



REBREATHERS



A study on the behaviour of passive addition, RMV-keyed SCR / Part 3



V1.1/18.3.06

von
Beat A. Müller
Msc. (Mech. Eng.) ETH Zurich



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 3

**Auslegung für tiefenkompensierten,
variablen Auswurf**



REBREATHERS



Inhaltsverzeichnis

- **Beispiele von SCR mit tiefenkompensiertem Auswurf**
- **Systemschema des tiefenkompensierten Halcyon**
- **Gedanken zur technischen Realisierung**
- **Vor-/Nachteile der Tiefenkompensation**
- **Herleitung der Gleichungen**
- **Randbedingungen**
- **Gemischbestimmung**
- **Bestimmung von Kr-12 und Kr-100**
- **Verifizierung von Kr (Vergleich mit Festauswurf)**
- **Diskussion /Schlussfolgerungen**



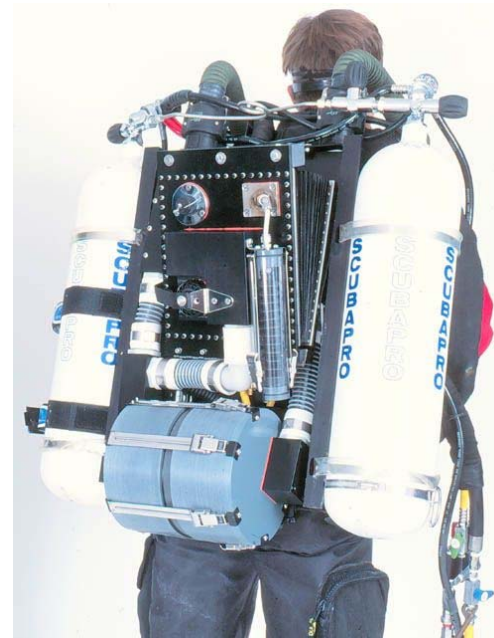
REBREATHERS



Beispiele von SCR mit tiefenkompensiertem Auswurf



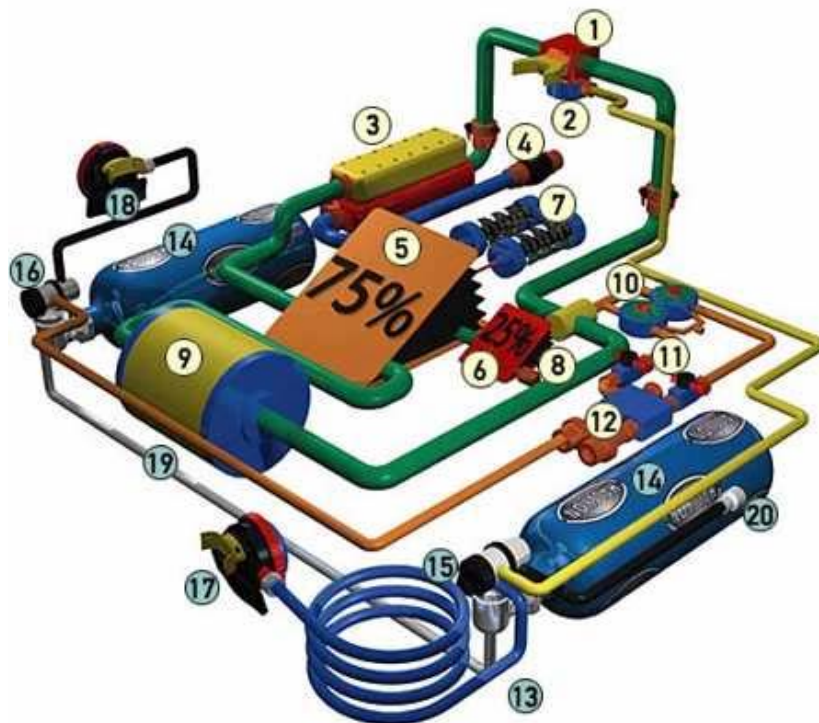
BMD-SCR-4



**Halcyon PVR-BASC
ca. 1990**

Weitere: BK-2 von J. Bohnert

Systemschema des tiefenkompensierten Halcyon SCR



- 1 Mundstück/umschaltbar auf OC ab Bailout-Flasche
- 2 OC-Anschluss
- 3 Wasserabscheider
- 4 Manuelle Pumpe
- 5 Einatmungs-Gegenlunge
- 6 Ausatmungs-Gegenlunge, Volumen tiefenabhängig verstellbar; mit Ueberdruckventil
- 7 Verstellmechanismus für Tiefenkompensation
- 8 Einatmungsseite des Loops
- 9 Scrubber (Atemkalk)
- 10 Sensoren / Druckanzeiger
- 11 Manual Addition Valve (override)
- 12 Gas-Switchblock/Anschlüsse
- 13 Bailout-Gas Zuführung
- 14 Speisegas- / Bailout-Flaschen (Diluent)
- 15 1. Stufe Speisegas- / Bailout Flasche 1
- 16 1. Stufe Speisegas- / Bailout Flasche 2
- 17 Bailout 2. Stufe Flasche 1
- 18 Bailout 2. Stufe Flasche 2
- 19 Verbindung Bailout-Flaschen
- 20 Mitteldruckanschluss zu Drysuit/Wing



REBREATHERS



Gedanken zur technischen Realisierung (1)

- Das Verhältnis K_r des Auswurfvolumens Q_{dump} zum Atemminutenvolumen AMV ist definiert durch das Volumenverhältnis der beiden Gegenlungen.
- Wenn K_r variabel gestaltet werden soll, muss also physisch das Volumenverhältnis der beiden Gegenlungen variiert werden.
- Die Einatmungsgegenlung wiederum ist auf die übliche mittlere Vitalkapazität eines Taucher abzustimmen (ca. 4-4.5l) und darf jedenfalls nicht *kleiner* ausgelegt werden.
- Alleine schon aus Gründen der technischen Komplexität, resp. Realisierbarkeit wird man sich darauf beschränken müssen, EINES der beiden Volumina zu verändern und das andere unverändert zu lassen. (Auch wenn rein platzgrössenmässig ein Mechanismus, der gleichzeitig die Ausatemungslunge verkleinert und die Einatemungslunge vergrössert das Ideale wäre.)



REBREATHERS



Gedanken zur technischen Realisierung (2)

- Daraus ergeben sich folgende technische Möglichkeiten:
 - a) Volumen der Einatemungsgegenlunge variabel (A); Volumen wird mit grösserer Tiefe ebenfalls vergrössert; Ausatemungsgegenlunge bleibt unverändert
 - a) Volumen der Ausatemungsgegenlunge variabel (B), Volumen wird mit grösserer Tiefe verkleinert; Einatemungsgegenlunge bleibt unverändert
- Der Verstellbereich der Volumina wird schon aus Grössen-, aber auch aus Regeltechnischen Gründen limitiert sein. Während gastechnisch ein Kr von ca. 30-35% an der Oberfläche (Systemschema Halcyon: 1:4 = 25%) und von 3-5% auf grosser Tiefe wünschbar wäre (ein Verstellbereich um den Faktor 6-12!) wird der obere Wert technisch kaum realisierbar sein.
- Variante A
Da Gegenlunge grösser, hat man mehr Platz für Steuerungsmechanismus und da aussen angeordnet, besserer technischer Zugang



REBREATHERS



Gedanken zur technischen Realisierung (3)

Variante A (Forts.)

Der Vergrößerung stehen massive Platzprobleme (und damit auch AUFTRIEBSprobleme) im Weg, sowie das Problem, wie mit einer sehr grossen Einatemungslunge, welche sich in der Einatemungsphase kaum noch bewegt, die Ausatemungsgegenlunge angesteuert werden soll.

- Variante B

Da innerhalb der Einatemungsgegenlunge angeordnet, nur sehr beschränkter Zugang für Regelungsmechanismus. Falls separat ausserhalb angeordnet, was technisch auch möglich wäre (s. Prinzipschema Halcyon), besteht diese Einschränkung nicht.

B1: Das Volumen der Ausatemungsgegenlunge an der Oberfläche ist so gross, dass es einem K_r von ca. 30% entspricht und wird mit grösserer Tiefe laufend verkleinert. Eine gewisse minimale Grösse sollte aber so oder so nicht unterschritten werden. Falls innerhalb der Einatemungsgegenlunge platziert, müsste diese zwar auch vergrössert werden, aber sehr viel weniger als mit Variante A.



REBREATHERS



Gedanken zur technischen Realisierung (4)

B2: Mit zunehmender Tiefe wird die Ausatemungsgegenlunge von der Einatemungsgegenlunge immer weniger angesteuert. Damit entfällt das Grössenproblem des Gerätes.

