



## Dekompressionsmodelle Einführung und Übersicht

Dr. Michael Melter

Vortrag zur  
VDST/CMAS TL2 Theorie Vorbereitung  
in Frankfurt am Main

# Fachbereich Ausbildung

## These



**Hält man sich stets an  
Tabellen bzw. Computer,**

**wird eine DCS  
zuverlässig verhindert!**

# Fachbereich Ausbildung

## Übersicht

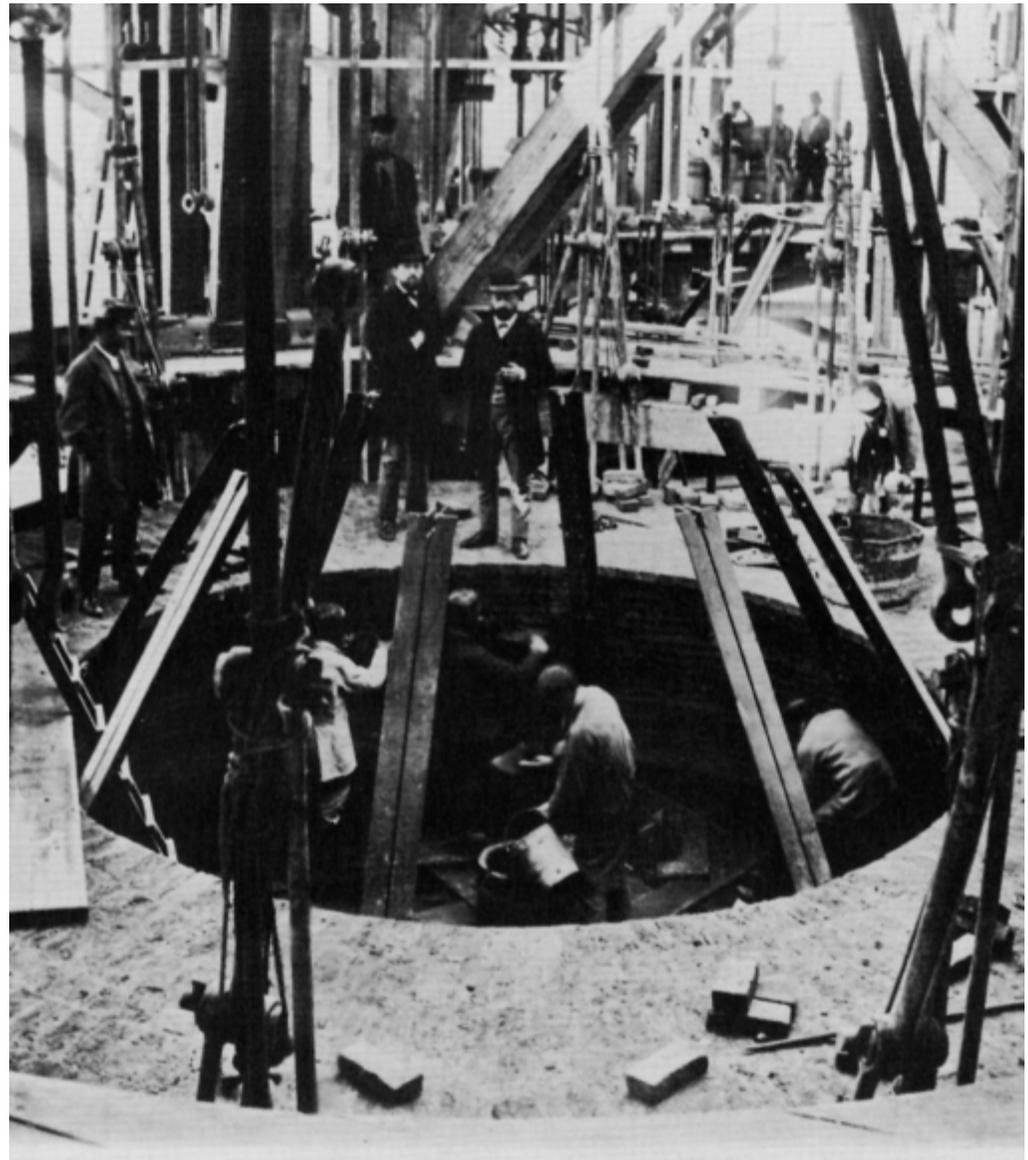
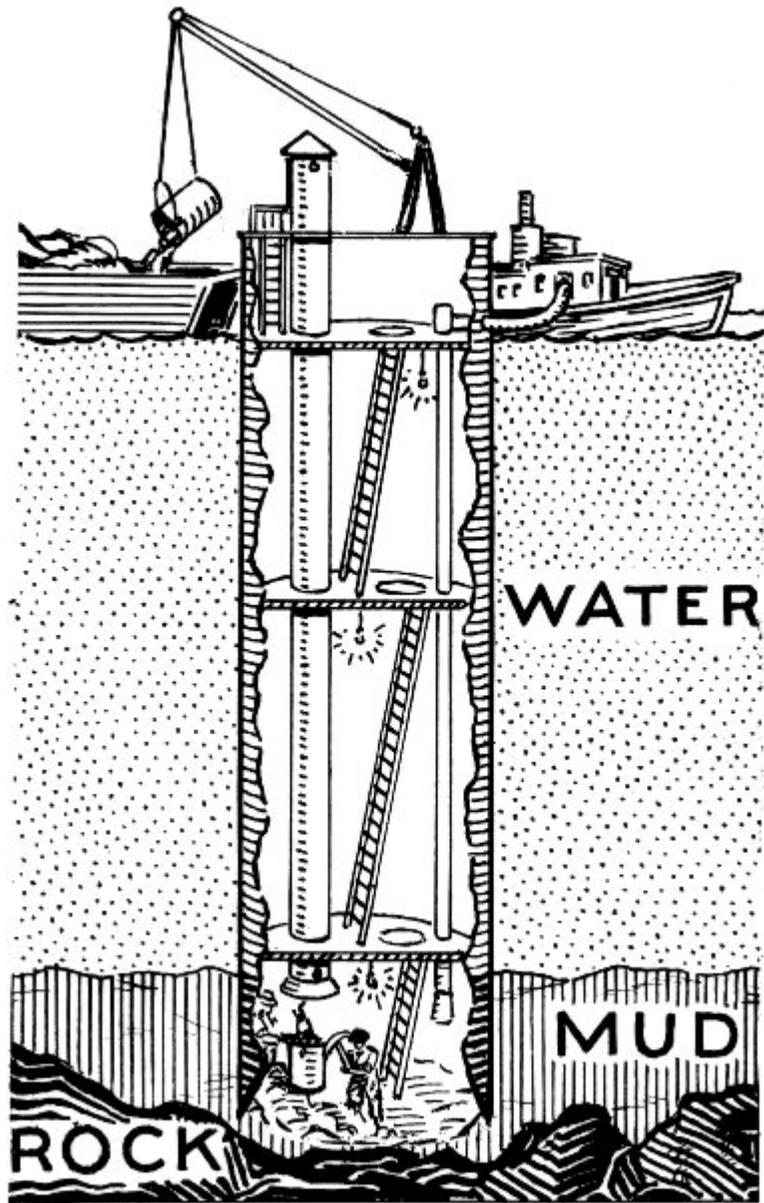


