

**Dr. Armin Rauen**

Ödgarten 12, 94574 Wallerfing

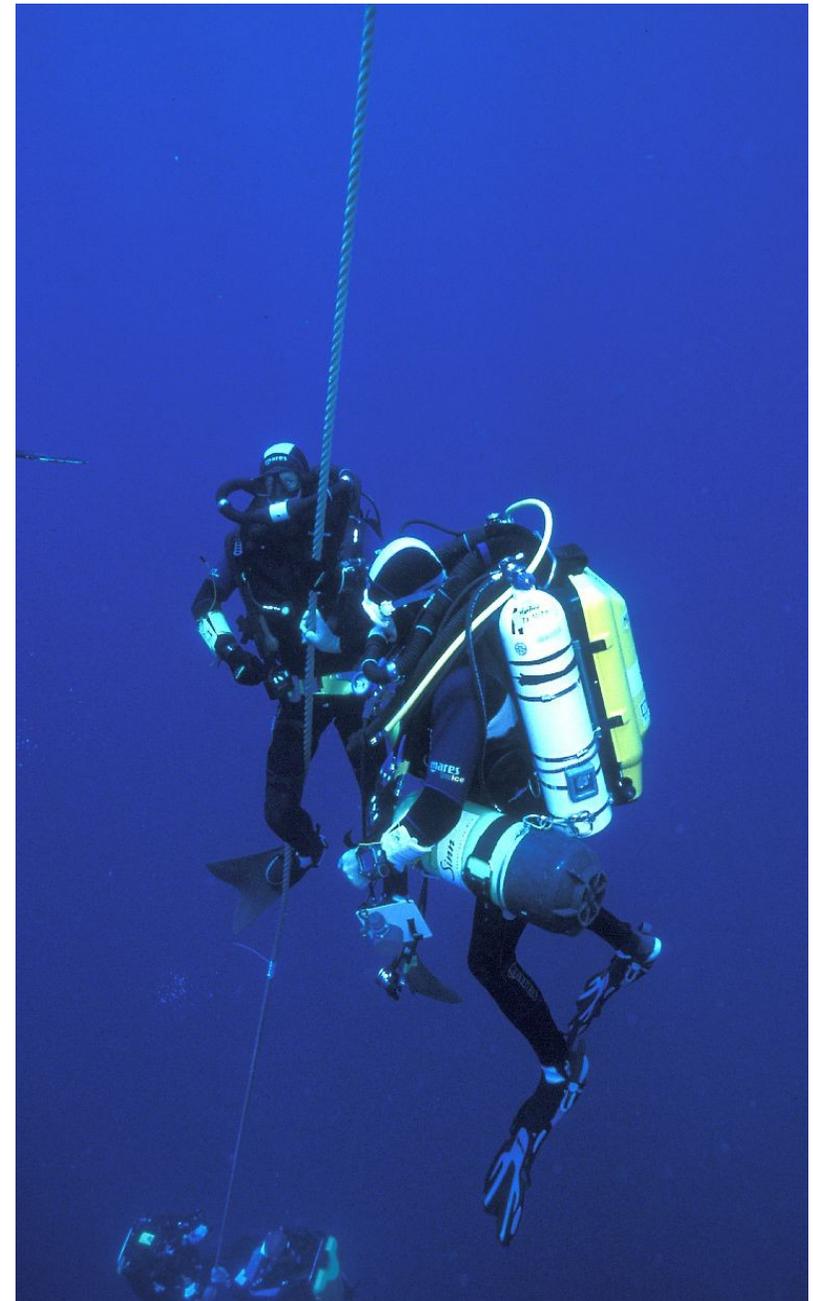
Tel. 09936 - 902026

[www.decotrainer.de](http://www.decotrainer.de)

## **Atemgase und Dekompression**

- 1 Atemgase und ihre Wirkungen**
  - .. Luft, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He
  
- 2 Dekompression - Grundlagen**
  - .. Haldane
  - .. Bühlmann
  - .. GF
  - .. RGBM, VPM
  
- 3 Dekompression - Beispielrechnungen**
  - .. Decotrainer
  - .. Luft, Nitrox, Trimix
  - .. OC, CCR

VIT Fortbildungsseminar für Taucher und Tauchlehrer - 25.3.2017



# Vorstellung

Dr. Armin Rauen  
Diplom-Geophysiker  
Freiberuflich tätig

1960 mein Jahrgang  
1977 Beginn mit dem Tauchsport  
1983 VDST Tauchlehrer

Heute Ausbildungsleiter im Tauchclub Plattling

2003 Manfred Führmann bereitet einen Rekordtauchgang auf  
224 m Tiefe vor, daher ...

2003 Motivation, mich intensiver mit der  
Dekompressionstheorie zu befassen.

2004 Erste Version des Decotrainer  
Decotrainer ist eine Windows-Software zur  
Dekompressionsberechnung

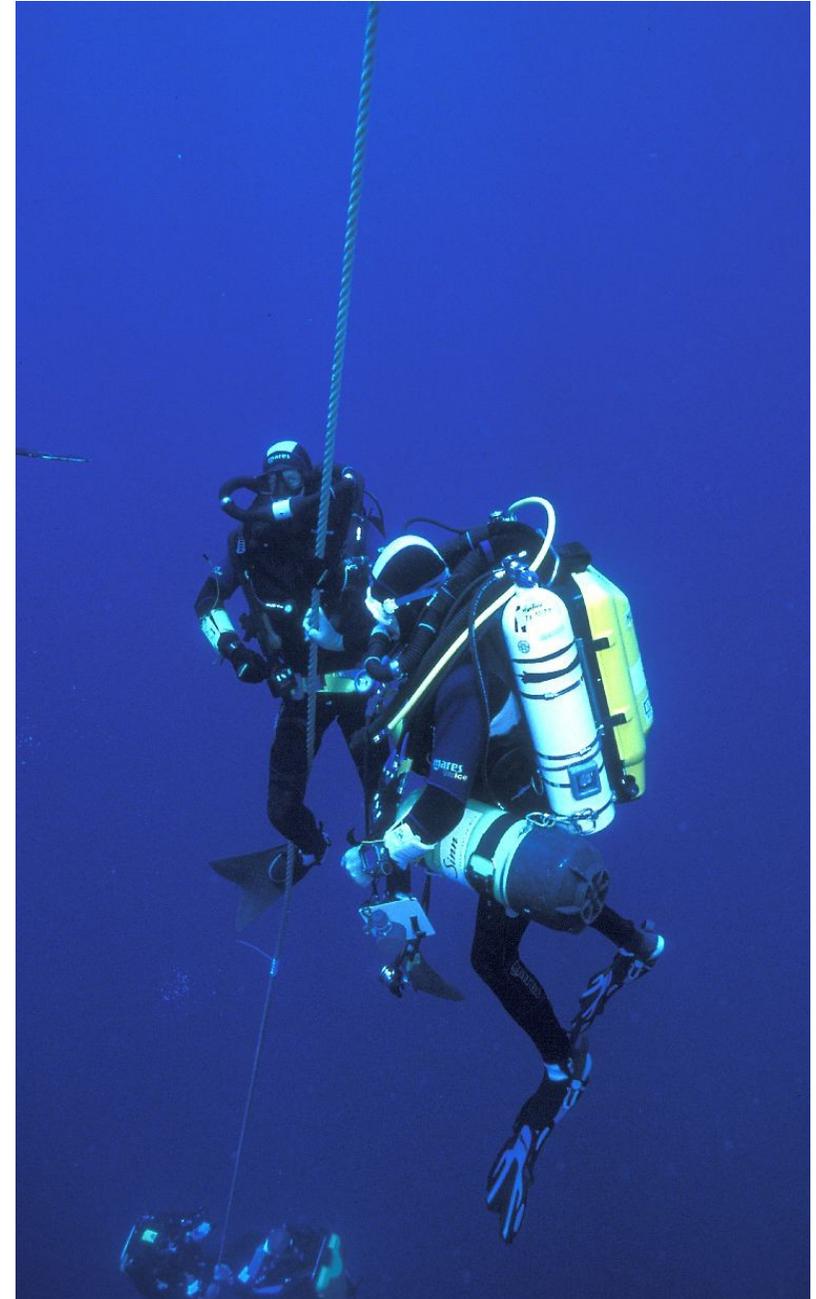
[www.decotrainer.de](http://www.decotrainer.de)



# Teil 1

## Atemgase und ihre Wirkungen

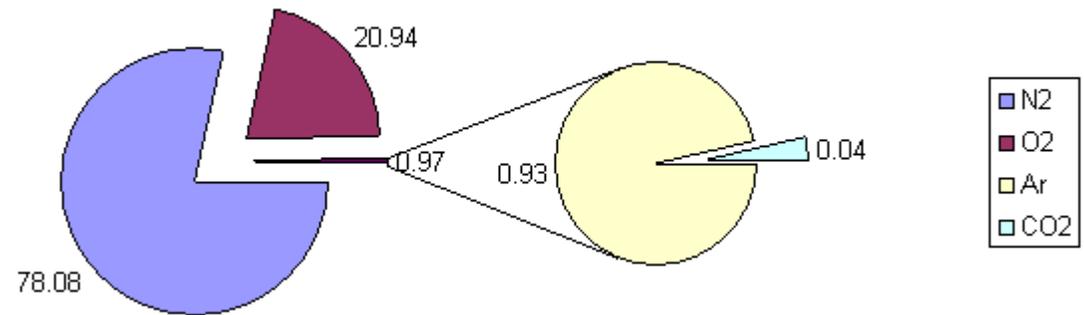
- Was ist Luft?
- Was sind Standardbedingungen?
- $O_2$  und  $CO_2$
- $O_2$  Verbrauch beim CCR ist tiefenunabhängig  
Gasverbrauch beim OC ist tiefenabhängig
- $pO_2$  - die Dosis macht das Gift  
CNS und OTU
- $N_2$
- He
- Atemgase bei (technischen) Tauchen



## Zusammensetzung der Luft

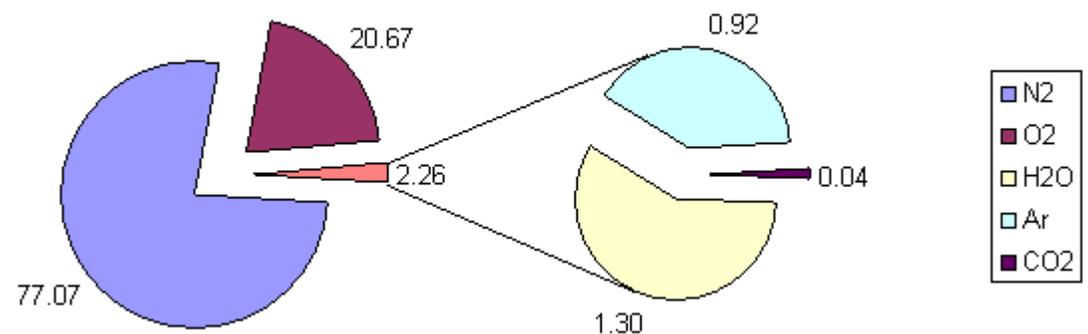
Trockene Luft bei Standardbedingungen:

Gas	Formel	Vol %
Stickstoff	N <sub>2</sub>	78.08
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	20.94
Argon	Ar	0.93
Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub>	0.04
<b>Summe</b>		<b>100.00</b>



Wassergesättigte Luft bei Standardbedingungen:

Gas	Formel	Vol %
Stickstoff	N <sub>2</sub>	77.07
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	20.67
Wasserdampf	H <sub>2</sub> O	1.30
Argon	Ar	0.92
Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub>	0.04
<b>Summe</b>		<b>100.00</b>



## Standardbedingungen

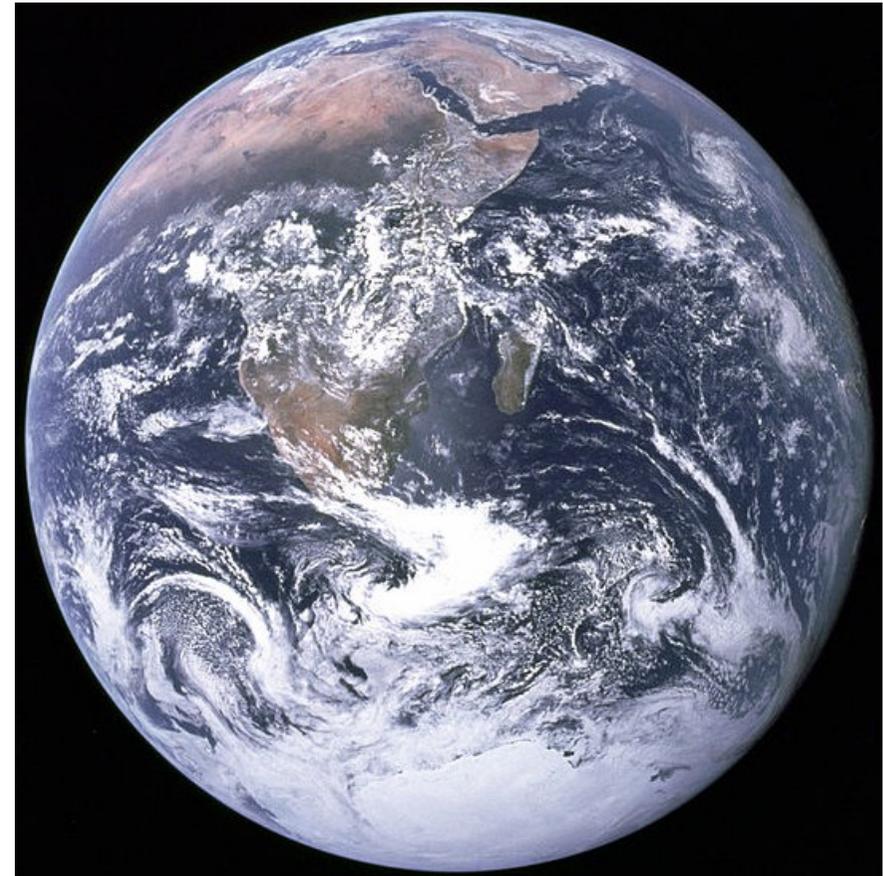
Standardbedingungen = Normalbedingungen = 1 bar (genauer 1.01325 bar = 1013.25 mbar)  
entspricht dem Luftdruck auf Meereshöhe

Der Wasserdampfgehalt ist stark veränderlich:

- 0.1 % an den Polen
- 3 % in den Tropen
- 6 % in der Lunge
- 0 % im Druckgasbehälter

Andere Gasgehalte (in %) sind praktisch konstant in der Erdatmosphäre, natürlich nicht die Partialdrücke.

- Meereshöhe  
Höhe = 0 m  
Umgebungsdruck = 1.013 bar  
 $f(\text{O}_2) = 21 \%$   
→  $p(\text{O}_2) = 0.21 \text{ bar}$
- Mount Everest  
Höhe = 8848 m  
Umgebungsdruck = 0.326 bar  
 $f(\text{O}_2) = 21 \%$   
→  $p(\text{O}_2) = 0.07 \text{ bar}$



wikipedia

## Sauerstoff (O<sub>2</sub>) und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)

### Atmung

Durch einen biologischen Prozess (genannt aerobe Atmung) wird O<sub>2</sub> verbraucht und CO<sub>2</sub> produziert.



1 Molekül Glucose + 6 Moleküle Sauerstoff

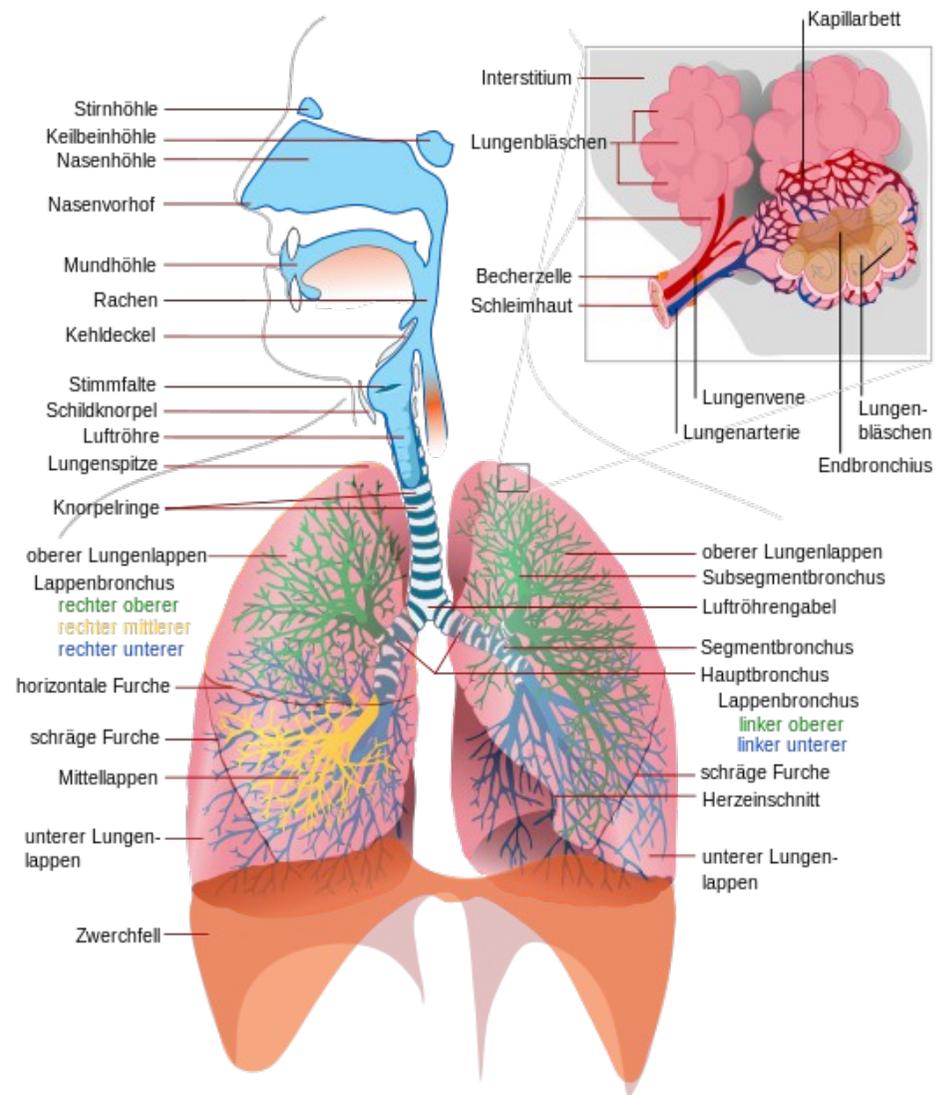


6 Moleküle Kohlenstoffdioxid + 6 Moleküle Wasser

- Kohlendioxid-Produktion = Sauerstoff-Verbrauch  
Beispiel:
  - O<sub>2</sub> Verbrauch 1 l/min
  - CO<sub>2</sub> Produktion 1 l/min

### Respiratorischer Koeffizient

- Respiratorischer Koeffizient = CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> = 0.82
- nicht nur Kohlenhydrate, sondern auch Fette und Proteine
- → O<sub>2</sub> Verbrauch 1 l/min
- → CO<sub>2</sub> Produktion 0.8 l/min



Graphik: Wikipedia

## Steuerung der Atmung

- Atemreiz reagiert auf den CO<sub>2</sub> Gehalt.  
Genauer: auf den Partialdruck von CO<sub>2</sub> im Blutkreislauf
- Grenzwert für den Atemreiz: p(CO<sub>2</sub>) ist ca. 40 mbar  
entspricht bei Normalbedingungen 4 Vol-%

### → Zusammensetzung von Einatem- und Ausatemluft:

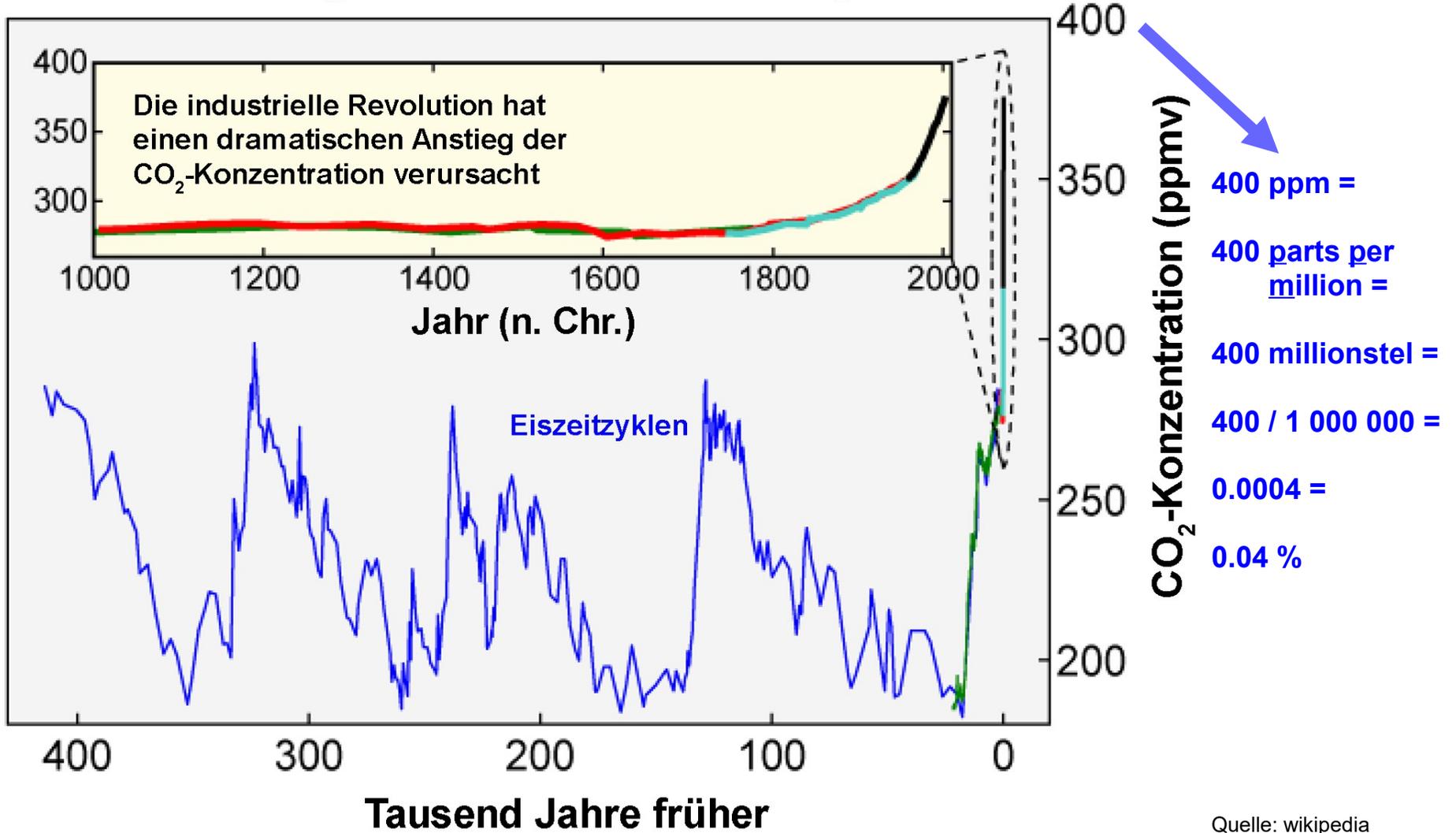
Inspiratorische Fraktion	Gas	Expiratorische Fraktion
78 %	Stickstoff	78 %
21 %	Sauerstoff	17 %
1 %	Edelgase	1 %
0,04 %	Kohlenstoffdioxid	4 %

O<sub>2</sub> wird verbraucht

CO<sub>2</sub> entsteht

Inertgase,  
werden unverändert ein-  
und ausgeatmet

# Veränderungen des Kohlendioxidgehalts



Quelle: wikipedia  
"Kohlenstoffdioxid"

## Frage:

### Warum ist der Sauerstoffverbrauch beim CCR Tauchgerät unabhängig von der Tiefe?

Typisches Beispiel: Sauerstoffverbrauch unter Oberflächenbedingungen = 1 l/min = 1 bar\*l/min

- Oberflächenbedingungen (1 bar):  
Gasverbrauch = 1 l/min \* 1 bar = 1 bar\*l/min
- 10 m Tiefe (2 bar):  
Gasverbrauch = 0.5 l/min \* 2 bar = 1 bar\*l/min

## Antwort:

- Nur der verbrauchte Sauerstoff wird ergänzt
- Der Sauerstoffverbrauch hängt vom Stoffwechsel ab, und nicht von der Tauchtiefe
- höherer Umgebungsdruck  
-> unveränderter Sauerstoffverbrauch



## Frage:

### Warum ist der Gasverbrauch beim offenen Tauchsistem tiefenabhängig?

Typisches Beispiel: AMV = 20 l/min

- Oberflächenbedingungen (1 bar):  
Gasverbrauch = 20 l/min \* 1 bar = 20 bar\*l/min
- 10 m Tiefe (2 bar):  
Gasverbrauch = 20 l/min \* 2 bar = 40 bar\*l/min

## Antwort:

- Der Sauerstoffverbrauch hängt vom Stoffwechsel ab, und nicht von der Tauchtiefe
- Der Körper produziert CO<sub>2</sub> unabhängig von der Tiefe
- Der CO<sub>2</sub> Partialdruck ist daher tiefenunabhängig
- Das Atemzentrum reagiert auf den CO<sub>2</sub> Partialdruck
- Die Atemfrequenz und Atemtiefe bleibt gleich = AMV bleibt gleich
- höherer Umgebungsdruck  
→ größerer Gasverbrauch



## Physiologische Wirkungen des Sauerstoffs

### O<sub>2</sub> ist lebensnotwendig

- ▶ minimaler p (O<sub>2</sub>) = 0.16 bar

Nach Adaption auch deutlich weniger.  
Beispiel: Reinhold Messners Besteigung  
des Mount Everest ohne "künstlichen"  
Sauerstoff.

$$p(\text{O}_2) = 326 \text{ mbar} * 0.21 = 0.07 \text{ bar}$$

### Wirkungen der Hypoxie:

- bläuliche ("zyanotische") Hautfarbe
- Höhenkrankheit
- Kopfschmerzen
- Bewusstseinsbeeinträchtigung
- Ohnmacht
- Atemnot
- Muskelschwäche
- Tod



Reinhold Messner ([www.suedtirol.info](http://www.suedtirol.info))

## O<sub>2</sub> kann tödlich sein - die Dosis macht das Gift

- ▶ maximaler p (O<sub>2</sub>) = 1.6 bar

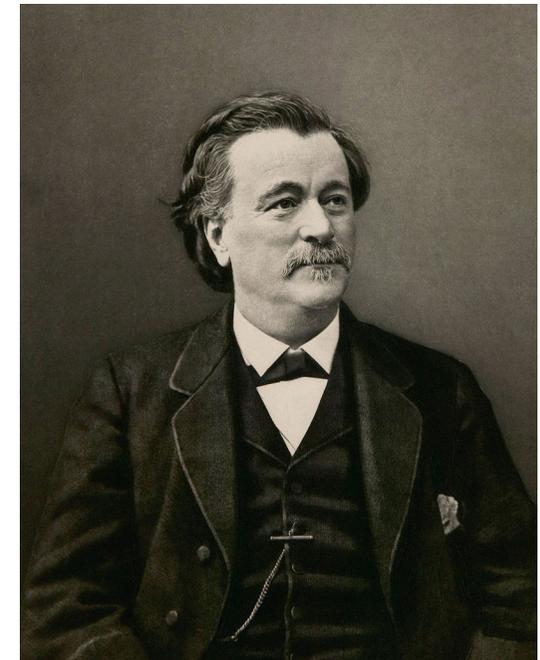
### Wirkungen der Hyperoxie:

"Paul Bert- Effekt" = Einfluss des erhöhten p (O<sub>2</sub>) auf das zentrale Nervensystem mit diesen Symptomen:

- Zittern, Lippenzittern
- **Muskelkrämpfe**
- Ohrgeräusche
- Tunnelblick
- Übelkeit
- Schwindel, Erbrechen
- Persönlichkeitsveränderungen
- Erregung, Angst, Verwirrtheit
- Bewusstlosigkeit

"Lorrain Smith-Effekt" = Einfluss des erhöhten p (O<sub>2</sub>) auf die Lunge mit Schädigung des Lungengewebes, mit diesem Symptomen:

- Übelkeit
- Müdigkeit
- Orientierungs- und **Leistungsschwäche**
- Schwindelgefühl
- niedrige Atemfrequenz, erhöhter Atemwiderstand
- **Lungenschmerzen**, Engegefühl in der Brustgegend.



Paul Bert 1878 (wikipedia)

## Der maximal tolerierbare p (O<sub>2</sub>) ist schwer zu fassen:

Bis etwa 1940 galten sehr hohe Obergrenzen für den p (O<sub>2</sub>):

- 4 bar für 30 min (!)
- 3 bar für 3 Stunden (!)

Spätere Versuche (während des 2. Weltkriegs [Donald, 1947a und b]) ergaben neue Erkenntnisse:

- Die Sauerstoffvergiftung ist extrem variabel
- Es gibt gute und schlechte Verträglichkeiten
- Die gleiche Versuchsperson kann den erhöhten p (O<sub>2</sub>) mal gut vertragen, dann mal wieder schlecht (tagesform-abhängig).
- "kleinster gemeinsamer Nenner"  
= sichere Grenze 1.76 bar  
= 25 ft = 7.6 m mit reinem O<sub>2</sub>



fig. 1 aus Donald (1947, part 1, wikipedia)

## Und heute? - Moderne Strategien zur Quantifizierung des erhöhten p(O<sub>2</sub>):

Der maximale p (O<sub>2</sub>) hängt von der Dauer der Einwirkung ab.