Ausfallszenarien und Folgen:

Sollte der Regelungsmechanismus beim Abtauchen versagen (zB. nahe Ausgangsstellung/Oberfläche blockieren), so würde bei beiden Varianten B1 und B2 einfach mit einem sehr grossen Dump Ratio getaucht. Damit nähert sich der p_{O_2} im Loop sehr stark demjenigen eines OC mit gleichem Gas, was schnell zu einem zu hohen p_{O_2} führen kann.

Gleiches Problem, wenn auf der Tiefe fehlerhafterweise in Ausgangsstellung zurückgekehrt würde. Gefahr der Hyperoxie.

Blockiert der Mechanismus hingegen auf der Tiefe, führt das beim Aufstieg zu einem massiv zu kleinen K_r , was den p_{O_2} Abfall noch weiter beschleunigen würde (massive Hypoxie).

Kurz und gut: es ist ein sehr anspruchsvolles Problem



REBREATHERS



Vor-/Nachteile der Tiefenkompensation

Vorteile:

- Die Gefahr des zu tiefen p_{O_2} Pegels im Flachwasserbereich kann durch gesteuerte Erhöhung des K_r drastisch reduziert werden (wenn die Regelung funktioniert)
- Bessere Gasökonomie auf grösserer Tiefe möglich, da minimaler K_r auf max. Einsatztiefe abstimmbar
- Es können u.U. Gemischwechsel vermieden werden
- Speisegas kann für grössere Tiefen als OC-Bailoutgas eingesetzt werden

Nachteile:

- Schwierigkeit in der Auslegung (Abhängigkeit von den selbstgesetzten Randbedingungen), nicht eine EINZIGE Lösung.
- Komplexität des Geräts durch zusätzlichen Steuerungsmechanismus nimmt stark zu.
- Anfälligkeit/Zuverlässigkeit der Steuerung ist sehr kritisch!
- Massive Gefahr der Hyper-, resp. der Hypoxie bei Versagen der Regelung !!!



REBREATHERS



Herleitung der Gleichungen (1)

Bisher sind wir von einer fixen Eliminationsrate K_r ausgegangen (Festauswurf); dabei werden Werte von ca. 7%....13% verwendet.

Für eine optimale Gemischzusammensetzung wäre eine tiefen-abhängige Eliminationsrate aber wesentlich vorteilhafter (permanente Annäherung an F_{mixO_2}).

Dies kann mit folgendem linearen Ansatz erreicht werden:

$$K_r (Tiefe) = K_{r_Surf} + \gamma_{Kr} \cdot \frac{p_{amb} (Tiefe)}{p_{ambSurf}}$$

[22]

Zur Bestimmung von γ_{Kr} lösen wir Gl. [22] nach γ_{Kr} auf:

$$\gamma_{Kr} = \left[K_r (Tiefe) - K_{r_Surf} \right] \cdot \frac{p_{ambSurf}}{p_{amb} (Tiefe)}$$

[23]



REBREATHERS



Herleitung der Gleichungen (2)

Wir wenden die Gl.[9] sinngemäss an:

$$K_r (\text{Tiefe}) = \frac{(F_{\text{mixO}_2} - 1)}{K_E \cdot (F_{\text{O}_2\text{min}} - F_{\text{mixO}_2})} \cdot \frac{p_{\text{ambSurf}}}{p_{\text{amb}} (\text{Tiefe})}$$

resp.

$$F_{\text{O}_2\text{min}} = \frac{p_{\text{O}_2\text{min}}}{p_{\text{amb}} (\text{Tiefe})}$$

[7b]

[9a]

und erhalten:

$$K_r (\text{Tiefe}) = \frac{(F_{\text{mixO}_2} - 1) \cdot p_{\text{ambSurf}}}{K_E \cdot \left[p_{\text{O}_2\text{min}} - F_{\text{mixO}_2} \cdot p_{\text{amb}} (\text{Tiefe}) \right]}$$

[9b]

Dabei verwenden wir Gl. [4] für $p_{\text{amb}} (\text{Tiefe})$:

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

[4]

Die *numerischen* Werte von K_{r_Surf} und γ_{Kr} müssen jetzt anhand von Randbedingungen festgelegt werden und deren gibt es mehrere!



REBREATHERS



Randbedingungen (1)

- 1) Es soll nur ein einziges Speisegas für den RB verwendet werden, das auch als **Bailout-Gas im offenen System** verwendet werden kann (Verwendung eines single-rebreathers), und zwar bis auf 3m mit **$p_{O2min}=0.18bar$** .
- 2) Auf einer max. Einsatztiefe von **100m** soll ein **p_{O2max}** von **1.60bar** bei Verwendung von Tmx und mit OC nicht *überschritten* und im Loop ein **p_{O2min}** von ca. **0.50 bar** gehalten werden (p_{O2} von 0.50bar kann beliebig lange ohne respiratorische Konsequenzen geatmet werden; OTU bleiben konstant).
- 3) **p_{N2max}** soll **4.0 bar** sein; **$p_{He-max} = 10.0 bar$**
- 4) Der RB soll von ca. **12m** an mit dem verwendeten Gas einsatztauglich sein unter, dabei soll ein **p_{O2min}** von **0.18 bar** gehalten werden. Oberhalb 12m soll offen mit dem Bailout getaucht werden.



REBREATHERS



Randbedingungen (2)

- 5) Es soll ein Gaswechsel auf **EANxx** auf **40m** vorgesehen werden. Anteilbestimmung aufgrund **p_{N2_max} (4.0bar)**.
- 6) Es soll an der Oberfläche alternativ mit diesem **EANxx** als Speisegas ohne Spülung beliebig lange geatmet werden können (→ Syphons!); dabei soll ein **p_{O2} von 0.20bar** nicht *unterschritten* werden.
- 7) Es soll bei den physiologischen Parametern **K_E** und **AMV** von den für den **p_{O2}** -Abfall ungünstigeren Werten ausgegangen werden (**$K_E = 20$** (5%) und **$AMV = 20l/min$**).
- 8) Als maximale Grenze für **K_r** wird ein Bereich von **0.35** (35%) bis **0.40** (40%) gesetzt. Ein zu grossen Verstellbereich ist konstruktiv kaum möglich (das Verhältnis der beiden Gegenlungen kann nicht beliebig zueinander gewählt werden).

Damit ist klar: es gibt nicht EINE einzige generelle Lösung!



REBREATHERS



Gemischbestimmung

Umgebungsbedingungen		Randbedingungen für Atemgasgemische			
p_surf	1.000 bar	p_O2max	1.600 bar	p_O2min-3-12m	0.180 bar
dpdT	0.980 bar/10m	p_N2max	4.000 bar	p_O2min-0m	0.200 bar
		p_Hemax	10.000 bar	T_max	100.0 m
				T_GasExch	40.0 m

Bestimmung Travel-Mix					
a) Berechnung			b) Selektion		
F_O2	0.325 ---		F_O2	0.32 ---	} EAN32
F_N2	0.675 ---		F_N2	0.68 ---	
c) Nachkontrolle					
p_O2-40m	1.574 bar	EAD	32.3 m		
p_N2-40m	3.346 bar	MOD	40.8 m		

Bestimmung F_O2-BottomMix					
a) Berechnung			b) Selektion		
F_O2	0.148 ---		F_O2	0.14 ---	} Tmx14/37
F_N2	0.370 ---		F_N2	0.37 ---	
F_He	0.481 ---		F_He	0.49 ---	
c) Nachkontrolle Randbedingungen					
p_O2-3m	0.181 bar	p_O2-100m	1.512 bar	p_O2-40m	0.689 bar
p_O2-0m	0.140 bar	p_N2-100m	3.996 bar	p_N2-40m	1.820 bar
		p_He-100m	5.292 bar	p_He-40m	2.411 bar
-> Gemisch kann im OC-Modus bis auf 3m geatmet werden.		EAD	40.6 m	EAD	13.0 m
		MOD	100.11 m		



REBREATHERS



Bestimmung von Kr-12 und Kr-100 (1)

Bestimmung des Kr_min im Rebreather mit Tmx14/37					
p_amb-3m	1.294 bar				
p_O2min-3m	0.180 bar -->	F_O2min-3m	0.139 ---	} Kr-min-3m = #### --- Kr-min-6m = 1.016 --- Kr-min-9m = 0.515 --- Kr-min-12m = 0.345 --- Kr-min-100m = 0.043 --- Selektion: Kr-12m = 0.350 --- Kr-100m = 0.050 ---	
p_amb-6m	1.588 bar				
p_O2min-6m	0.180 bar -->	F_O2min-6m	0.113 ---		
p_amb-9m	1.882 bar				
p_O2min-9m	0.180 bar -->	F_O2min-9m	0.096		
p_amb-12m	2.176 bar				
p_O2min-12m	0.180 bar -->	F_O2min-12m	0.083		
p_amb-100m	10.800 bar				
p_O2min-100m	0.520 bar -->	F_O2min-100m	0.048 ---		
F_mixO2	0.140 ---				
K_E	20 ---				

Werte von Kr über ca. 0.40 bedeuten, dass dies kaum mehr über eine variable Dump-Steuerung erreicht werden kann. Es sind auch Platzprobleme bei der Dimensionierung der beiden Gegenlungen zu erwarten. Werte von Kr über 1.0 sind physikalisch unmöglich; Bedeutung: Gemisch ist nicht atembar.

