



Berechnung des normalisierten spezifischen Gasverbrauchs aus beliebigen TG-Profilen



Jeden Taucher interessiert es - muss es interessieren: wie hoch ist mein Gasverbrauch! Meist nimmt man dann für die TG-Planung irgendeinen Wert, der einem der Kollege oder der Instruktor angibt (20-25 l/min/bar). Das kann ganz gut stimmen, aber auch meilenweit daneben liegen. Der Autor hat in seiner 25-jährigen Instructor-Karriere spezifische Gasverbräuche bei Tauchpartnern, Schüler etc. erlebt, die gingen von 11 l/min/bar bis 28 l/min/bar !

Verschiedene Organisation propagieren zur Berechnung (oder besser Abschätzung) der SAC-rate (surface air consumption) die verschiedensten Methoden, denen man vertrauen kann oder nicht. Die meisten nehmen aber stark vereinfachend ein sog. Rechteck-Tauchprofil an. Damit sind solche Methoden von vornherein in den meisten Fällen unbrauchbar und geben völlig falsche Werte an, welche für eine seriöse TG-Planung - gerade wie im Bereich Höhlentauchen - unbrauchbar sind und nicht verwendet werden sollten.

Im Zeitalter der Tauchcomputer gibt es keinen Grund, seine, auf den Oberflächendruck normalisierte SAC-rate nicht höchstpersönlich zu messen!

Die Berechnung

Die folgende Methode ist

- mathematisch UND physikalisch korrekt
- sehr einfach durch jeden Taucher / Taucherin selbst durchzuführen.

Benutzte Größen:

p_amb-surf	Umgebungsdruck an der Oberfläche (meist ca. 1 bar)
p_amb (t_exp)	Umgebungsdruck (in bar) in Funktion der Zeit
t_exp	gerade aktuelle, laufende Expositionszeit (min)
sGV_surf	spezifischer Gasverbrauch an der Oberfläche (l/min)
Φ sGV_surf	<u>normalisierter</u> spezifischer Gasverbrauch an der Oberfläche = sGV_surf / p_amb-surf (l/min/bar)
sGV (t_exp)	der momentane spezifischer Gasverbrauch zur Zeit t_exp (l/min)
Δ t_exp	verflossene Expositionszeit (Messzeit; Differenz aus Endzeit - Startzeit)
GV_tot	totaler Luftverbrauch (in Liter entspannte Luft)

Umgebungsdruck:

Der Umgebungsdruck p_amb (t_exp) lässt sich aus der jeweils gemessenen Tiefe berechnen:

$$p_{\text{amb}}(t_{\text{exp}}) = p_{\text{amb-surf}} + \text{Tiefe}(t_{\text{exp}}) \cdot \delta p \quad \text{Gl. 1}$$

Dabei ist δp der Drucksteigerungsfaktor (meist näherungsweise 0.1 bar/1m Wassersäule)

Der momentane spezifische Gasverbrauch sGV (t_exp) ist, wenn man einmal den psychischen Zustand, Strömung, Sicht, Ausrüstung, Gasart etc. ausklammert, nur noch eine Funktion des gerade herrschenden Umgebungsdruckes p_amb (t_exp), dort wo wir uns befinden.

Also kann man schreiben:

$$sGV(t_{\text{exp}}) = \text{funct.} \{ p_{\text{amb}}(t_{\text{exp}}) \} \quad \text{Gl. 2}$$

Wenn wir vereinfachend annehmen, der spezifische Gasverbrauch sei (mit allen andern Faktoren sonst identisch) linear abhängig vom Umgebungsdruck (also z.B. bei 2-fach höherem Druck sei auch der spezifische Verbrauch 2-fach höher), dann können wir schreiben:

$$sGV(t_{\text{exp}}) = sGV(p_{\text{amb}}(t_{\text{exp}})) \\ = sGV_{\text{surf}} \cdot p_{\text{amb}}(t_{\text{exp}}) / p_{\text{amb-surf}} \quad \text{Gl. 4}$$



