# Tauchmedizin - Seminar

TSA des TC69

## Grundlagen der Dekompression

Stefan Overhagen
**FA Anästhesie**
**Tauch- und Überdruckmedizin (nach GTÜM e.V.)**
**St.Josef-Hospital Oberhausen**
**www.tcsoverhagen.de**

1. Februar 2004

# Dekompressionsphysiologie

- Seit dreihundertdreißig Jahren werden die physiologischen und pathophysiologischen Vorgänge bei Dekompression des Organismus erforscht.
- Genaue Modellvorstellungen existieren seit ca. 100 Jahren
- 1890 wurden tödliche DCS-Erkrankungen bei Brückenbauern durch Rekompressionstherapie von 25% auf 2% gesenkt

©S.Overhagen 2004

# Historie

1670 Boyle beschreibt bei Unterdruckversuchen Störungen des Blutflusses durch Blasen

1837 Entwicklung des Helmtauchanzug durch Siebe

1841 Triger beschreibt bei Minenarbeitern DCS-Symptome, die er als Caissonerkrankung bezeichnet

1854 Pol und Watelle stellen den Zusammenhang zwischen Expositionsdauer und Schwere der DCS-Symptome fest.

Robert Boyle

August Siebe

©S.Overhagen 2004

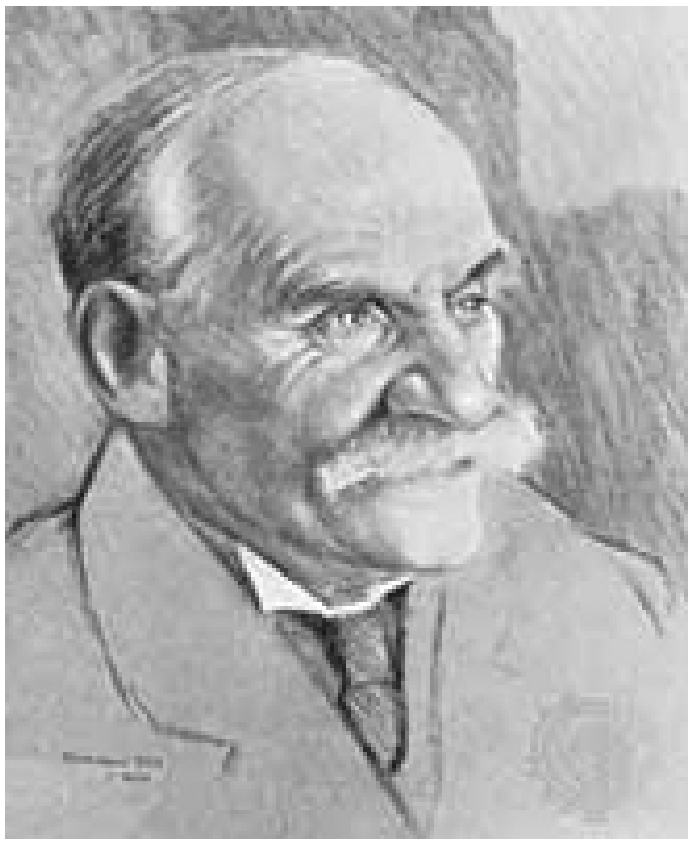
# Historie

1857 Seyler beschreibt pulmonale Blockaden durch Gasblasen

1878 Bert identifiziert Stickstoff als Hauptbestandteil von Blasen nach Deco

1900 Haller, Mager und von Schrotter stellen erste Deko-Regeln auf

1908 Haldane erkennt die unterschiedlichen Sättigungshalbwertzeiten verschiedener Kompartimente



Scott Haldane

©S.Overhagen 2004

©S.Overhagen 2004
www.tcsoverhagen.de

# Haldane'sches Dekompressionsmodell

- Die maximale lösliche Stickstoffmenge hängt vom Löslichkeitskoeffizienten *alpha* ab
- Die Geschwindigkeit hängt ab von der spezifischen Durchblutung Q ( $Q/V_G$ ( ml Blut/ml Gewebe X Zeit)) ***und***
- Dem Anteil des Stickstoffs, den das Blut für sich behält (λ=alphaG/alphaB)=Verteilungskoeffizient

©S.Overhagen 2004
www.tcsoverhagen.de

# Haldane'sches Dekompressionsmodell

- Sättigung:

$$P_G(N_2)=P_aN_2(1-e^{-kt})$$

- Entsättigung:

$$P_G(N_2)=P_aN_2 \times e^{-kt}$$

- Geschwindigkeitskonstante k ergibt sich aus:

$$k= a_b/a_G \times Q/V_G = 0{,}69/t_H$$

©S.Overhagen 2004

# Haldane'sches Dekompressionsmodell

- Aus der Erkenntnis, das sich nach Boyle-Mariotte das Volumen einer Blase bei Druckreduktion auf die Hälfte des Ausgangsdrucks verdoppelt, der Durchmesser aber nur um 26% vergrößert, leitete Haldane die sog. 2:1 – Regel ab.

Die erste Hälfte der Dekompression kann demnach ohne Einschränkungen aufgetaucht werden, ab dort müssen Dekostufen eingehalten werden.

©S.Overhagen 2004

# Weiterentwicklungen

- Die britische Admiralität veränderte die Haldane-Tabellen, die bis 50m sicher gerechnet waren, von sich aus bis auf eine Tiefe von 64 m
- Die Erkenntnis, dass die kritische Aufsättigung der Gewebe nicht nur von der Halbwertzeit, sondern auch von Tiefe und Dauer des Aufenthaltes abhängt, ließ die alte 2:1 nicht grundsätzlich anwenden
- Die USA starten in den 40er Jahren eine große Untersuchungsreihe, um das Tauchen der Marine sicherer zu gestalten

©S.Overhagen 2004

# Weiterentwicklungen

- 1935 & 1937 untersuchten Hawkins und Yarbrough in großen Untersuchungsreihen mehrere tausend Taucher, die ohne Deko-Stops nach Tiefen von 30 – 60 m auftauchten ( DCS-Rate 2,5%)
- Die Auswertung der Ergebnisse zeigte deutlich, dass für schnelle Gewebe das Dekompressionsverhältnis wesentlich höher, für langsame Gewebe wesentlich niedriger ist
- Daraufhin wurden die Haldane-Tabellen modifiziert, Dekozeiten für flache TG wurden verkürzt
- die DCS-Rate für tiefe TG stieg auf 50%

©S.Overhagen 2004

# Weiterentwicklungen

- 1945 stellte Aue und 1947 die US-Navy-Arbeitsgruppe um Dwyer die Yarbrough-Tabellen auf ein neues Fundament.
- Statt linearer Beziehung zwischen toleriertem Inertgasdruck und Umgebungsdruck für jedes Gewebe stellten die AG´s, gestützt auf ein kompliziertes mathematisches Modell, ein Verhältnis der Beziehungen zwischen den beiden Drücken, abhängig von den Halbwertzeiten und Tauchtiefen. Mit Hilfe eines weiteren Gewebes und einer weiteren Modifizierung für große Tauchtiefen entstanden die US-Navy Tabellen.