Berechnung des Variabilitätsfaktors γ_{Kr}			
Kr-12m =	0.350		
p_amb-12m	2.176 bar	$\gamma_{T-Kr} = -0.003409$ 1/m	
Kr-100m =	0.050	$\gamma_{p-Kr} = -0.034787$ 1/bar	
p_amb-100m	10.800 bar		

Überprüfung des statischen p_O2GG mit EAN32 an der Oberfläche			
p_surf	1.000 bar		
p_amb (T=0)	1.000 bar	Kr-0m = 0.3909 ---	(mit γ_{Kr} rückgerechnet)
F_mixO2	0.320 ---	F_O2GG-32-0m	0.233 ---
K_E	20 ---	p_O2-32-0m	0.233 bar

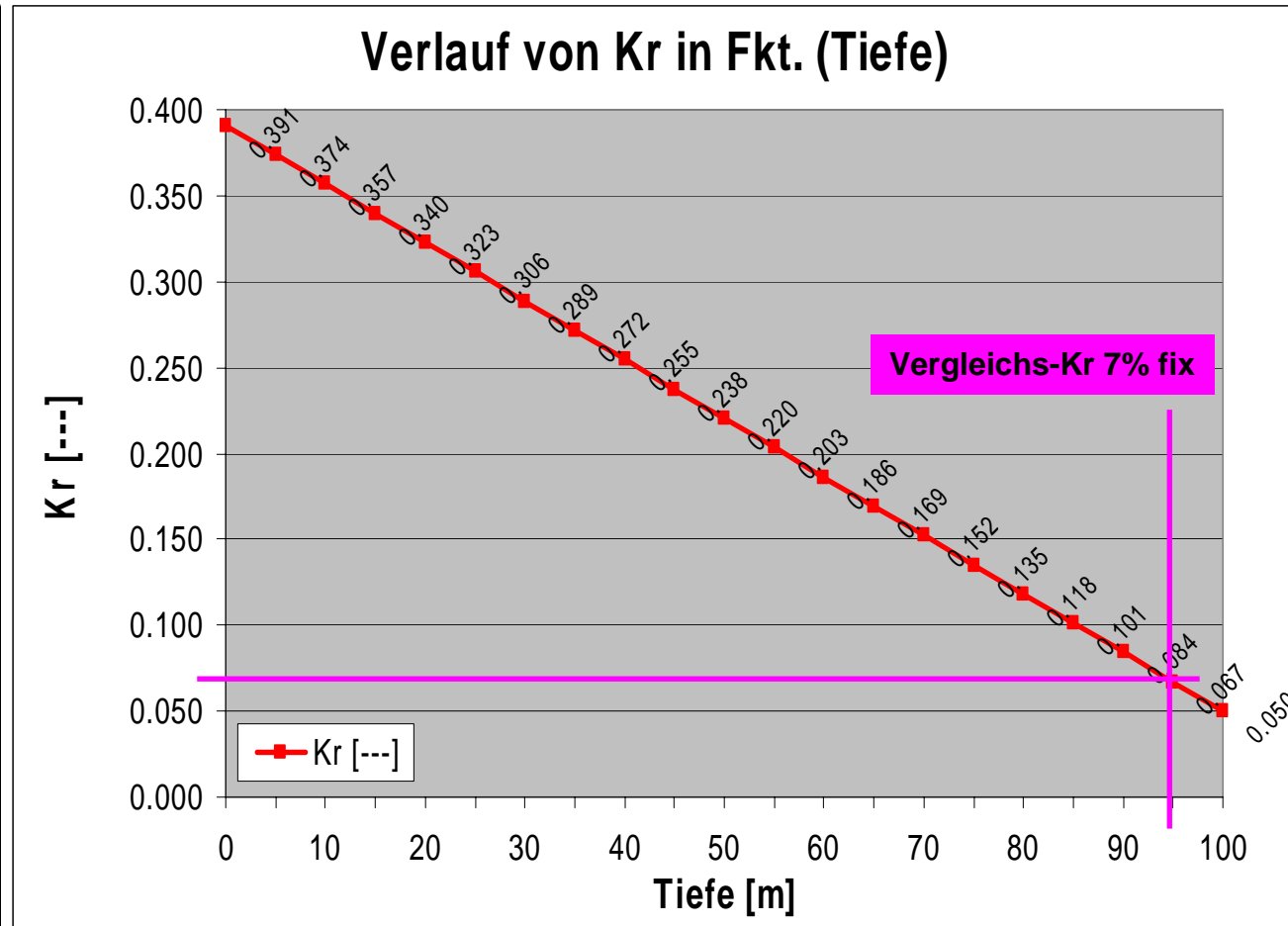


REBREATHERS



Bestimmung von Kr-12 und Kr-100 (2)

Tiefe [m]	p_amb [bar]	Kr [---]
0.0	1.000	0.3909
5.0	1.490	0.3739
10.0	1.980	0.3568
15.0	2.470	0.3398
20.0	2.960	0.3227
25.0	3.450	0.3057
30.0	3.940	0.2886
35.0	4.430	0.2716
40.0	4.920	0.2545
45.0	5.410	0.2375
50.0	5.900	0.2205
55.0	6.390	0.2034
60.0	6.880	0.1864
65.0	7.370	0.1693
70.0	7.860	0.1523
75.0	8.350	0.1352
80.0	8.840	0.1182
85.0	9.330	0.1011
90.0	9.820	0.0841
95.0	10.310	0.0670
100.0	10.800	0.0500