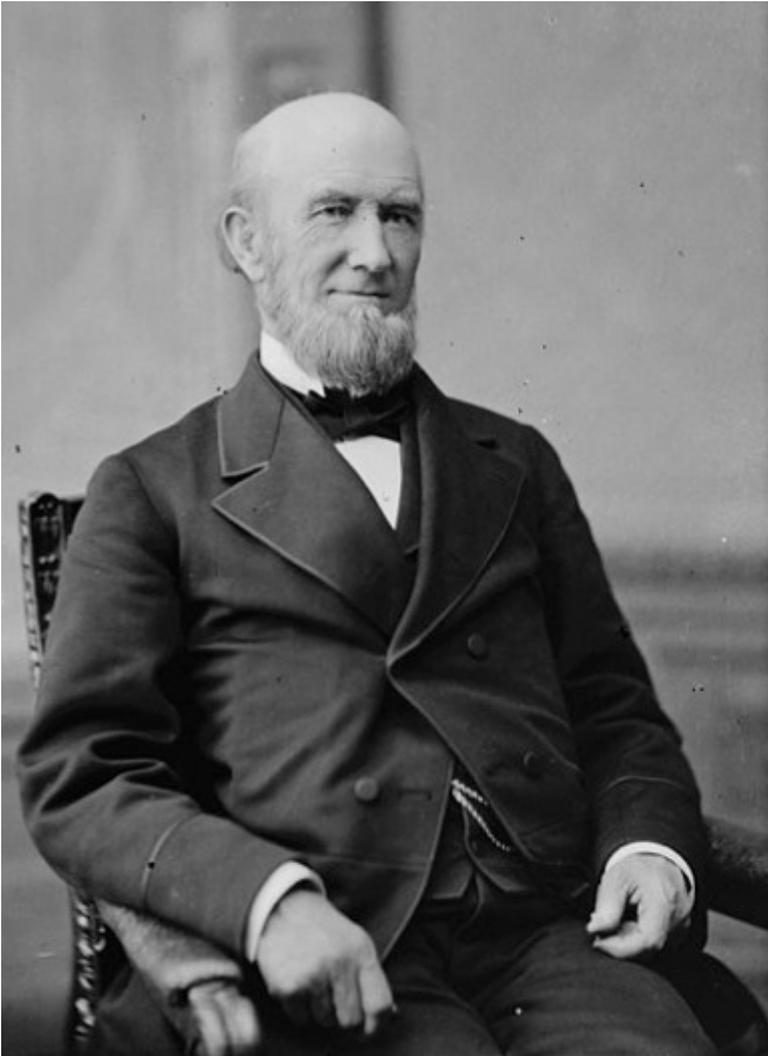
- Eine kurze Geschichte der Dekompression
- Klassische Dekompressionsmodelle
- Moderne Dekompressionsmodelle
- Vom Modell zum Computer
- „Take-Home-Message“



