	0.036	0.027
	in %	35.00%	22.04%	16.08%	12.66%	10.44%	8.88%	5.09%	3.56%	2.74%

Berechnung des erforderlichen minimalen K_r (4)

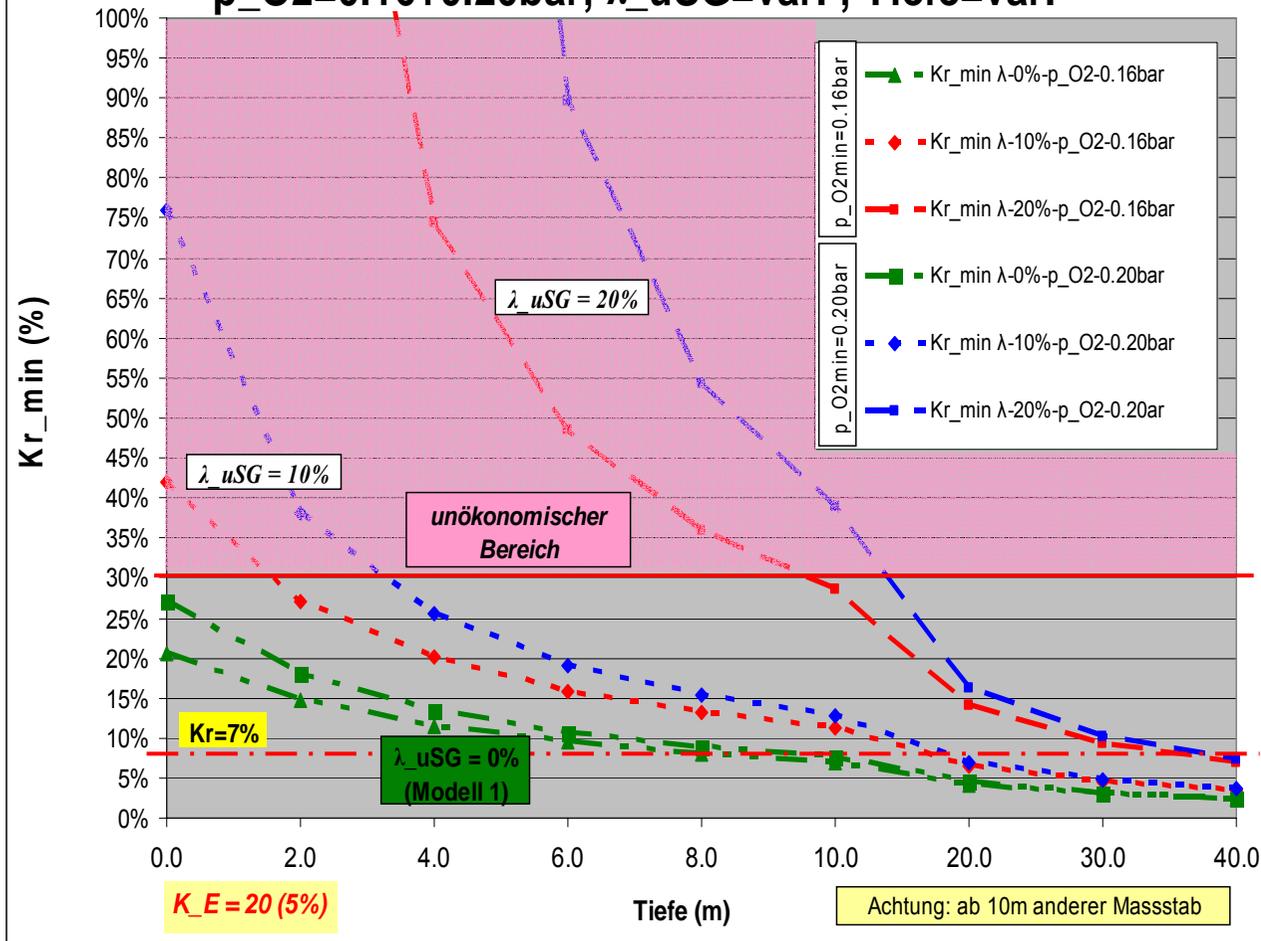
minimaler K_r als Fkt. von $F_{mix}=51\%$,
 $p_{O_2}=0.16+0.20\text{bar}$, $\lambda_{uSG}=\text{var.}$, Tiefe= var.

mit $F_{mixO_2}=51\%$:



Berechnung des erforderlichen minimalen K_r (5)

minimaler K_r als Fkt. von $F_{mix}=32.5\%$,
 $p_{O_2}=0.16+0.20\text{bar}$, $\lambda_{uSG}=\text{var.}$, Tiefe= var.



mit $F_{mixO_2}=32.5\%$:

Resultate:

- es wird sehr augenfällig, wie dramatisch sich der geringere F_{mixO_2} auf die erforderliche Erhöhung von K_r auswirkt.

- Auch der Einfluss von λ_{uSG} ist sehr viel stärker als bei höheren F_{mixO_2} .

- mit $\lambda_{uSG} = 10\%$ und dem üblichen $K_r=10\%$ kann immer noch bis auf ca. 15m ein p_{O_2min} von 0.20 bar aufrecht erhalten werden.