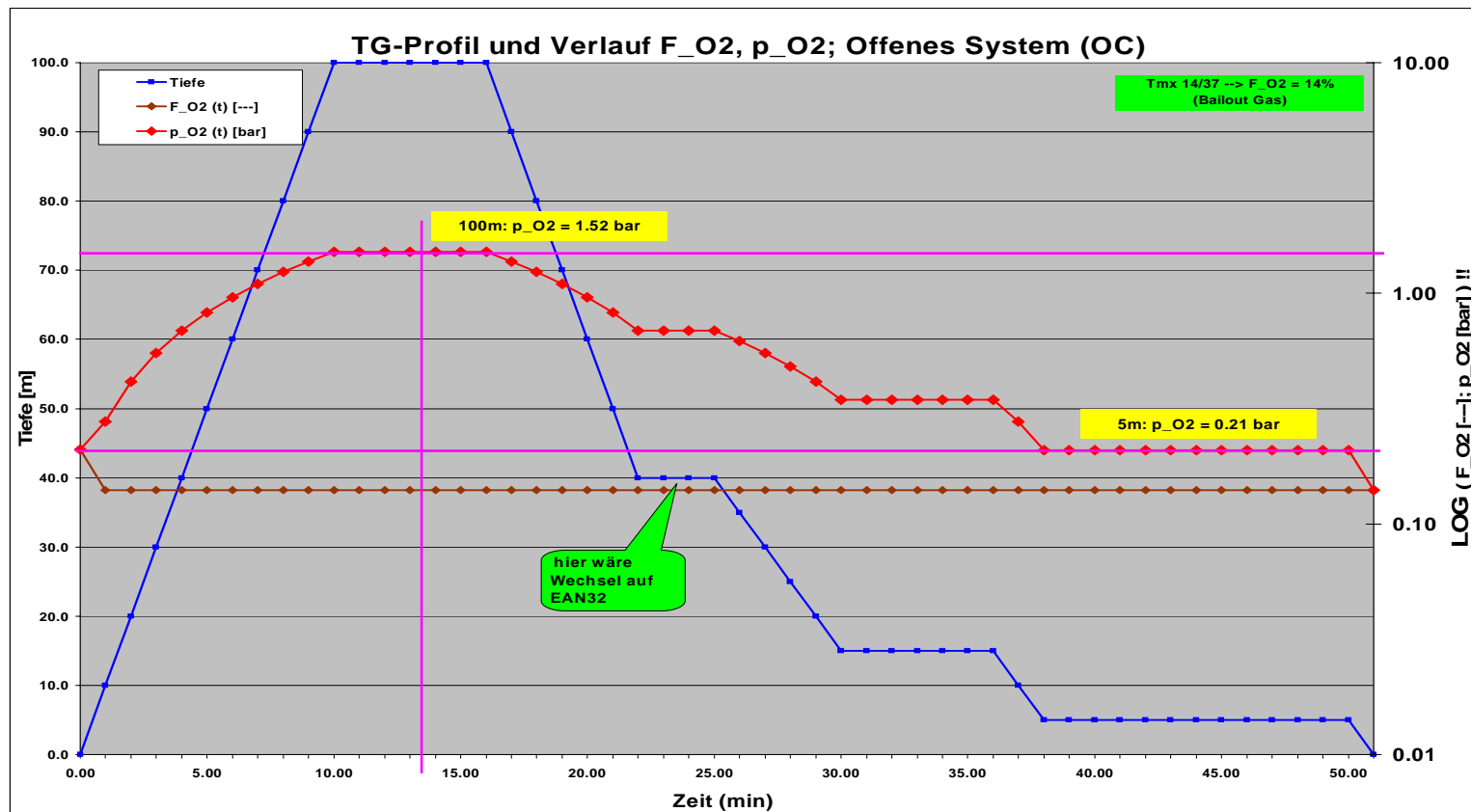


REBREATHERS



Vergleich Offenes System mit Bailout-Gas

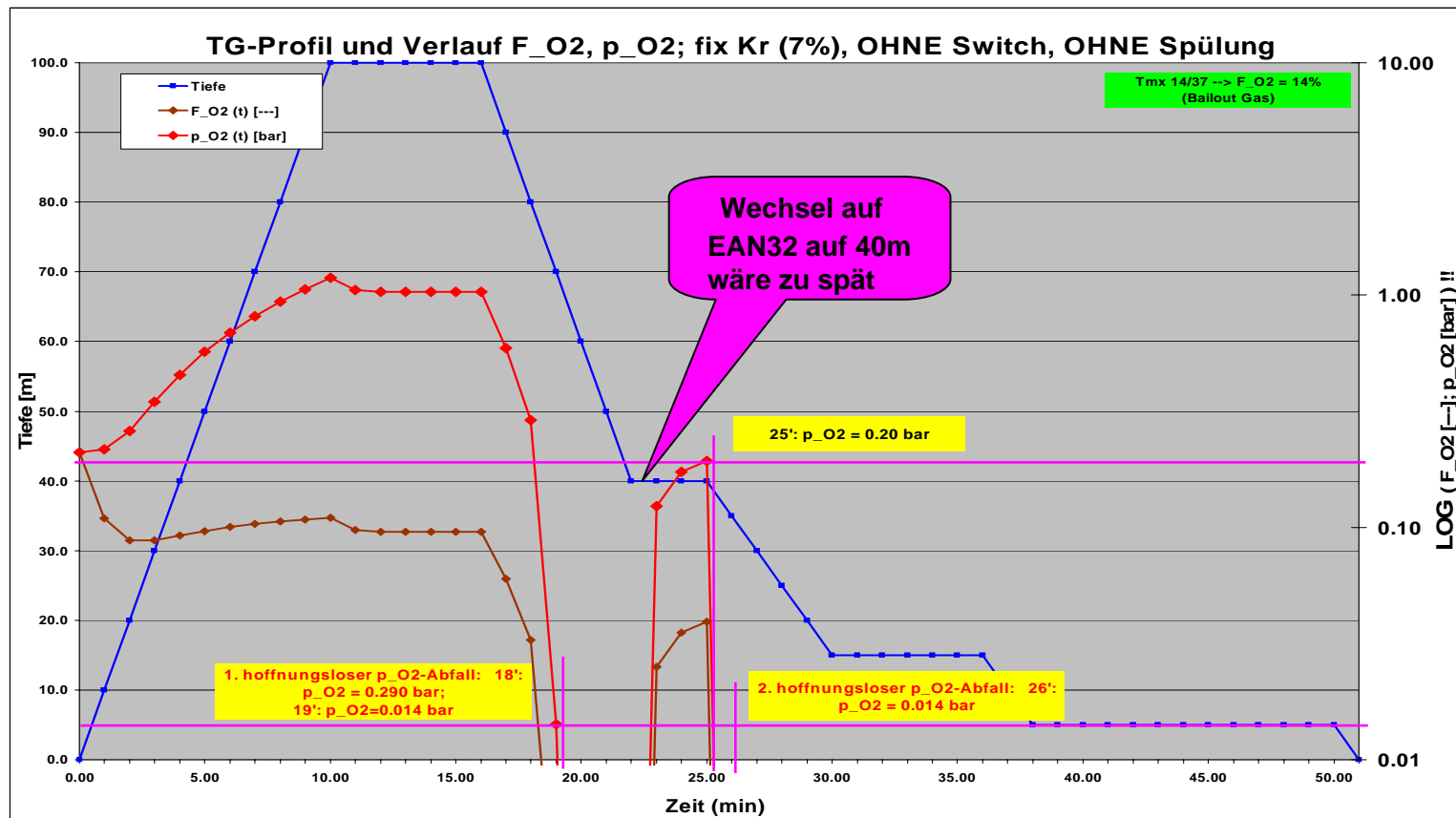
Anhand eines hypothetischen Muster-TGs wird zuerst mit dem vorgesehenen Bailout-Gas (Tmx 14/37) mit einem offenen System (OC) getaucht. Es wird KEIN Gaswechsel auf EAN32 auf 40m gerechnet, da für die zu klärenden Fragen unerheblich. KEINE DEKO-Rechnung !!



Resultat: alle Werte innerhalb der berechneten Vorgaben.

Verifizierung von K_r - Vergleich mit Festauswurf (1a)

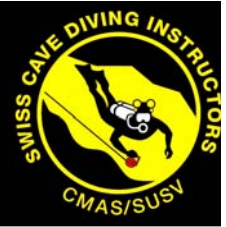
Anhand des identischen, völlig hypothetischen Muster-TGs wird einmal mit fixem K_r (7%), einmal mit variablen K_r (5%....39%) der Verlauf von p_{O_2} berechnet und miteinander verglichen.



Resultat: mit $K_r = \text{fix } 7\%$ und Tmx14/37 ein hoffnungsloser Fall!

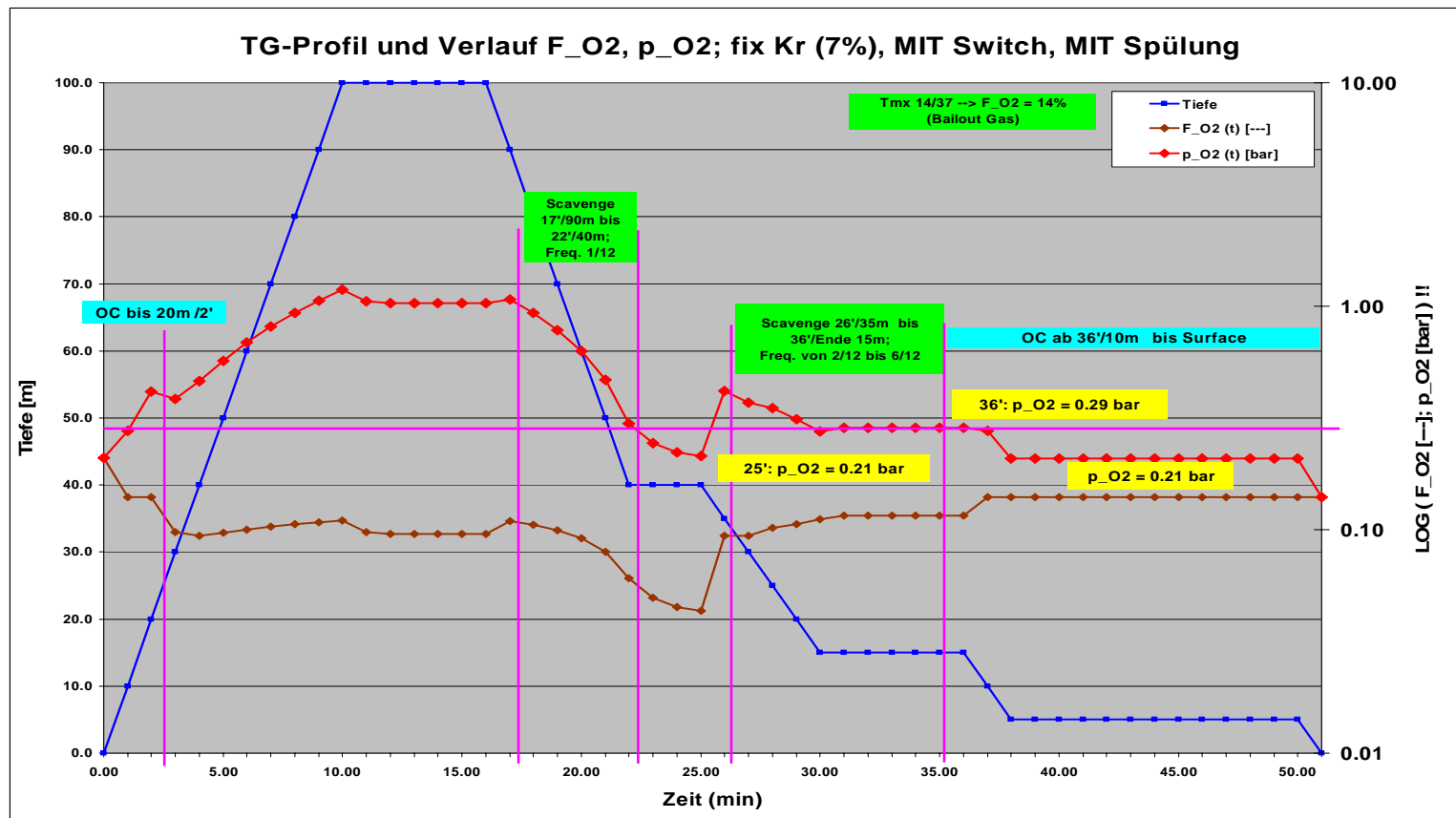


REBREATHERS



Verifizierung von K_r - Vergleich mit Festauswurf (1b)

Es zeigt sich, dass Spülung während 2 Aufstiegsrampen erforderlich ist. Zudem muss spätestens beim Aufstieg auf 10m auf OC Bailout gewechselt werden.