Kurzzeitverträglichkeit ("Paul-Bert-Effekt"):

- **CNS Uhr der NOAA:**  
100 % O<sub>2</sub> Belastung werden erreicht bei:  
1.3 bar → 3 Stunden  
1.6 bar → 45 Minuten
- Empfohlener Maximalwert p (O<sub>2</sub>) = 1.6 bar
- Nebenbemerkung: NOAA rechnet mit atm:  
1 atm = 1.013 bar

Langzeitverträglichkeit ("Lorrain Smith-Effekt"):

- Konzept der **OTU (= Oxygen Tolerance Unit)**.  
Auch: "REPEX Verfahren" (Hamilton, 1989)  
1 Tag → OTU(max) = 850 → OTU/Tag = 850  
1 Woche → OTU(max) = 2660 → OTU/Tag = 380
- Maximale Dauerbelastung:  
p (O<sub>2</sub>) = 0.5 bar (wahrscheinlich)

NOAA = National Oceanic and Atmospheric Administration  
Wetter- und Ozeanografiebehörde der USA

oben: JJ-CCR Manual (2011)  
unten: Hamilton (1989)

pO <sub>2</sub> bar	O <sub>2</sub> Einzel- Exposition	
	Min.	Std.
1,6	45	0,75
1,5	120	2,0
1,4	150	2,5
1,3	180	3,0
1,2	210	3,5
1,1	240	4,0
1,0	300	5,0
0,9	360	6,0
0,8	450	7,5
0,7	570	9,5
0,6	720	12,0

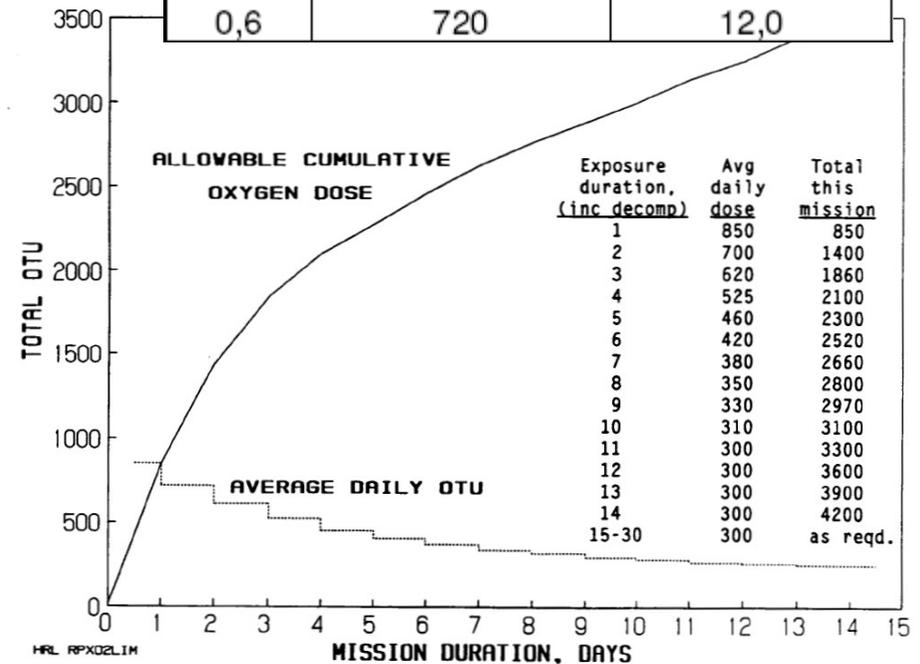
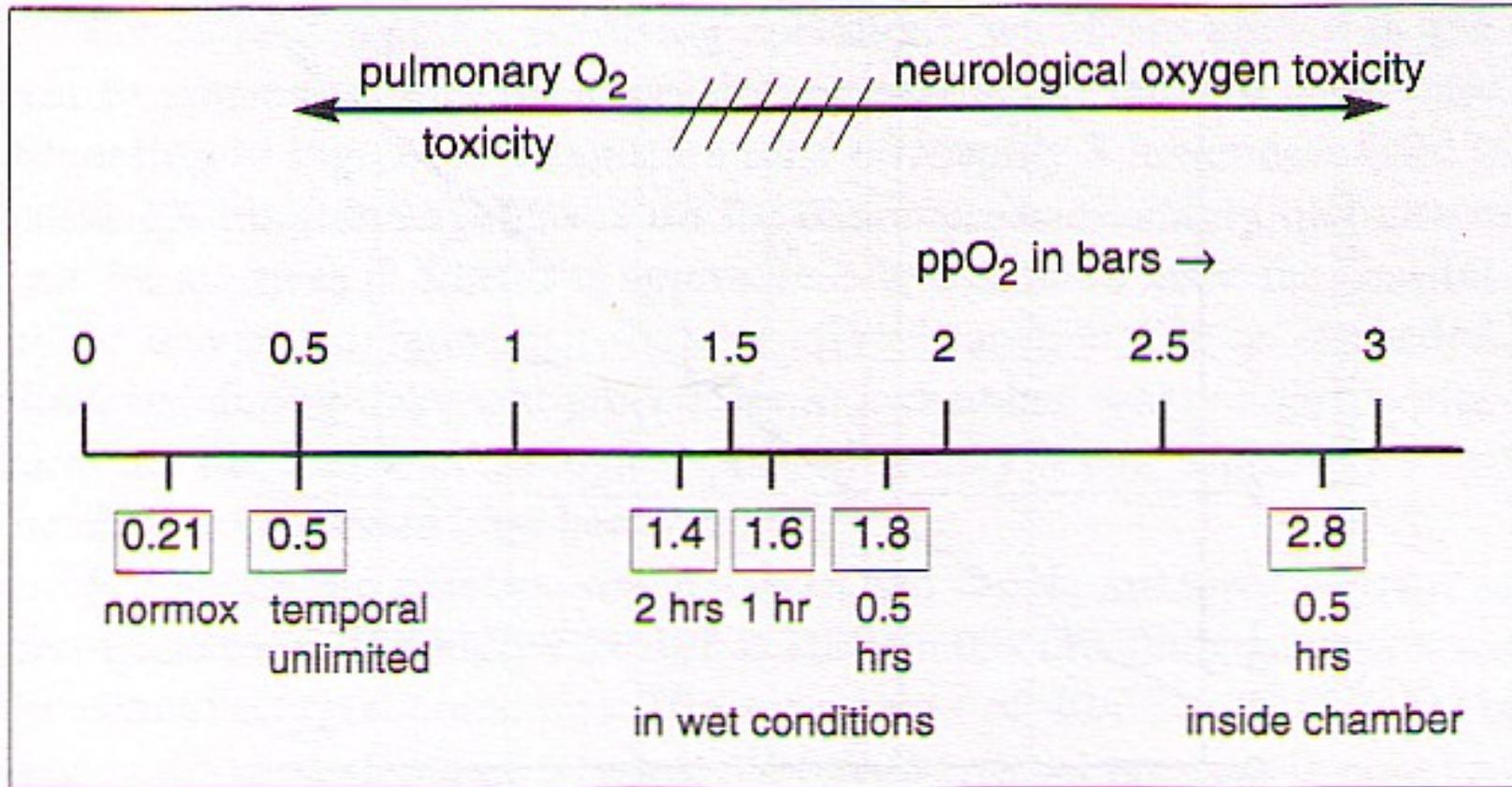


Figure 1. Repex oxygen exposure limits. The line shows the total allowable oxygen exposure in OTUs as of each day in a multiday exposure ("mission"). The lower line shows average daily limit to yield the curve. The chart contains the same values (from Hamilton, Kenyon, Peterson, Butler, Beers 1988).

## Maximaler $p(O_2)$ als Funktion der Einwirkzeit



**Fig. 5.5** Oxygen partial pressures and tolerable exposure times

Lettnin (2001): International Handbook of Mixed Gas Diving

## Stickstoff

Stickstoff ist ...

- $N_2$
- Hauptbestandteil unserer Atemluft (78 %, je nach Wasserdampfgehalt)
- Inertgas = nimmt nicht an Austauschvorgängen im Körper teil

### Inertgas-Narkose

Wirkung auf Nervenzellen, Symptome:

- eingeschränktes Urteilsvermögen, Selbstüberschätzung
- Euphorie, Angst, Halluzinationen
- nachlassende Denkfähigkeit

Beim Tauchen mit Luft:

- erste Effekte ab ca. 30 m Tiefe  
 $p(N_2) = 3.2 \text{ bar}$
- ab etwa 60 m Tiefe deutliche Einschränkung der intellektuellen Fähigkeiten  
 $p(N_2) = 5.5 \text{ bar}$
- Limitierung von Luft-Tauchgängen meist auf 50 m
- "40 m sind genug"
- Therapie: höher tauchen

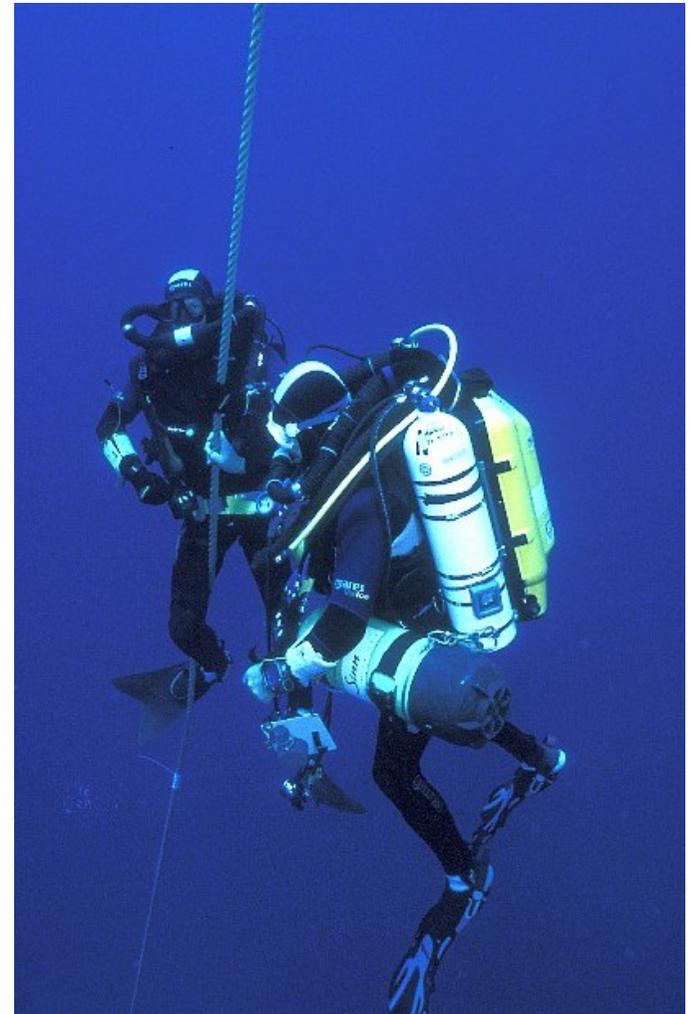
➔ **Tieftauchgänge: Stickstoff durch anderes Inertgas ersetzen**



## Helium

Helium ist ...

- He
- Edelgas, nimmt an keinen chemischen Reaktionen teil
- Inertgas
- 7.2 mal leichter als Luft (Dichte = 0.179 g/l unter Normalbedingungen)
- 6 mal besser wärmeleitend als Luft (Wärmeleitfähigkeit = 0.15 W/m/K)
- auf der Erde selten  
(Gehalt in der Atmosphäre = 5 ppm = 0.0005 %)
- wird aus Erdgas gewonnen  
(kommt in manchen Erdgasen mit bis zu 7 Vol % vor)
- nach Wasserstoff (H<sub>2</sub>) das häufigste Element im Universum



## Tauchen mit He im Atemgas im Vergleich zu N<sub>2</sub>

- Narkosewirkung wesentlich geringer (Faktor 0.235)  
END = equivalent narcosis depth  
= equivalent nitrogen depth
  - Atemarbeit optimiert (geringere Dichte 0.18 g/l, N<sub>2</sub>: 1.25 g/l)
  - HPNS = High Pressure Nervous Syndrome  
oft beobachtet bei Tiefen > 200 m und hohen Abstiegsgeschwindigkeiten  
Symptome:
    - Zittern der Hände oder am ganzen Körper
    - Sehstörungen
    - Müdigkeit
    - Übelkeit
  - Sprachverzerrung
  - größere Auskühlung bei der Verwendung als Anzuggas  
**aber: keine größere Auskühlung über die Atmung**
  - schnellere Sättigung/Entsättigung gegenüber N<sub>2</sub>
    - Halbwertszeiten N<sub>2</sub>: 4 min .. 635 min
    - Halbwertszeiten He: 1.5 min .. 240 min
- ➔ veränderte Dekompressionsberechnungen
- ➔ **Gegendiffusion (He ↔ N<sub>2</sub>) kann ein Problem sein**



## Gasgemische beim Technischen Tauchen

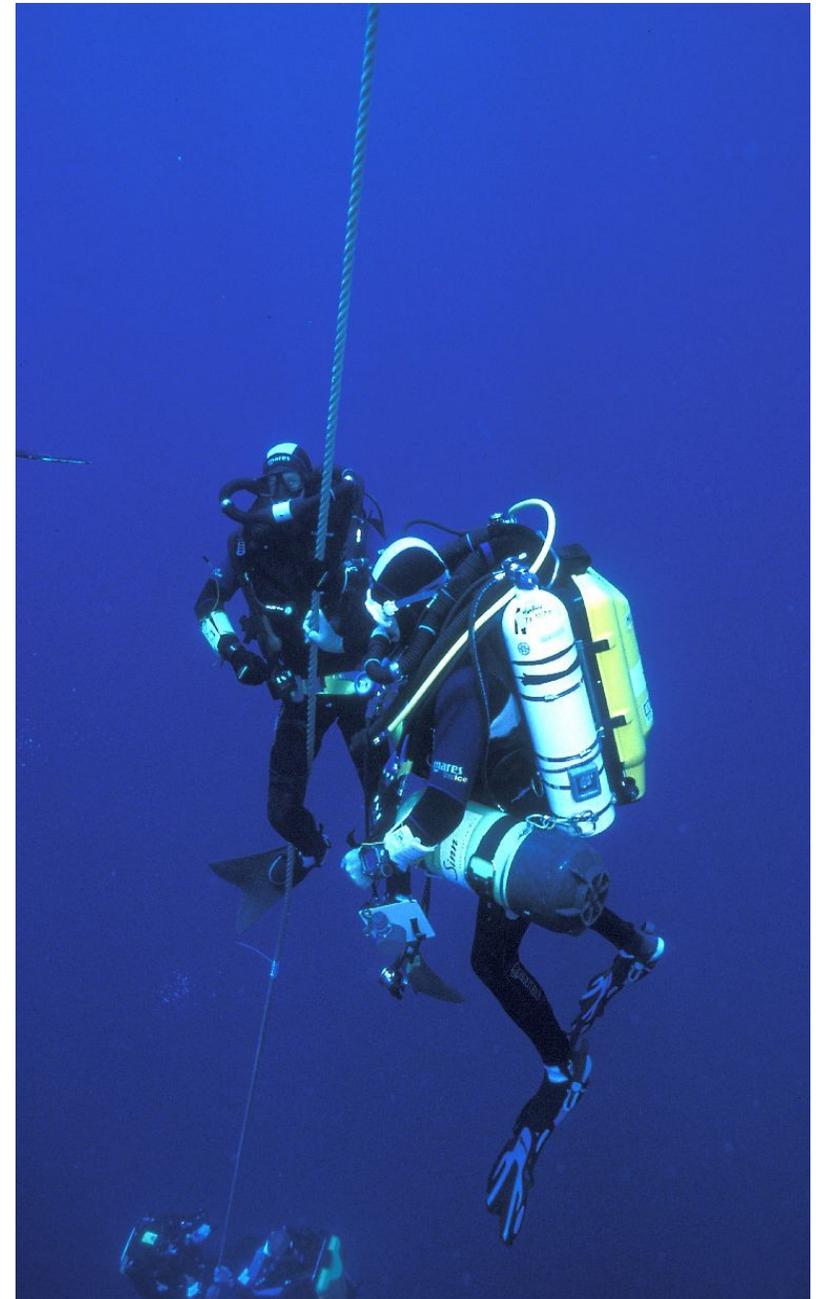
Gas	O2 (%)	N2 (%)	He (%)	Verwendung für ...
Luft	21	78	0	Sporttauchen Diluent beim CCR einfach und billig
Sauerstoff	100	0	0	Deko-Gas CCR
Nitrox	> 21	< 78	0	Nitrox Tauchen <ul style="list-style-type: none"> <li>• "Safe Air" für höhere Sicherheitsreserven</li> <li>• oder längere Tauchzeiten</li> </ul> Deko-Gas Diluent bei SCR
TriOx	> 21	< 78	> 0	Nitrox Tauchen ohne Narkosewirkung
Trimix (normoxisch)	21	< 78	> 0	Tauchen ohne Narkosewirkung
Trimix	< 21	< 78	> 0	Technisches Tauchen in großen Tauchtiefen Vermeidung der Stickstoff- Narkose
Trimix Beispiel: Tx 12/65	12	23	65	<b>Technisches Tauchen</b> <b>Vermeidung der Stickstoff- Narkose</b> <b>Einsatztiefe 6 m .. 90 m</b>

## Teil 2

### Grundlagen der Dekompression

#### “Eine kurze Geschichte der Dekompressionsforschung”

1838 - 1907	Von den Helmtauchern zur ersten Dekotabelle Haldane, Halbsättigungszeiten
1958	U.S. Navy Dekotabellen
1983	Albert Bühlmann
1986	VPM und RGBM: Blasenmodelle
1988 - 1992	Tiefenrekorde im Sättigungstauchen
1996	Deep Stops
1998	Gradienten-Faktoren
seit ~ 2000	Sättigungsmodelle ↔ Blasenmodelle
2015	Empfehlung von Simon Mitchell für Technische Tauchgänge “Recreational Technical Diving”

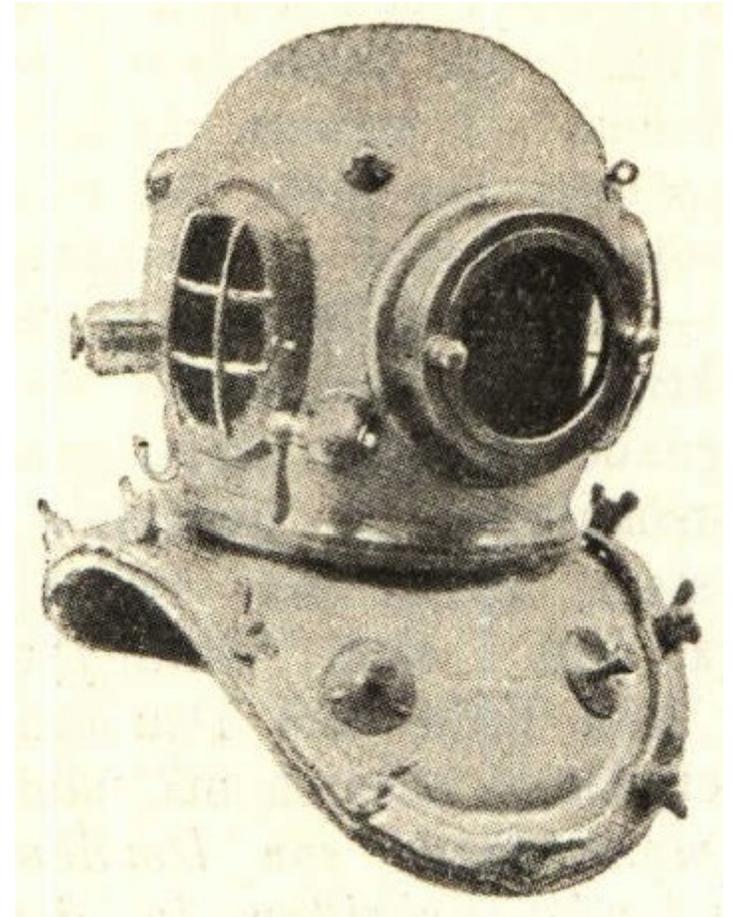


## 1838 - Helmtaucher

Der deutschstämmige Augustus Siebe erfindet die Helmtaucher-Ausrüstung, wie sie im Prinzip noch heute in Gebrauch ist.

Schon bald gab es die ersten Tauchunfälle mit Lähmungserscheinungen der Taucher.

Bei griechischen Schwammtauchern waren Lähmungen eine Art Berufskrankheit.



Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Helmtaucher>

## 1870 - Brückenbau mit Caissons

Seit ca. 1870 wurden Arbeiten unter Wasser in Senkkästen (französisch: Caissons) durchgeführt. Mit Hilfe von Caissons wurden ursprünglich die Fundamente von Brückenpfeiler betoniert.

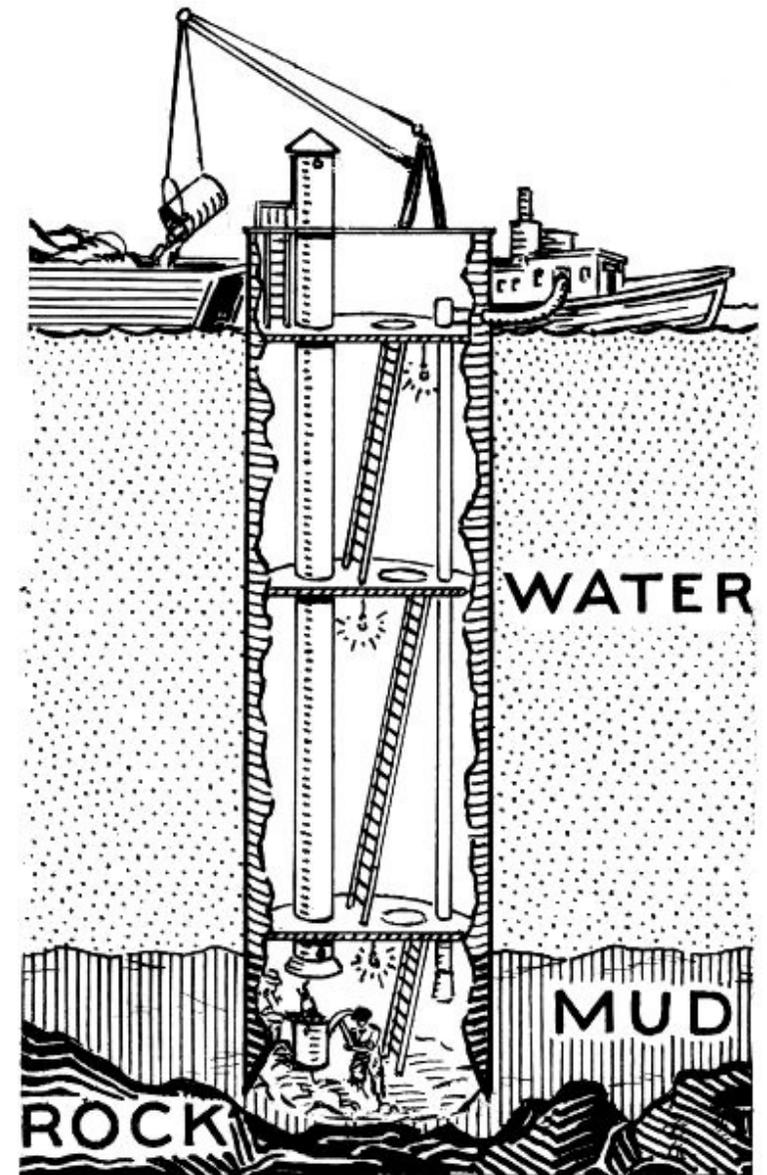
Seit dieser Zeit traten immer wieder Probleme bei den Arbeitern auf, die als damals als "Caisson-Krankheit" bezeichnet wurden.

Beispiel:

1984 beim Bau der U-Bahn-Tunnels in München: 2227 Caisson-"Tauchgänge" mit 51 Arbeitern.

- Davon hatten 14 einmalig einen Dekompressionsunfall und
- 12 mehrmalig.
- Übergewichtige waren besonders empfindlich.
- Jeweils Mittwochs ergab sich eine Häufung der Beschwerden.

(Quelle: [http://www.divetable.de/skripte/Deko\\_Manual.pdf](http://www.divetable.de/skripte/Deko_Manual.pdf), Seite 99).



Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Caisson>

## 1878 - Die erste Erforschung der Dekompressionskrankheit

Der französische Arzt Paul Bert erkannte die schnelle Druckentlastung als Ursache für die Caisson-Krankheit. Er untersuchte als Erster die Wirkungen verschiedener Gase unter Druck. Er erforschte die Rolle von Stickstoff als Verursacher der Caissonkrankheit und die Gefährlichkeit von reinem Sauerstoff als Atemgas ("Paul-Bert-Effekt").

Zur Vorbeugung der Caissonkrankheit empfahl Bert eine langsame Anpassung an den Umgebungsdruck.

- Dekompressionszeit von 20 Minuten pro bar Druckentlastung.

Heute werden die folgenden Begriffe mit gleicher Bedeutung verwendet:

- Caissonkrankheit
- Taucherkrankheit
- Dekompressionskrankheit
- Dekounfall
- Druckfallkrankheit
- Decompression Sickness = DCS



Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Paul\\_Bert](http://de.wikipedia.org/wiki/Paul_Bert)

## 1907 - Die ersten Dekompressionstabellen von John Scott Haldane

Die Royal Navy wollte die Sicherheit ihrer Helmtauchereinsätze verbessern. Sie beauftragte den Physiologen John Scott Haldane mit der Erforschung der Taucherkrankheit und der Erstellung von Austausch Tabellen. Haldane verwendete Ziegen als Versuchstiere, die er in einer Druckkammer bis auf 60 m Tiefe brachte. Haldane fand damals schon heraus, dass magere Ziegen weniger empfindlich auf Druckentlastungen reagierten als fette Ziegen. Das brachte ihn zu der Annahme von unterschiedlichen Gewebetypen, die sich unterschiedlich schnell sättigen und entsättigen. Für Haldane war die Art der Durchblutung der entscheidende Faktor.

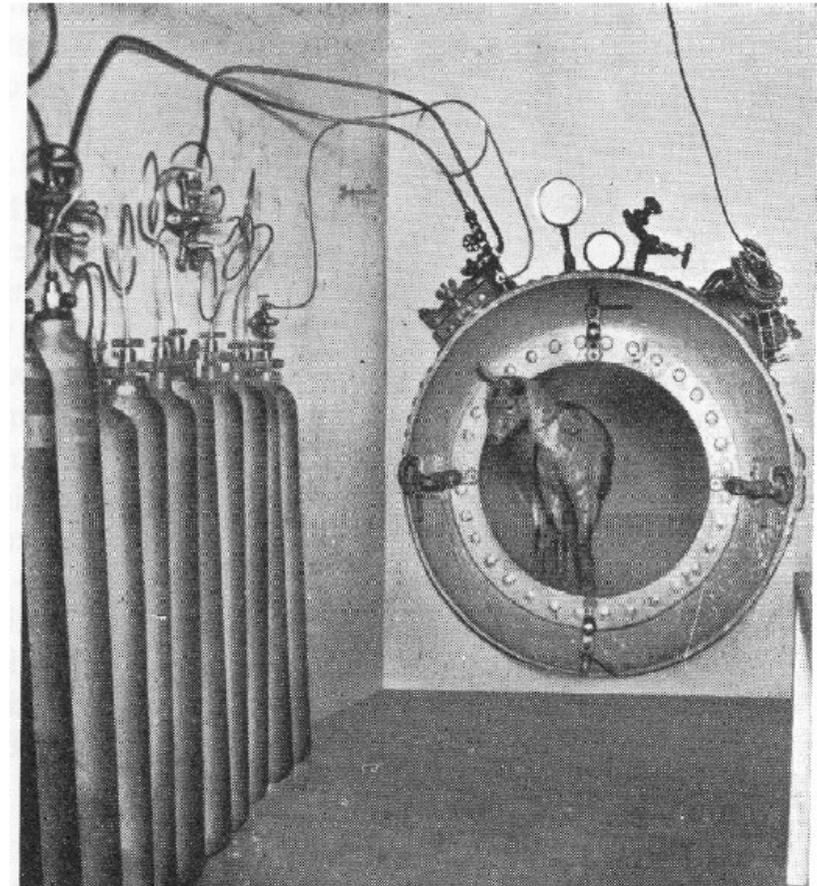
Haldane baute auf damals bereits bekannten Grundlagen auf:

- **Gesetz von Dalton** (John Dalton 1805):  
Der Gesamtdruck eines Gases setzt sich aus der Summe der Teildrücke (Partialdrücke) der Gaskomponenten zusammen.

Beispiel für Luft:

100 %	= 21 %	O <sub>2</sub>	+ 79 %	N <sub>2</sub>
1 bar	= 0.21 bar	O <sub>2</sub>	+ 0.79 bar	N <sub>2</sub>

- **Gesetz von Henry** (William Henry 1803):  
Die Konzentration eines Gases in einer Flüssigkeit ist direkt proportional zum Partialdruck des entsprechenden Gases über der Flüssigkeit.