Berechnung des normalisierten spezifischen Gasverbrauchs aus beliebigen TG-Profilen

Der gesamte Gasverbrauch lässt sich nun auch wie folgt berechnen: er ist im Wesentlichen nichts anderes als das zeitliche Integral des Druckverlaufs:

$$GV_{tot} = \int sGV(t_{exp}) dt = \int sGV_{surf} * p_{amb}(t_{exp}) / p_{amb-surf} dt \quad \text{Gl. 5}$$

$$= sGV_{surf} / p_{amb-surf} * \int p_{amb}(t_{exp}) dt \quad \text{Gl. 5'}$$

Nun kann man die Gleichung nach sGV_{surf} auflösen und erhält

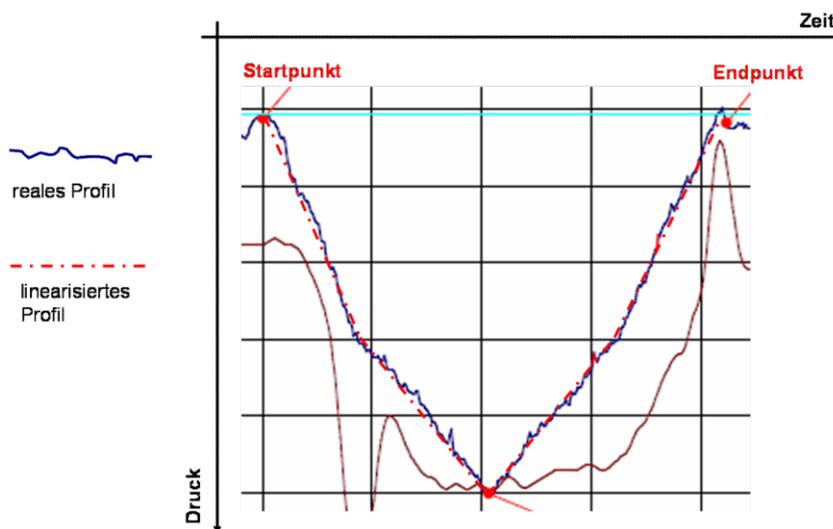
$$sGV_{surf} = \frac{GV_{tot} * p_{amb-surf}}{\int p_{amb}(t_{exp}) dt} \quad \text{Gl. 6}$$

Wir suchen die auf den Oberflächendruck normalisierte Grösse, dividieren also Gl. 6 durch $p_{amb-surf}$ und erhalten:

$$\Phi sGV_{surf} = \frac{sGV_{surf}}{p_{amb-surf}} = \frac{GV_{tot}}{\int p_{amb}(t_{exp}) dt} \quad \text{Gl. 7}$$

Wenn wir das TG-Profil als Druck-Zeit-Verlauf aufzeichnen, so ist das Integral nicht anderes als die Fläche unter dieser Druck-Zeit-Kurve.

Unterteilt man das Profil in kleine zeitliche Abschnitte und wählt diese klein genug, so kann man jeden beliebigen Kurvenverlauf durch kleine lineare Stücke ersetzen:



Jedes dieser Flächenstücke kann man nun leicht berechnen. Die Gesamtfläche ist dann einfach die Summe all dieser Teilflächen.

$$\int p_{amb}(t_{exp}) dt = 0.5 * (p_{amb(0)} + p_{amb(1)}) * (t_{exp(1)} - t_{exp(0)}) + 0.5 * (p_{amb(1)} + p_{amb(2)}) * (t_{exp(2)} - t_{exp(1)}) + \dots$$

oder allgemein:

$$\int p_{amb}(t_{exp}) dt = 0.5 * \left[\sum (p_{amb(n)} + p_{amb(n+1)}) * (t_{exp(n+1)} - t_{exp(n)}) \right] \quad \text{Gl. 8}$$



Berechnung des normalisierten spezifischen Gasverbrauchs aus beliebigen TG-Profilen



Was alles brauchen wir also ?