Resultat: nur mit 2x Spülung und Wechsel auf OC / (O_2) am Schluss!

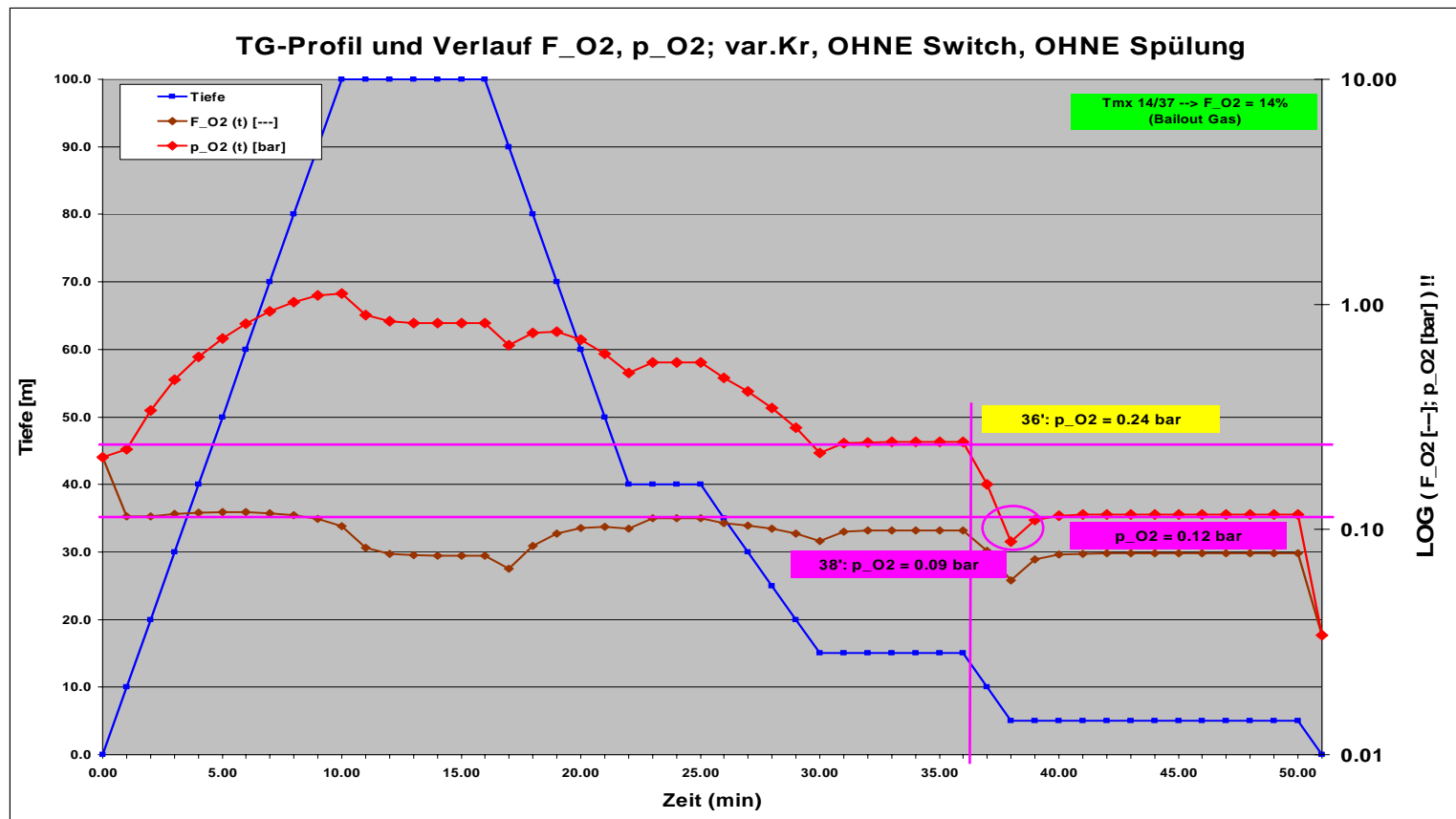


REBREATHERS



Verifizierung von K_r - Vergleich mit Festauswurf (3)

Die Vorteile des variablen K_r sind nicht zu übersehen: keine Probleme mit den langen Aufstiegsrampen. Erst beim Wechsel auf 10m fällt der p_{O_2} zu stark ab!



Resultat: wesentlich besser mit var. K_r ; noch kritisch: ab 10m

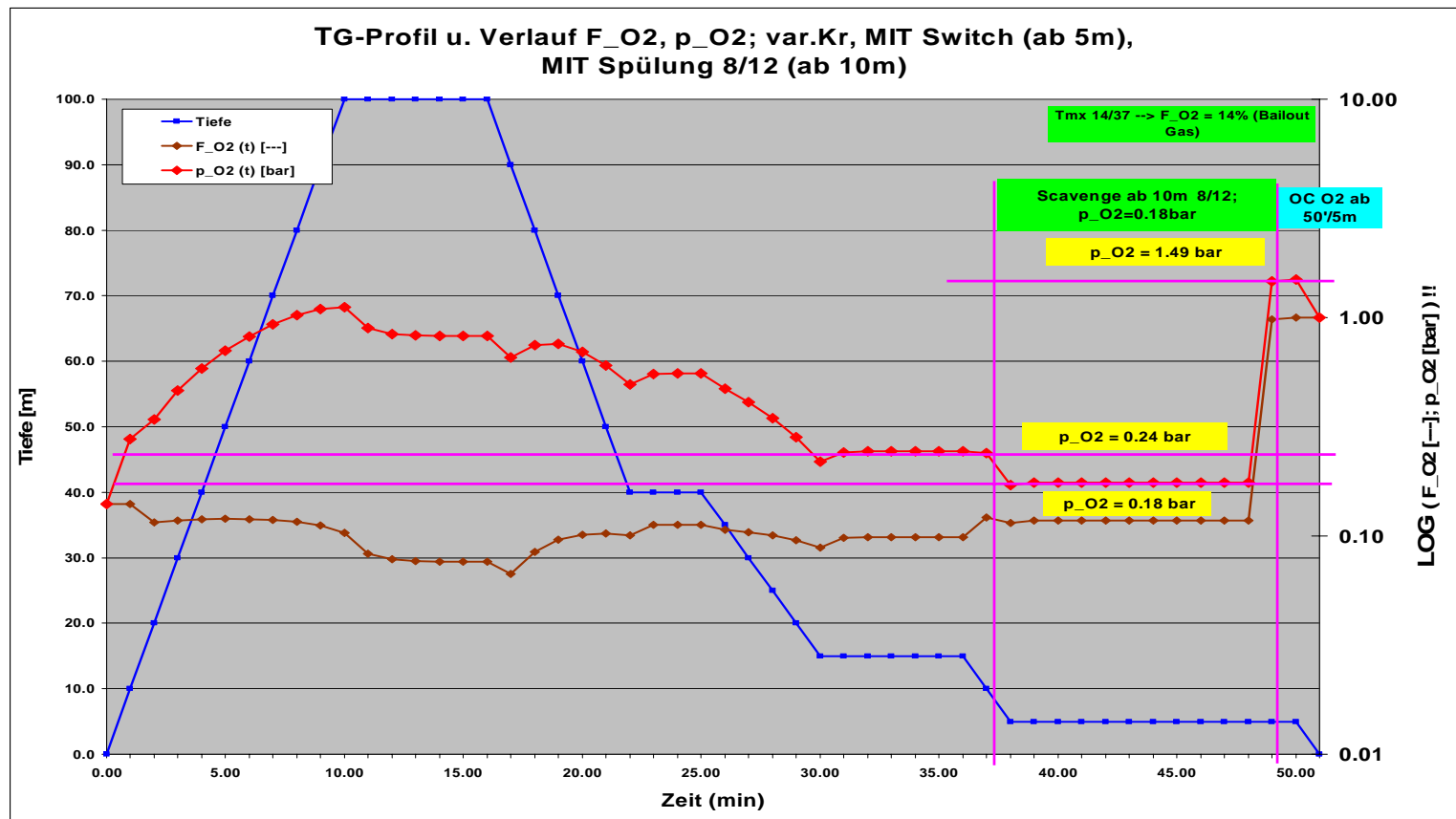


REBREATHERS



Verifizierung von K_r - Vergleich mit Festauswurf (4a)

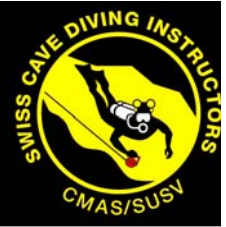
Mit Spülung mit einer konstanten (!) Frequenz von 8/12 (pro Minute) ab 10m wird ein p_{O_2} von 0.18 bar gehalten. Vor finalem Aufstieg Wechsel auf OC erforderlich (Dauer 1-2min).