Quelle: [http://www.divetable.de/skripte/Deko\\_Manual.pdf](http://www.divetable.de/skripte/Deko_Manual.pdf)

Haldane fand die Grundlagen heraus, die in weiterentwickelter Form noch heute gültig sind:

- Sättigungs- und Entsättigungsberechnung durch **exponentielle Funktionen**.
- Berechnung durch 5 verschiedene Sättigungs- und Entsättigungsgeschwindigkeiten (**Halbsättigungszeiten** zwischen 5 min und 75 min).
- Konzept des "maximal erlaubten Überdrucks" mit dem **Haldane-Faktor 2.0**.
- Konzept der stufenweisen Dekompression auf Tiefen im Abstand von 10 Fuß = **3 Meter**
- Aufstiegsgeschwindigkeit 1 Fuß/s = **18 m/min**

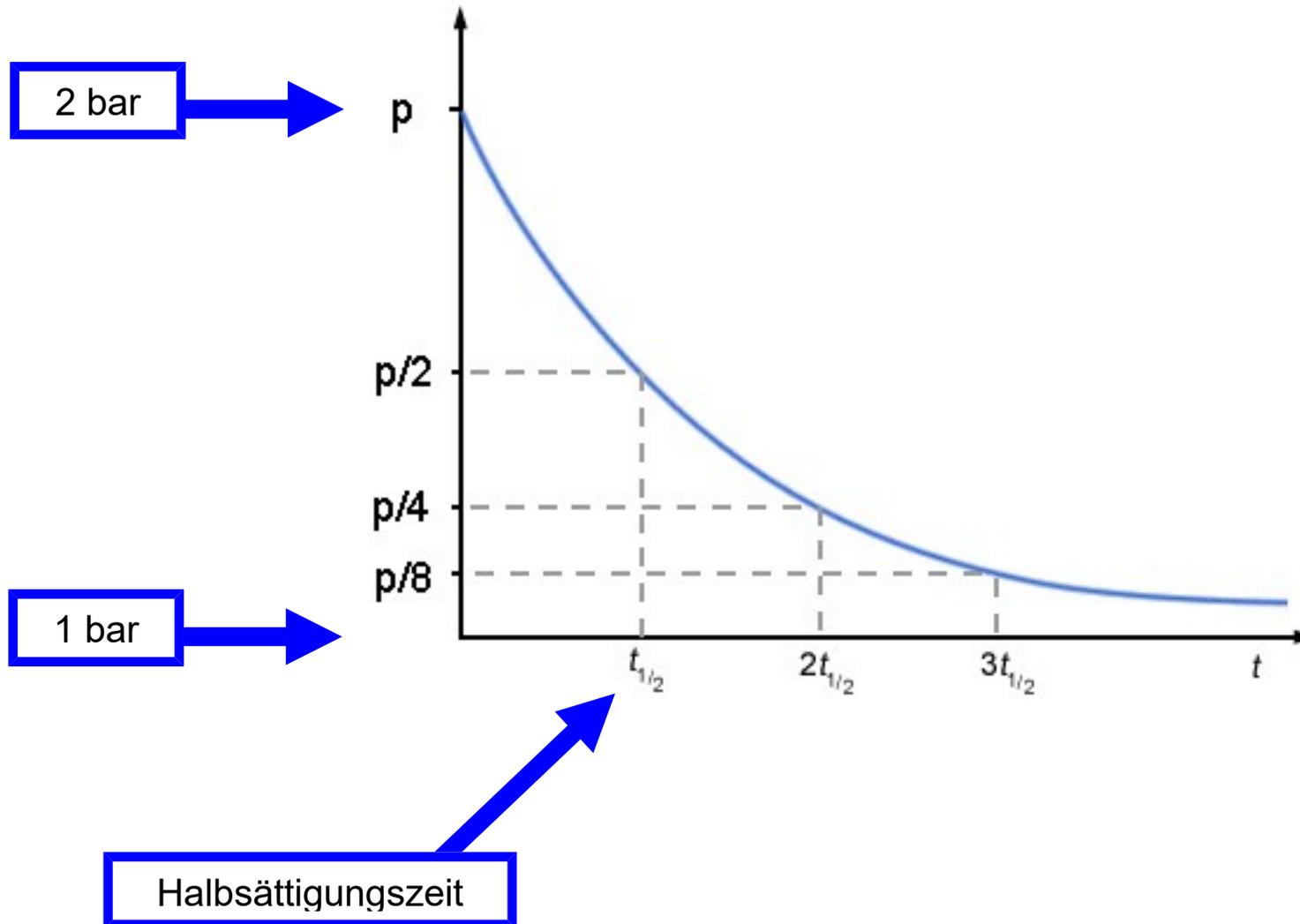
**Austauch-Tabelle I.\***  
Stufenaufenthalte eines Tauchers während des Aufstieges bei Annahme normaler Aufenthaltszeiten am Grunde:

Tiefe in m	Druck in kg per cm <sup>2</sup>	Zeitintervall vom Tauchbeginn bis zum Beginn des Aufstieges	Beläufige Zeit bis zur ersten Stufe	Aufenthalt in Minuten während des Aufstieges in						Gesamtzeit des Aufstieges in Minuten	
				18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m		
0 - 10,97	0 - 1,13	Keine Grenze	—	—	—	—	—	—	—	0-1	
10,97 - 12,80	1,13 - 1,29	Über 3 Stunden	1	—	—	—	—	—	—	8	
12,80 - 14,63	1,29 - 1,48	Bis 1 Stunde	—	—	—	—	—	—	—	14	
		Über 1-3 Stunden	1 1/2	—	—	—	—	—	5	6 1/2	
14,63 - 16,46	1,48 - 1,69	Über 3 Stunden	1 1/2	—	—	—	—	—	—	10	11 1/2
		Bis 1/2 Stunde	—	—	—	—	—	—	—	—	2
		1/2 - 1 1/2 Stunden	2	—	—	—	—	—	5	7	7
		1 1/2 - 3 Stunden	2	—	—	—	—	—	10	12	12
16,46 - 18,29	1,69 - 1,86	Über 3 Stunden	2	—	—	—	—	—	—	20	22
		Bis 20 Minuten	—	—	—	—	—	—	—	—	2
		20-45 Minuten	2	—	—	—	—	—	5	7	7
		3/4 - 1 1/2 Stunden	2	—	—	—	—	—	10	12	12
18,29 - 20,11	1,86 - 2,08	1 1/2 - 3 Stunden	2	—	—	—	—	—	5	15	22
		Über 3 Stunden	2	—	—	—	—	—	10	20	32
		Bis 1/4 Stunde	2	—	—	—	—	—	—	—	2
		1/4 - 1/2 Stunde	2	—	—	—	—	—	5	7	7
		1/2 - 1 Stunde	2	—	—	—	—	—	3	10	15
		1 - 2 Stunden	2	—	—	—	—	—	5	15	22
20,11 - 21,95	2,08 - 2,25	2 - 3 Stunden	2	—	—	—	—	—	10	20	32
		Bis 1/4 Stunde	2	—	—	—	—	—	—	—	2
		1/4 - 1/2 Stunde	2	—	—	—	—	—	3	5	10
		1/4 - 1 Stunde	2	—	—	—	—	—	5	12	19
21,95 - 23,77	2,25 - 2,42	1 - 2 Stunden	2	—	—	—	—	—	10	20	32
		Bis 20 Minuten	2	—	—	—	—	—	—	—	5
		20-45 Minuten	2	—	—	—	—	—	5	10	17
		3/4 - 1 1/2 Stunden	2	—	—	—	—	10	20	32	

Quelle:

Stelzner, Tauchertechnik - Handbuch für Taucher - Lehrbuch für Taucheranwärter, Lübeck 1931. Quelle: <http://www.seveke.de/tauchen/download/2tab-hist-tab.htm>.

## Die Halbsättigungszeit



## 1958 - Die US Navy Tabellen

Der nächste große Entwicklungsschub ging von der amerikanischen Marine aus. Die US Navy erfasste ca. 16'000 Tauchgänge und analysierte das Auftreten von Dekompressionsproblemen. Die US Navy Tabellen waren damit statistisch sehr gut abgesichert.

Diese Tauchtabellen waren die Standardvorgaben in der Boom-Zeit des Sporttauchens, sie wurden auch vom VDST bis 1984 als offizielle Lehrmeinung verbreitet.

9	30	B				
	45	C				
	60	D				
	75	E				
	95	F				
	120	G				
10.5	15	B				
	25	C				
	40	D				
	50	E				
	60	F				
	80	G				
	100	H				
	120	I				
	140	J				
	12	15	B			
25		C				
30		D				
40		E				
50		F				
70		G				
80		H				
100		I				
110		J				
130		K				
170	M					
10	55				I	
	60				J	
	70	2			K	
	80	7			L	
	100	14			M	
21	10				C	
	15				D	
	20				E	
	30				F	
	35				G	
	40				H	
	45				I	
	50				J	
	60	8			K	
	70	14			L	
80	18			M		
24	10				C	
	15				D	
	20				E	
	25				F	
	30				G	
	35				H	
	40				I	
	50	10			K	
	60	17			L	
	70	23			M	
33	60	9	28		N	
	10				D	
	13				E	
	15				F	
	20				G	
	25		3		H	
	30		7		J	
	40	2	21		L	
	50	8	26		M	
	60	18	36		N	
36	10				D	
	12				E	
	15				F	
	20		2		H	
	25		6		I	
	30		14		J	
	40	5	25		L	
	50	15	31		N	
	39	8				D
		10				E
15			1		F	
20			4		H	
25			10		J	
30		3	18		M	
40		10	25		N	
48		15		1	4	H
		20		3	11	J
		25		7	20	K
	30	2	11	25	M	
	40	7	23	39	N	
51	5				D	
	10			2	F	
	15		2	5	H	
	20		4	15	J	
	25	2	7	23	L	
	30	4	13	26	M	
54	5				D	
	10			3	F	
	15		3	6	I	
	20	1	5	17	K	
	25	3	10	24	L	
	30	6	17	27	N	
57	5				D	
	10		1	3	G	
	15		4	7	I	
	20	2	6	20	K	
	25	5	11	25	M	
<b>US Navy Austausch-tabelle</b>						

Oberflächenpause (h. min) ▶✈															
N	0.10	0.24	0.39	0.54	1.11	1.30	1.53	2.18	2.47	3.22	4.04	5.03	6.32	9.43	12.0
M		0.10	0.25	0.42	0.59	1.18	1.39	2.05	2.34	3.06	3.52	4.49	6.18	9.28	12.0
L			0.10	0.26	0.45	1.04	1.25	1.49	2.19	2.53	3.36	4.35	6.02	9.12	12.0
K				0.10	0.28	0.49	1.11	1.35	2.03	2.38	3.21	4.19	5.48	8.58	12.0
J					0.10	0.31	0.54	1.19	1.47	2.20	3.04	4.02	5.40	8.40	12.0
I						0.10	0.33	0.59	1.29	2.02	2.44	3.43	5.12	8.21	12.0
H															
G															
F															
E															
D															
C															
B															
A															

Wiederholungstauchgang Tauttiefe (m)	12	213	187	161	138	11
	15	142	124	111	99	8
	18	107	97	88	79	7
	21	87	80	72	64	5
	24	73	68	61	54	4
	27	64	58	53	47	4
	30	57	52	48	43	3
	33	51	47	42	38	3
	36	46	43	39	35	3
	39	40	38	35	31	2
42	38	35	32	29	2	
45	35	32	30	27	2	
48	33	31	28	26	2	
51	31	29	26	24	2	
54	29	27	25	22	20	
57	28	26	24	21	19	

Zeitzuschlag (min)										
	18	16	14	12	10	8	6	4	2	
	17	15	13	11	10	8	6	4	2	

**Verband Deutscher Sporttaucher e.V.**  
 Schloßstr. 2-6 · 2000 Hamburg 70 · Tel. 040/68 63 64

**Grundlagen der US-Navy Tauchtabellen:**

- 6 Gewebetypen mit unterschiedlichem Sättigungsverhalten (Halbsättigungszeiten von 5 min bis 120 min)
- Übersättigungstoleranzen sind jetzt vom Gewebe abhängig, nicht mehr konstant wie bei Haldane
- Luft als Atemgas
- Berechnung von Wiederholungstauchgängen
- Neuer Begriff "Nullzeit"
- Aufstiegs geschwindigkeit 18 m/min
- Varianten:
  - > VDST Standard-Tabelle für Sporttaucher bis 57 m
  - > US Navy erweiterte Tabellen bis 90 m
  - > Tabelle für Frauen mit verlängerten Dekozeiten
  - > Bergsee-Tabellen

Tauchtiefe	Tauchzeit	Wiederholungsgruppe
m	min	
3	60	A
	120	B
	210	C

Tauchtiefe	Tauchzeit	Sättigungsgruppen	Wiederholungsgruppe
m	min	3	
	15		C
	25		D
	30		E
	40		F

Tauchtiefe	Tauchzeit	Dekozeit	Wiederholungsgruppe
m	min	6 3	
	10		C
	12		D
	15		E
	20		F

Tauchtiefe	Tauchzeit	Dekozeit	Wiederholungsgruppe
m	min	9 6 3	
	5		C
	7		D
	10		E
	15	2	G
	20	6	I
	25	2 14	J
	30	5 21	K
	40	2 16 26	N

Tauchtiefe	Tauchzeit	Dekozeit	Wiederholungsgruppe
m	min		
	5		C
	10	1	E
	15	3	G
	20	2 7	H
	25	4 17	K
	30	8 24	L
	40	5 19 33	N

Tauchtiefe	Tauchzeit	Dekozeit	Wiederholungsgruppe
m	min		
	5		D
	10	1	F
	15	1 4	H
	20	3 11	J
	25	7 20	K
	30	2 11 25	M
	40	7 23 39	N

Tauchtiefe	Tauchzeit	Dekozeit	Wiederholungsgruppe
m	min		
	5		D
	10	2	F
	15	2 5	H
	20	4 15	J
	25	2 7 23	L
	30	4 13 26	M

Tauchtiefe	Tauchzeit	Dekozeit	Wiederholungsgruppe
m	min		
	5		D
	10	3	F
	15	3 6	I
	20	1 5 17	K
	25	3 10 24	L
	30	6 17 27	N

Tauchtiefe	Tauchzeit	Dekozeit	Wiederholungsgruppe
m	min		
	5		D
	10	1 3	G
	15	4 7	I
	20	2 6 20	K
	25	5 11 25	M

Tauchtiefe	Tauchzeit	Dekozeit	Wiederholungsgruppe
m	min		
	8		D
	10		E
	15	1	F
	20	4	H
	25	10	J
	30	3 18	M
	40	10 25	N

Tauchtiefe	Tauchzeit	Dekozeit	Wiederholungsgruppe
m	min		
	10		C
	15		D
	20		E
	25		F
	30		G
	35		H
	40		I
	50	10	K
	60	17	L
	70	23	M

Tauchtiefe	Tauchzeit	Dekozeit	Wiederholungsgruppe
m	min		
	40	5 25	L
	50	15 31	N

Tauchtiefe	Tauchzeit	Dekozeit	Wiederholungsgruppe
m	min		
	8		D
	10		E
	15	1	F
	20	4	H
	25	10	J
	30	3 18	M
	40	10 25	N

US Navy Austausch-tabelle

## 1983 - Albert Bühlmann

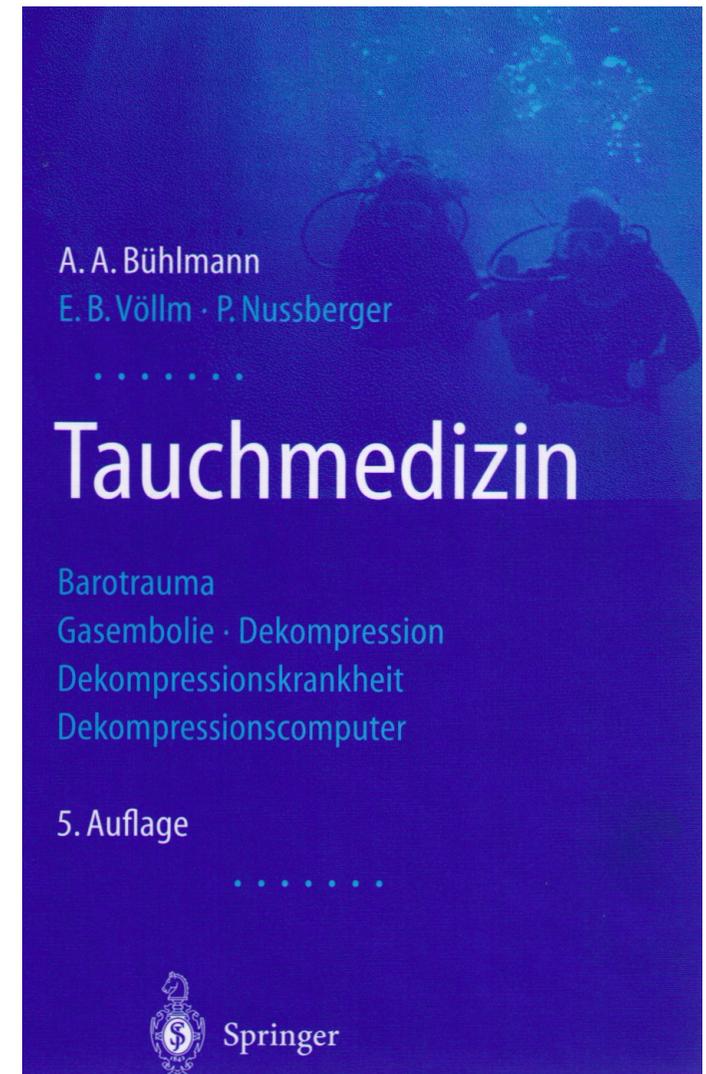
Prof. Albert Bühlmann (1923 - 1994) war ab 1960 der Leiter des Druckkammerlabors am Universitätskrankenhaus in Zürich. Er hat durch sehr viele Druckkammerversuche und echte Tauchgänge mit Freiwilligen und die Dekompressionsforschung entscheidend weiter entwickelt. Im Gegensatz zur US Navy (gut trainierte junge Männer) untersuchte er "normale" Sporttaucher beiderlei Geschlechts.

Der VDST führte nach 1984 neue Tauchtabeln ein, die von Max Hahn mit den Bühlmann-Werten berechnet wurden.

- > Deco 92
- > Deco 2000

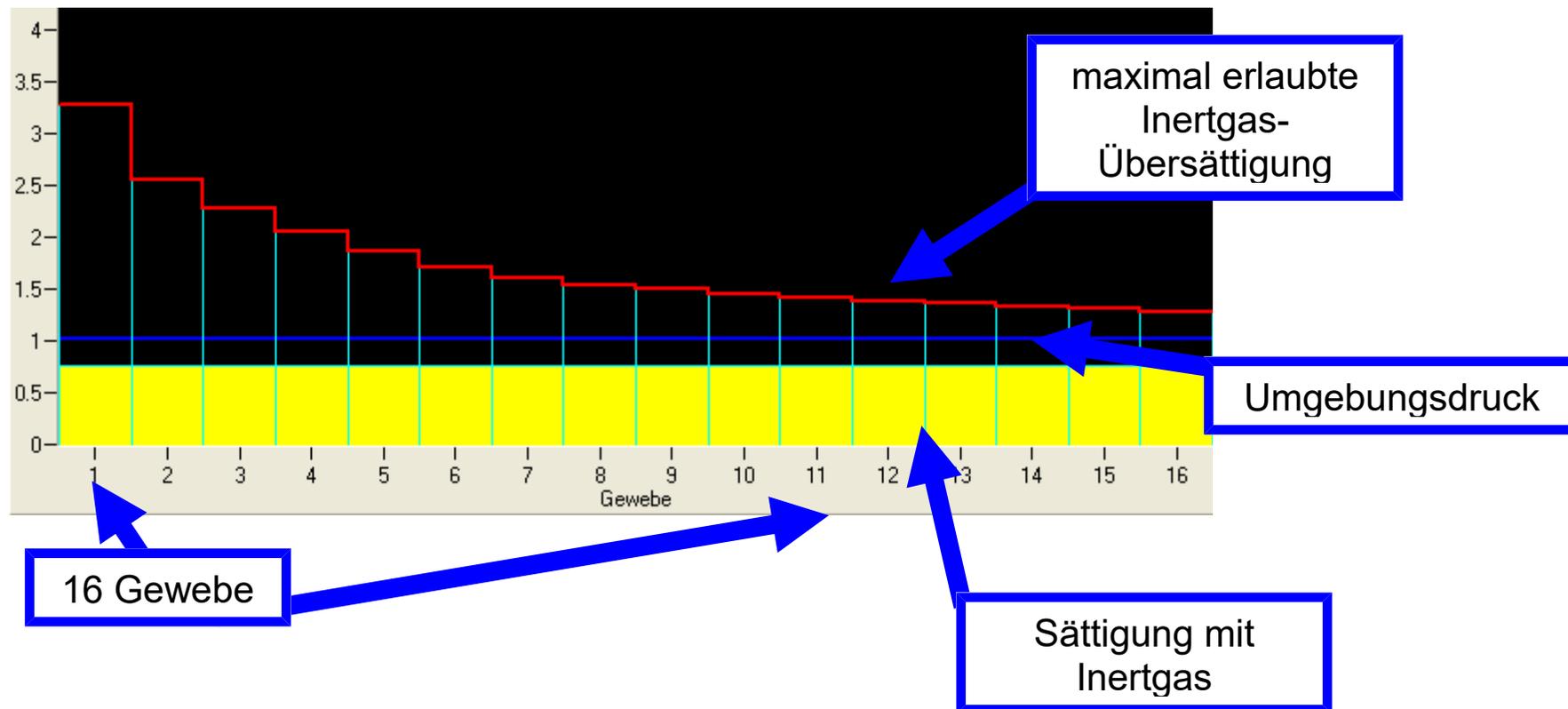
Aktuelle Ausgabe:

Bühlmann A. A., Völlm E. B. & Nussberger P. (2002): Tauchmedizin.  
5. Auflage, Springer-Verlag. 29.95 €.



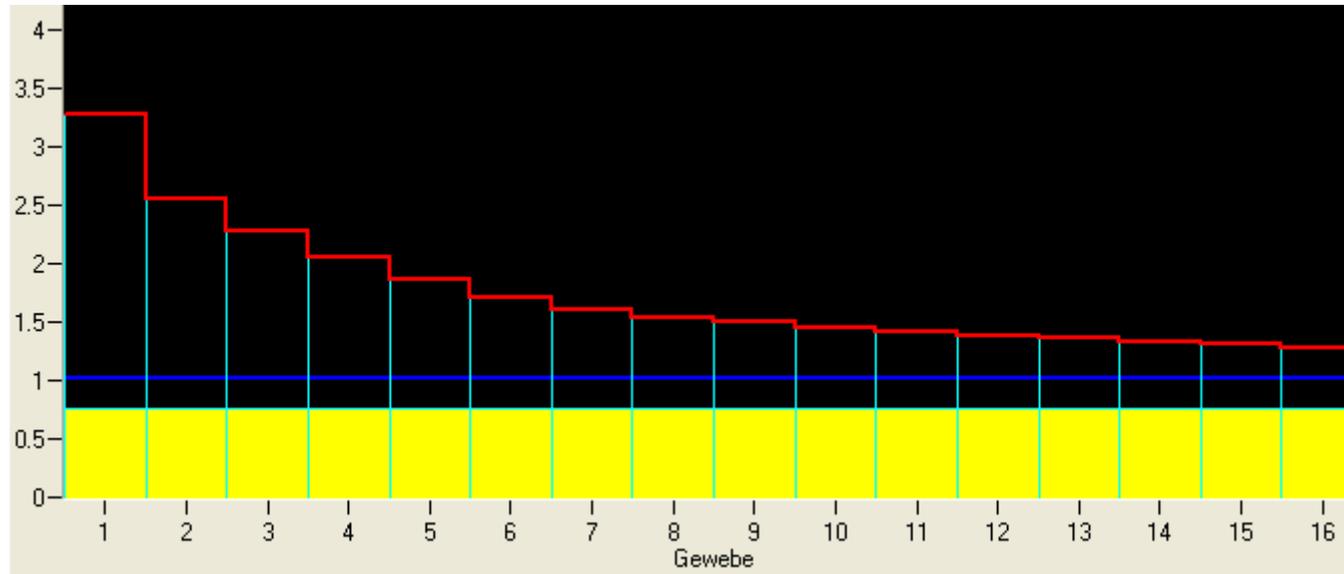
## Die wichtigsten Punkte:

- Erweiterung auf 16 Gewebe mit Halbsättigungszeiten zwischen 4 min und 635 min.
- Geringere Übersättigungstoleranzen
- Geringere Aufstiegs geschwindigkeit 10 m/min
- Zusätzlich: "Risikotaucher" mit höherem DCS Risiko
- Bergsee-Tauchgänge und Wiederholungstauchgänge
- Tauchgänge auch mit anderen Inertgasen als Stickstoff (Wasserstoff, Helium)
- Das Bühlmann Modell ZHL-16 ist vollständig dokumentiert und deswegen Grundlage vieler Dekompressionsprogramme (für PCs und Tauchcomputer)



## Zuordnung von Modellgeweben zu Körperorganen

Aus der Analyse der Symptome nach Dekompressionsunfällen ergibt sich lt. Bühlmann:



1 ..... 4  
Gehirn  
Rückenmark

9 ..... 12  
Muskulatur

5 ..... 11  
Haut

13 ..... 16  
Gelenke  
(Bänder,  
Knorpel,  
Knochen)

## Grundlagen der Dekompensationsberechnung nach Bühlmann

### (a) Sättigung und Entsättigung

Mathematische Schreibweise nach Bühlmann:

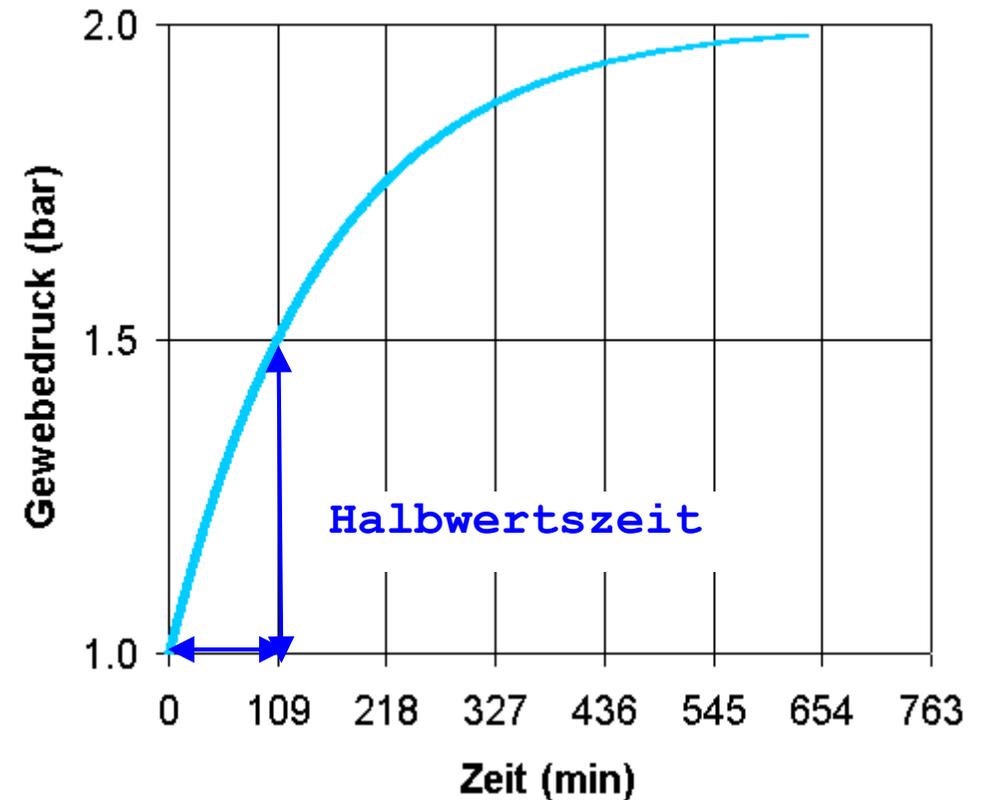
$$p(t) = p_0 + [p_A - p_0] * [1 - 2^{(-t/T)}]$$

$p(t)$  = Inertgasdruck im Gewebe  
zum Zeitpunkt  $t$

$p_0$  = Inertgasdruck im Gewebe  
zum Zeitpunkt  $t_0$   
(am Anfang der Berechnung)

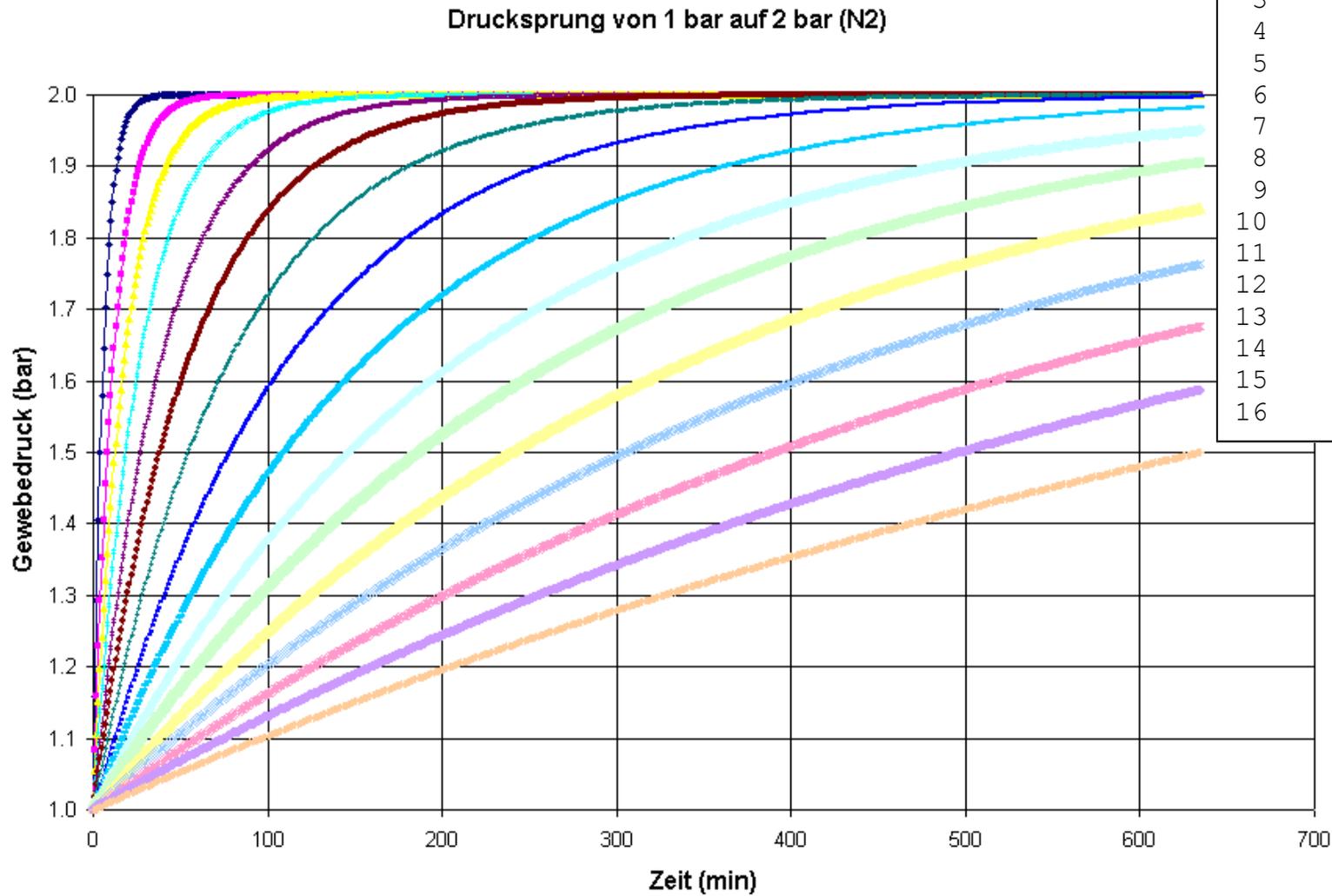
$[p_A - p_0]$  = Differenz der Inertgasdrücke  
zwischen Atemgas und Gewebe

$[1 - 2^{(-t/T)}]$  = Exponentialfunktion mit:  
 $t$  = Zeit  
 $T$  = Halbwertszeit