➢ <u>DCS-Rate für alle TG von 1956 – 1976 der US-Navy = 0,065%</u>

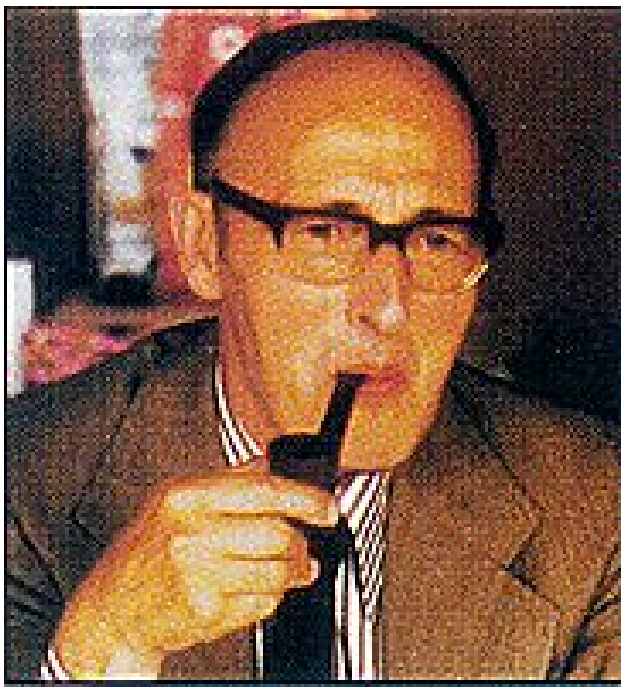
©S.Overhagen 2004

# Weiterentwicklungen

- 1960 entwickelte der Schweizer Bühlmann ein Mehrkomponentenmodell auf Basis von Haldane´s Rechenmodellen, die ZH-L12 und -L16 (ZH für Zürich)

Diese Rechenverfahren gehen von zwei Annahmen aus:

1. Jedes Gewebe sättigt sich unter Überdruck mit Inertgas auf und besitzt eine bestimmte Halbsättigungszeit *und*
2. Einen bestimmten Inertgasüberdruck toleriert jedes Gewebe symptomlos



Albert A. Bühlmann

©S.Overhagen 2004

# Bühlmann-Algorithmus ZH-L16

Dieser am weitesten entwickelte Algorithmus basiert auf 3 simplen mathematischen Gleichungen

1. Ermittlung, unter welchem Partialdruck das Inertgas aufgenommen wird, die *Inspirationsgleichung*
2. Errechnung der Inertgasaufladung jeden Gewebes anhand des Inertgaspartialdrucks im Atemgas. Sie wird als *Sättigungsgleichung* bezeichnet, da sie den Sättigungszustand eines jeden Gewebes zu jeder Zeit des Tauchgangs beschreibt
3. Berechnung des äußeren Drucks, welchen ein Gewebe grade nicht unterschreiten darf, damit keine Gasblasen austreten, also die *Toleranzgleichung*

©S.Overhagen 2004

# Bühlmann-Algorithmus ZH-L16 II

## Zusammenfassend

In die Funktion der Sättigung eines Gewebes gehen ein:

1. Tauchzeit (Expositionszeit)
2. Tauchtiefe (der abgeleitete Umgebungsdruck)
3. Der Inertgasanteil im Atemgasgemisch
4. Der Umgebungsluftdruck über Wasser

Aus diesen Formeln errechnen Computer die nötigen Dekostufen, zur Nullzeitrechnung wird eine andere Rechnung benötigt

©S.Overhagen 2004

# Bühlmann-Algorithmus ZH-L16 III

Nullzeitberechnung

$$p.ambtol = (p.i.g(t_E) - a) \times b$$

$$\rightarrow \frac{p.ambtol}{b} + a = p.i.g(t_E)$$

©S.Overhagen 2004

# Bühlmann-Algorithmus ZH-L16 IV

$$p.i.g(t_E) = p.i.g(t_o) + [p.i.i.g - p.i.g(t_o)] \times (1 - 2^{-\frac{dt}{105}})$$

$$\frac{p.amb.tol}{b} + a = p.i.g(t_o) + [p.i.i.g - p.i.g(t_o)] \times (1 - 2^{-\frac{dt}{105}})$$

$$\frac{p.amb.tol}{b} + a - p.i.g(t_o) = [p.i.i.g - p.i.g(t_o)] \times (1 - 2^{-\frac{dt}{105}})$$

$$\frac{\frac{p.amb.tol}{b} + a - p.i.g(t_o)}{[p.i.i.g - p.i.g(t_o)]} = 1 - 2^{-\frac{dt}{105}}$$

$$\frac{\frac{p.amb.tol}{b} + a - p.i.g(t_o)}{[p.i.i.g - p.i.g(t_o)]} - 1 = -2^{-\frac{dt}{105}}$$

$$\frac{\frac{p.amb.tol}{b} + a - p.i.g(t_o)}{[p.i.i.g - p.i.g(t_o)]} - 1 = -2^{-\frac{dt}{105}}$$

$$-\frac{\frac{p.amb.tol}{b} + a - p.i.g(t_o)}{[p.i.i.g - p.i.g(t_o)]} + 1 = 2^{-\frac{dt}{105}}$$

$$\log(-\frac{\frac{p.amb.tol}{b} + a - p.i.g(t_o)}{[p.i.i.g - p.i.g(t_o)]} + 1) = -\frac{tE}{105} \times \log(2)$$

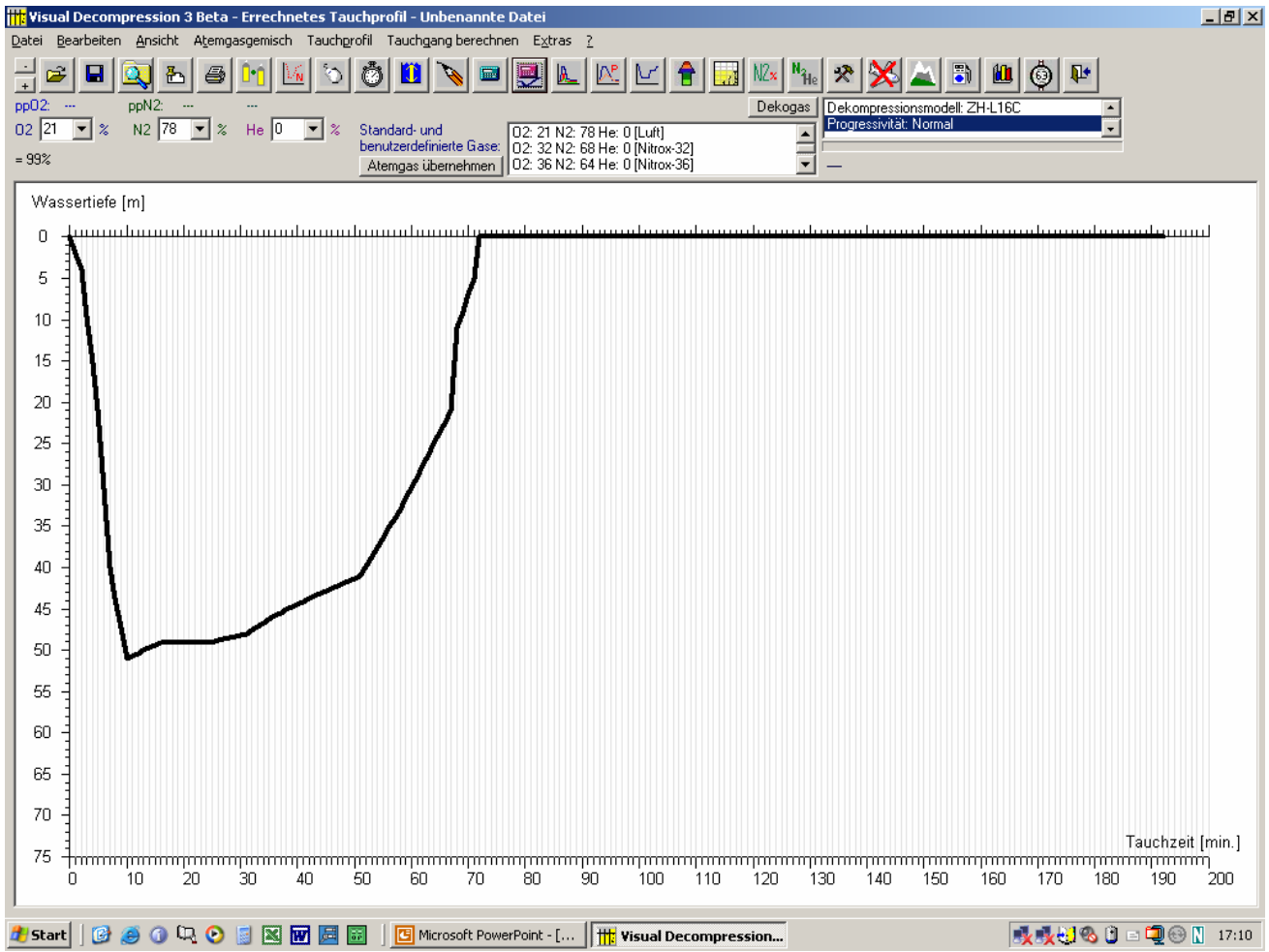
©S.Overhagen 2004

# Bühlmann-Algorithmus ZH-L16 V

$$\frac{\log\left(-\frac{\frac{p.amb.tol}{b}+a-pi.g(t_o)}{\left[p.ii.g-pi.g(t_o)\right]}+1\right)}{\log(2)}=-\frac{tE}{t05}$$