Resultat: Lösung: var. Kr, Spülung 8/12 ab 10m, O2-OC am Schluss!

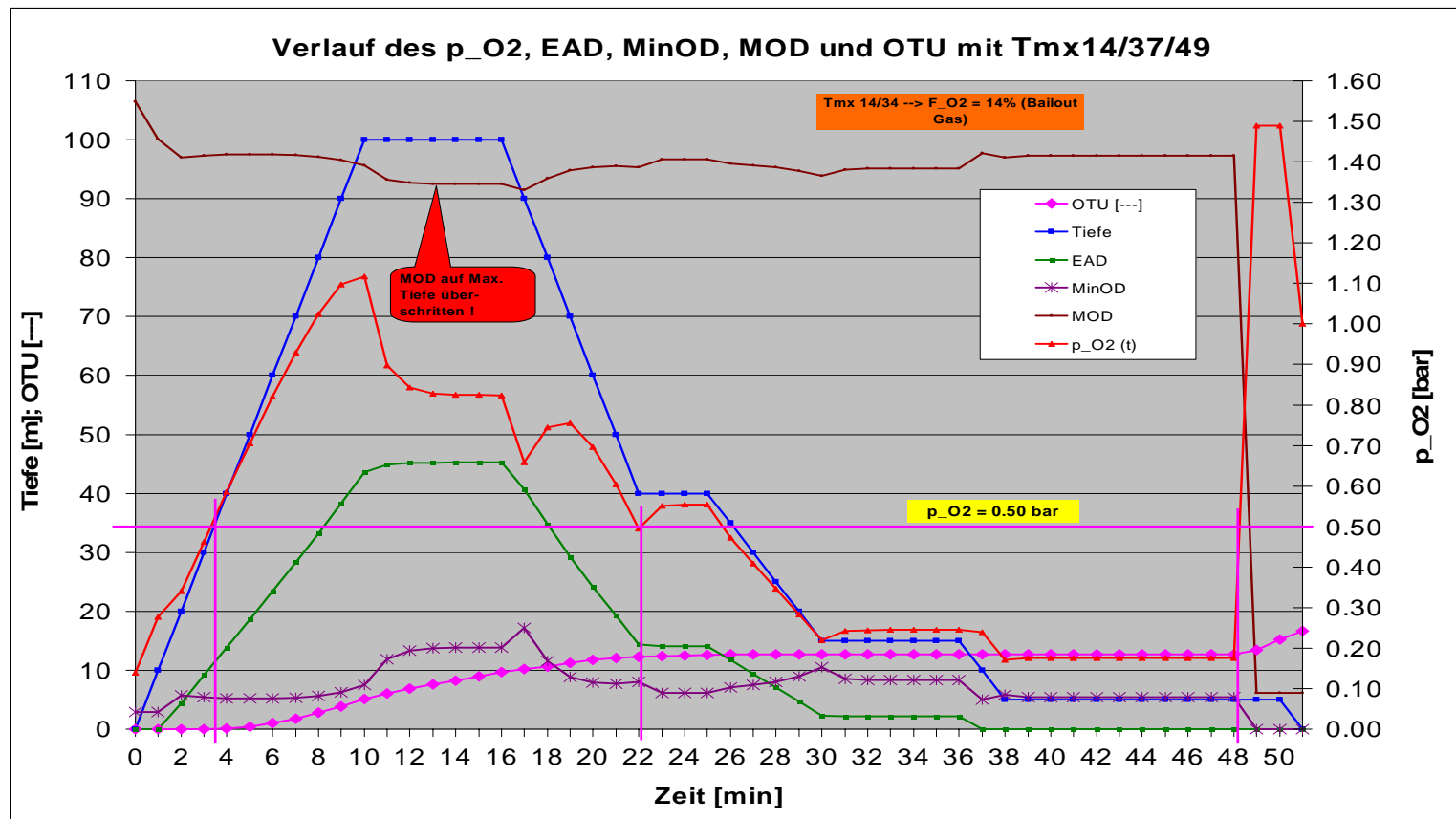


REBREATHERS



Verifizierung von K_r - Vergleich mit Festauswurf (4b)

Es zeigt sich, dass mit Tmx14/37/49 die MOD auf der maximalen Tiefe (100m) überschritten wurde, wegen zu hohem p_{N_2} . Dies wird eine Reduktion des F_{N_2} notwendig machen.



Resultat: Mit Tmx14/37/49 ist p_{N_2} auf max. Tiefe noch zu hoch !

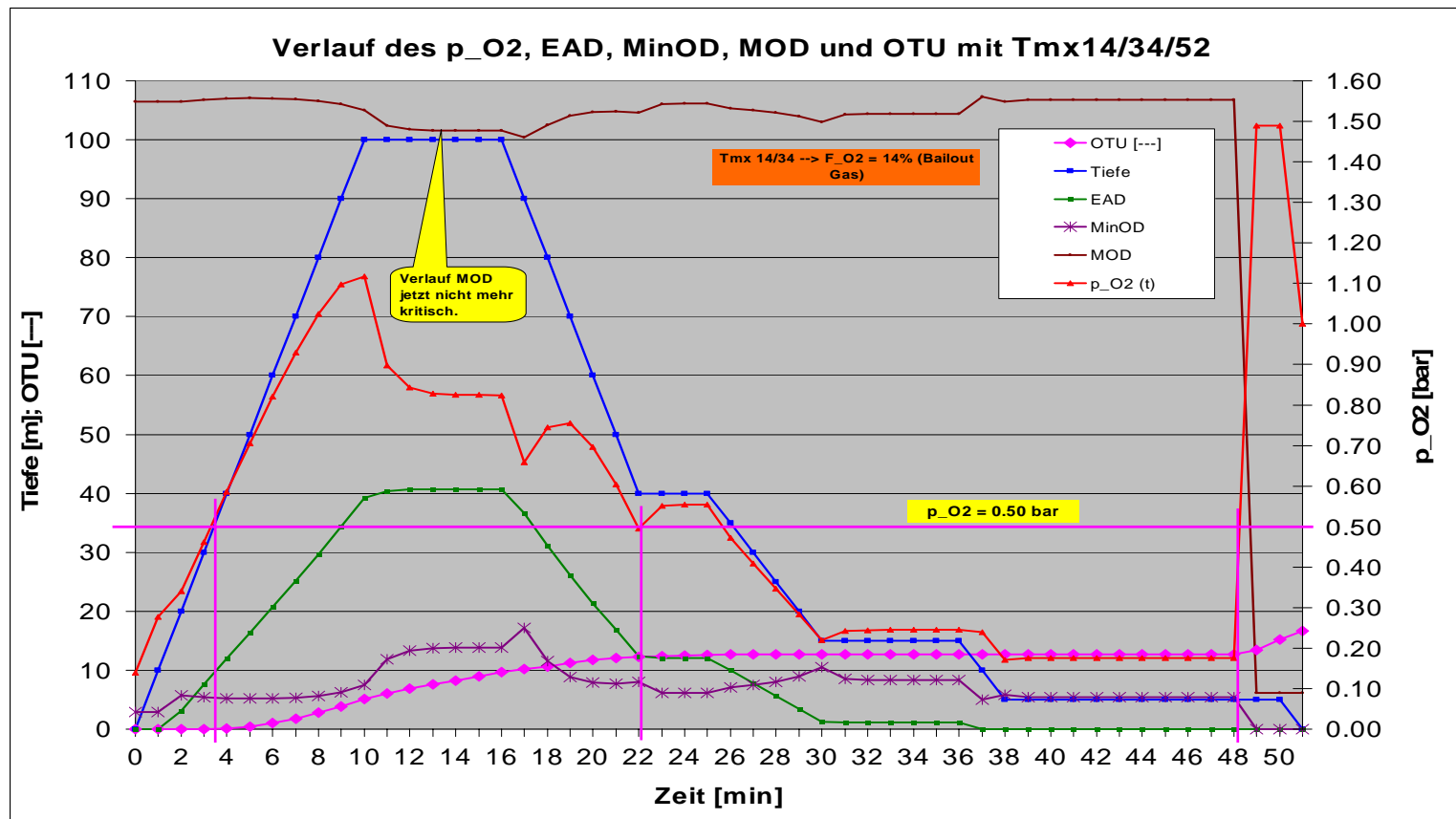


REBREATHERS



Verifizierung von K_r - Vergleich mit Festauswurf (5b)

Verlauf von EAD, MinOD, MOD, OTU mit modifiziertem Gemisch Tmx 14/34/52, sowie Wechsel am Schluss von 5m an die Oberfläche auf 100% O₂ OC.