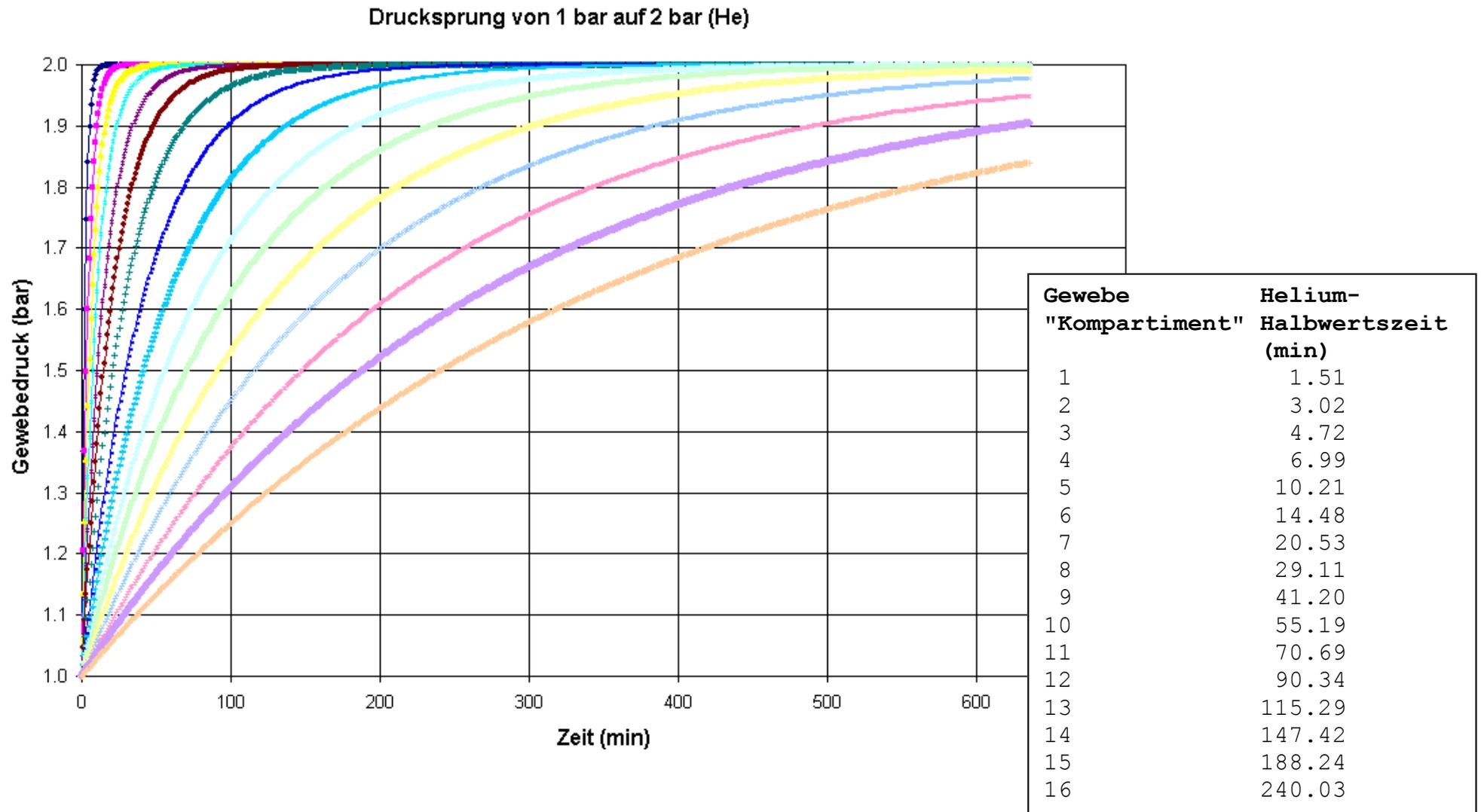
## Sättigung mit dem Inertgas Stickstoff (N<sub>2</sub>):

16 Gewebe mit Halbwertszeiten zwischen 4 min und 635 min



## Sättigung mit dem Inertgas Helium (He):

16 Gewebe mit Halbwertszeiten zwischen 1.51 min und 240.03 min



## Grundlagen der Dekompressionsberechnung nach Bühlmann

### (b) Maximal erlaubter Gewebeüberdruck

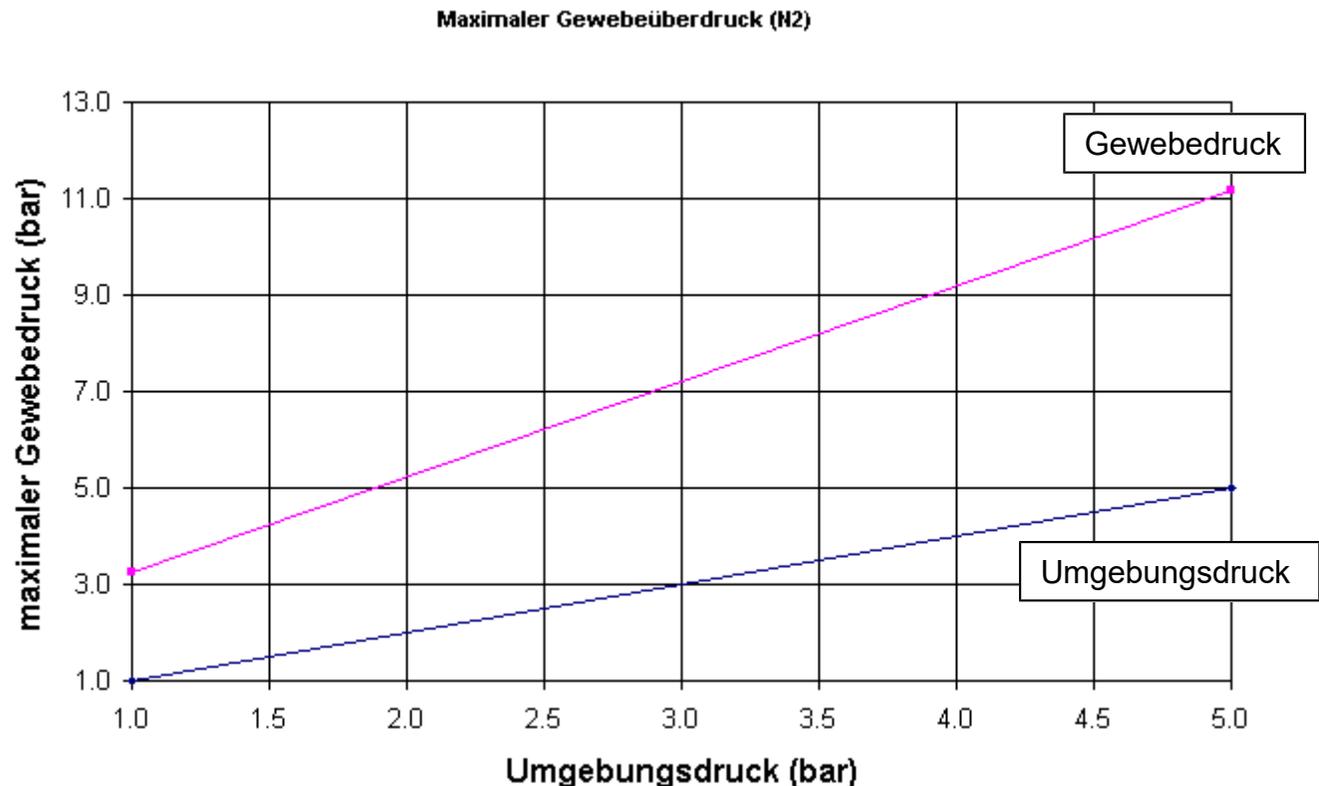
Mathematische Schreibweise nach Bühlmann (lineare Beziehung):

$$p(\max) = p_{\text{Umgebung}} / b + a$$

mit:

$p(\max)$  = maximal tolerierter  
Inertgasdruck  
im Gewebe  
 $p_{\text{Umgebung}}$  = Umgebungsdruck  
 $b$  = Koeffizient b  
 $a$  = Koeffizient a

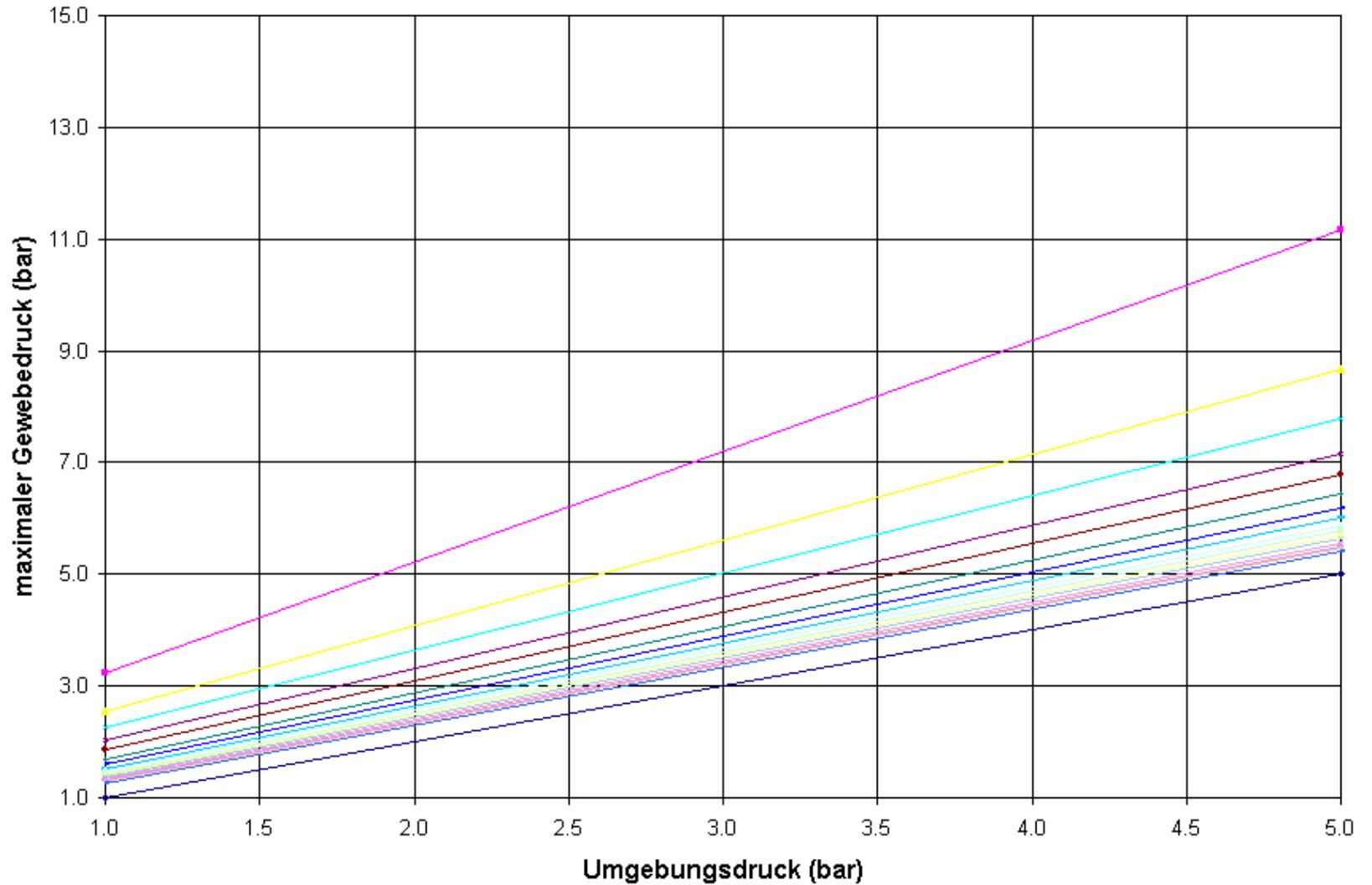
**Koeffizienten a und b sind durch  
viele Testtauchgänge mit Freiwilligen  
ermittelt**



## Sättigung mit dem Inertgas Stickstoff (N<sub>2</sub>):

16 Gewebe mit unterschiedlichen Modellkonstanten a und b

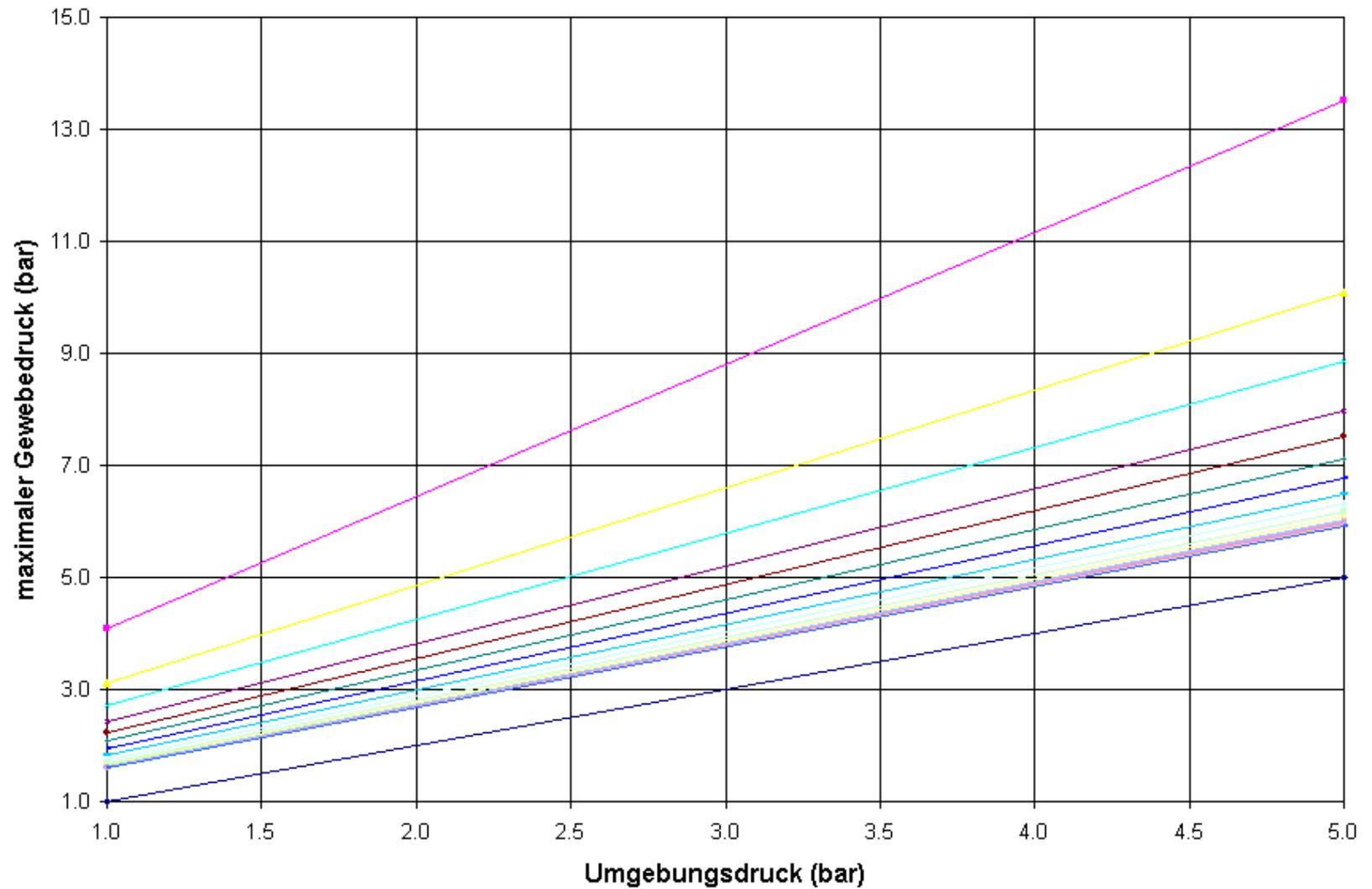
Maximaler Gewebeüberdruck (N<sub>2</sub>)



## Sättigung mit dem Inertgas Helium (He):

16 Gewebe mit unterschiedlichen Modellkonstanten a und b

Maximaler Gewebeüberdruck (He)



## Vergleich der Modelle für die Inertgase N<sub>2</sub> und He

He im Vergleich zu N<sub>2</sub> ...

- kürzere Halbwertszeiten ► He diffundiert schneller, schnellere Sättigung und schnellere Entsättigung
- Koeffizienten a sind größer und b sind kleiner ► höhere Toleranzen

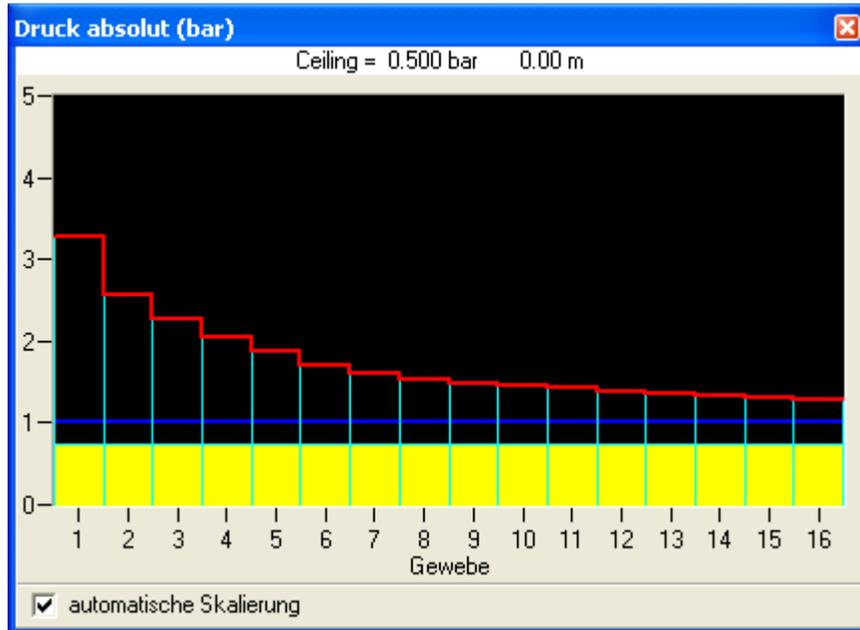
N <sub>2</sub>				He			
Nummer	2			Nummer	6		
Bezeichnung	ZH-L16C N2			Bezeichnung	ZH-L16A He		
Erläuterung	Bühlmann ZH-L16C N2 "Computer"			Erläuterung	Bühlmann ZH-L16A He		
Quelle	A.A. Bühlmann, E.B. Völlm & P.			Quelle	A.A. Bühlmann, E.B. Völlm & P.		
Koeffizienten				Koeffizienten			
i	t1/2	a	b	i	t1/2	a	b
1	4.00	1.25990	0.50500	1	1.51	1.74240	0.42450
2	8.00	1.00000	0.65140	2	3.02	1.38300	0.57470
3	12.50	0.86180	0.72220	3	4.72	1.19190	0.65270
4	18.50	0.75620	0.78250	4	6.99	1.04580	0.72230
5	27.00	0.62000	0.81260	5	10.21	0.92200	0.75820
6	38.30	0.50430	0.84340	6	14.48	0.82050	0.79570
7	54.30	0.44100	0.86930	7	20.53	0.73050	0.82790
8	77.00	0.40000	0.89100	8	29.11	0.65020	0.85530
9	109.00	0.37500	0.90920	9	41.20	0.59500	0.87570
10	146.00	0.35000	0.92220	10	55.19	0.55450	0.89030
11	187.00	0.32950	0.93190	11	70.69	0.53330	0.89970
12	239.00	0.30650	0.94030	12	90.34	0.51890	0.90730
13	305.00	0.28350	0.94770	13	115.29	0.51810	0.91220
14	390.00	0.26100	0.95440	14	147.42	0.51760	0.91710
15	498.00	0.24800	0.96020	15	188.24	0.51720	0.92170
16	635.00	0.23270	0.96530	16	240.03	0.51190	0.92670

Schließen

## Vergleich der Modelle für die Inertgase $N_2$ und He

Normalfall:

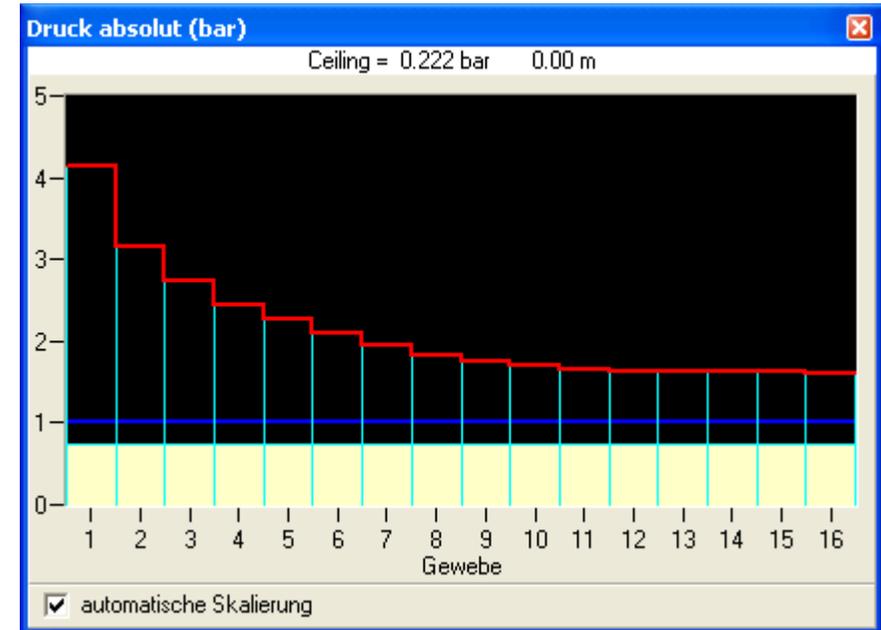
100 % Sättigung mit Stickstoff bei 1 bar



- ▶ längere Halbwertszeiten (4 min bis 635 min)  
langsame Sättigung und Entsättigung
- ▶ niedrigere erlaubte Übersättigungen
- ▶ höherer Minimaldruck (Ceiling)

theoretischer Fall:

100 % Sättigung mit Helium bei 1 bar



- ▶ kürzere Halbwertszeiten (1.5 min bis 240 min)  
schnelle Sättigung und Entsättigung
- ▶ höhere erlaubte Übersättigungen
- ▶ niedrigerer Minimaldruck (Ceiling)

## Bühlmann Modelle und Modifizierungen

<b>ZHL 16</b>	Erstes, von Bühlmann veröffentlichtes, Modell ZH = Zürich L = Limits 16 = 16 Gewebe
<b>ZHL 16 B,C</b>	von Bühlmann veröffentlichte Modifizierungen B = für Tabellen C = für Computer
<b>ZHL 8</b>	auf 8 Gewebe reduziertes Modell, für Tauchcomputer (Uwatec Aladin)
<b>ZHL 8 ADT</b>	adaptives Modell, mit Berücksichtigung des Luftverbrauchs (Uwatec Aladin)
<b>ZHL 8 ADT MB</b>	zusätzliche Modifizierung, welche Mikroblasenentstehung reduzieren soll (Scubapro)



## 1988 und 1992 - Tiefenrekorde im Sättigungstauchen

In der Berufstaucherei setzte sich das Sättigungstauchen durch. Besonders in der Offshore Erdölindustrie werden tagelange Tauchgänge (mit Ruhepausen unter Druck) mit anschließender tagelanger Dekompressionsphase Routine. Besonders die französische Firma COMEX betreibt umfangreiche Forschungen zum Thema.

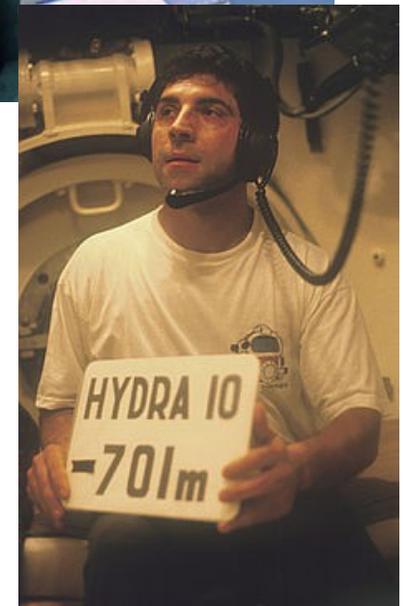
1988 gehen COMEX Taucher im Mittelmeer für einen simulierten Arbeitseinsatz bis auf 534 m.



[www.comex.fr](http://www.comex.fr)

1992 erreicht der COMEX Taucher Theo Mavrostomos in einem Druckkammertauchgang die Tiefe von 701 m.

Der Tauchgang dauerte 43 Tage und es wurden Gasgemische mit Sauerstoff, Helium und Wasserstoff verwendet. Der Tauchgang verlief nicht ohne Probleme, der Aufenthalt auf der Maximaltiefe wurde auf ca. 2 Stunden verkürzt (geplant waren mehrere Tage).



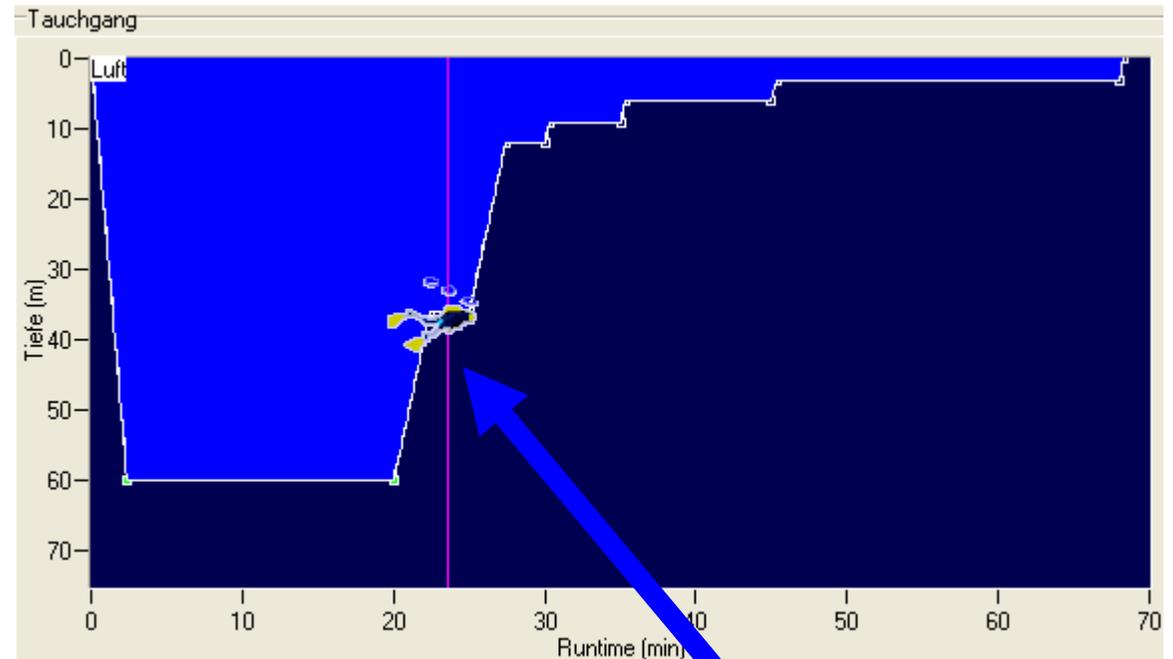
## 1996 - Tiefe Deko- Stops

Der Biologe Richard Pyle arbeitete in den 90er Jahren auf Hawaii. Er machte relativ tiefe Tauchgänge (bis 72 m), um Fische zu fangen. Beim Aufstieg punktierte er die Schwimmblasen der Fische, damit sie den Aufstieg überlebten.

Pyle fiel irgendwann auf, dass er sich besser fühlte, wenn er erfolgreich war, und dass er sich oft sehr müde fühlte, wenn er mal keinen Fisch fangen konnte. Er brachte das in Zusammenhang mit den Stops in größerer Tiefe.

### "Pyle-Stops":

- Berechne das Profil des Tauchgangs
- Mache einen Stop von 2 bis 3 min in der Mitte zwischen dem tiefsten Punkt und dem ersten Dekostop.
- Berechne das neue Profil.
- Falls der Abstand zum ersten Dekostop größer als 10 m ist, mache einen weiteren tiefen Stop.
- usw ..

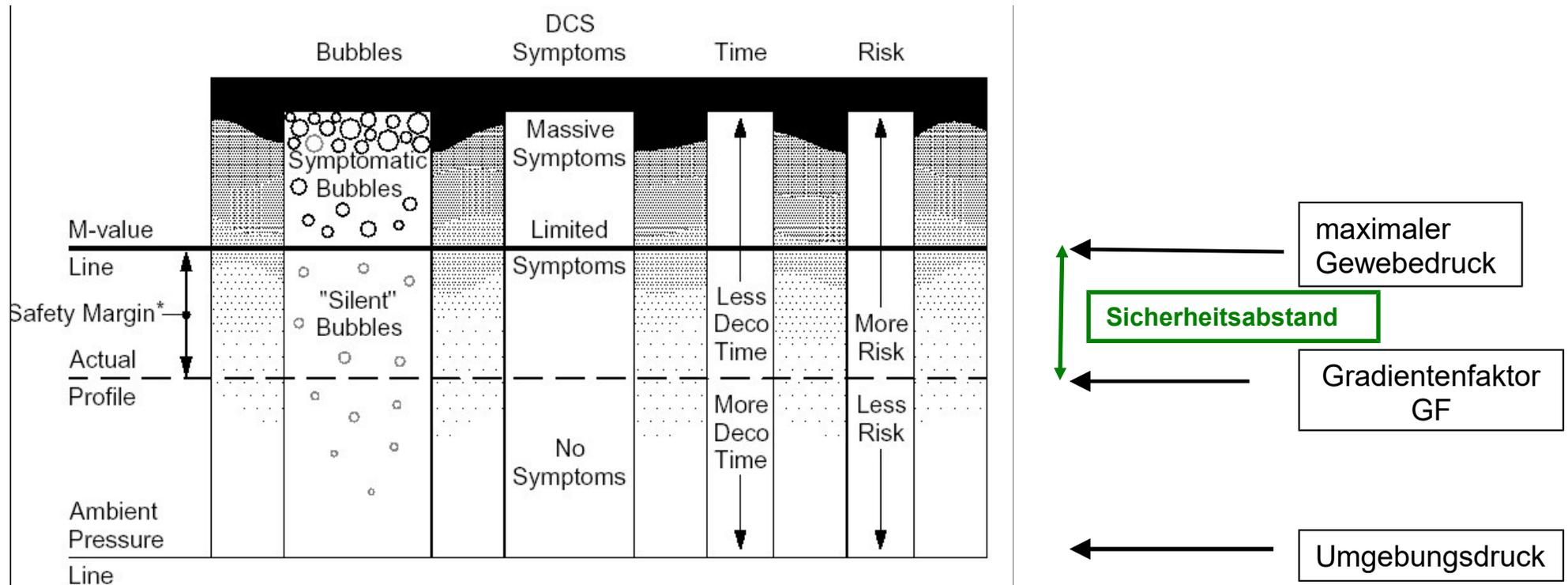


Quelle:

Pyle Richard (1996): The Importance of Deep Safety Stops: Rethinking Ascent Patterns From Decompression Dives. DeepTech. 5:64; Cave Diving Group Newsletter, 121:2-5. (<http://www.bishopmuseum.org/research/treks/palautz97/deepstops.html>)

## 1998 - Gradienten-Faktoren

Der Engländer Erik C. Baker machte sich Gedanken zu Sicherheitsabständen zu den maximal erlaubten Übersättigungen. Er brachte das Konzept der "Gradientenfaktoren" (englisch: Gradient factors) ins Spiel.