- 1) eine genau definierte UW-Schwimmstrecke (genaue Tiefen, ev. Distanz)
Dabei ist eine möglichst gradlinige Strecke vorteilhaftesten.
Aber es geht auch mit Jo-Jo-Tauchgangprofilen, wenn man einen Computer hat, der einem das Profil schön brav aufzeichnet und man so in Minutenabständen die jeweilige Tiefe auslesen kann.
- 2) genauer Anfangsdruck wenn wir losschwimmen (für unsere Tauchkollegen aus Zürich: die Trinkwasserröhre im Tiefenbrunnen ist die perfekte „Laborumgebung“).
- 3) genauer Enddruck, wenn wir am Ende der Messstrecke angekommen sind
- 4) Flaschenvolumen
- 5) genaue Schwimmzeit
- 6) ein excel-Sheet um die numerische Integration einfacher durchführen zu können
- 7) etwas Zeit, um all die uns interessierenden Kombinationen messen zu können

Zu beachten:

- Ferner sollte man auch die Messung auf verschiedenen Tiefen wiederholen, damit man sieht, ob der spezifische Verbrauch wegen der zunehmenden Dichte des Atemgases nicht doch zunimmt.
- Es ist darauf zu achten, dass man immer die gleiche Streckenlänge (z.B. 300m) in der gleichen Zeit durchschwimmt.
- Für Tec-Freaks: verschiedene Konfigurationen ausmessen (z.B. Monogerät, Doppel-Rückengerät, 2 Flaschen Sidemount, Rückengerät plus 1 Stage, dito, aber mit 2 Stage usw.)
- Da auch Tagesform, Strömung, Sicht etc. das Ergebnis beeinflussen, sollte man jede Kombination mindestens 2-3 mal wiederholen und messen und sich jeweils die genauen Begleitumstände notieren. Nur so kommt man zu einer vernünftigen, stabilen Aussage.
- EINMAL ist KEINMAL in der Statistik!

Konkrete Beispiele:

Es wurden 2 konkrete Messungen durchgeführt, einmal mittels Flossenschwimmen, einmal mittels Scooter.

- Die **Gesamtdistanz** betrug in beiden Fällen **980-1000m**.
- Start- und Endpunkt befanden sich jeweils auf **6m** Tiefe

1) Verbrauch beim Flossenschwimmen (Profil: Beilage 1)

Flaschengrösse:	24	liter (D12)
Oberflächendruck:	1	bar
Druckdifferenz:	109.5	bar
Verbrauch total:	2628	NL

TG-Profil:	Zeit (min)	Tiefe (m)	Druck (bar)	Integral (bar*min)
Pkt. 1	4	6	1.6	0
Pkt. 2	11.5	20	3.0	17.25
Pkt. 3	25	30	4.0	47.25
Pkt. 4	38	20	3.0	45.5
Pkt. 6	46	6	1.6	18.4
Integral = Total aller Flächen:				128.4

Normalisierter Spezifischer Verbrauch:	20.5	l/min/bar
---	-------------	------------------



Berechnung des normalisierten spezifischen Gasverbrauchs aus beliebigen TG-Profilen



2) Verbrauch bei Scooter-Einsatz (Profil: Beilage 2)

Flaschengrösse:	11.1	liter (80 cft)
Oberflächendruck:	1	bar
Druckdifferenz:	85	bar
Verbrauch total:	943.5 NL	

TG-Profil:	Zeit (min)	Tiefe (m)	Druck (bar)	<i>Integral</i> (<i>bar*min</i>)
Pkt. 1	5	6	1.6	0
Pkt. 2	9	20	3.0	9.2
Pkt. 3	15.5	30	4.0	22.75
Pkt. 4	21.5	20	3.0	21
Pkt. 6	26	6	1.6	10.35
Integral = Total aller Flächen:				63.3

Normalisierter Spezifischer Verbrauch:	14.9	l/min/bar
---	-------------	------------------