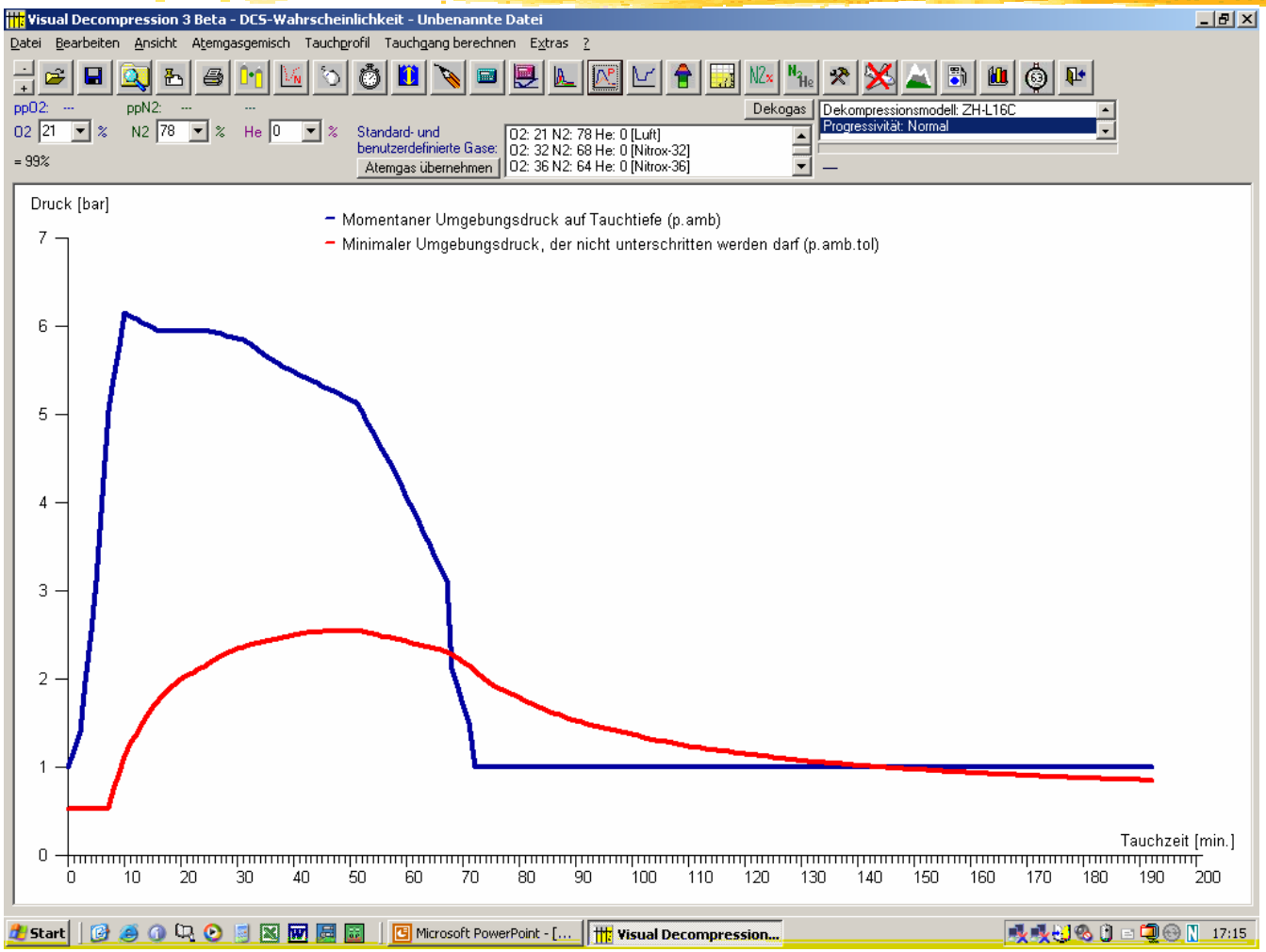
©S.Overhagen 2004

# Sättigung und Entsättigung



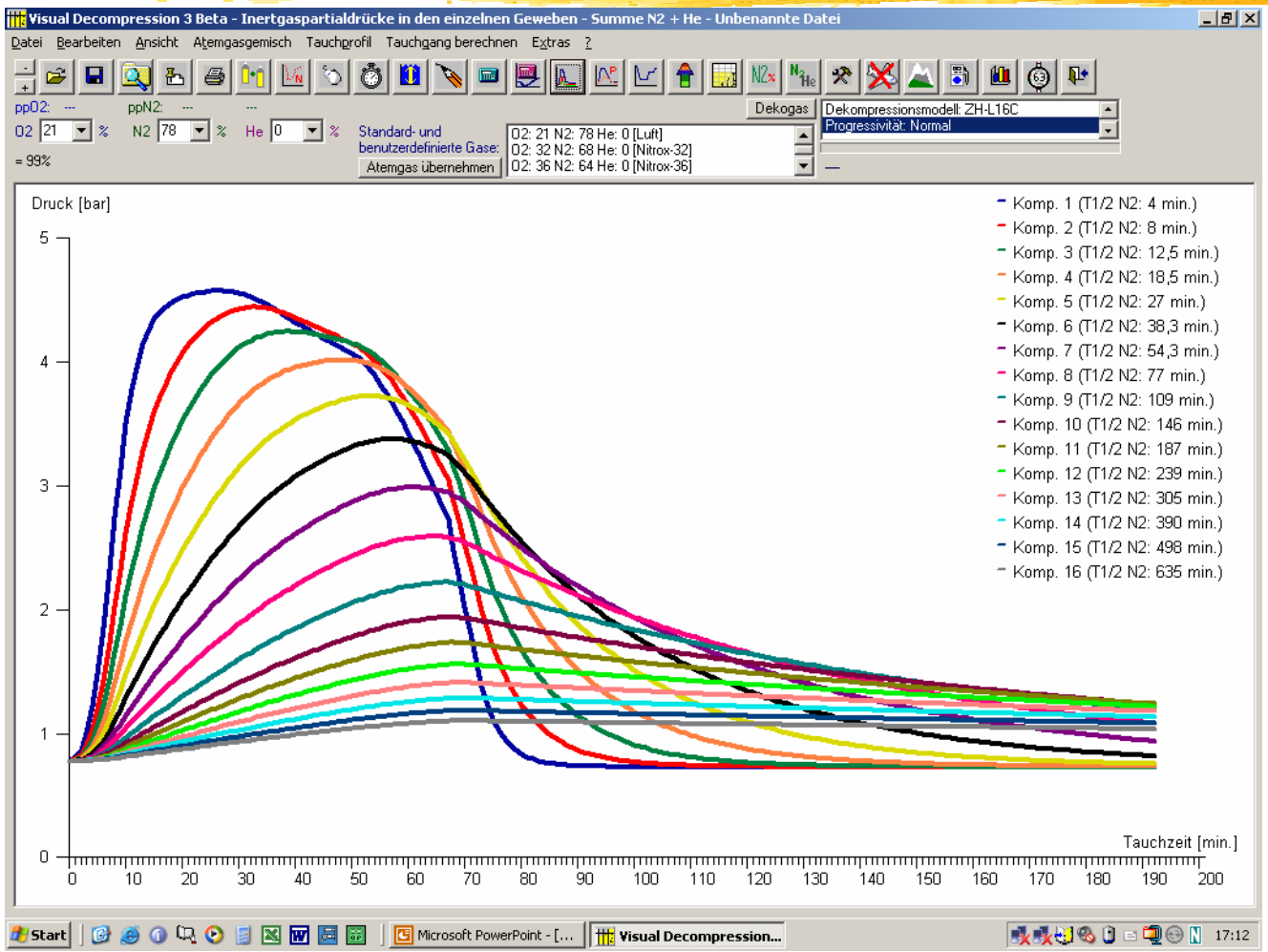

©S.Overhagen 2004

# Sättigung und Entsättigung




©S.Overhagen 2004

# Sättigung und Entsättigung

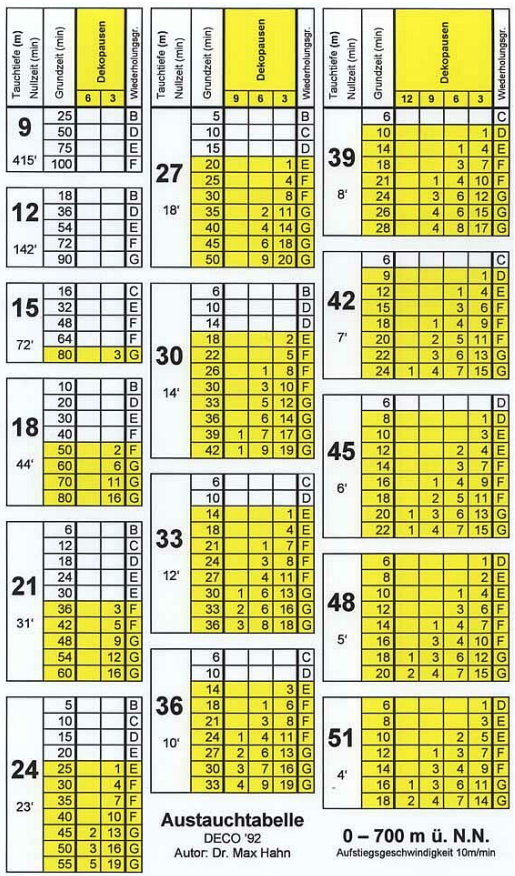



©S.Overhagen 2004

# Verbesserung/Erleichterung

- 1992 übersetzte Max Hahn die Berechnungen Haldanes und Bühlmanns in eine verständliche Austauchtabelle, die 2000 überarbeitet wurde und bis zum heutigen Tage verwendet wird.

Max Hahn (†11.6.2000)



| Tauchtiefe (m) | Nullzeit (min) | Grundzeit (min) | Dekopausen 6 | Dekopausen 3 | Wiederholungsgr. |
|---|---|---|---|---|---|
| 9 | 415' | 25 | | | B |
| | | 50 | | | D |
| | | 75 | | | E |
| | | 100 | | | F |
| 12 | 142' | 18 | | | B |
| | | 36 | | | D |
| | | 54 | | | E |
| | | 72 | | | F |
| | | 90 | | | G |
| 15 | 72' | 16 | | | C |
| | | 32 | | | E |
| | | 48 | | | F |
| | | 64 | | | F |
| | | 80 | | 3 | G |
| 18 | 44' | 10 | | | B |
| | | 20 | | | D |
| | | 30 | | | E |
| | | 40 | | | F |
| | | 50 | | 2 | F |
| | | 60 | | 6 | G |
| | | 70 | | 11 | G |
| | | 80 | | 16 | G |
| 21 | 31' | 6 | | | B |
| | | 12 | | | C |
| | | 18 | | | D |
| | | 24 | | | E |
| | | 30 | | | E |
| | | 36 | | 3 | F |
| | | 42 | | 5 | F |
| | | 48 | | 9 | G |
| | | 54 | | 12 | G |
| | | 60 | | 16 | G |
| 24 | 23' | 5 | | | B |
| | | 10 | | | C |
| | | 15 | | | D |
| | | 20 | | | E |
| | | 25 | | 1 | E |
| | | 30 | | 4 | F |
| | | 35 | | 7 | F |
| | | 40 | | 10 | F |
| | | 45 | 2 | 13 | G |
| | | 50 | 3 | 16 | G |
| | | 55 | 5 | 19 | G |

| Tauchtiefe (m) | Nullzeit (min) | Grundzeit (min) | Dekopausen 9 | Dekopausen 6 | Dekopausen 3 | Wiederholungsgr. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 27 | 18' | 5 | | | | B |
| | | 10 | | | | C |
| | | 15 | | | | D |
| | | 20 | | | 1 | E |
| | | 25 | | | 4 | F |
| | | 30 | | | 8 | F |
| | | 35 | | 2 | 11 | G |
| | | 40 | | 4 | 14 | G |
| | | 45 | | 6 | 18 | G |
| | | 50 | | 9 | 20 | G |
| 30 | 14' | 6 | | | | B |
| | | 10 | | | | D |