Quellen:

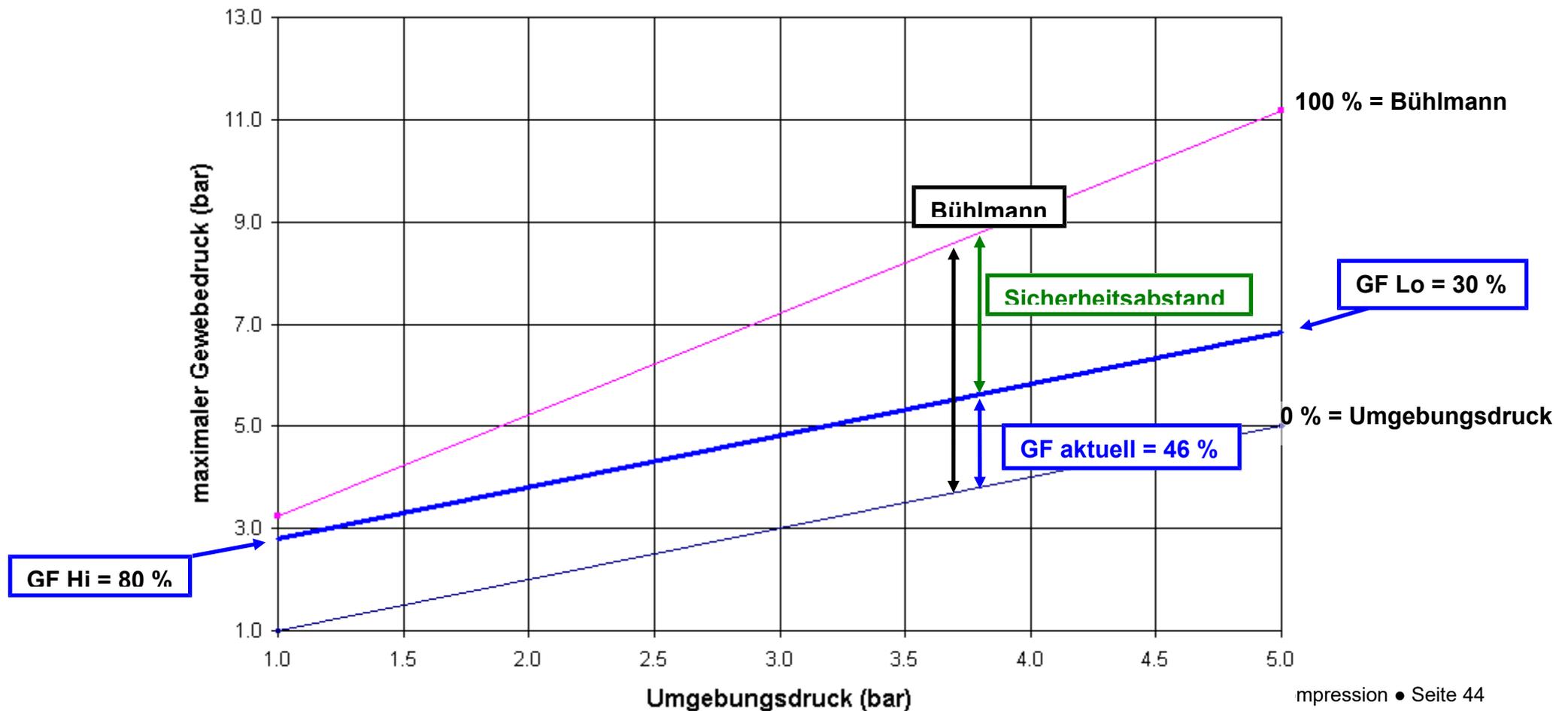
Baker Erik C (1998): Understanding M-values. Immersed, Vol. 3, No. 3, 23-27, Fall 1998, [www.immersed.com](http://www.immersed.com).

Baker Erik C (1998): Clearing up the confusion about "deep stops". Immersed, Vol. 3, No. 4, 23-31, Winter 1998, [www.immersed.com](http://www.immersed.com).

2 Gradientenfaktoren:

- GF Lo: maximale Übersättigung beim hohen Umgebungsdruck
- GF Hi: maximale Übersättigung beim niedrigen Umgebungsdruck

aktueller GF wird zwischen GF Lo und GF Hi interpoliert



## 2 Gradientenfaktoren:

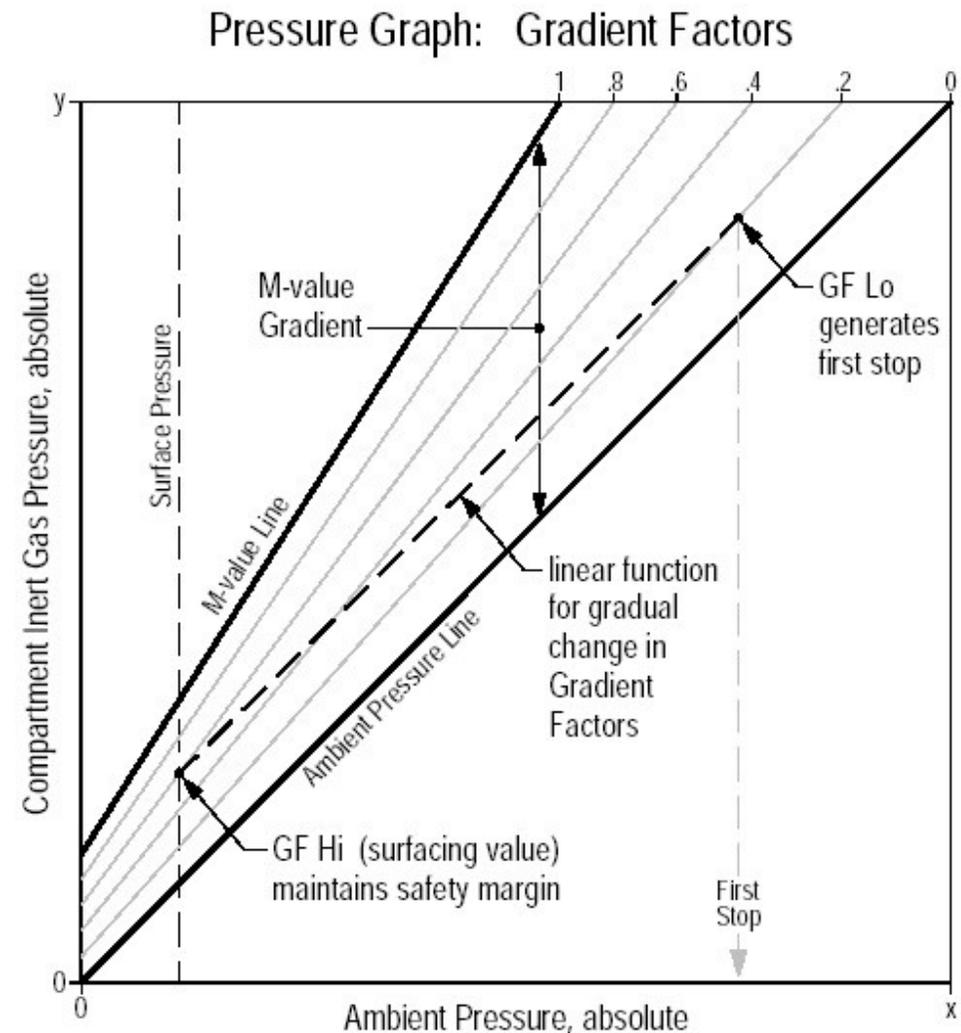
- Der "Gradient Factor Low" (GF Lo) regelt die erlaubte Übersättigung auf dem ersten, tiefsten Dekostop. Ein Wert von z.B. 20 bedeutet 20% der maximalen Übersättigung und damit einen Sicherheitsabstand von 80% (= 100% - 20%).

Je kleiner der Wert von GF Lo ist, um so tiefer wird der erste Dekostop ausgerechnet.

- Der "Gradient Factor High" (GF Hi) regelt die maximale Übersättigung auf der letzten, flachsten Dekostufe. Ein Wert von z.B. 60 bedeutet hier, dass die Übersättigung nur 60% des maximalen Wertes erreichen darf.

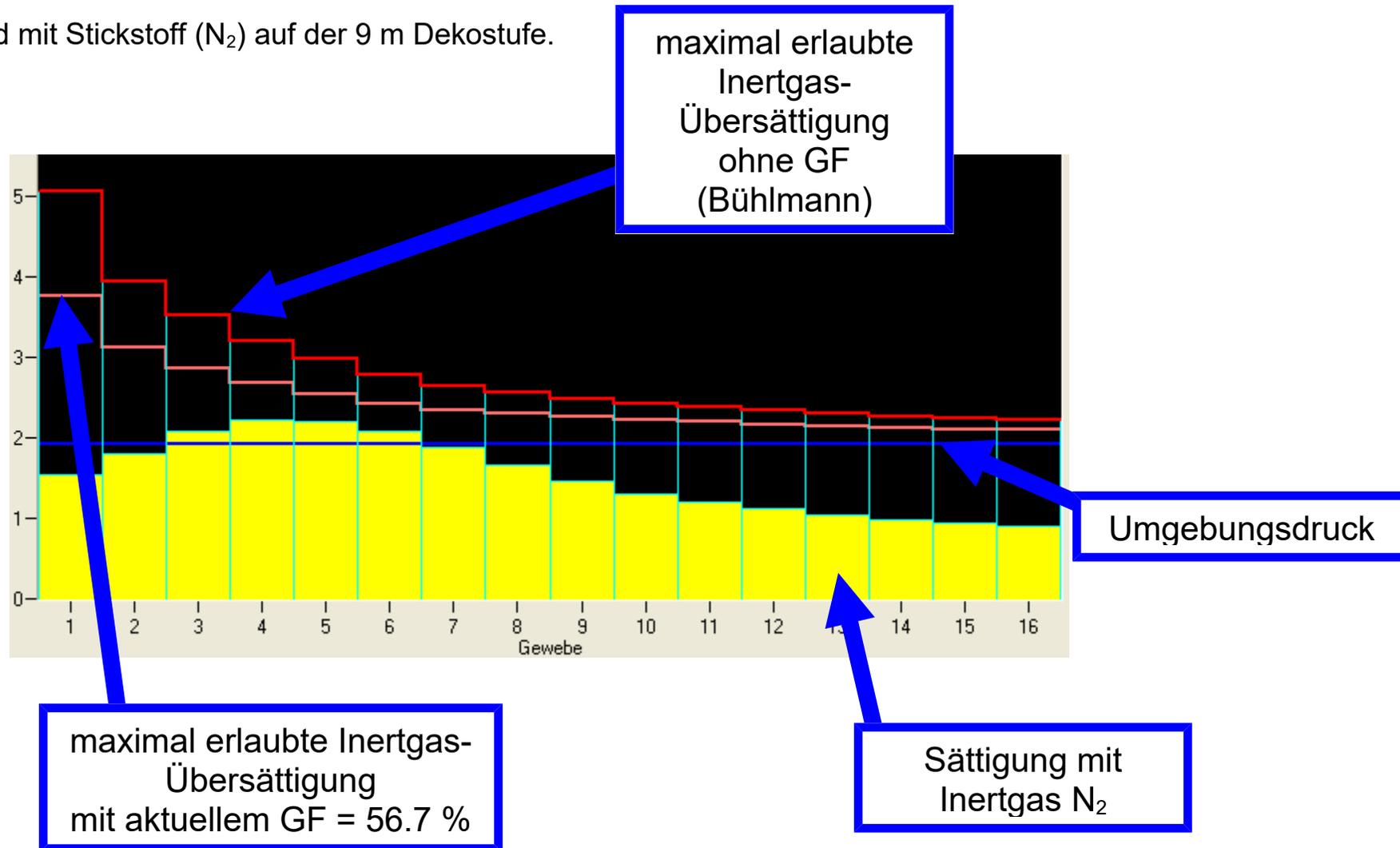
Je kleiner der GF Hi ist, um so länger dauert der letzte Dekostop.

Wenn beide GF=100 gesetzt sind, wird streng nach Bühlmann gerechnet.



## Visualisierung im Programm Decotrainer:

Sättigungszustand mit Stickstoff ( $N_2$ ) auf der 9 m Dekostufe.

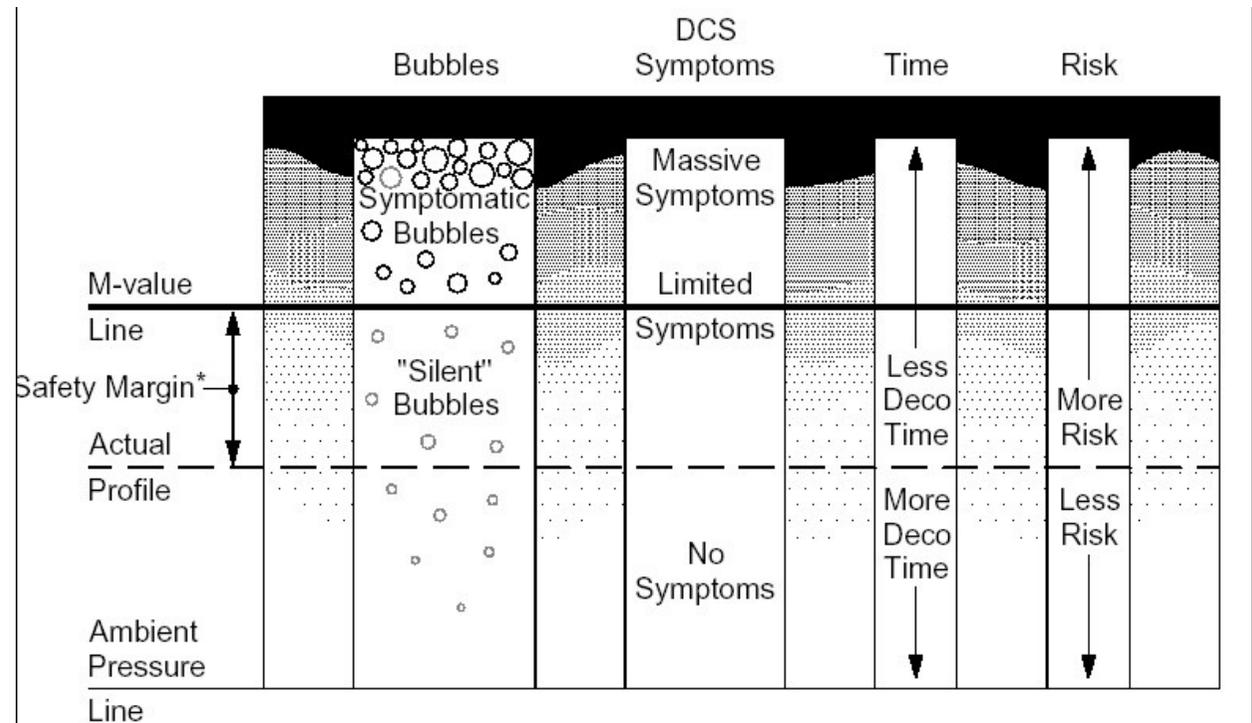


## ab 1986 - VPM und RGBM = Blasenorientierte Dekompression

Die bisherigen Modelle zur Dekompressionsberechnung hatten eine Schwachstelle: Die maximal erlaubten Übersättigungen, die gerade noch keine Gasembolien verursachen. Die Modelle liefern keine Erklärungen für diese Werte. Sie waren im Prinzip durch viele Versuche untermauert, aber nicht physikalisch begründet.

Ausgangsüberlegungen:

- Gasblasen verursachen die Dekompressionskrankheit
- Nach jedem Tauchgang sind Gasblasen nachweisbar ("stille Blasen"), auch nach normalen Tauchgängen
- es gibt eine "Grauzone" zwischen der Obergrenze der maximal erlaubten Übersättigung und dem Umgebungsdruck.



Quelle: Baker E. C. (1998): Understanding M-values. Immersed vol. 3, no. 3, p. 23-27, Fall 1998.

## VPM = Varying Permeability Model

## RGBM = Reduced Gradient Bubble Model

Ab den 1980er Jahren gab es verschiedene Forschungen zur Entstehung von Gasblasen bei der Dekompression. Yount stellte schließlich 1986 eine Berechnungsmöglichkeit nach dem VPM Modell vor. Wienke baut 1991 auf dem VPM Modell auf, setzt aber andere Werte für die Druckgradienten an.

## VPM und RGBM:

Sättigung und Entsättigung nach Bühlmann  
(16 Gewebe mit Halbsättigungszeiten zwischen 4 min und 635 min)

Gasblasen sind charakterisiert durch:

- Gasdruck in der Blase = Gasdruck außerhalb der Blase + Oberflächenspannung
- Die Oberfläche der Gasblase ist durchlässig.
- Wachstum / Auflösung der Blase ist vom Druckgradienten und einer kritischen Größe (Radius) abhängig
- Dekompressionsprofil orientiert sich an der kritischen Blasengröße

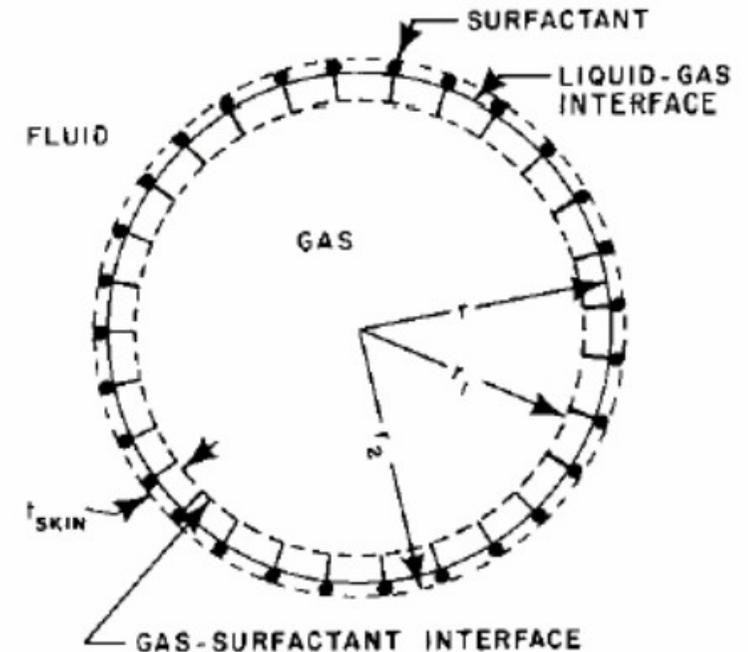
Unterschiede der VPM / RGBM Dekompressionsprofile gegenüber Bühlmann:

- der erste Dekostop liegt tiefer
- der letzte Dekostop wird kürzer

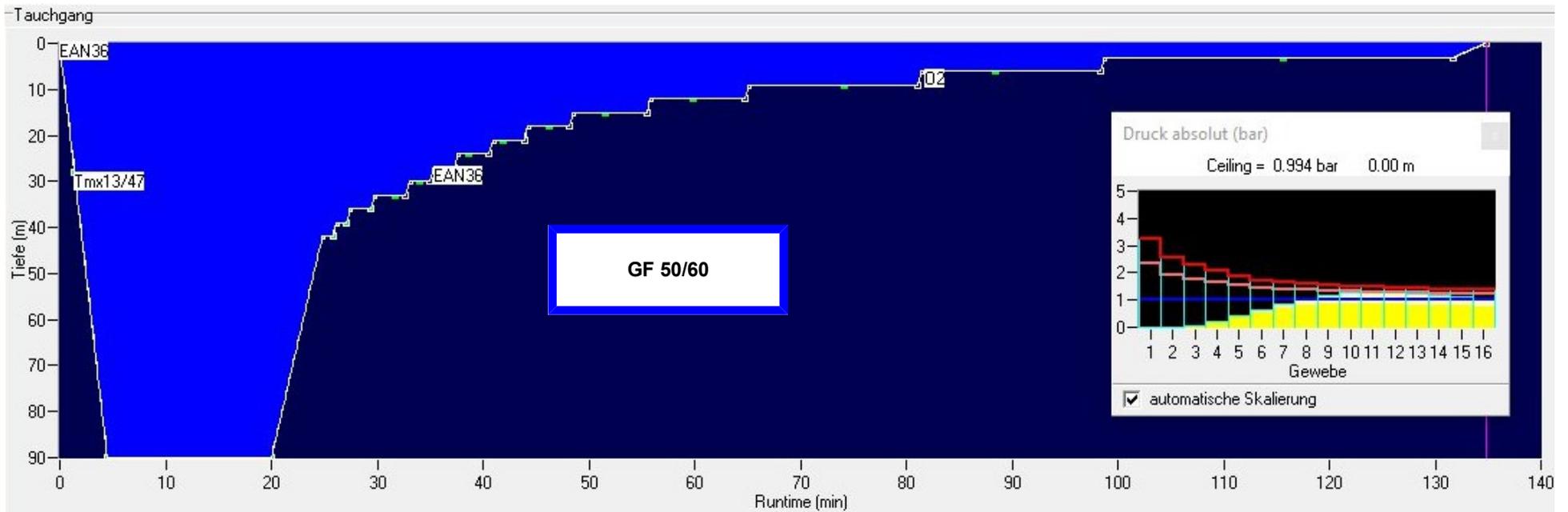
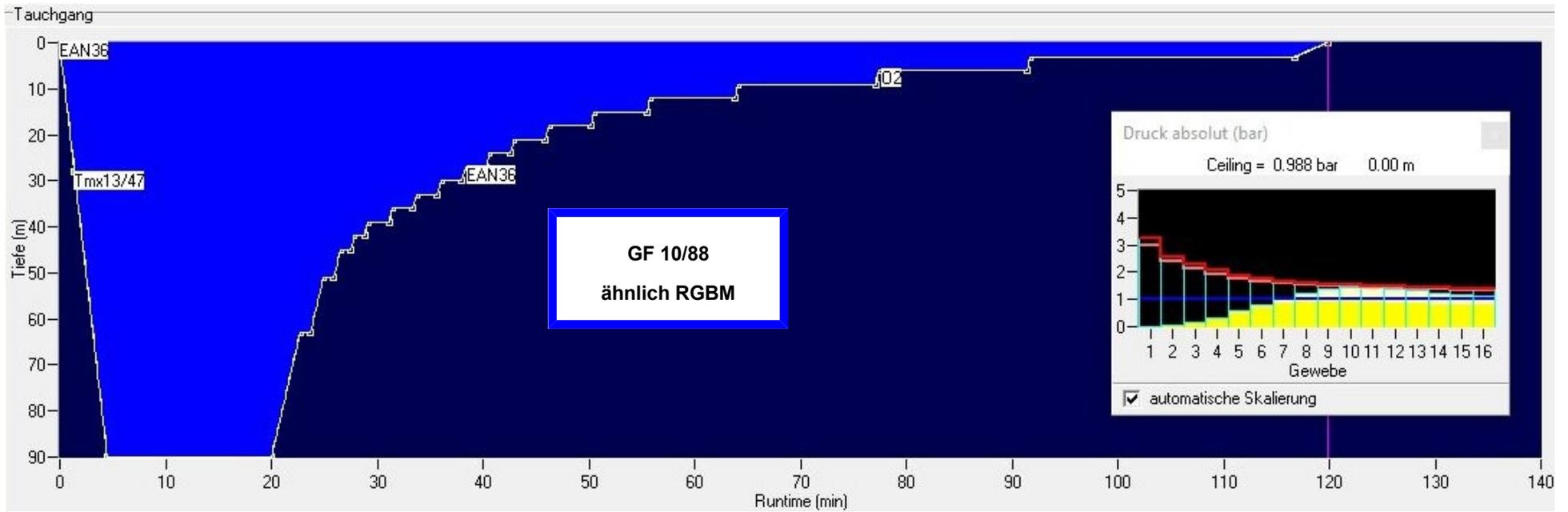
Quellen:

D.E. Yount, D.C. Hoffman (1986), *On the Use of a Bubble Formation Model to Calculate Diving Tables*. Aviation, Space, and Environmental Medicine, February, 1986.

B.R. Wienke (2003): *Reduced Gradient Bubble Model in Depth*. Best Publishing Company, ISBN 1-930536-11-9, [www.bestpub.com](http://www.bestpub.com).



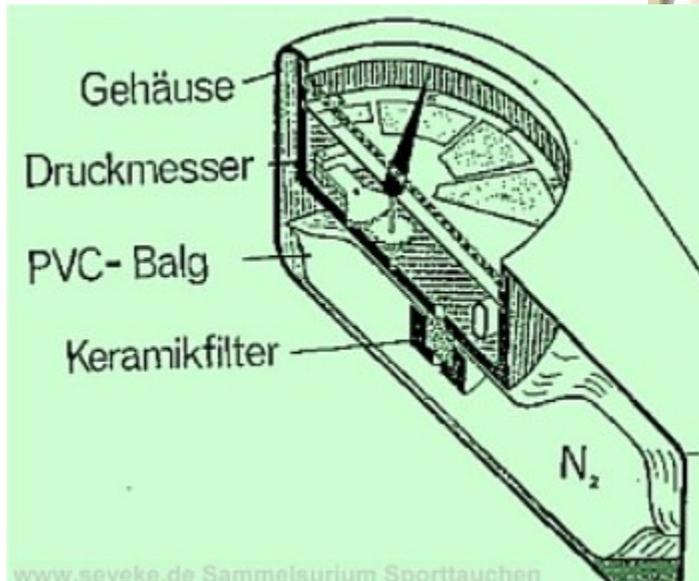
Quelle: [http://www.divetable.de/skripte/Deko\\_Manual.pdf](http://www.divetable.de/skripte/Deko_Manual.pdf)



## Wie rechnen Tauchcomputer?

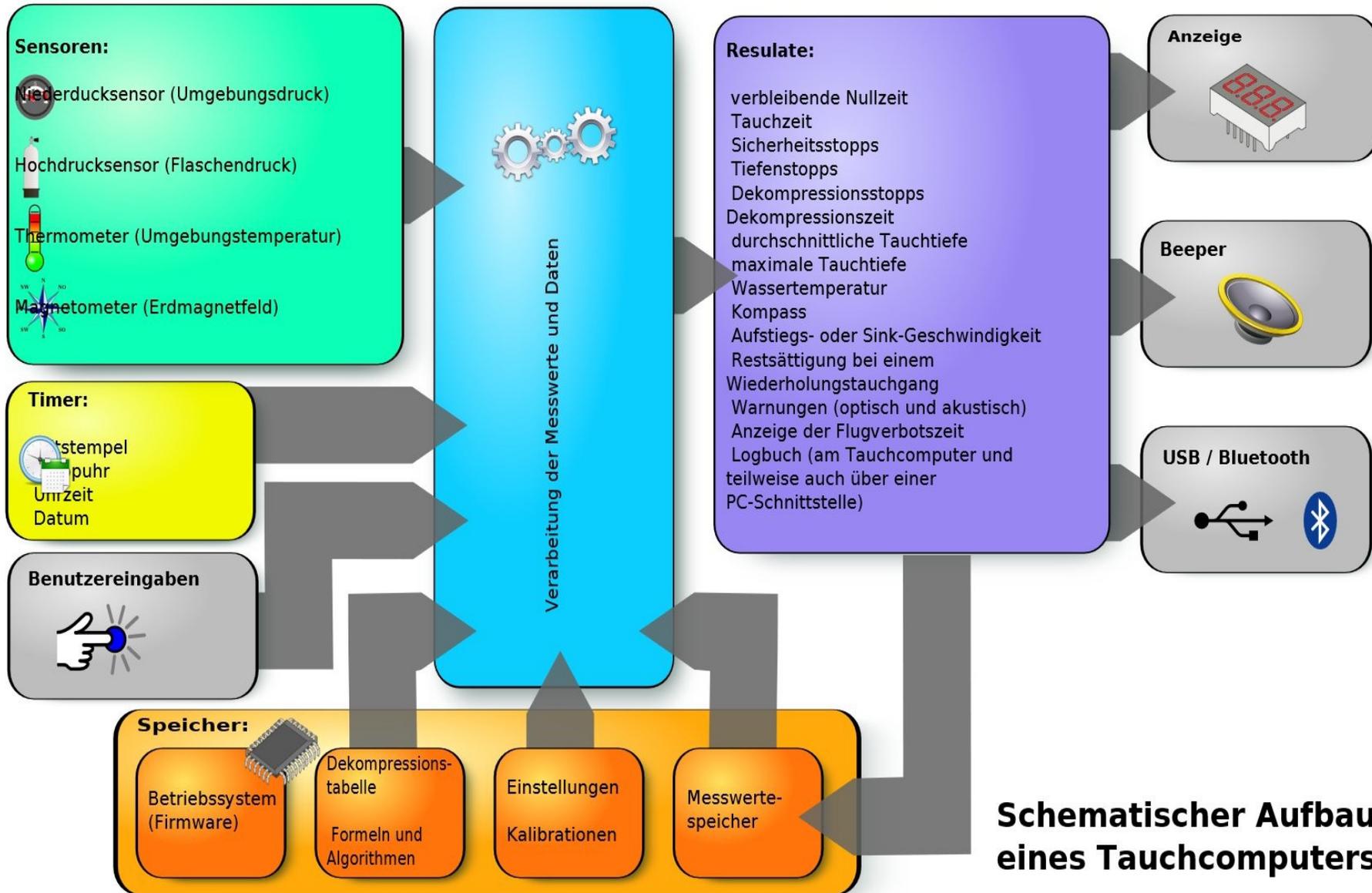
~ 1963: SOS Dekometer - Der erste "Tauchcomputer"

analoge Simulation des Sättigungs- und Entsättigungsvorgangs von einem "Gewebe"



Quelle: [www.seveke.de](http://www.seveke.de)

## Wie rechnen Tauchcomputer?



Quelle:  
wikipedia

## Wie rechnen Tauchcomputer?



ohne Anspruch auf Vollständigkeit (Infos von den Herstellern):

Hersteller	Sättigung / Entsättigung	Übersättigungsberechnung
Mares	10 Gewebe	RGBM "Mares-Wienke"
Suunto	9 Gewebe	RGBM "reduction factors"
Scubapro (Uwatec)	8 Gewebe	ZHL 8 ADT MB

## Welche Theorie ist die Bessere?

- Die altbewährte Sättigungsberechnung oder das neuere Blasenmodell?