Resultat: Mit Tmx14/34/52 ist p_{N_2} auf max. Tiefe nicht mehr zu hoch !

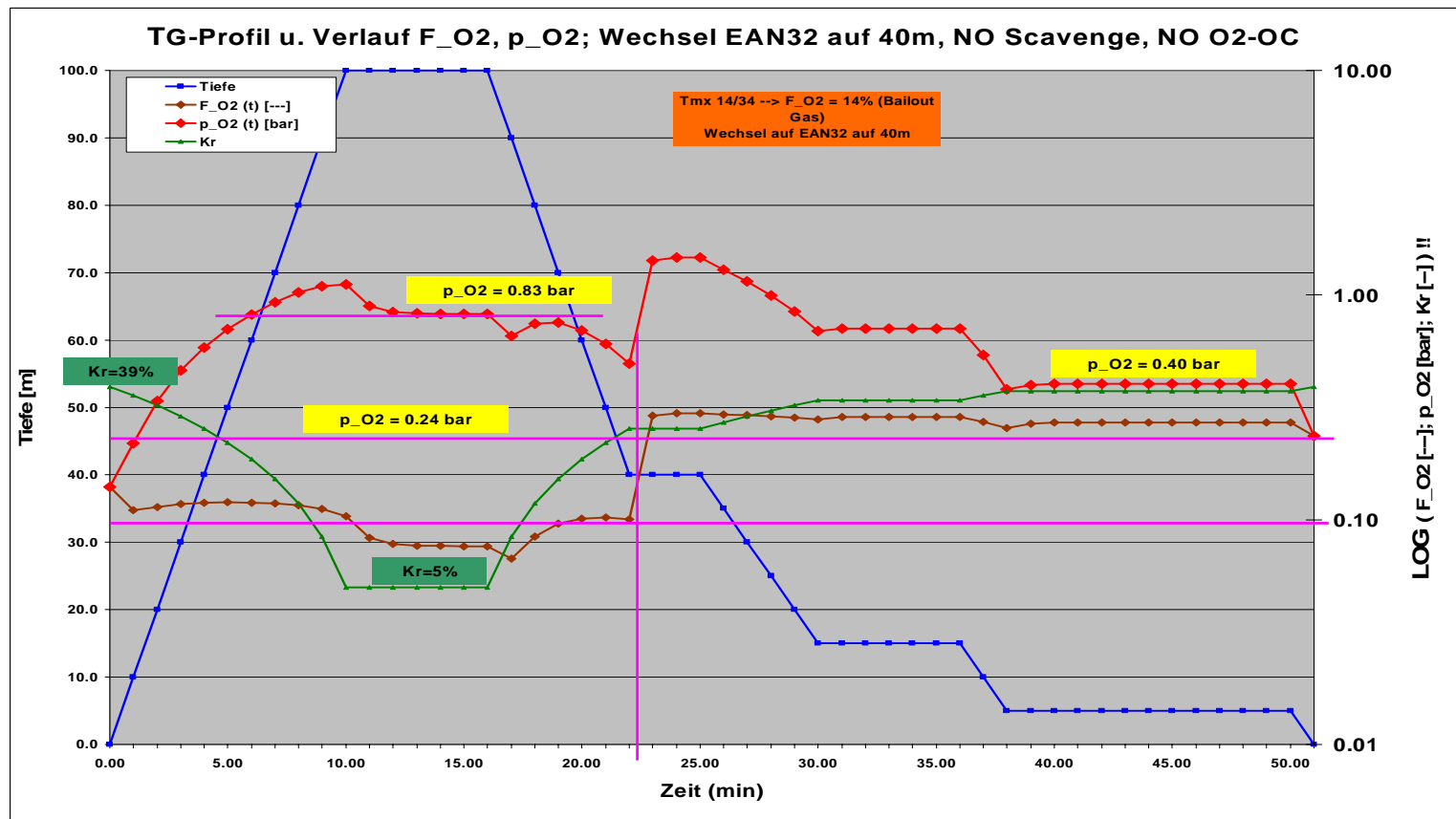


REBREATHERS



Verifizierung von K_r - Vergleich mit Festauswurf (6a)

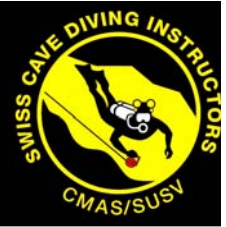
Vereinfachung durch Gaswechsel: Wechsel auf EAN32 auf 40m



Resultat: Bei weitem die einfachste/sicherste Lösung vom Handling her!

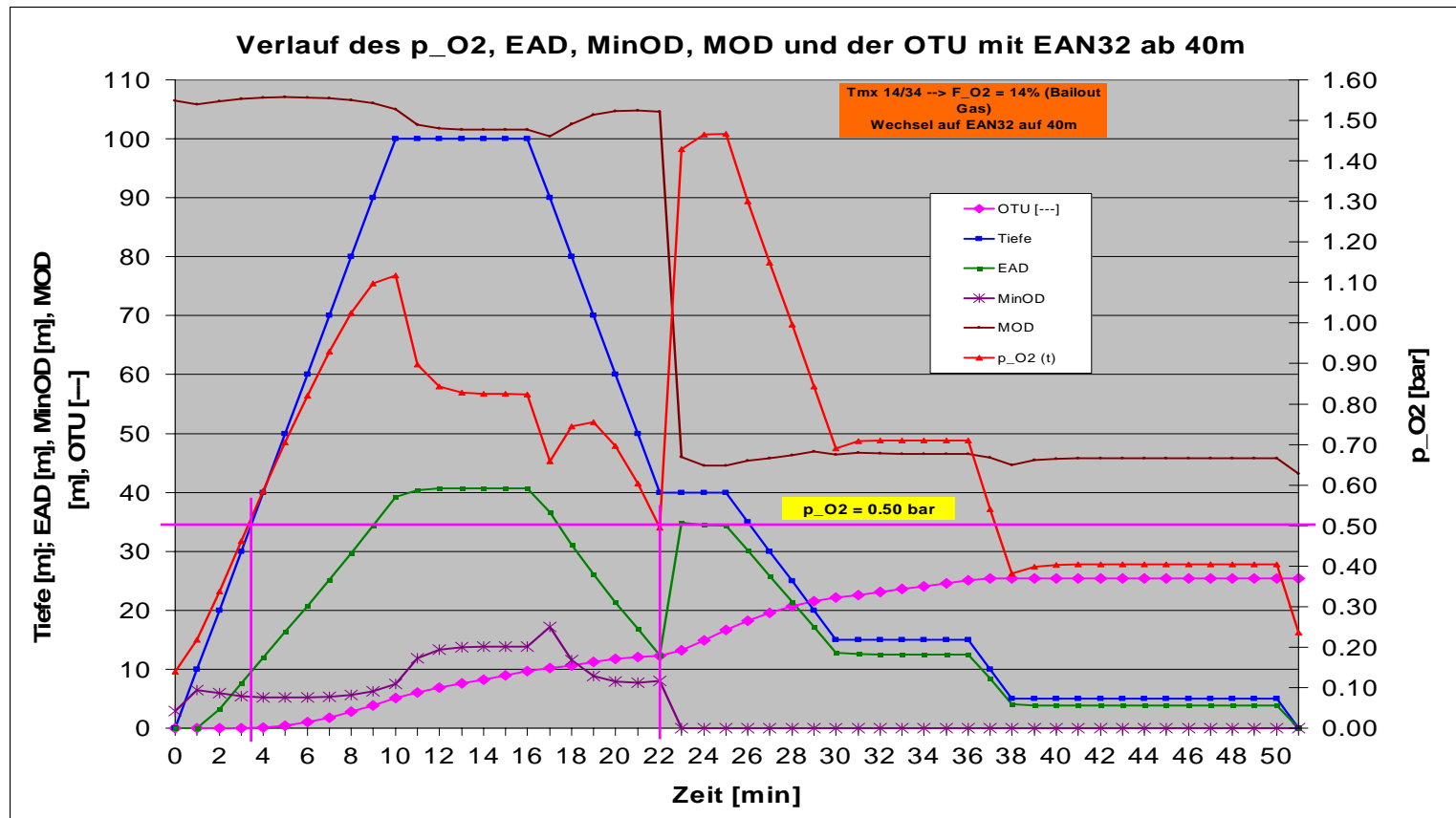


REBREATHERS



Verifizierung von K_r - Vergleich mit Festauswurf (6b)

Vereinfachung durch Gaswechsel: Wechsel auf EAN32 auf 40m



Resultat: Bei weitem die einfachste/sicherste Lösung vom Handling her!