| | | 14 | | | | D |
| | | 18 | | | 2 | E |
| | | 22 | | | 5 | F |
| | | 26 | | 1 | 8 | F |
| | | 30 | | 3 | 10 | F |
| | | 33 | | 5 | 12 | G |
| | | 36 | | 6 | 14 | G |
| | | 39 | 1 | 7 | 17 | G |
| | | 42 | 1 | 9 | 19 | G |
| 33 | 12' | 6 | | | | C |
| | | 10 | | | | D |
| | | 14 | | | 1 | E |
| | | 18 | | | 4 | E |
| | | 21 | | 1 | 7 | F |
| | | 24 | | 3 | 8 | F |
| | | 27 | | 4 | 11 | F |
| | | 30 | 1 | 6 | 13 | G |
| | | 33 | 2 | 6 | 16 | G |
| | | 36 | 3 | 8 | 18 | G |
| 36 | 10' | 6 | | | | C |
| | | 10 | | | | D |
| | | 14 | | | 3 | E |
| | | 18 | | 1 | 6 | F |
| | | 21 | | 3 | 8 | F |
| | | 24 | 1 | 4 | 11 | F |
| | | 27 | 2 | 6 | 13 | G |
| | | 30 | 3 | 7 | 16 | G |
| | | 33 | 4 | 9 | 19 | G |

| Tauchtiefe (m) | Nullzeit (min) | Grundzeit (min) | Dekopausen 12 | Dekopausen 9 | Dekopausen 6 | Dekopausen 3 | Wiederholungsgr. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 39 | 8' | 6 | | | | | C |
| | | 10 | | | | 1 | D |
| | | 14 | | | 1 | 4 | E |
| | | 18 | | | 3 | 7 | F |
| | | 21 | | 1 | 4 | 10 | F |
| | | 24 | | 3 | 6 | 12 | G |
| | | 26 | | 4 | 6 | 15 | G |
| | | 28 | | 4 | 8 | 17 | G |
| 42 | 7' | 6 | | | | | C |
| | | 9 | | | | 1 | D |
| | | 12 | | | 1 | 4 | E |
| | | 15 | | | 3 | 6 | F |
| | | 18 | | 1 | 4 | 9 | F |
| | | 20 | | 2 | 5 | 11 | F |
| | | 22 | | 3 | 6 | 13 | G |
| | | 24 | 1 | 4 | 7 | 15 | G |
| 45 | 6' | 6 | | | | | D |
| | | 8 | | | | 1 | D |
| | | 10 | | | | 3 | E |
| | | 12 | | | 2 | 4 | E |
| | | 14 | | | 3 | 7 | F |
| | | 16 | | 1 | 4 | 9 | F |
| | | 18 | | 2 | 5 | 11 | F |
| | | 20 | 1 | 3 | 6 | 13 | G |
| | | 22 | 1 | 4 | 7 | 15 | G |
| 48 | 5' | 6 | | | | 1 | D |
| | | 8 | | | | 2 | E |
| | | 10 | | | 1 | 4 | E |
| | | 12 | | | 3 | 6 | F |
| | | 14 | | 1 | 4 | 7 | F |
| | | 16 | | 3 | 4 | 10 | F |
| | | 18 | 1 | 3 | 6 | 12 | G |
| | | 20 | 2 | 4 | 7 | 15 | G |
| 51 | 4' | 6 | | | | 1 | D |
| | | 8 | | | | 3 | E |
| | | 10 | | | 2 | 5 | E |
| | | 12 | | 1 | 3 | 7 | F |
| | | 14 | | 3 | 4 | 9 | F |
| | | 16 | 1 | 3 | 6 | 11 | G |
| | | 18 | 2 | 4 | 7 | 14 | G |