Neuere Studien zeigen:

### Die Kombination aus Deep Stops und kurzen flachen Dekostops können das Risiko einer DCS erhöhen

- Beispiel: Studie der NEDU (United States Navy Experimental Diving Unit)  
170 ft (52 m), 30 min, 115 W, Luft

deep stops → 10 DCS / 198

keine deep stops → 3 DCS / 192

"normal" ist ca. 1 DCS / 3000

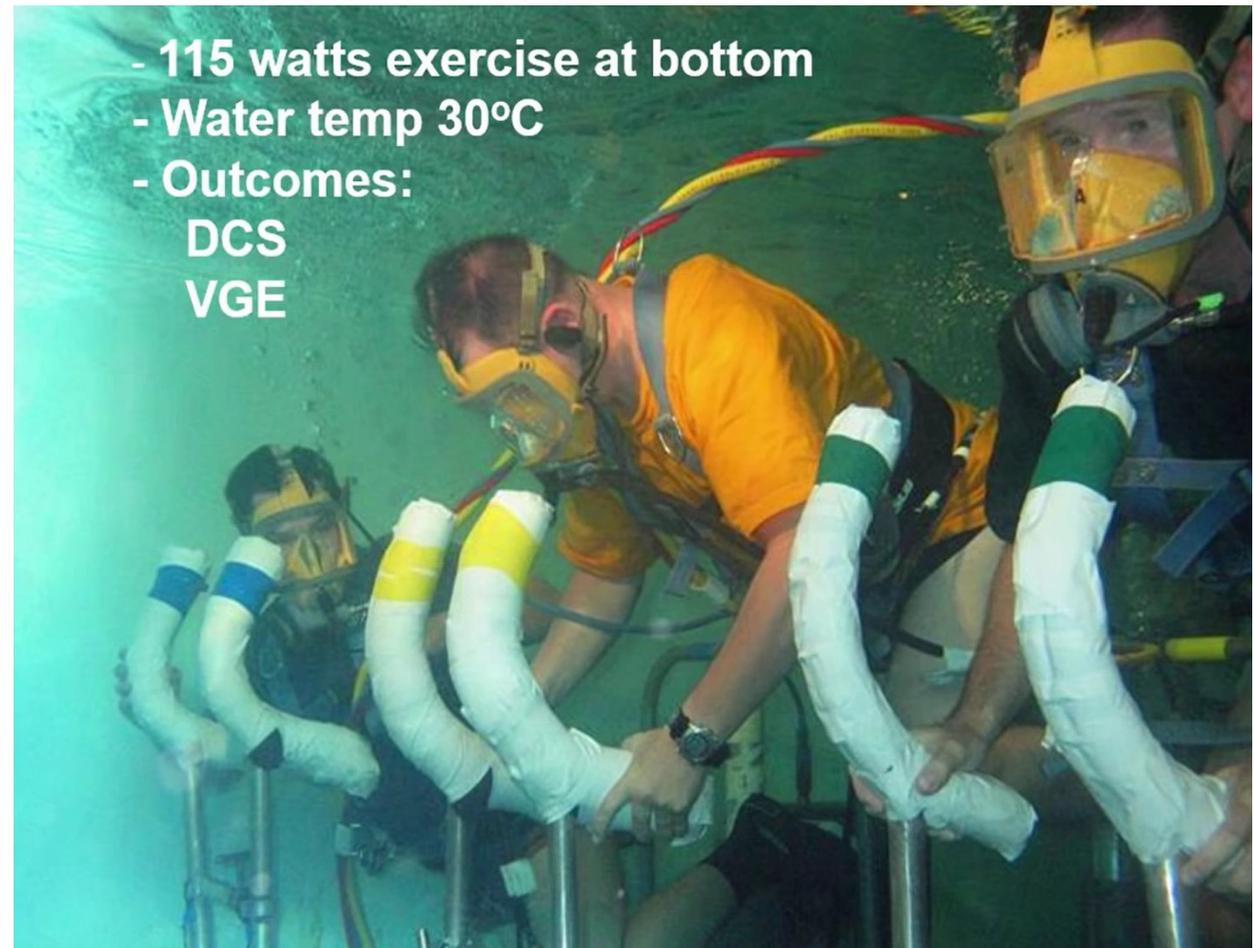
Quelle:

Simon Mitchell (2015): Decompression controversies  
<https://www.youtube.com/watch?v=UY61E49lyos>

Siehe auch:

Blatteau JE, Hugon M, Gardette B, Sainty JM & Galland FM (2005): Bubble incidence after staged decompression from 50 or 60 msw: effect of adding deep stops. *Aviat Space Environ Med.* 2005 May, 76(5), 490-2.

Doolette DJ & Mitchell SJ (2013): Recreational technical diving part 2: decompression from deep technical dives. *Diving Hyperb Med.* 2013 Jun; 43(2):96-104.



<b>Versuch einer Gegenüberstellung:</b>	<b>Sättigungsberechnung</b>	<b>Blasenberechnung</b>
---	-----------------------------	-------------------------

Stichworte	Haldane, Bühlmann, Gradientenfaktoren GC models	RGBM, VPM  Bubble models
gibt es seit	1907	1986
Entstanden aus:	Sättigungstauchen, Theorie + Experiment	"Bounce dives", Theorie
Kriterium für Deko-Stops	Übersättigungstoleranz, experimentell ermittelt	Blasengröße, theoretisch berechnet
Testobjekte	Marinetaucher Sporttaucher	nicht veröffentlicht
Berechnungen öffentlich	ja	nein

### **Typische Merkmale eines Tec Tauchgangs**

Erster Dekostop	flacher	tiefer
Letzter Dekostop	länger	kürzer
Gesamte Aufstiegszeit	länger	kürzer

### **Empfehlung von Simon Mitchell (2015):**

**Sättigungsberechnung  
nach Bühlmann  
+ Gradientenfaktoren 50/70**

## Grenzen der mathematischen Dekompressionsberechnung

Jeder Taucher ist ein Mensch und dadurch ein Individuum. Viele Faktoren sind nur schwer oder gar nicht mathematisch erfassbar. Modelle sind immer nur eine Annäherung an die Wirklichkeit.

- Unterschiedliche Anteile der Körperorgane:  
Blut, Muskeln, Fett, Knochen
- Frau oder Mann
- Fitnesszustand, Alter, Tagesform  
-> adaptive Berechnungen (Herzfrequenz)
- Krankheit, Dehydratation
- Offenes Foramen Ovale  
-> Einfluss auf die Verteilung der Mikroblasen
- Kälte, Anstrengung, Luftverbrauch  
-> adaptive Berechnungen (Luftverbrauch)
- Aktivitäten vor, während und nach dem Tauchgang
- Medikamente, Alkohol, Nikotin, Verletzungen
- usw ...

→ **Empfehlung = Safety First**  
angebotene Sicherheitsreserven nutzen  
"Konservatismus"  
"Bubble level", "Micro Bubbles"  
"Gradientenfaktoren", "GF"

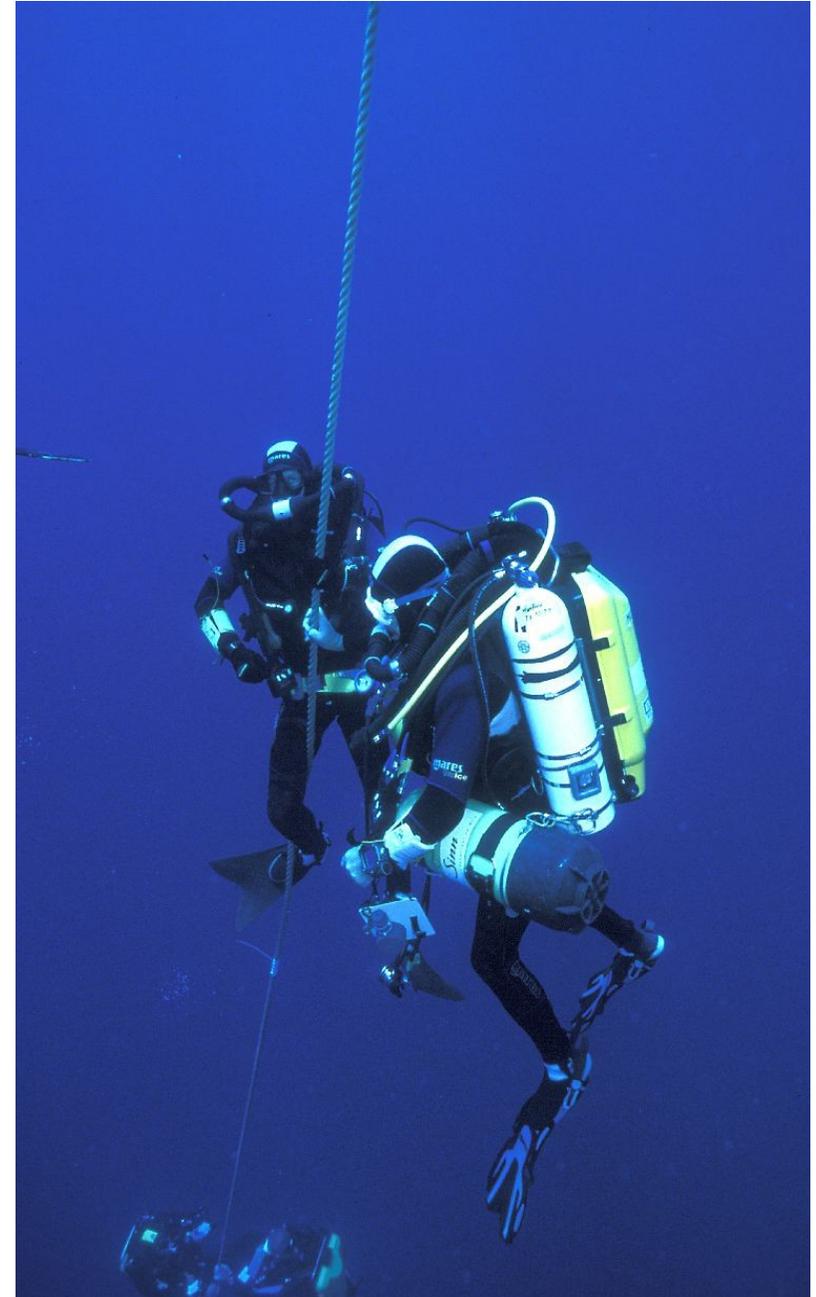


## Teil 3

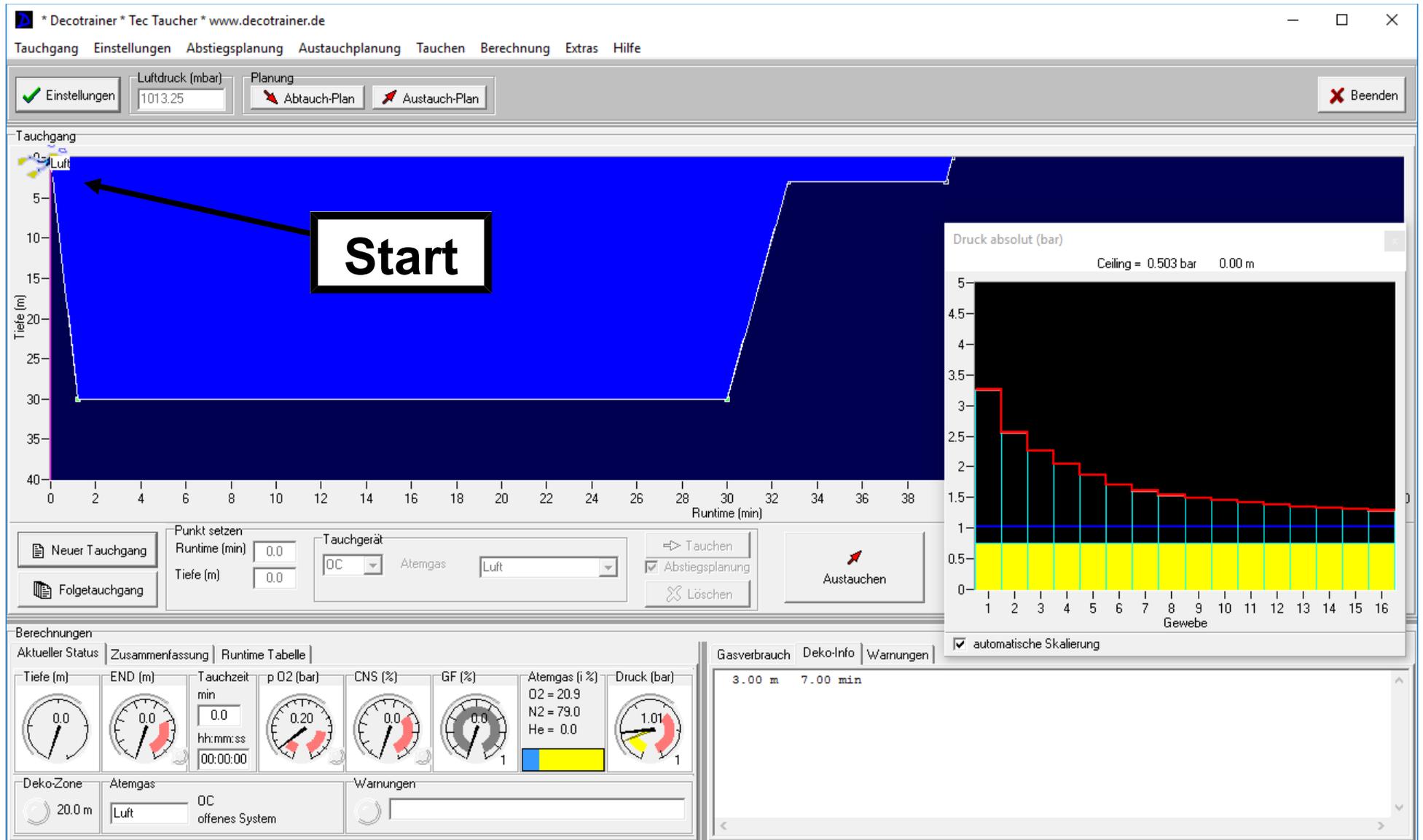
### Sättigung / Entsättigung bei Beispieltauchgängen

- **"normaler" Tauchgang 30 m, 30 min**
  - Luft
  - Wiederholungstauchgang
  - Nitrox
  - Bergsee
- **"Tec" Tauchgang 70 m, 15 min**
  - OC + Gaswechsel
  - GF
  - CCR

Es folgen Screenshots aus der Berechnung mit Decotrainer



# Tauchgang 30 m, 30 min, Luft



# Tauchgang 30 m, 30 min, Luft

The screenshot shows the Decotrainer software interface for a 30m, 30min air dive. The main window displays a depth-time profile with a callout "auf Tiefe" pointing to the 30m depth. A partial gas pressure graph on the right shows a step-wise decrease from 9.05 bar at the surface to 4.06 bar at 30m. The bottom status bar displays various parameters including depth (30.0m), end depth (29.4m), time (1.2min), and partial O2 pressure (0.84 bar).

**auf Tiefe**

**Druck absolut (bar)**  
Ceiling = 0.505 bar 0.00 m

Gewebe	Druck (bar)
1	9.05
2	7.24
3	6.50
4	5.94
5	5.50
6	5.16
7	4.90
8	4.70
9	4.55
10	4.45
11	4.38
12	4.33
13	4.29
14	4.26
15	4.24
16	4.22

**Berechnungen**

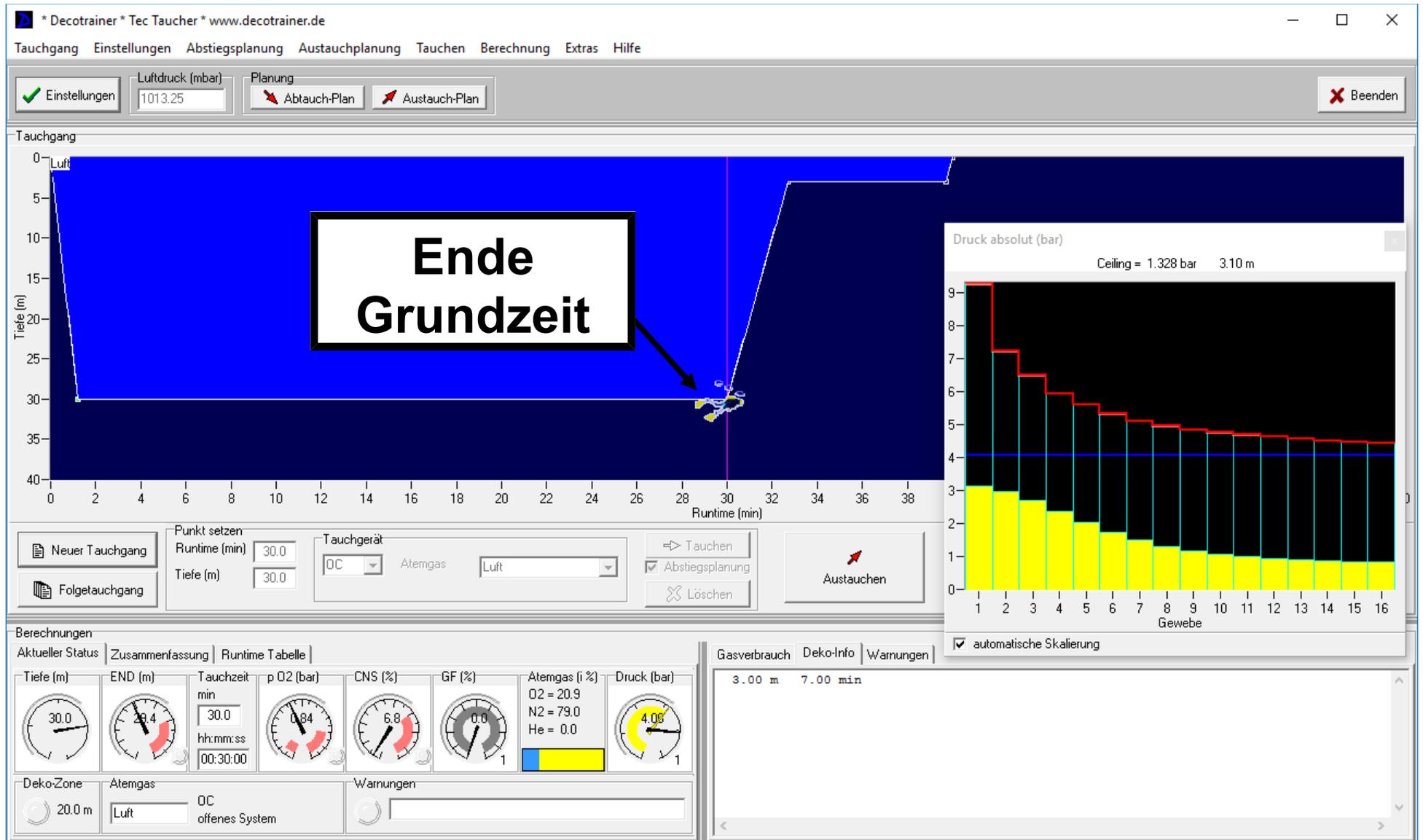
Parameter	Value
Tiefe (m)	30.0
END (m)	29.4
Tauchzeit (min)	1.2
p O2 (bar)	0.84
CNS (%)	0.1
GF (%)	0.0
Atemgas (i %)	O2 = 20.9, N2 = 79.0, He = 0.0
Druck (bar)	4.06