- mit $K_r=7\%$ wird es bereits bei ca. 20m kritisch.



REBREATHERS



Dynamischer Verlauf des p_{O_2} (1)

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

$$V \cdot \Delta F_{O_2} = \left[\begin{aligned} &F_{mixO_2} \cdot (Q_{dump} + \dot{V}_{O_2} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM}) \\ &- \dot{V}_{O_2} \\ &- F_{mixO_2} \cdot \lambda_{uSG} \cdot Q_{dump} \\ &- F_{O_2}(t) \cdot ((1 - \lambda_{uSG}) \cdot Q_{dump} + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM}) \end{aligned} \right] \cdot \Delta t$$

[10-Nr. 2]

Durch Ableitung nach der Zeit t erhält man wiederum die bekannte Differentialgleichung:

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

[11-Nr. 2]



REBREATHERS



Dynamischer Verlauf des p_{O_2} (2)

Diese führt zu folgender Lösung:

$$F_{O_2}(t) = C + (F_{O_2start} - C) \cdot e^{\left[\frac{-(Q_{dump} \cdot (1 - \lambda_{uSG}) + \dot{V}_{Spül} + \dot{V}_{BM})}{V} \cdot t \right]}$$

wobei C:

[12-Nr. 2]

$$C = F_{O_2-GG} = \left[F'_{O_2-GG} - \lambda_{uSG} \cdot F_{mixO_2} \right] \cdot \frac{1}{(1 - \lambda_{uSG})}$$

[6-Nr. 2]

Wobei F'_{O_2-GG} nichts anderes ist als der bereits bekannte Ausdruck (Gl. 5) für F_{O_2-GG} mit dem vereinfachten Modell Nr. 1:

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

[5] mit Modell 1



REBREATHERS



Dynamischer Verlauf des p_{O_2} (3)

Für $t=0$ wird der Term e^{-kt} in Gl. [12-Nr. 2] = 1; damit wird

$$F_{O_2}(t=0) = C + (F_{O_2start} - C) \cdot 1 = F_{O_2start}$$

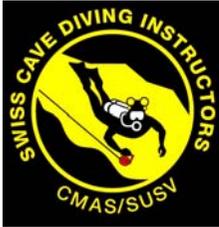
[12a- Nr. 2]

Für $t= \infty$ wird der Term e^{-kt} in Gl. [12-Nr. 2] = 0; damit wird

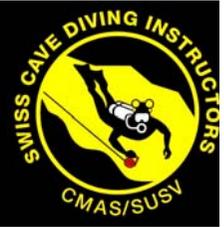
$$F_{O_2}(t= \infty) = C = F_{O_2-GG}$$

[12b-Nr. 2]

s. dazu Gl. [5-Nr.2]; d.h. F_{O_2} hat ein stabiles Gleichgewicht erreicht, das für jeden Umgebungsdruck und Zusammensetzung des Speisegases einen anderen Wert hat.



REBREATHERS



Abfall des p_{O_2} bei konstantem Umgebungsdruck (1)

Wie bereits bei Modell 1 wird mit der gefundenen Lösung der Differentialgleichung der Abfall des p_{O_2} bei konstantem Umgebungsdruck berechnet. Der ungenutzte Anteil des Speisegases λ_{uSG} wird von 0% (wie Modell 1) bis 30% variiert.