**Austauchtabelle**
DECO '92
Autor: Dr. Max Hahn

**0 – 700 m ü. N.N.**
Aufstiegsgeschwindigkeit 10m/min

©S.Overhagen 2004

# Blasenentstehung

Über die Existenz dieser Blasenkerne bestehen zwei Modellvorstellungen:

1. YOUNT-Modell — von polarem Kolloid überzogener Nukleus
2. HARVEY-Modell — Spaltbildung der Gefäßintima mit lipophiler Oberfläche

Wobei das Harvey`sche Modell in der Literatur bevorzugt wird

©S.Overhagen 2004

# Blasenentstehung II

Versuchsanordnung zum Nachweis blasenbildender Mikrostrukturen

1. Kompression eines N2-Raumes über Blut und nachfolgende Dekompression

   ➔ keine Blasen im Blut

2. Gleicher Versuch mit Arterien oder verunreinigtem Blut

   ➔ sofort Blasen im Blut

3. Versuch Nr.2 mit 200 bar und folgender Dekompression

   ➔ wenige bis keine Blasen im Blut

4. Blut wird filtriert in verschiedenlumige Chargen und jede einzelne komprimiert und dekomprimiert

   ➔ Blasen in allen Chargen,
   wenig in kleinem Filter, mehr in großem Filter

5. Versuch Nr.4 mit mindestens 4 Stunden Pause zwischen Filtration und Dekompression

   ➔ massenhaft Blasen in allen Chargen

©S.Overhagen 2004

# Blasenentstehung III

- Diese Phänomene werden als Blasenkerne bezeichnet, ihre physikalischen Eigenschaften sind:

1. Kompressibel
2. Gasgefüllt
3. Nicht durch Resorptionsmechanismen zu zerstören

Sie benötigen Strukturen im Gewebe um sich zu Manifestieren, sog. Triggerpunkte

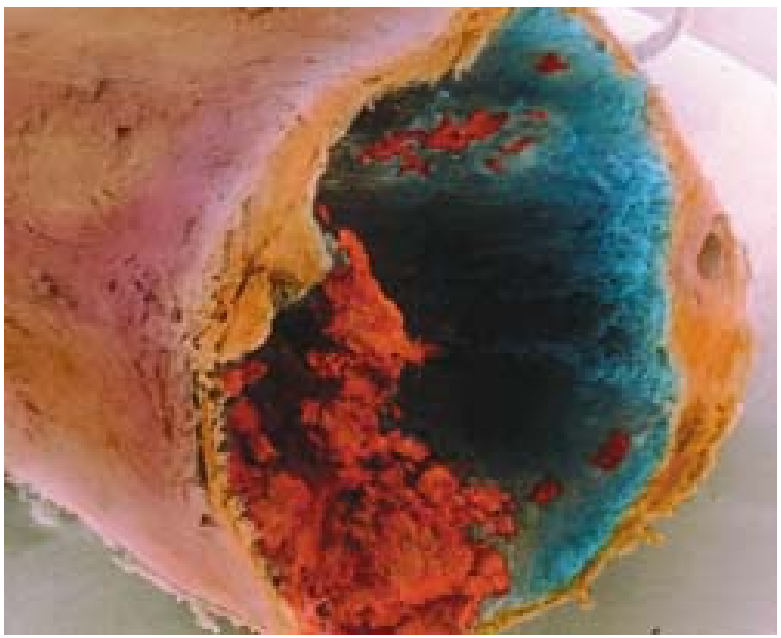
©S.Overhagen 2004

# Arterien als natürliche Trigger

©S.Overhagen 2004
www.tcsoverhagen.de

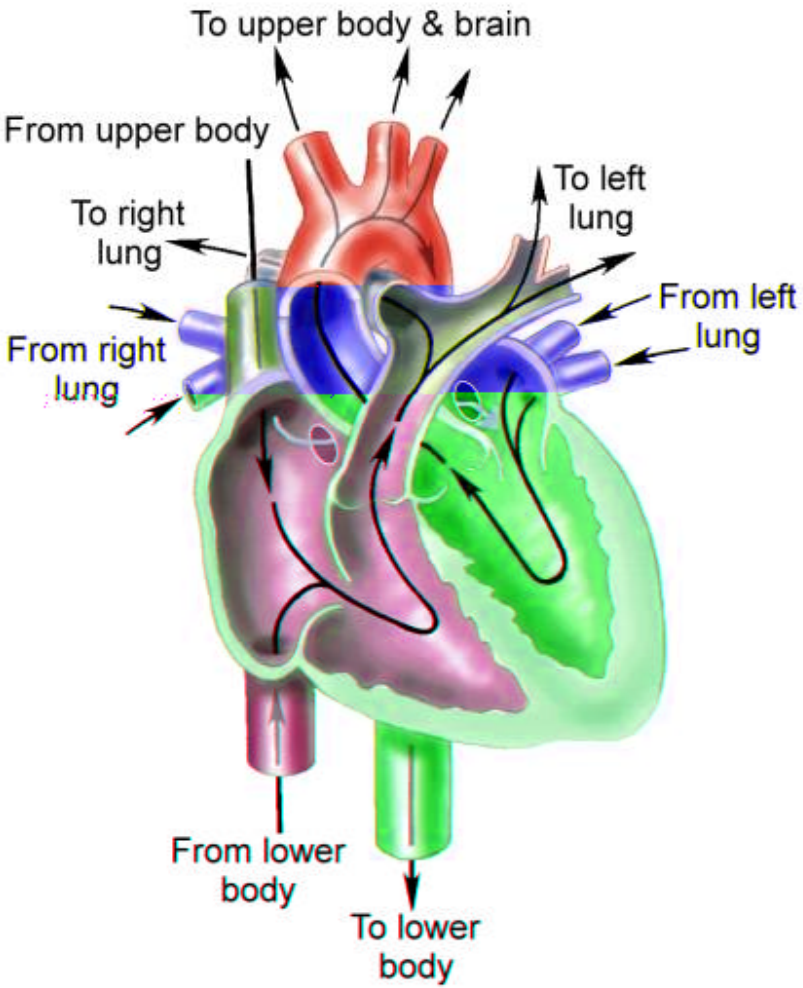
# Arteriosklerose als Trigger

- Raucher sind nach ca. 2 Jahren betroffen
- Arterieller Hypertonus bewirkt Gefäßschäden
- Familiäre Hypercholesterinämie ebenso