3) resultierende Kennzahlen

a) beim Flossenschwimmen	
Schwimmstrecke:	980 m
Schwimmzeit:	42 min
Geschwindigkeit:	23.3 m / m in
Gasverbrauch:	2628 NL
Spez. Gasverbrauch:	20.5 l/m in/bar
b) beim Scooter-Einsatz	
Schwimmstrecke:	980 m
Schwimmzeit:	21 min
Geschwindigkeit:	46.7 m / m in
Gasverbrauch:	943.5 NL
Spez. Gasverbrauch:	14.9 l/m in/bar
Kennzahlen	
Verh. der Geschwindigkeiten / Scooter:Flosse)	2.000 (----)
Verh. der spez. Verbräuche	0.728 (----)
Verbrauchsfaktor Worst Case Szenario	1.873 (----)
Worst Case Szenario: der Scooter gibt genau beim Umkehrpunkt seinen Geist auf. Der Gesamte Rückweg muss mit Flossen geschwommen werden.	

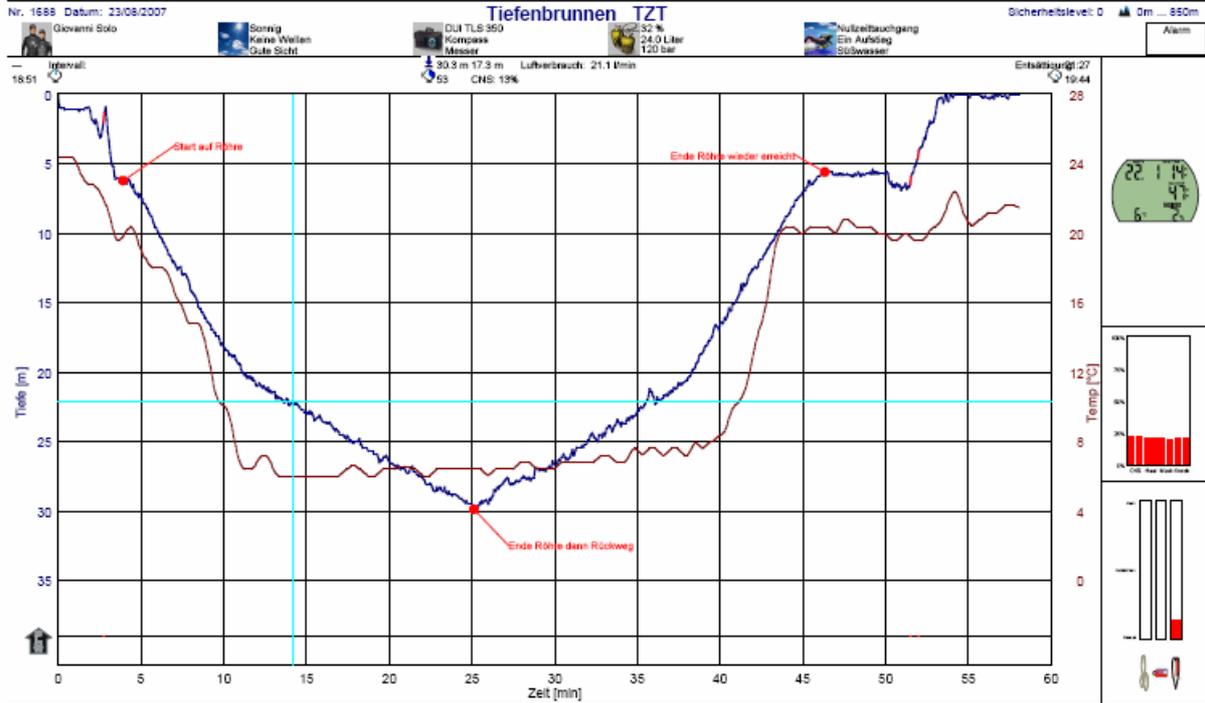
25.8.2007

B. Müller / Swiss Cave Diving

Beilage 1: Profil Flossenschwimmen (ohne Scooter)

Logbuch Hanssmartrak.sig [Benutzer: Hans]