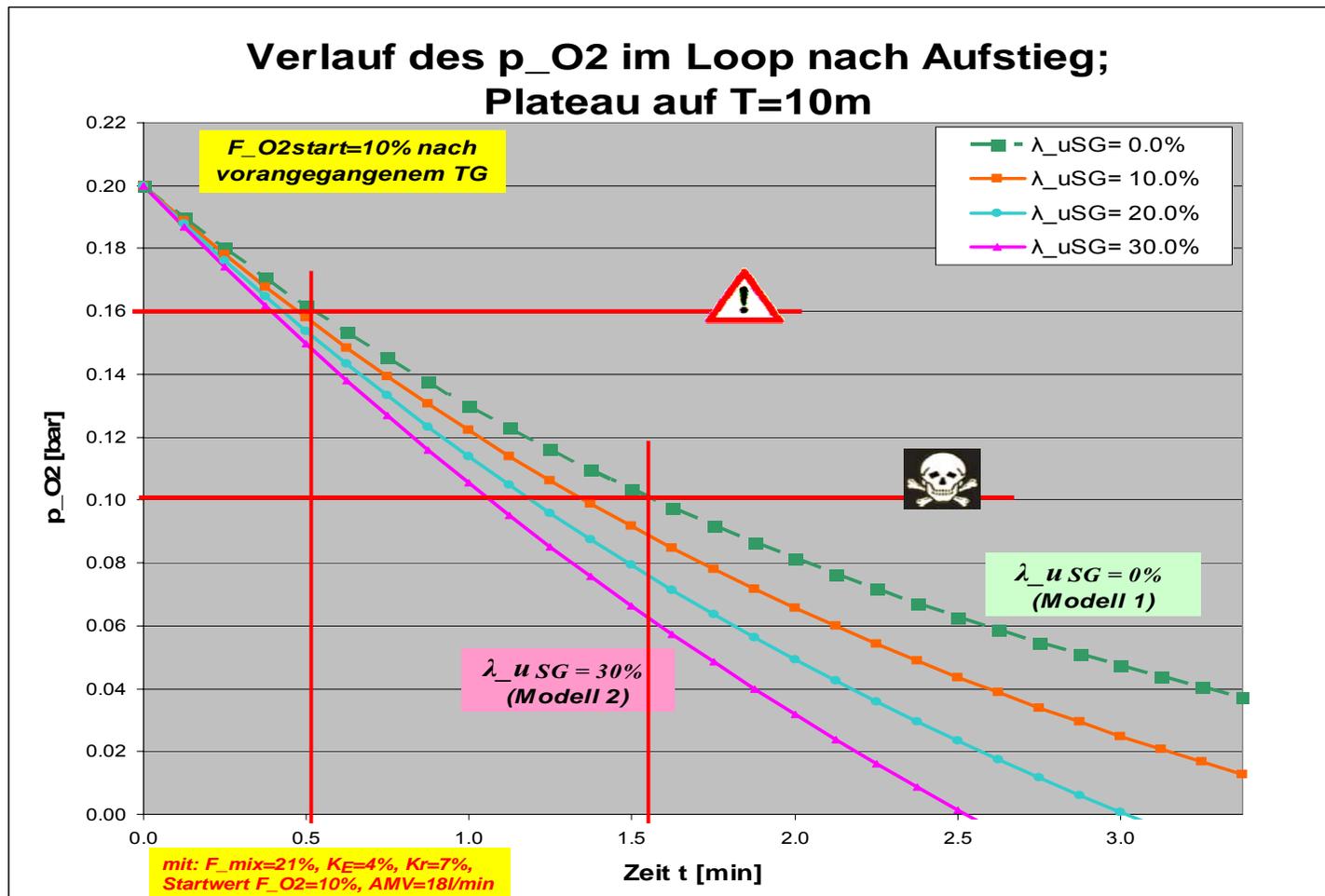
F_O2-init	Initialanteil O2 im Loop zu Beginn Zyklus	10.0%
F_mixO2	Anteil O2 im Speisegas (F_O2 Flasche)	21.0%
AMV	AtemMinutenVolumen	18.0 l/min
V_O2	metabolisch verbrauchtes O2	4.0% * AMV
Ke	Ventilationskoeffizient 17...20...25	25.0
Kr	Eliminationsrate des SCR	7.0% (1:14)
V	Gesamtvolumen des Systems	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
Q_dump	ausgestossenes Gasvol. auf Tiefe T	2.52 l/min

Anteil ungenutztes Speisegas	
Zeit t	F_O2start
[min]	[%]
0.000	10.0%
0.125	10.0%
0.250	10.0%
0.375	10.0%
0.500	10.0%
0.625	10.0%
0.750	10.0%
0.875	10.0%
1.000	10.0%
1.125	10.0%
1.250	10.0%
1.375	10.0%
1.500	10.0%
1.625	10.0%
1.750	10.0%
1.875	10.0%
2.000	10.0%
2.125	10.0%
2.250	10.0%
2.375	10.0%
2.500	10.0%
2.625	10.0%
2.750	10.0%
2.875	10.0%
3.000	10.0%

$\lambda_{uSG}=0.0\%$	$\lambda_{uSG}=10.0\%$	$\lambda_{uSG}=20.0\%$	$\lambda_{uSG}=30.0\%$
-1.6%	-4.1%	-7.2%	-11.2%
p_O2 (t)	p_O2 (t)	p_O2 (t)	p_O2 (t)
[bar]	[bar]	[bar]	[bar]
0.200	0.200	0.200	0.200
0.190	0.189	0.188	0.187
0.180	0.178	0.176	0.174
0.171	0.168	0.165	0.162
0.162	0.158	0.154	0.150
0.153	0.148	0.143	0.138
0.145	0.139	0.133	0.127
0.137	0.130	0.123	0.116
0.130	0.122	0.114	0.105
0.123	0.114	0.105	0.095
0.116	0.106	0.096	0.085
0.110	0.099	0.087	0.076
0.103	0.092	0.079	0.066
0.098	0.085	0.071	0.057
0.092	0.078	0.064	0.048
0.086	0.072	0.056	0.040
0.081	0.066	0.049	0.032
0.076	0.060	0.042	0.024
0.072	0.054	0.036	0.016
0.067	0.049	0.029	0.009
0.063	0.044	0.023	0.001
0.059	0.039	0.017	-0.006
0.055	0.034	0.012	-0.012
0.051	0.029	0.006	-0.019
0.047	0.025	0.001	-0.025

Abfall des p_{O_2} bei konstantem Umgebungsdruck (2)

Graphisch dargestellt:



Resultate:

- je höher λ_{uSG} , desto schneller der p_{O_2} -Abfall
- Vergleich bei $\lambda_{uSG} = 0\%$ ergibt Uebereinstimmung mit Modell 1



REBREATHERS



Fortsetzung folgt...