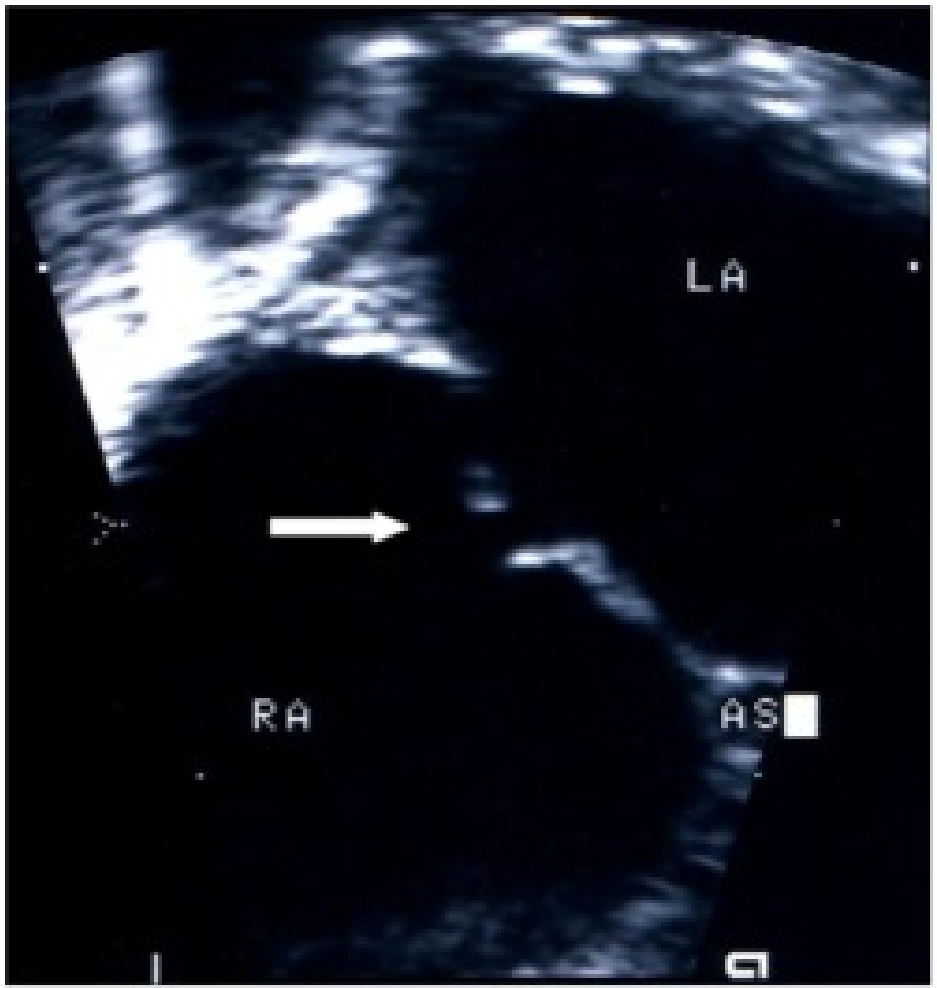
©S.Overhagen 2004

# PFO




©S.Overhagen 2004
www.tcsoverhagen.de

# PFO




©S.Overhagen 2004
www.tcsoverhagen.de

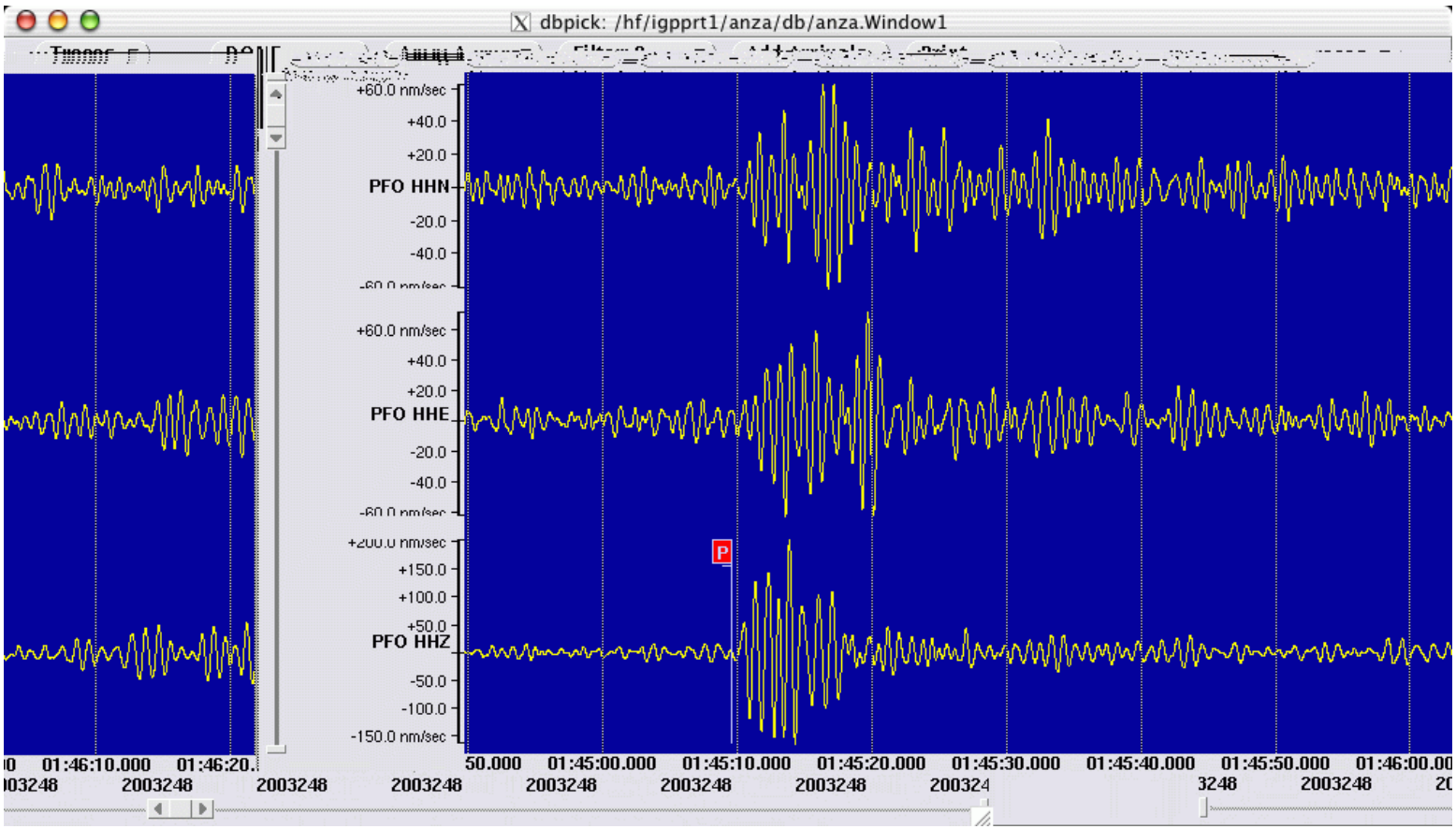
# PFO

©S.Overhagen 2004

# PFO

©S.Overhagen 2004
www.tcsoverhagen.de

# PFO



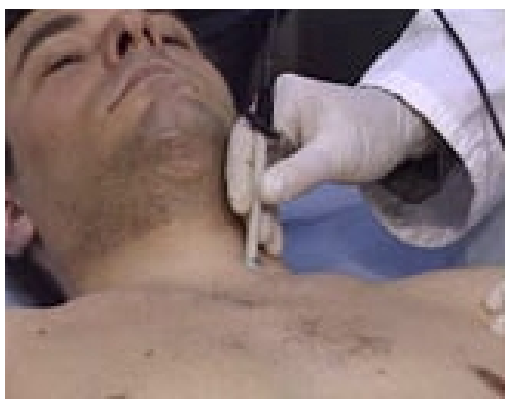

©S.Overhagen 2004

# PFO

©S.Overhagen 2004

# PFO

- Mit einfachem akustischem Doppler wurden von DAN International reihenweise Taucher untersucht
- Das Ergebnis war sehr erschreckend, ca. 15% aller Menschen haben ein PFO in unterschiedlichen Ausprägungen