Tauchcomputer: UWATEC Aladin TEC 2G

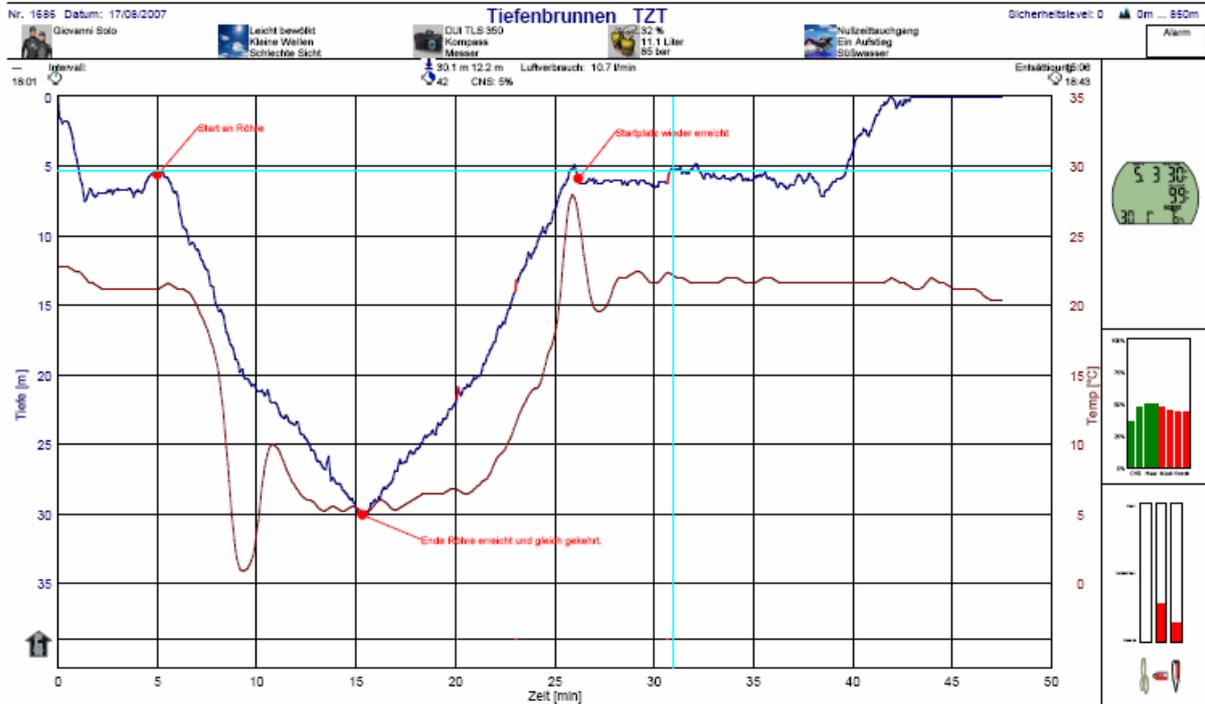


Röhren TG ohne Scooter, D12 Komposite 300 Bar, 1 40cf Stage O2, 1 80cf Stage Nitrox 32, Rückengas EAN 32, OUI TLS 350, Jetfin, 8 A Akkutank
 Strecke 500 m hin, 500 m zurück. Startdruck D12 202 Bar digital gemessen. Enddruck digital gemessen 82 Bar. (beides zu Hause gemessen) Verbrauch 120 Bar aus D12. Stages nicht gebraucht. Kleinste Restzeit mit EAN32 13 min.

Beilage 2: Profil bei Scooter-Einsatz

Logbuch Hanssmartrak.sig [Benutzer: Hans]

Tauchcomputer: UWATEC Aladin TEC 2G



Zeuko ADV 30, D12 300 Bar Rückengerät, OUI TLS 350 mit Weeze Extreme +, Turletins, Non-Bungee Wings mit Backplate, 1 80 cf Stage mit Nitrox 32 als Travelgas, 1 40 cf Stage O2 mitgeführt. Startdruck 80 cf Stage 210 Bar, Enddruck 125 Bar. Distanz 800 m ein Weg.