REBREATHERS



Verifizierung von Kr - Vergleich mit Festauswurf (7)

		Gemisch Tmx 14/37/49			Tmx 14/34/52 und EAN32 ab 40m Aufstieg	
		OC	fixer Kr	variabler Kr	Bemerkung	variabler Kr
Kr_min	[%]	100.00	7.14	5.00	Oberfl.	5.00
Kr_max	[%]	100.00	7.14	39.10	auf 100m	39.10
V_vent	[NL]	4375.8	4375.8	4375.8		4375.8
Q_dump	[NL]	4375.8	785.4	826.4		775.8
V_O2	[NL]	37.4	37.4	37.4		37.4
V_spül	[NL]	0	280.3	238.3		0
p_O2-max	[bar]	1.51 auf 100m 1.49 auf 5m	1.03 auf 100m 1.49 auf 5m	1.12 auf 100m 1.49 auf 5m	(5m: OC O2)	0.83 auf 100m 1.47 auf 40m 0.40 auf 5m
p_N2-max	[bar]	3.996 auf 100m	4.203 auf 100m	4.292 auf 100m		4.944 auf 100m
EAD-max	[m]	41.4	44.1	45.2		40.7
MOD auf max.Tiefe	[m]	100.1	94.7	92.5	(wegen N2)	101.6
OTU	[---]	30.86	17.79	16.57		25.39
		NL: Normalliter (bei 1 bar)				

Der zu hohe p_N2 des Tmx14/37/49 bedingt eine Reduktion von F_N2 von 37% auf 34%, bei gleichzeitiger Anhebung des F_He auf 52%. Damit erhält man beim Nachfahren des Profils auf T = 100m eine MOD von max. 101.6m.



REBREATHERS



Diskussion - Einleitung

Anhand von einer Reihe Randbedingungen wurde aufgezeigt, wie ein System mit variablem Dump Ratio K_r (von 39% an der Oberfläche bis auf 5% auf 100m) berechnungsmässig ausgelegt werden *könnte*.

Das Verhalten dieses Systems im Vergleich zu einem OC-System und einem SCR mit fixem K_r (7%) wurde anhand eines hypothetischen TG-profils mit einer Maximaltiefe von 100m durchgerechnet. Die echten physiologisch erforderlichen Dekompressionsanforderungen wurden bewusst ausser Acht gelassen, da dies für die hier zu klärenden Fragen belanglos ist.

Falls sich rechnerisch zu irgendeinem Zeitpunkt ein zu tiefer p_{O_2} ergab, so wurde durch iterativen Versuch mit Spülen und Umstellen auf OC jeweils versucht, mit dem minimalsten Aufwand (möglichst geringer Gasverbrauch) ein p_{O_2min} von 0.18-0.22bar aufrecht zu erhalten. Als erste Massnahme wurde immer mit Spülen in steigender Frequenz begonnen, erst wenn dies nicht zum Erfolge führte, wurde auf OC umgestellt.



REBREATHERS



Diskussion – Schlussfolgerungen (1)

- 1) Aus sicherheitstechnischen Ueberlegungen heraus sollte deshalb lieber ein Gerät mit höherem Kr (z.B. 10% statt nur 7%) gewählt werden, weil der vermeintliche Vorteil der besseren Gasökonomie durch schlechtere (grössere) minimale Einsatztiefen, höhere erforderliche O₂-Konzentrationen im Speisegas und komplexere Handhabung bei weitem wieder wettgemacht wird.
- 2) Der Vorteil eines SCR beim Gasverbrauch, sowohl mit fixem Kr , wie auch mit variablen Kr gegenüber einem OC sind offensichtlich: die Menge von Q_{dump} der beiden SCR-Varianten war bei diesem spezifischen TG-Profil gerade einmal 17% desjenigen eines OCs.
Die total verbrauchte Menge ($Q_{dump} + V_{spül}$) betrug ca. 24% der verbrauchten Gasmenge des OC.
- 3) Der Unterschied von Q_{dump} zw. SCR mit fixem Kr (7%) und variablen Kr (5%.. ...39%) ist insgesamt sehr klein (ca. 3%). Die Erklärung liegt darin, dass eben Geräte mit fixem und tiefem Kr in Flachwasserbereich meist gar nicht mehr einsetzbar sind (also ohnehin auf OC gewechselt werden muss), oder nur mit sehr viel Spülung und auch auf konstanter Tiefe.



REBREATHERS



Diskussion – Schlussfolgerungen (2)

- 4) Der Unterschied hingegen zw. den Spülmengen der beiden SCR ist beträchtlich: Das Gerät mit fixem K_r braucht ca. 15% mehr. (Erklärung s. Pkt. 3)
- 5) Insgesamt verbraucht das SCR mit variablem K_r ca. 2.3% WENIGER Gas als dasjenige mit fixem K_r (für dieses eine TG-Profil!).
- 6) Um bei Geräten mit kleinen K_r trotzdem ohne Spülung und Wechsel auf OC eine vernünftige minimale Einsatztiefe zu erhalten, muss mit entsprechend hohen F_{mixO_2} gefahren werden. Dies wiederum schränkt aber die MOD ein!
- 7) Das Spülen mit steigender Frequenz unterwegs dürfte zudem in der Praxis sehr schwierig zu realisieren sein, weil ja im Wasser dazu immer die O₂-Anzeige beobachtet und praktisch vorausschauend agiert werden müsste. Zudem nützt die F_{O_2} -Anzeige nichts, es muss direkt der p_{O_2} abgelesen werden können; wer macht schon Kopfrechnungen unter Wasser?
- 8) Der starke Einfluss der Spülung (Anhebung des p_{O_2}) schon bei geringen Frequenzen (1/12 bis 3/12) ist teilweise erstaunlich.
- 9) Um die p_{O_2} -Schwankungen beim Spülen (und vor allem den p_{O_2} -Abfall dazwischen) klein zu halten, ist es besser, gleichmässig und dafür häufiger zu spülen, als in grösseren Abständen und dafür jeweils viel.



REBREATHERS



Diskussion – Schlussfolgerungen (3)

- 10) Durch die dynamische Verschiebung der Gasanteile im Loop gegenüber der rein statischen, auf OC basierenden Gemischberechnung, kann es notwendig sein, z.B. wegen der MOD, die Anteile nochmasl korrigieren zu müssen (hier Reduktion des F_{N_2} von 37% auf 34%)
- 11) Bei den OTU liegt das Gerät mit variablen K_r am günstigsten (d.h. am tiefsten), allerdings ist der Unterschied zum fixen K_r relativ klein. Weit abgeschlagen jedoch das OC, das fast den doppelten Wert aufweist (u.a. wegen der grossen Tiefe des TG). Bei einem flachen TG würde das anders aussehen.
- 12) Der Einfluss durch die Volumenänderung ist zwar nachrechenbar, aber kleiner als erwartet; Grund: die Volumenänderung ist meist im Vergleich zu Q_{dump} relativ klein.
- 13) Generell kann aber gesagt werden, dass bei jedem Aufstieg grundsätzlich gespült werden sollte, natürlich unter Beobachtung der p_{O_2} -Anzeige, ausser bei Wechsel während des Aufstiegs auf Gase mit wesentlich höheren O_2 -Anteilen, womit das Problem drastisch reduziert werden kann.



REBREATHERS



Diskussion – Schlussfolgerungen (4)

- 14) Den Vorteilen des variablen Dump Ratio (Kr) gegenüber steht die erhöhte technische Komplexität einer mechanisch-pneumatischen UND funktions-sicheren Vorrichtung, welche das Volumenverhältnis der beiden Gegenlungen mit zunehmender Tiefe entsprechend verändert, so dass mit grösserer Tiefe Kr verringert wird. Auch kostenmässig dürfte sich das bemerkbar machen.
- 15) Die Frage, ob überhaupt 2 handelsübliche Bellows gefunden werden können, welche von ihren Volumenverhältnissen den auf der minimalen Einsatztiefe des Gerätes gewünschten Kr ergeben, wurde bewusst ausgeklammert. Ebenso die Frage nach der gesamten resultierenden Baugrösse des Systems.
- 16) Es konnte zudem aufgezeigt werden, **wie komplex und vieldimensional Randbedingungen** sein können und dass es **NICHT eine einzige Lösung** gibt. Aussagen wie: „.....für Kr ist ein Wert $x.y$ % optimal....“ sind Unsinn.
- 17) Teilweise wird auch ein iteratives Vorgehen notwendig sein (Gemischanpassungen etc.)
- 18) Vielen Problemen kann aus dem Weg gegangen werden mit einem **Wechsel** unterwegs auf ein anderes **besser geeignetes Gemisch** (hier: EAN32). Das bedingt aber eine **Vorausberechnung** in der Art, wie sie hier präsentiert worden ist. **Reines ausprobieren** ist nicht nur dumm, sondern **lebensgefährlich** !



REBREATHERS



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