©S.Overhagen 2004

# PFO

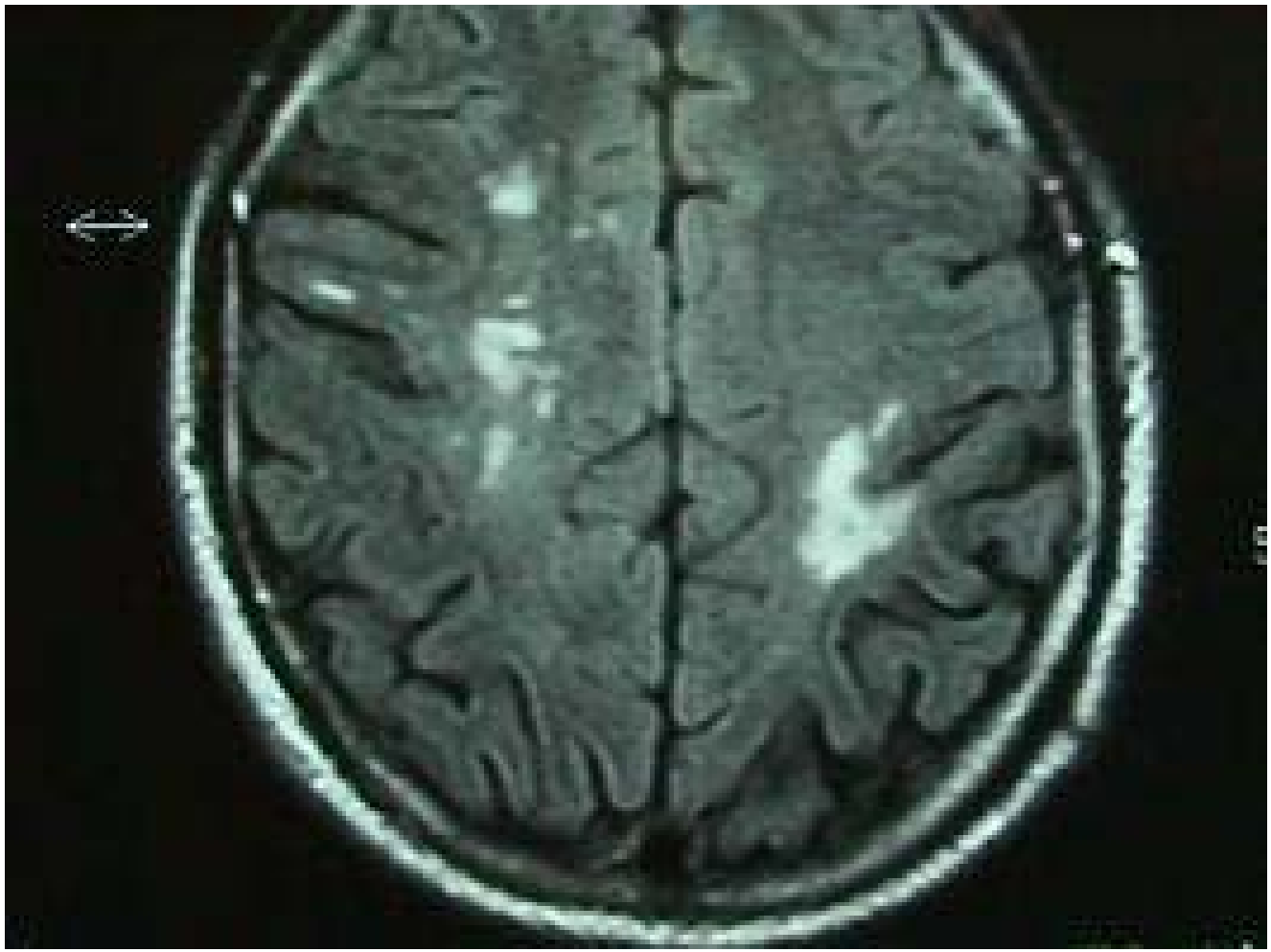
- Gefahr des Übertretens von venös vorhandenen Gasblasen in das arterielle System
- Festsetzen im Kapillarstromgebiet aller denkbaren Körperkompartimente und in Extremitäten: Taucherflöhe
- Erschwertes „Durcharbeiten" zurück in das venöse System

➔Erheblich verlängerte Dekompression

➔Gefahr unbemerkter Hirndefekte

©S.Overhagen 2004

# PFO



©S.Overhagen 2004
www.tcsoverhagen.de

# Dehydratation

- Durch Vorhofreflex wird atrio-natriuretisches Hormon ausgeschüttet
- Körper scheidet „überflüssiges" Volumen in Form von Urin aus (Leiterdrängler-Syndrom)
- Jeder Taucher hat nach einem 45-minütigem, nicht-dekopflichtigem Tauchgang einen Volumenbedarf von 0,75 Liter Wasser
- Erschwerend wirken Hitze und körperliche Anstrengung (Landtauchgänge mit Strandwanderungen in praller Sonne, angerödelte Ausfahrt im Zodiak bei $35^0$ Celsius)

©S.Overhagen 2004

©S.Overhagen 2004
www.tcsoverhagen.de

# Gewebearten

Absteigende Sättigungsgeschwindigkeit, Halbwertzeiten

| | |
|---|---|
| ⌘ Blut | 4 Min |
| ⌘ Rückenmark | 12,5 Min |
| ⌘ Muskulatur und Haut | 79 Min |
| ⌘ Innenohr | 239 Min |
| ⌘ Gelenke und Knochen | 635 Min |

Dekompressionsphysiologie ist in aller epischer Breite und mit dem nötigen fachlichen Hintergrund nachzulesen auf:

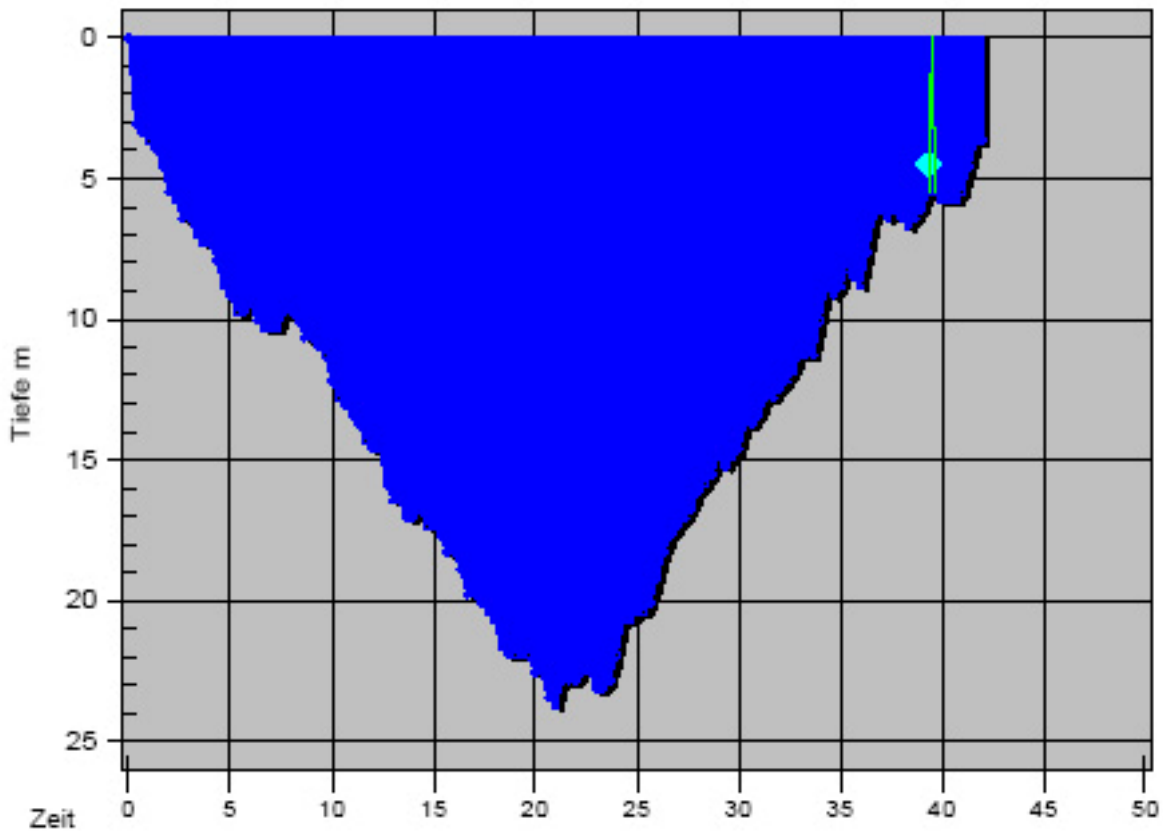
www.peter-rachow.de

Viele Formeln und Erklärungen sind mit dem freundlichen Einverständnis von Hr. Rachow abgekupfert.