**Deko-Zone** 20.0 m  
**Atemgas** OC, Luft, offenes System  
**Warnungen**

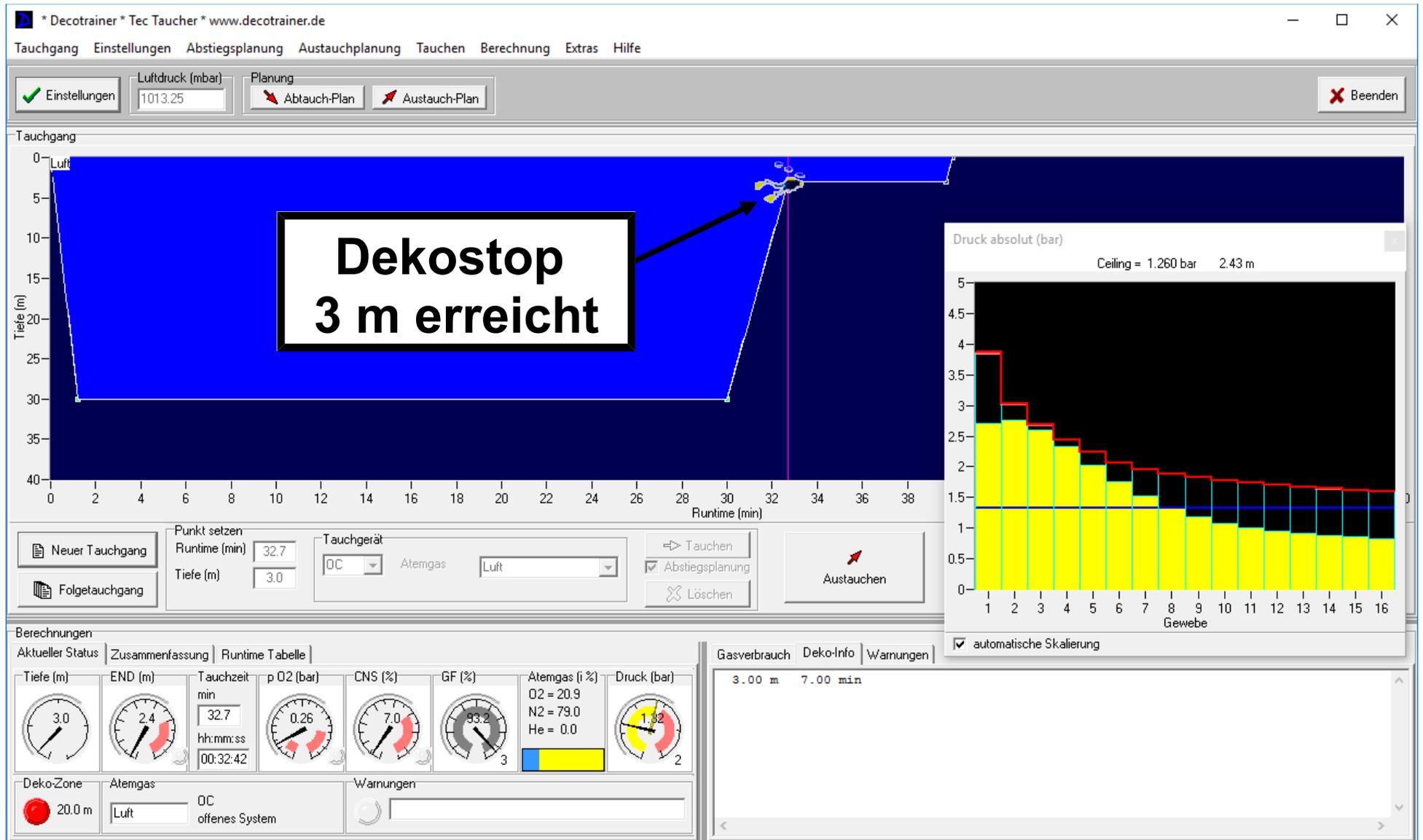
**Gasverbrauch** 3.00 m 7.00 min

**p(O2) = 0.84 bar**

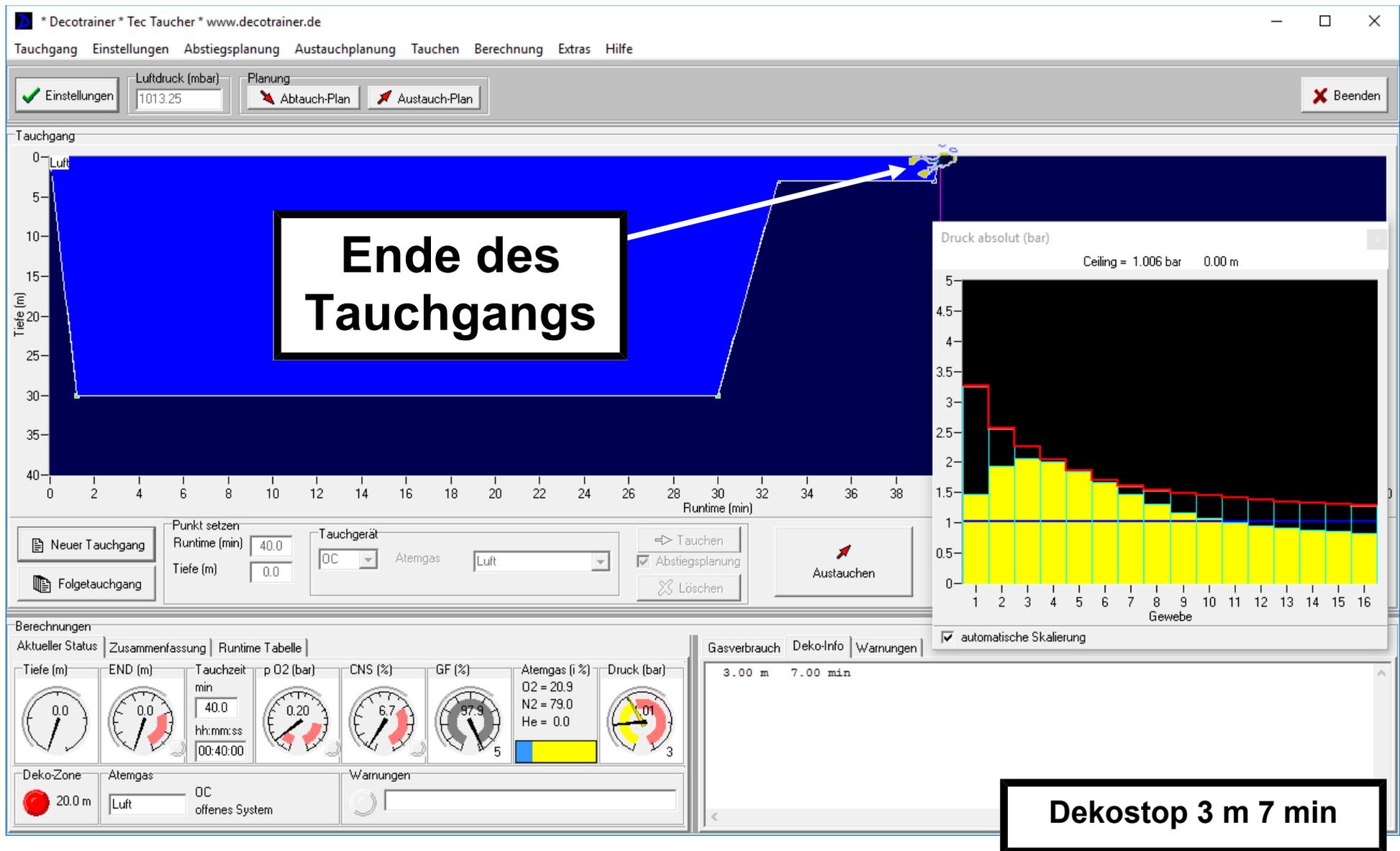
# Tauchgang 30 m, 30 min, Luft



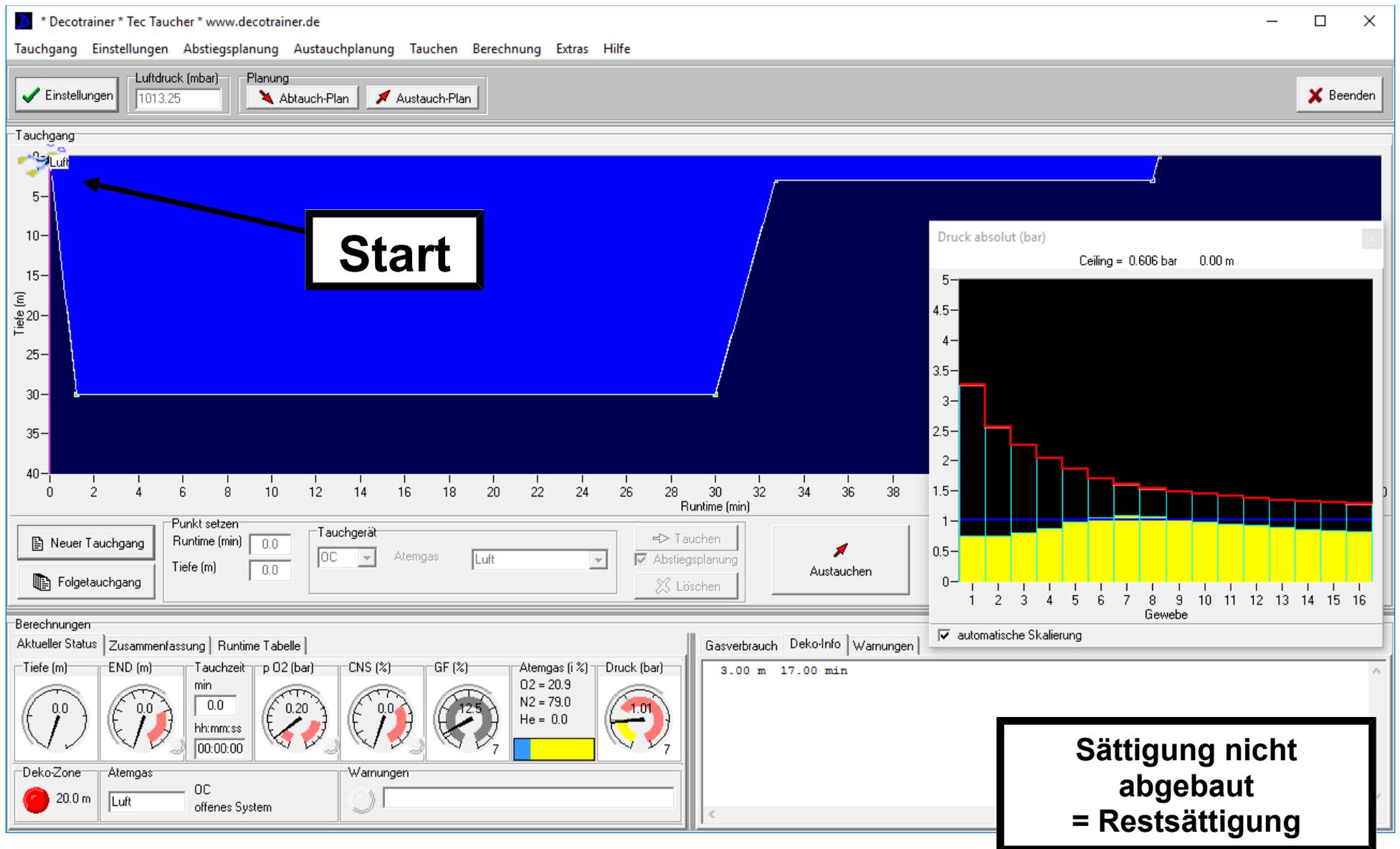
# Tauchgang 30 m, 30 min, Luft



# Tauchgang 30 m, 30 min, Luft



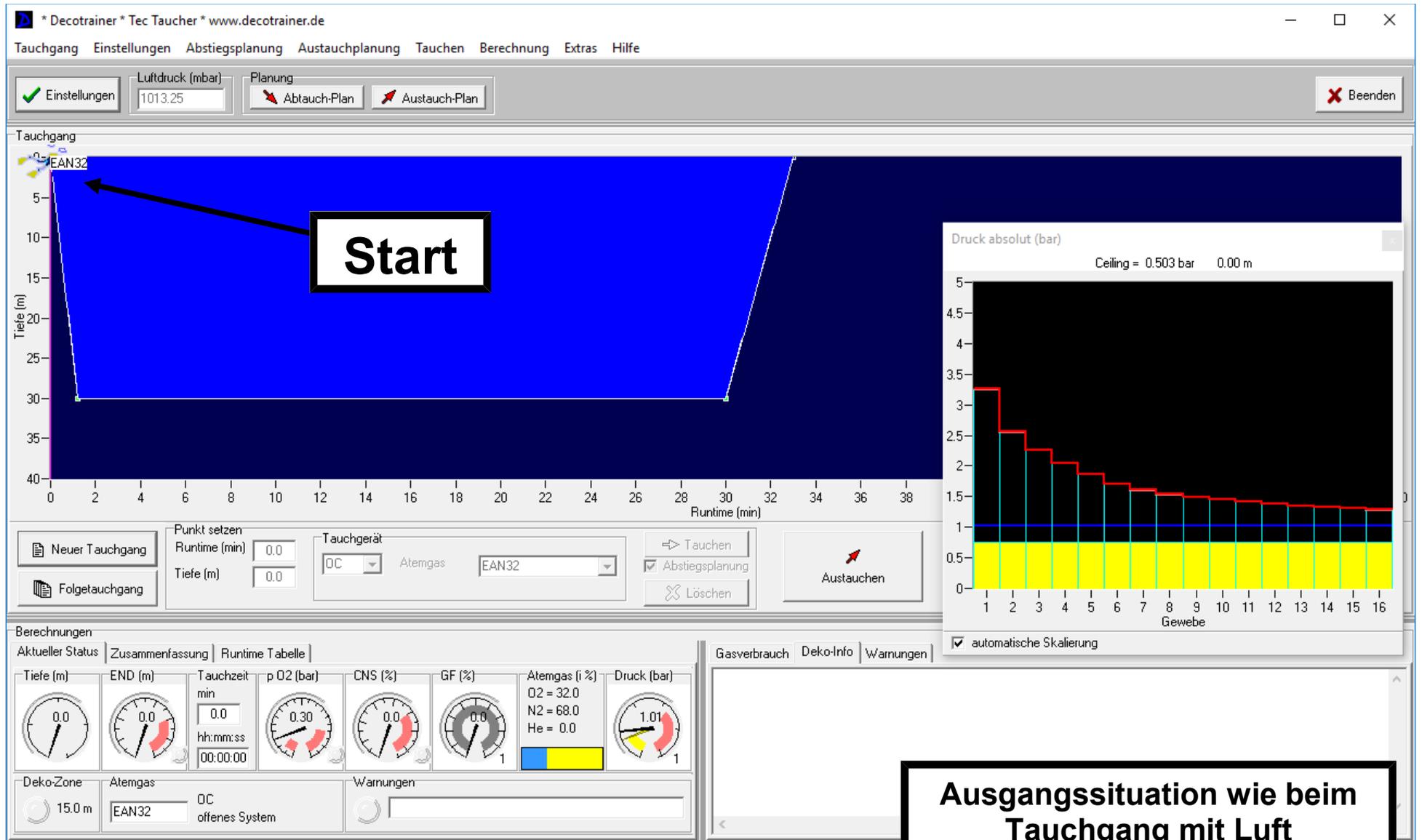
Oberflächenpause 1 Stunde → Tauchgang 30 m, 30 min, Luft



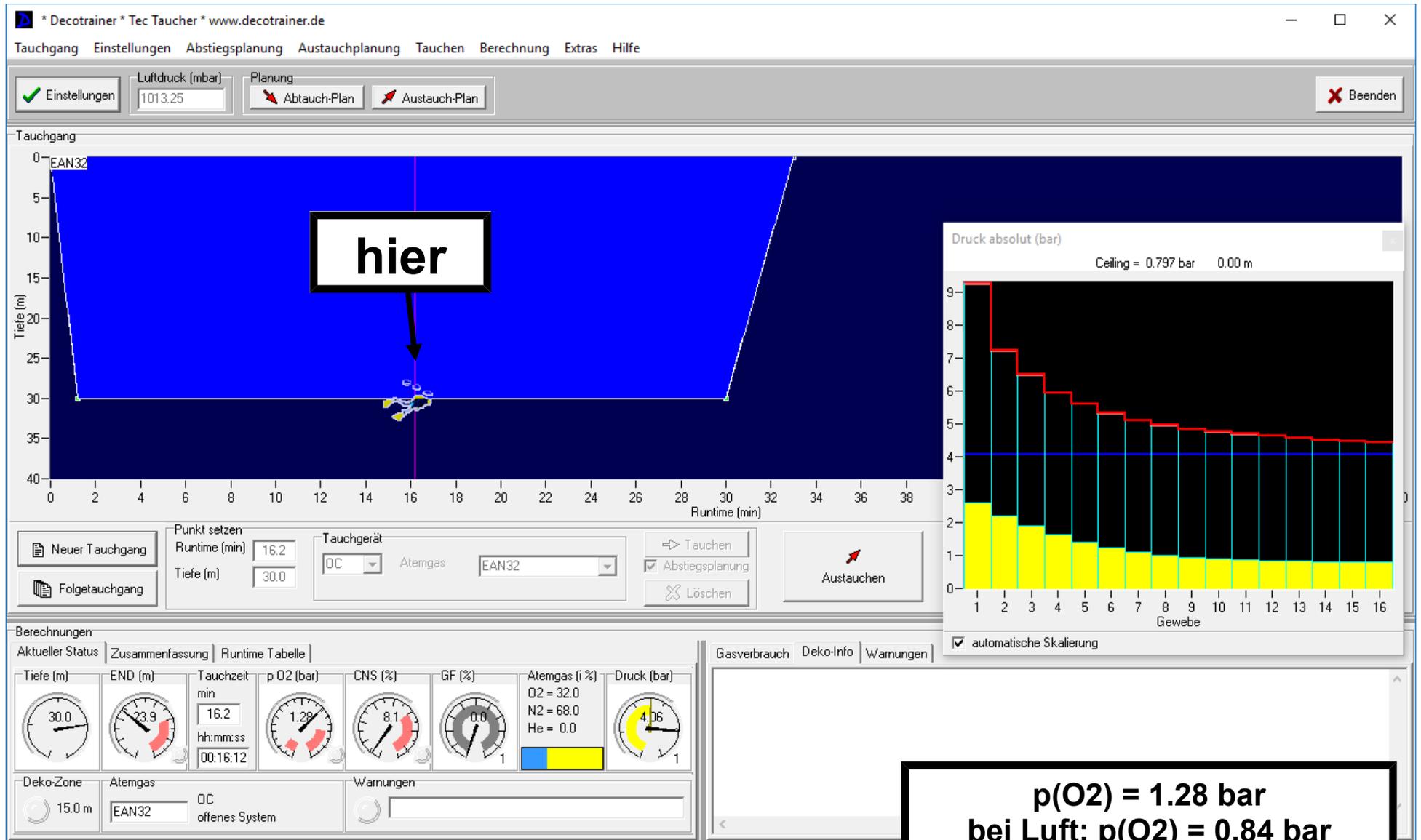
Oberflächenpause 1 Stunde → Tauchgang 30 m, 30 min, Luft



# Tauchgang 30 m, 30 min, Nitrox32



# Tauchgang 30 m, 30 min, Nitrox32



# Tauchgang 30 m, 30 min, Nitrox32

\* Decotrainer \* Tec Taucher \* www.decotrainer.de

Tauchgang Einstellungen Abstiegsplanung Austauschplanung Tauchen Berechnung Extras Hilfe

Einstellungen
  Luftdruck (mbar)
 Planung

Tauchgang

Druck absolut (bar)

Ceiling = 0.995 bar 0.00 m

Punkt setzen  
 Runtime (min)   
 Tiefe (m) 
 Tauchgerät  
 Atemgas 

 Abstiegsplanung

Berechnungen

Aktueller Status Zusammenfassung Runtime Tabelle

Tiefe (m)	END (m)	Tauchzeit min hh:mm:ss	p O2 (bar)	CNS (%)	GF (%)	Atemgas (i %)	Druck (bar)
0.0	0.0	33.0 00:33:00	0.30	15.9	96.8	O2 = 32.0 N2 = 68.0 He = 0.0	1.01

Deko-Zone  15.0 m  
 Atemgas  OC  
 offenes System

Gasverbrauch Deko-Info Warnungen

automatische Skalierung

**keine Dekopflucht**

# Bergsee auf 800 mNN Höhe, Tauchgang 30 m, 30 min, Luft

\* Decotrainer \* Tec Taucher \* www.decotrainer.de

Tauchgang Einstellungen Abstiegsplanung Austauschplanung Tauchen Berechnung Extras Hilfe

Einstellungen

Tauchgang

Druck absolut (bar)

Ceiling = 0.430 bar 0.00 m

Punkt setzen  
 Runtime (min)   
 Tiefe (m) 
 Tauchgerät  
 Atemgas 

 Abstiegsplanung

Berechnungen

Aktueller Status Zusammenfassung Runtime Tabelle

Tiefe (m)	END (m)	Tauchzeit (min)	p O2 (bar)	CNS (%)	GF (%)	Atemgas (i %)	Druck (bar)
0.0	0.0	0.0	0.18	0.0	0.0	O2 = 20.9 N2 = 79.0 He = 0.0	0.92

Deko-Zone 
 Atemgas  offenes System

Gasverbrauch Deko-Info Warnungen

6.00 m	1.00 min
3.00 m	9.00 min

automatische Skalierung

**Sättigung bei  
Luftdruck 917 mbar  
(- 9.5 % gegenüber  
Standard = 1013 mbar)**

# Bergsee auf 800 mNN Höhe, Tauchgang 30 m, 30 min, Luft

\* Decotrainer \* Tec Taucher \* www.decotrainer.de

Tauchgang Einstellungen Abstiegsplanung Austauschplanung Tauchen Berechnung Extras Hilfe

Einstellungen

Tauchgang

Druck absolut (bar)

Ceiling = 0.896 bar 0.00 m

Punkt setzen  
 Runtime (min)   
 Tiefe (m) 
 Tauchgerät  
 Atemgas 

 Abstiegsplanung

Berechnungen

Aktueller Status Zusammenfassung Runtime Tabelle

Tiefe (m)	END (m)	Tauchzeit (min)	p O2 (bar)	CNS (%)	GF (%)	Atemgas (i %)	Druck (bar)
0.0	0.0	43.0	0.18	6.3	85.9	O2 = 20.9 N2 = 79.0 He = 0.0	0.92
Deko-Zone		Atemgas		Warnungen			
20.0 m		OC offenes System					

Gasverbrauch Deko-Info Warnungen

6.00 m	1.00 min
3.00 m	9.00 min

automatische Skalierung

**Deko:**  
**6 m 1 min**  
**3 m 9 min**

# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, Gaswechsel, OC (= Open Circuit)

The screenshot shows the Decotrainer software interface for a Tec diving profile. The main window displays a depth-time graph with a blue area representing the dive profile. A black box labeled "Start" points to the beginning of the dive at 10m depth and 0 minutes. The profile descends to 70m at 15 minutes, stays there until 18 minutes, and then ascends. A label "Tmx15/55" is placed on the descent line. The right side of the interface features a "Druck absolut (bar)" graph showing absolute pressure over 16 tissue compartments. The bottom section contains various gauges for depth, gas pressure, CNS, GF, and differential pressure, along with a gas consumption table and a warning section.

**Druck absolut (bar) Ceiling = 0.503 bar 0.00 m**

Druck (bar)	Gewebe
3.3	1
2.5	2
2.2	3
2.0	4
1.8	5
1.7	6
1.6	7
1.5	8
1.4	9
1.3	10
1.2	11
1.1	12
1.0	13
0.9	14
0.8	15
0.7	16

**Berechnungen**

Gasverbrauch	Deko-Info	Warnungen
18.00 m	0.80 min	
15.00 m	1.70 min	
12.00 m	2.70 min	
9.00 m	3.70 min	
6.00 m	5.70 min	
3.00 m	6.90 min	

**Gase:**  
Luft, Tmx 15/55, Sauerstoff  
keine Sicherheitsreserve

# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, Gaswechsel, OC (= Open Circuit)

**auf 70 m mit Tmx 15/55**

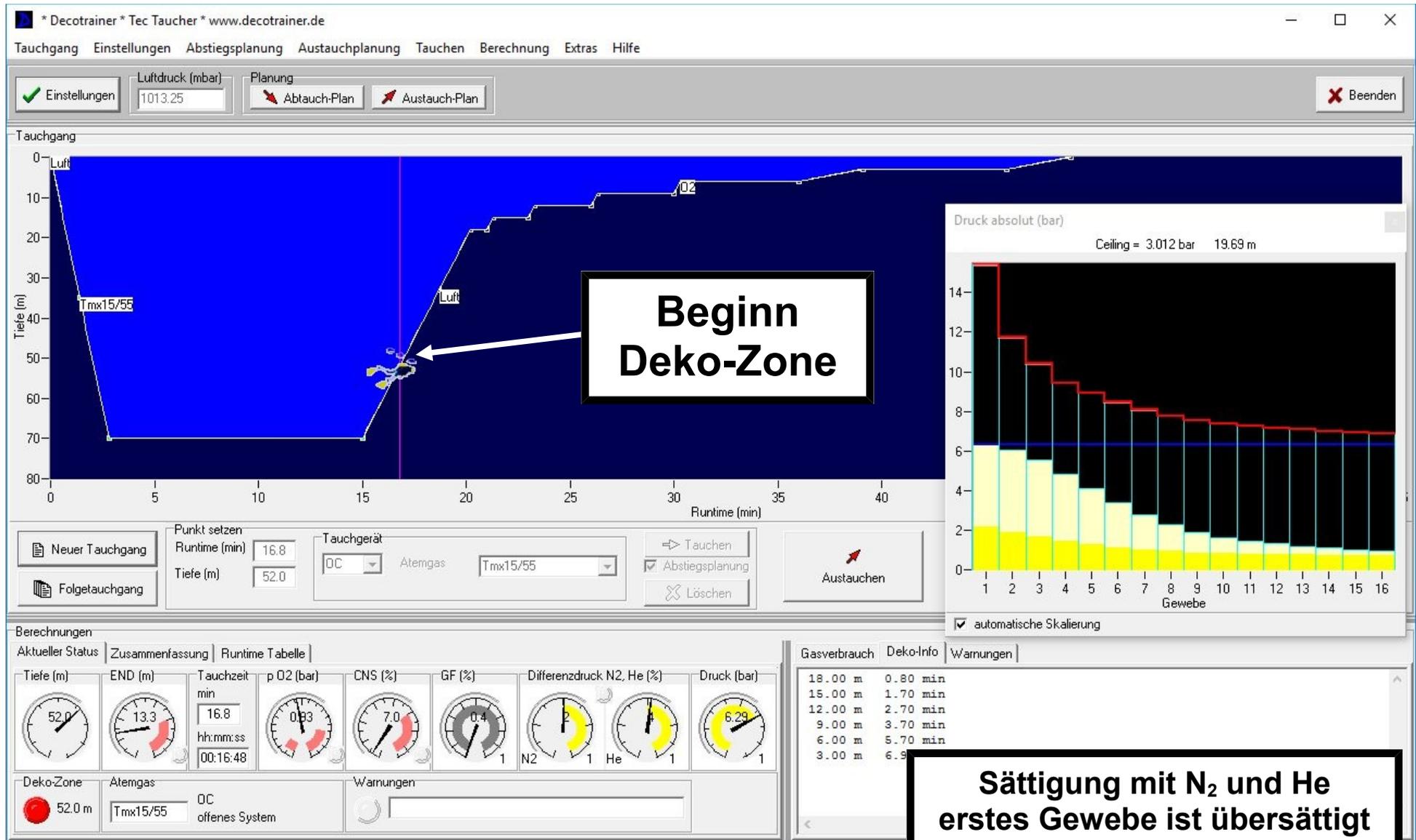
**Druck absolut (bar)**  
Ceiling = 0.678 bar 0.00 m

**Berechnungen**

Tiefe (m)	END (m)	Tauchzeit (min)	p O2 (bar)	CNS (%)	GF (%)	Differenzdruck N2, He (%)	Druck (bar)
18.00	0.80	0.80					18.00
15.00	1.70	1.70					15.00
12.00	2.70	2.70					12.00
9.00	3.70	3.70					9.00
6.00	5.70	5.70					6.00
3.00	6.90	6.90					3.00

**p(O2) = 1.21 bar**  
**END = 20.1 m**  
**Sättigung mit N<sub>2</sub> und He läuft**

# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, Gaswechsel, OC (= Open Circuit)



# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, Gaswechsel, OC (= Open Circuit)

\* Decotrainer \* Tec Taucher \* www.decotrainer.de

Tauchgang Einstellungen Abstiegsplanung Austauschplanung Tauchen Berechnung Extras Hilfe

Einstellungen

Tauchgang

Druck absolut (bar)

Ceiling = 2.820 bar 17.80 m

Punkt setzen  
 Runtime (min)   
 Tiefe (m)

Tauchgerät  
 Atemgas 

 Abstiegsplanung
 
 Löschen

Berechnungen

Aktueller Status Zusammenfassung Runtime Tabelle

Tiefe (m)	END (m)	Tauchzeit (min)	p O2 (bar)	CNS (%)	GF (%)	Differenzdruck N2, He (%)	Druck (bar)
32.0	31.4	18.8	0.88	7.4	31.1	17 / 43	4.25
hh:mm:ss							
00:18:48							

Deko-Zone  52.0 m  
 Atemgas  OC offenes System  
 Warnungen

Gasverbrauch	Deko-Info	Warnungen
18.00 m	0.80 min	
15.00 m	1.70 min	
12.00 m	2.70 min	
9.00 m	3.70 min	
6.00 m	5.70 min	
3.00 m	6.90 min	

**Gaswechsel Tmx → Luft**

**Gegendiffusion: He entsättigt N<sub>2</sub> sättigt auf**

# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, Gaswechsel, OC (= Open Circuit)

\* Decotrainer \* Tec Taucher \* www.decotrainer.de

Tauchgang Einstellungen Abstiegsplanung Austauschplanung Tauchen Berechnung Extras Hilfe

Einstellungen

Tauchgang

Druck absolut (bar)

Ceiling = 1.600 bar 5.78 m

automatische Skalierung

Berechnungen

Aktueller Status Zusammenfassung Runtime Tabelle

Tiefe (m)	END (m)	Tauchzeit (min)	p O2 (bar)	CNS (%)	GF (%)	Differenzdruck N2, He (%)	Druck (bar)
6.0	0.0	30.4	1.56	7.8	96.3	51 / 45	1.62
hh:mm:ss							
00:30:24							

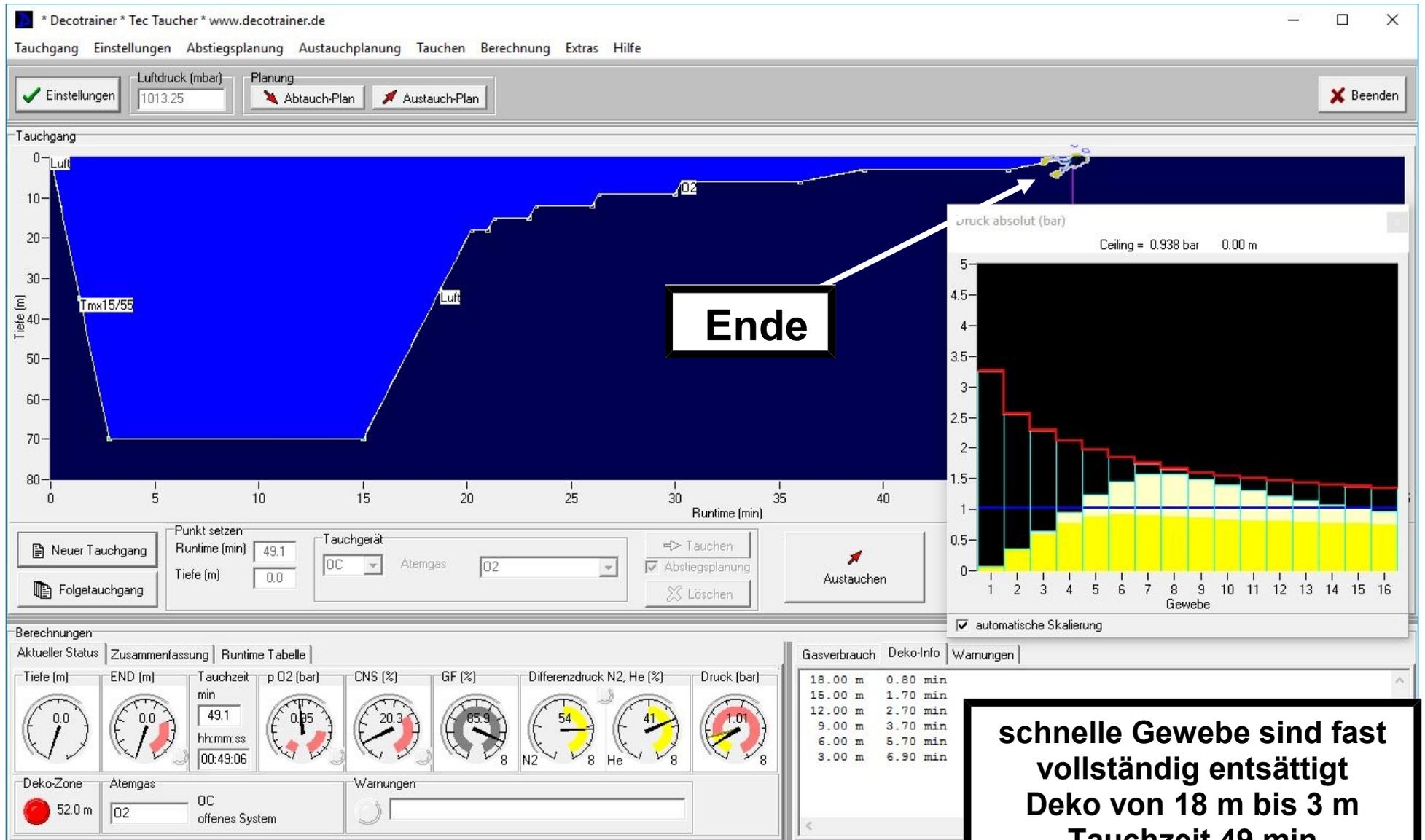
Deko-Zone:  52.0 m  
 Atemgas:  OC offenes System  
 Warnungen:

Gasverbrauch Deko-Info Warnungen

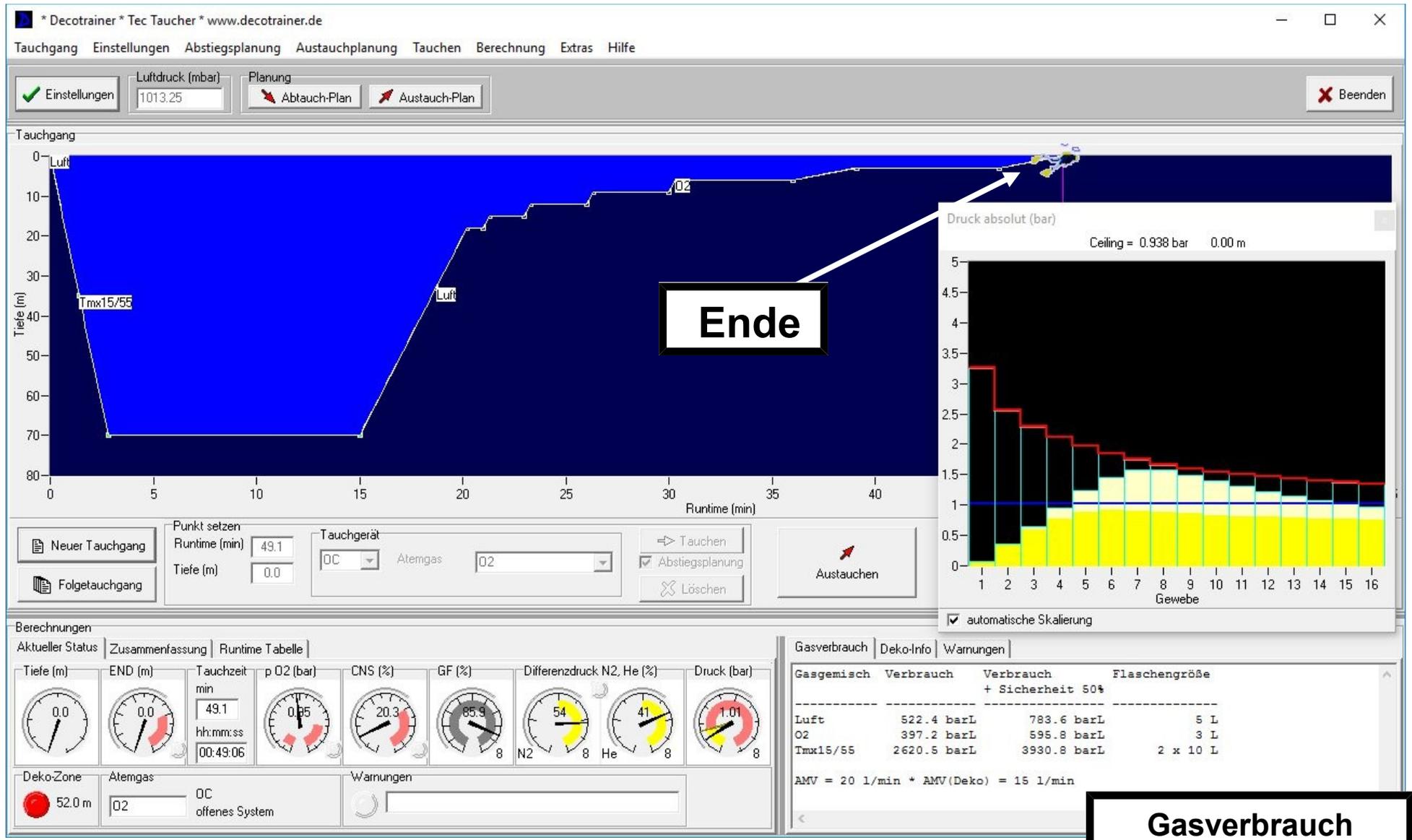
18.00 m	0.80 min	
15.00 m	1.70 min	
12.00 m	2.70 min	
9.00 m	3.70 min	
6.00 m	5.70 min	
3.00 m	6.90 min	

**hoher p(O<sub>2</sub>) → beschleunigte Entsättigung der Inertgase**

# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, Gaswechsel, OC (= Open Circuit)



# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, Gaswechsel, OC (= Open Circuit)



# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, Gaswechsel, GF 50/75, OC (= Open Circuit)

The screenshot displays the Decotrainer software interface for a Tec diving profile. The main window shows a depth-time graph with a 'Start' box at 70m depth and 15 minutes runtime. A secondary graph shows absolute pressure over tissue compartments. The bottom section contains various gauges and a gas consumption table.