©S.Overhagen 2004

# Computertauchen

Vom Computer berechnete Null- und Dekozeit

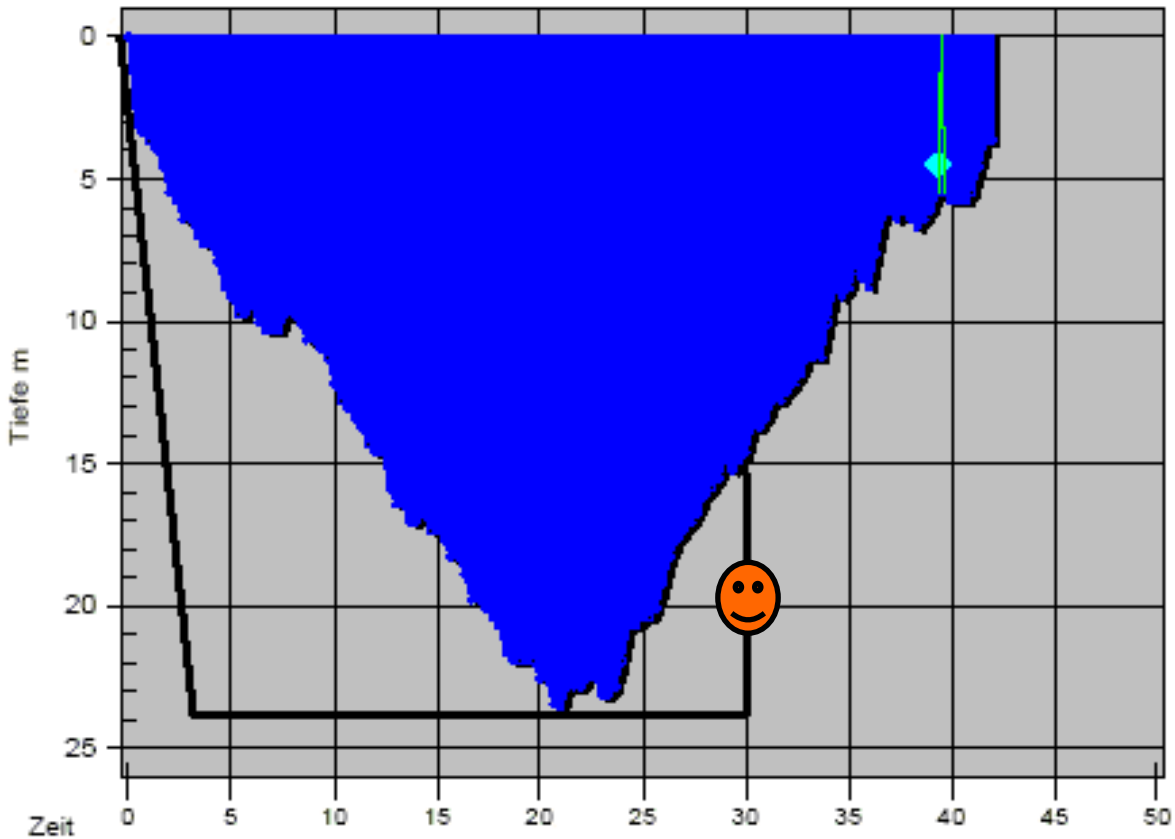



©S.Overhagen 2004

www.tcsoverhagen.de

# Computertauchen

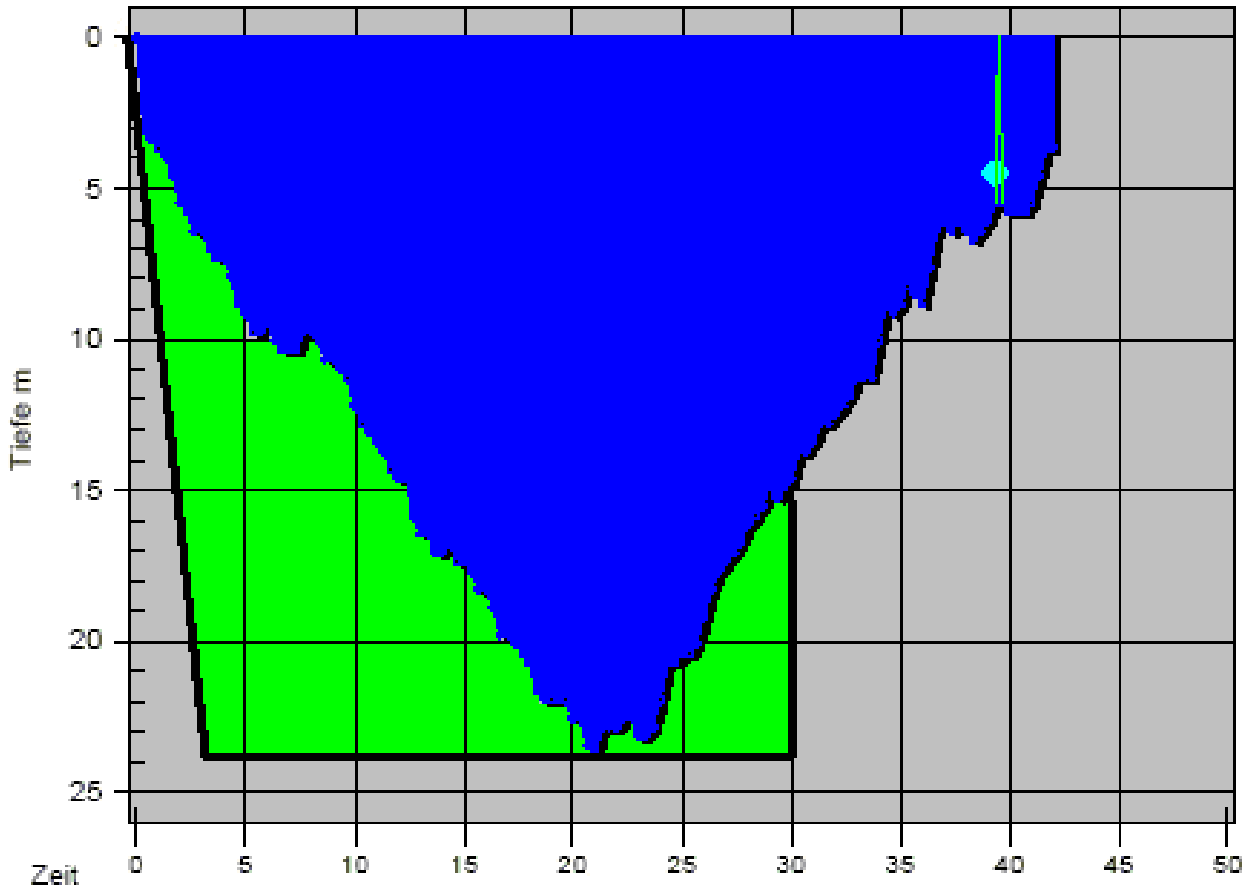
## Tauchen mit der Dekotabelle




©S.Overhagen 2004

# Computertauchen

Fehlender Sicherheitsbereich




©S.Overhagen 2004

www.tcsoverhagen.de

# Computertauchen

- Durch die exakte Berechnung aller Tauchsekunden verliert der Taucher die vom Entwickler der Bühlmann-Hahn Tabelle mitberechnete Sicherheitsmarge
- Der Tauchcomputer gaukelt eine Sicherheit vor, die durch die exakte Berechnung des Tauchprofils eine längere Nullzeit vorgibt, als der Tabellentaucher jemals errechnen könnte

➔ Tauchcomputer sind nur Hilfsmittel!!!
Keine endgültige Sicherheit

©S.Overhagen 2004

# Vielen Dank und gute Luft!!

©S.Overhagen 2004