**Start**

**Druck absolut (bar)**  
Ceiling = 0.561 bar 0.00 m

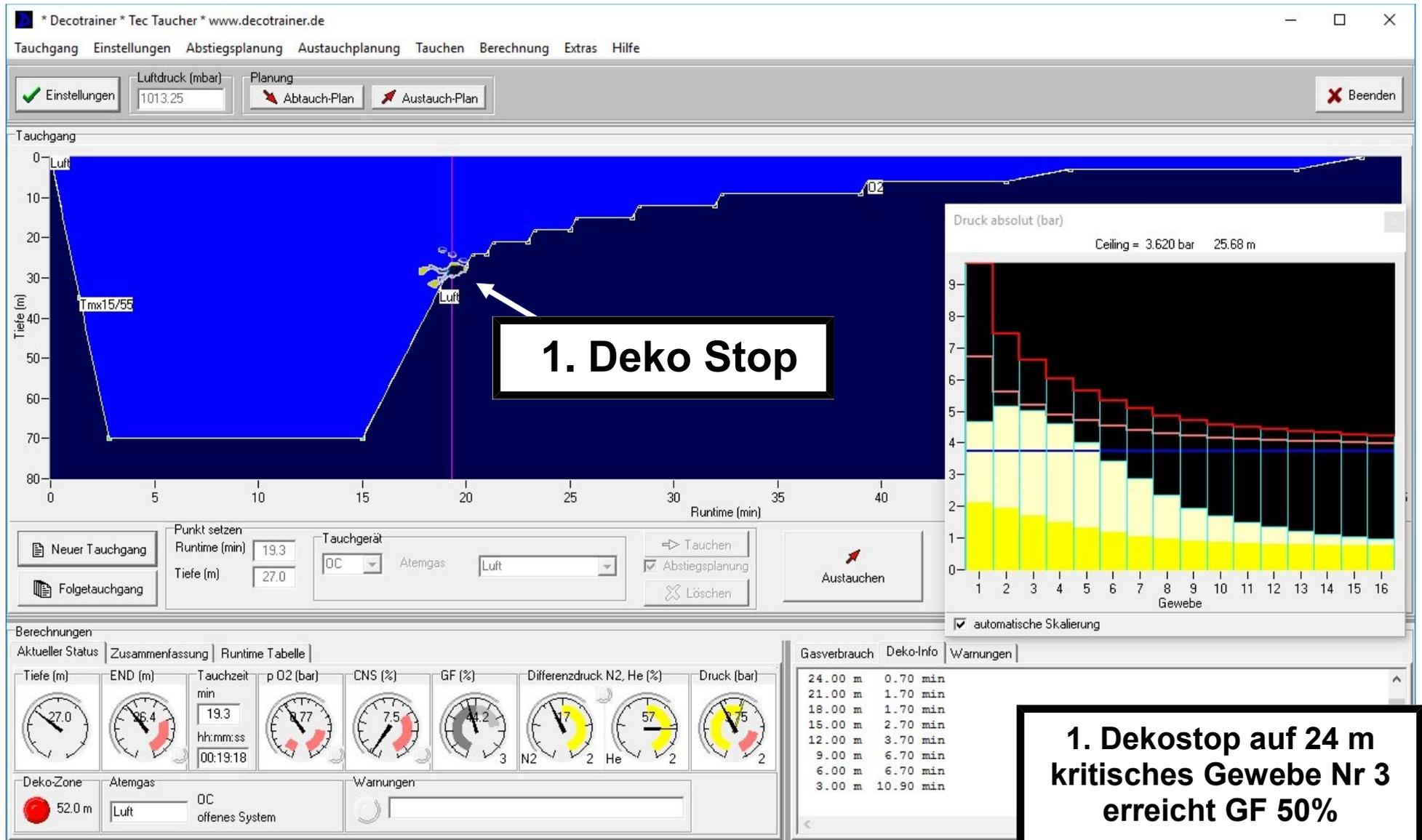
**Berechnungen**

**Gasverbrauch**

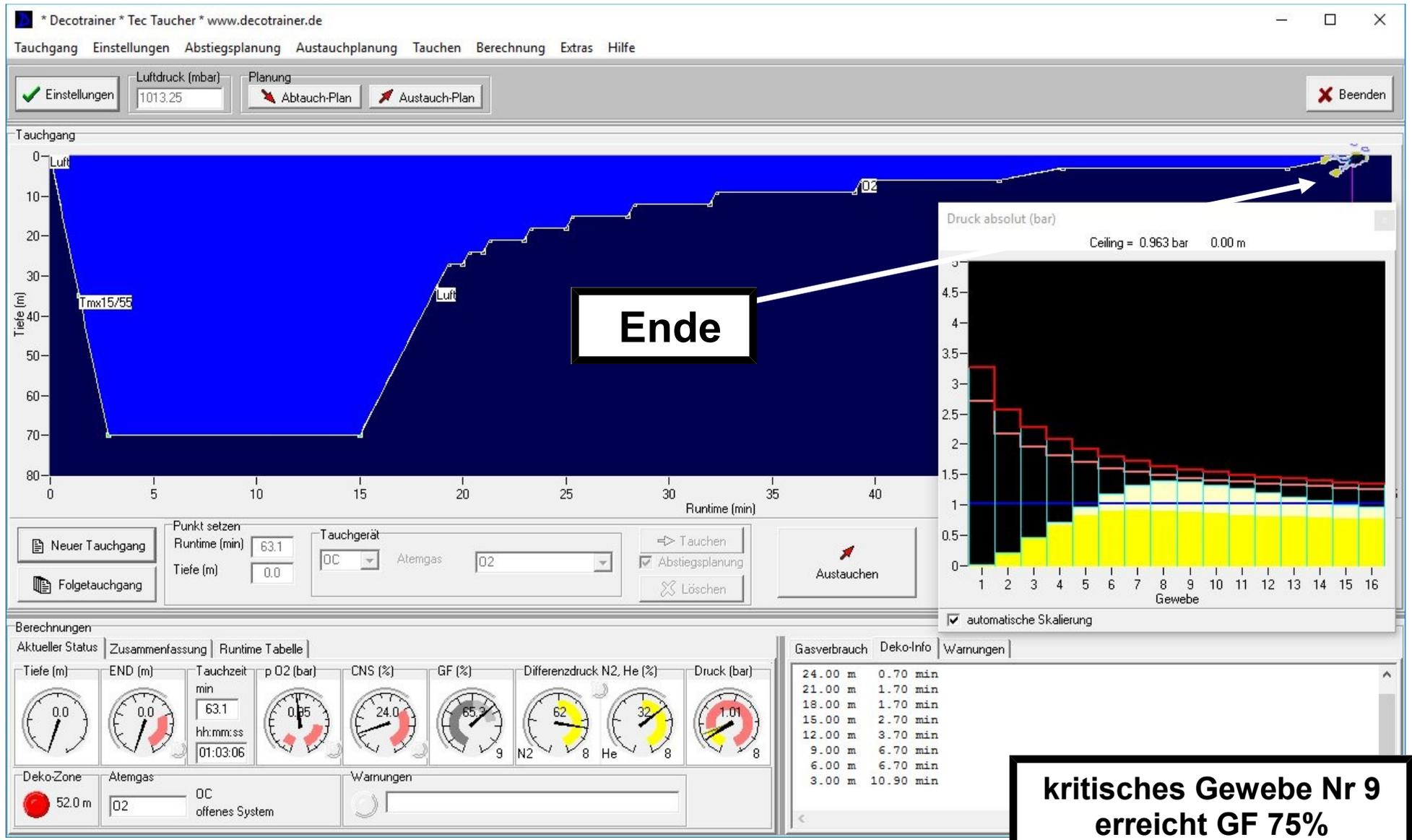
Tiefe (m)	Deko-Info
24.00 m	0.70 min
21.00 m	1.70 min
18.00 m	1.70 min
15.00 m	2.70 min
12.00 m	3.70 min
9.00 m	6.70 min
6.00 m	6.70 min
3.00 m	10.90 min

**Aktueller GF = 50 %  
d.h.  
Sicherheitsreserve 50 %**

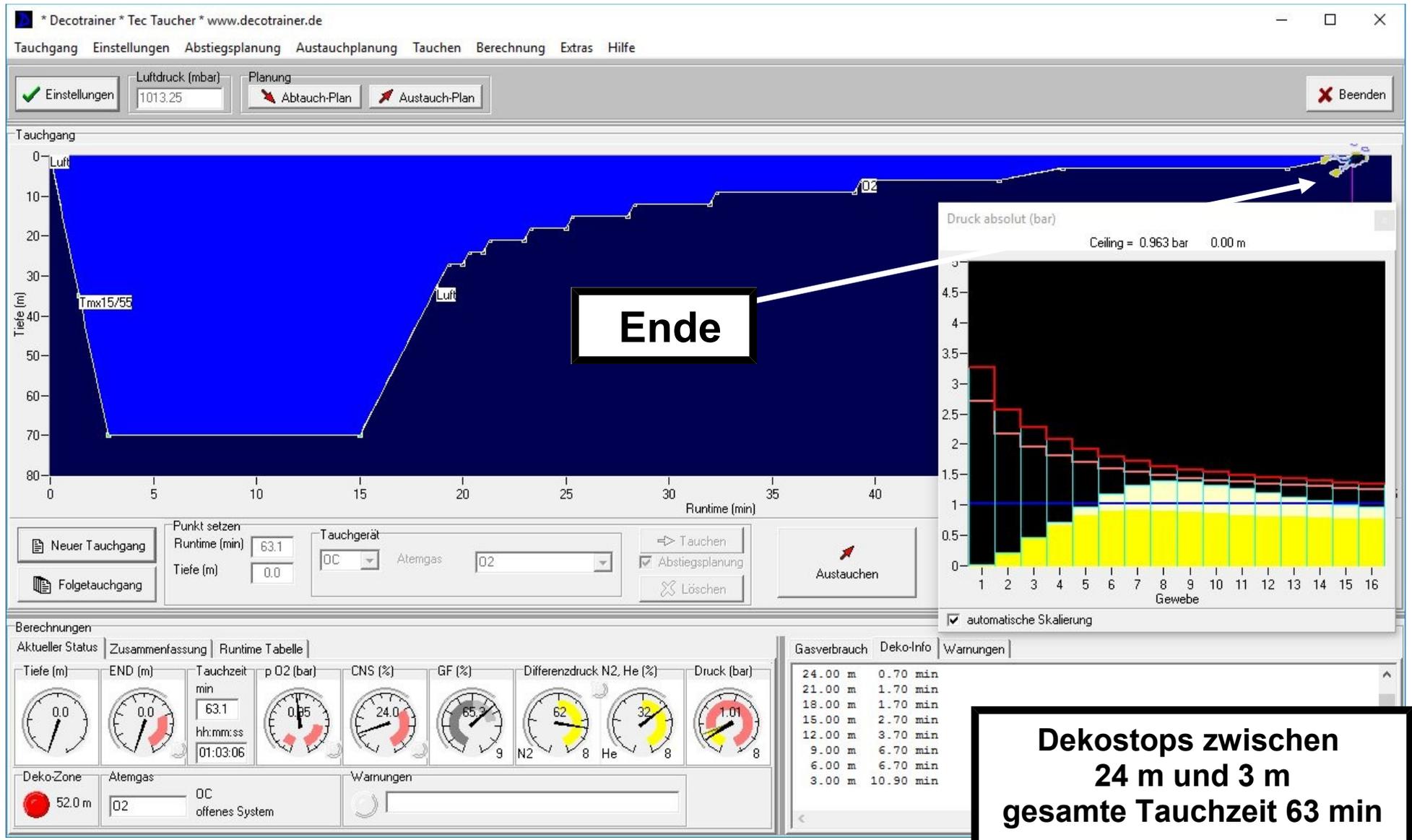
# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, Gaswechsel, GF 50/75, OC (= Open Circuit)



# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, Gaswechsel, GF 50/75, OC (= Open Circuit)

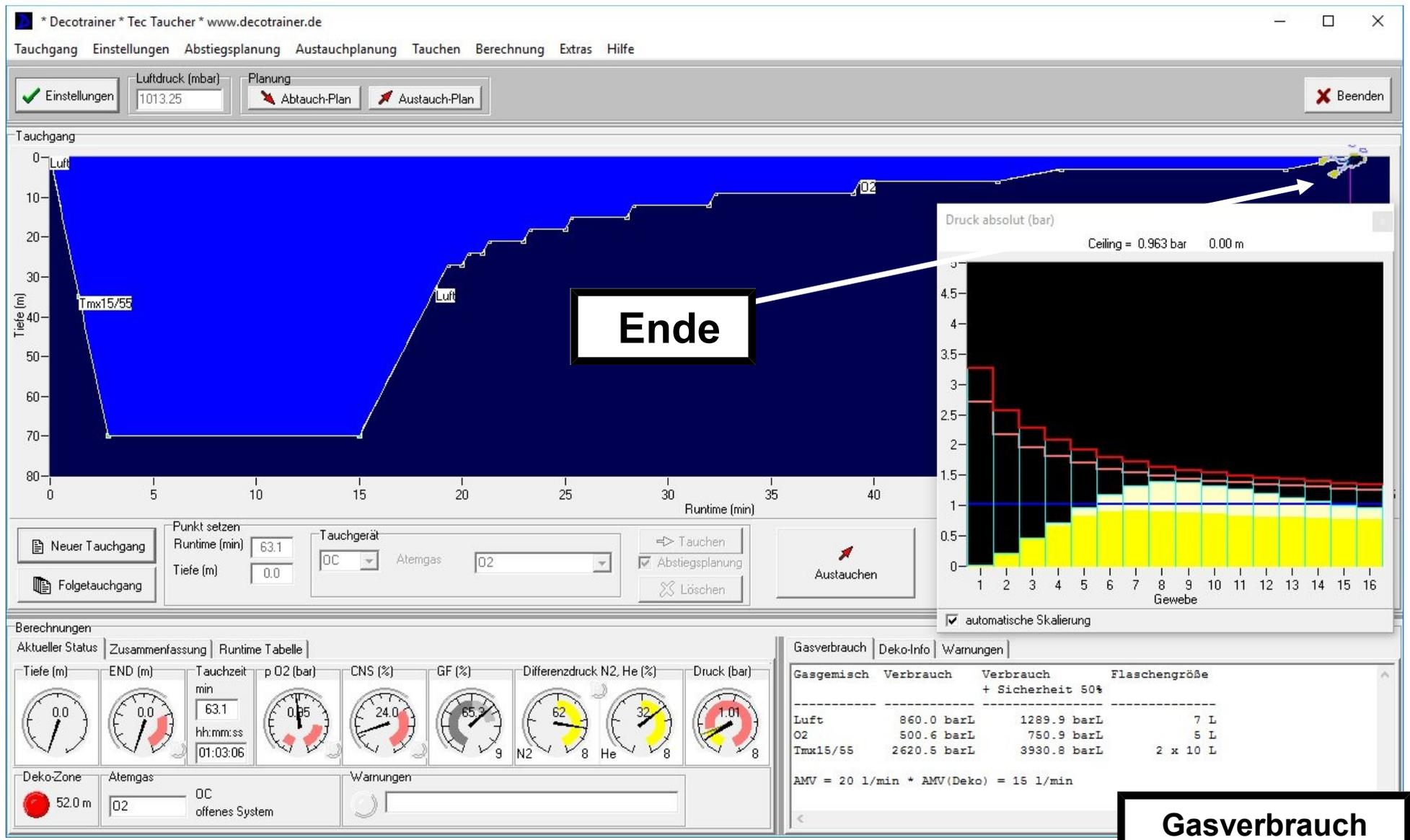


# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, Gaswechsel, GF 50/75, OC (= Open Circuit)



**Dekostops zwischen 24 m und 3 m  
gesamte Tauchzeit 63 min**

# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, Gaswechsel, GF 50/75, OC (= Open Circuit)

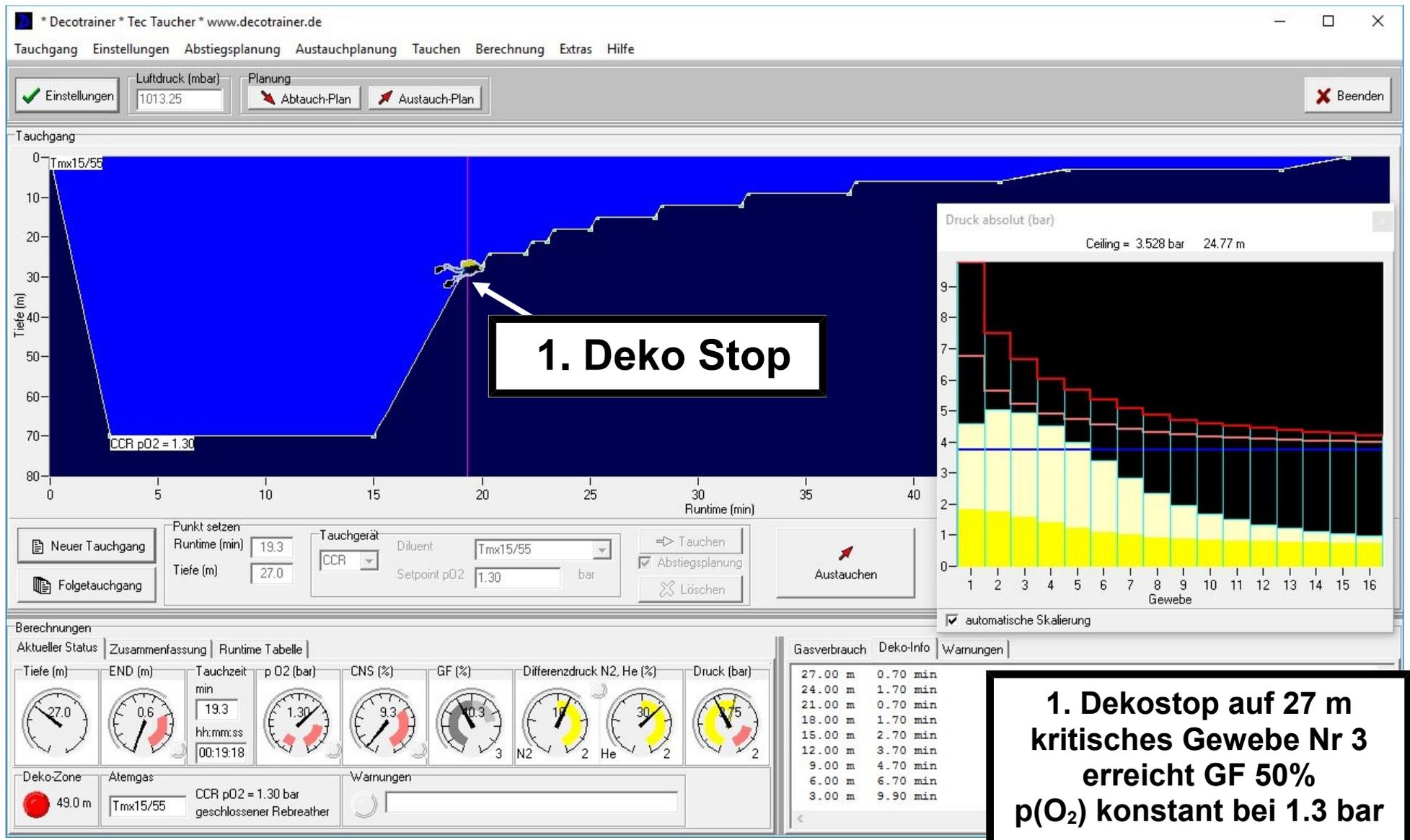


**Gasverbrauch**

# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, CCR (Rebreather) ohne Gaswechsel, GF 50/75



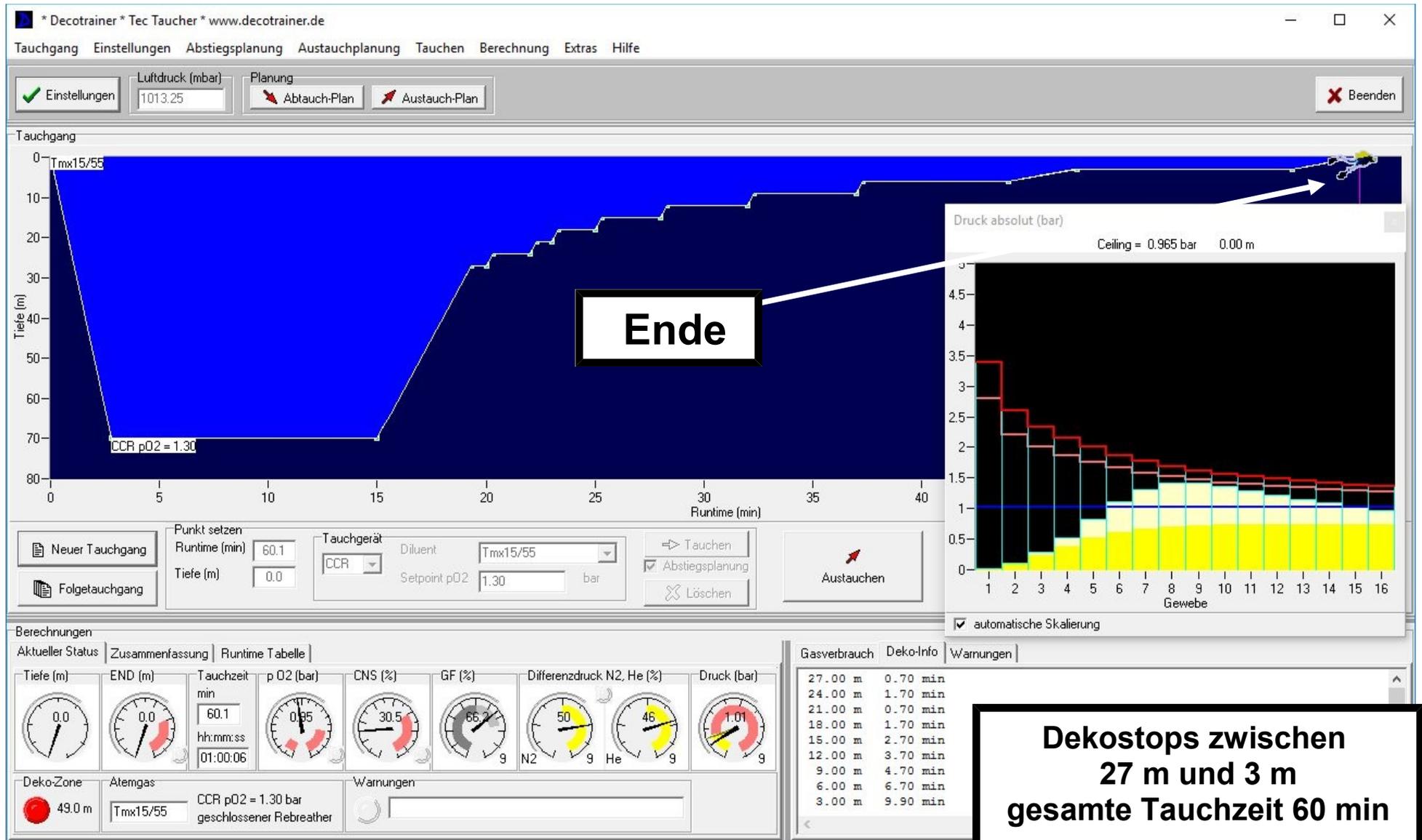
# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, CCR (Rebreather) ohne Gaswechsel, GF 50/75



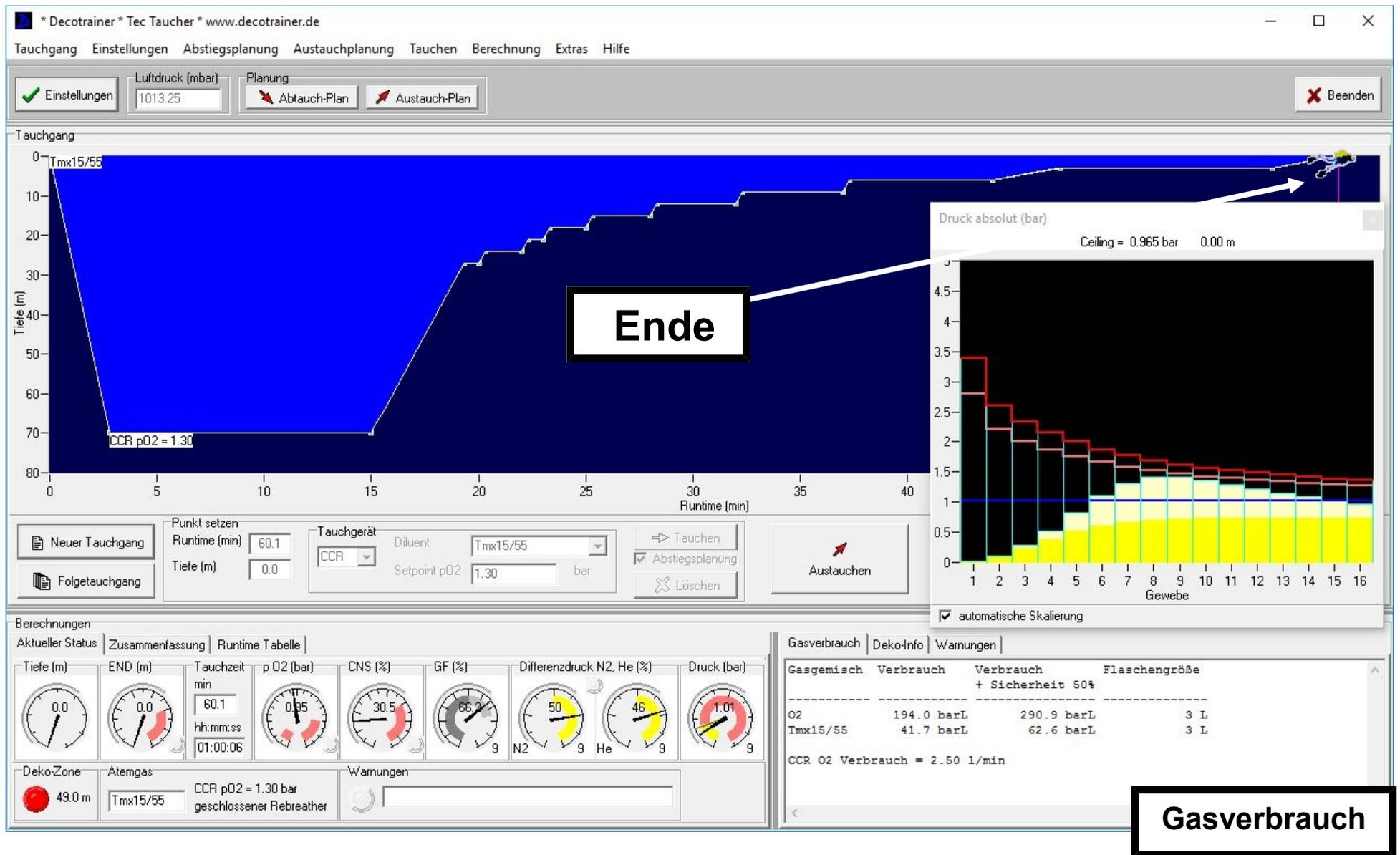
# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, CCR (Rebreather) ohne Gaswechsel, GF 50/75



# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, CCR (Rebreather) ohne Gaswechsel, GF 50/75



# Tec Tauchgang 70 m, 15 min, CCR (Rebreather) ohne Gaswechsel, GF 50/75



[←](#) [→](#) <http://www.decotrainer.de/> [Decotrainer - Index](#)

Datei Bearbeiten Ansicht Favoriten Extras ?

## Willkommen auf der Seite [www.decotrainer.de](http://www.decotrainer.de)

**Decotrainer** ist ein Programm zur Berechnung der Sättigung mit Inertgasen (Stickstoff und Helium) beim Tauchen. **Decotrainer** ist ein Dekompressions-Rechner. **Decotrainer** ist ideal für Schulungen und zum Verstehen der Sättigung und Entsättigung. Und: **Decotrainer** ist in Deutsch.

**Decotrainer** berechnet die Sättigung und Entsättigung nach dem modifizierten Bühlmann-Algorithmus ("Multi-Level"). Alle Angaben und Ergänzungen von Albert A. Bühlmann sind integriert. Dazu gehören die Aufstiegsgeschwindigkeit, alle Bühlmann Modelle für Stickstoff und Helium als Inertgase und auch alle von Bühlmann vorgeschlagenen Sicherheitszuschläge. Zusätzlich sind die Gradienten Faktoren ("Gradient Factors") von Erik C. Baker integriert. Der "Gradient Faktor Lo" steuert die Sicherheitsreserve für den tiefsten Dekostop, der "Gradient factor Hi" die Sicherheitsreserve bei Erreichen der Wasseroberfläche.



[\[Eigenschaften\]](#) [\[Ausbaustufen + Preise\]](#) [\[Screenshots\]](#) [\[Bestellung\]](#) [\[Version\]](#) [\[Downloads\]](#) [\[FAQ\]](#) [\[Links\]](#) [\[Kontakt + Impressum\]](#)

---

**NEU!** 6.12.2016 Die neue [Decotrainer Version 3.14](#) ist online

The actual Decotrainer version speaks english too. [See the order form.](#)

Interesse? Dann doch gleich die Download-Datei ausprobieren. [Gmail](#)

(c) 1997-2016 - [Name]

# Vielen Dank für Eure Aufmerksamkeit!

## Quellen

- Baker Erik C (1998): Understanding M-values. Immersed, Vol. 3, No. 3, 23-27, Fall 1998, [www.immersed.com](http://www.immersed.com).
- Baker Erik C (1998): Clearing up the confusion about "deep stops". Immersed, Vol. 3, No. 4, 23-31, Winter 1998, [www.immersed.com](http://www.immersed.com).
- Blatteau JE, Hugon M, Gardette B, Sainty JM & Galland FM (2005): Bubble incidence after staged decompression from 50 or 60 msw: effect of adding deep stops. Aviat Space Environ Med. 2005 May, 76(5), 490-2.
- Bühlmann A. A., Völlm E. B. & Nussberger P. (2002): Tauchmedizin. 5. Auflage, Springer-Verlag.
- Burton Steve (2004): How to avoid a isobaric counterdiffusion hit - or a simple visualization for determining the tolerable increase in inspired nitrogen percentage during the decompression phase of trimix dives. [http://www.scubaengineer.com/isobaric\\_counter\\_diffusion.htm](http://www.scubaengineer.com/isobaric_counter_diffusion.htm)
- D'Aoust & Lambertsen (1983): Isobaric gas exchange and supersaturation by counterdiffusion, 383-403. In: Peter Bennett & David Elliott: Physiology and medicine of diving, 3rd ed.
- Donald (1947a): Oxygen poisoning in man - part 1 - brmedj03781-0003.pdf
- Donald (1947b): Oxygen poisoning in man - part 2 - brmedj03782-0008.pdf
- Doolette & Mitchell (2003) : Biophysical basis of inner ear decompression sickness. J. Appl. Physiol. 94: 2145-2150
- Doolette DJ & Mitchell SJ (2013): Recreational technical diving part 2: decompression from deep technical dives. Diving Hyperb Med. 2013 Jun; 43(2):96-104.
- Hamilton (1989): Tolerating exposure to high oxygen levels - REPEX and other methods.
- JJ-CCR Manual (2011): IART, International Association of Rebreather Trainers.
- Lettnin Heinz K. J. (2001): International Textbook of Mixed Gas Diving. Theory, Technique, Application. Best Publishing Company, 2nd printing.
- Mitchell Simon (2015): Decompression controversies. <https://www.youtube.com/watch?v=UY61E49Iyos>
- NOAA Dive manual (2008)
- Pyle R.L. (1996): The importance of deep safety stops: Rethinking ascent patterns from decompression dives. DeepTech. 5/64, Cave Diving Group Newsletter, 121/2-5.
- Rauen (2016): Decotrainer-Handbuch - Computer-Programm "Decotrainer" zur Berechnung der Sättigung beim Tauchen ([www.decotrainer.de](http://www.decotrainer.de))
- Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki> und <https://en.wikipedia.org/wiki>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Dive\\_computer](https://en.wikipedia.org/wiki/Dive_computer)
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Innenohr>
- <http://shop.mares.com/de/diving/computers.html/>
- <http://www.scubapro.com/de-DE/DEU/instruments/computers.aspx>
- <http://www.seveke.de/tauchen/altet/2dekomet-demont.htm>
- <http://www.suunto.com/de-DE/Tauchkollektionen/>