Robert Boyle (1627-1691)







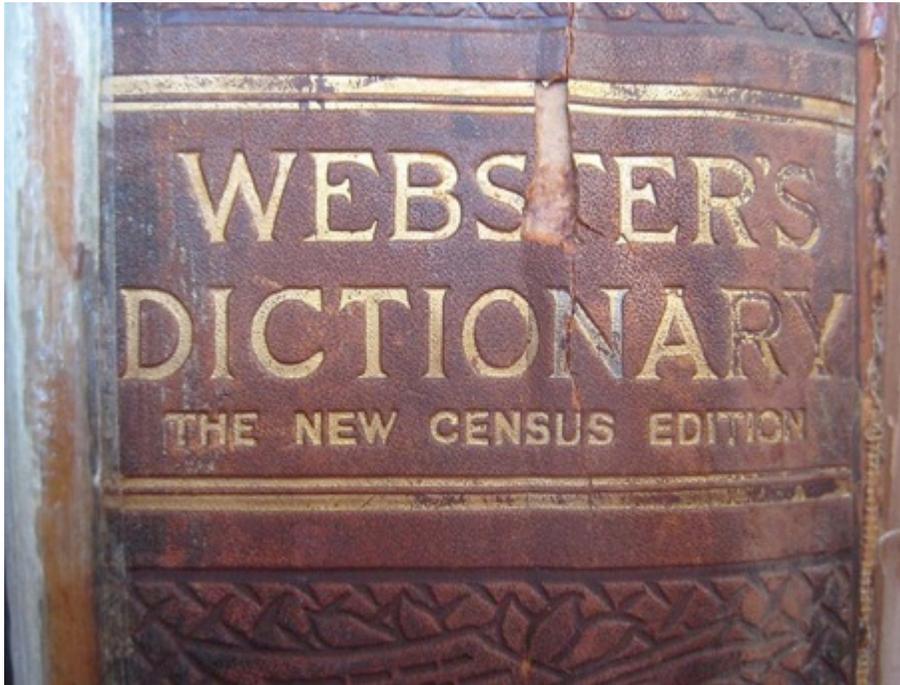
James Buchanan Eads (1820-1887)



Eads Bridge, St. Luis (Missouri)  
Brücke über den Mississippi  
(Bau: 1866-1876)



Bau: 1865-1883 Johann (John) August Roebling,  
später Washington R., dann Emily Warren R.



# 1913

## Caisson disease (med.)

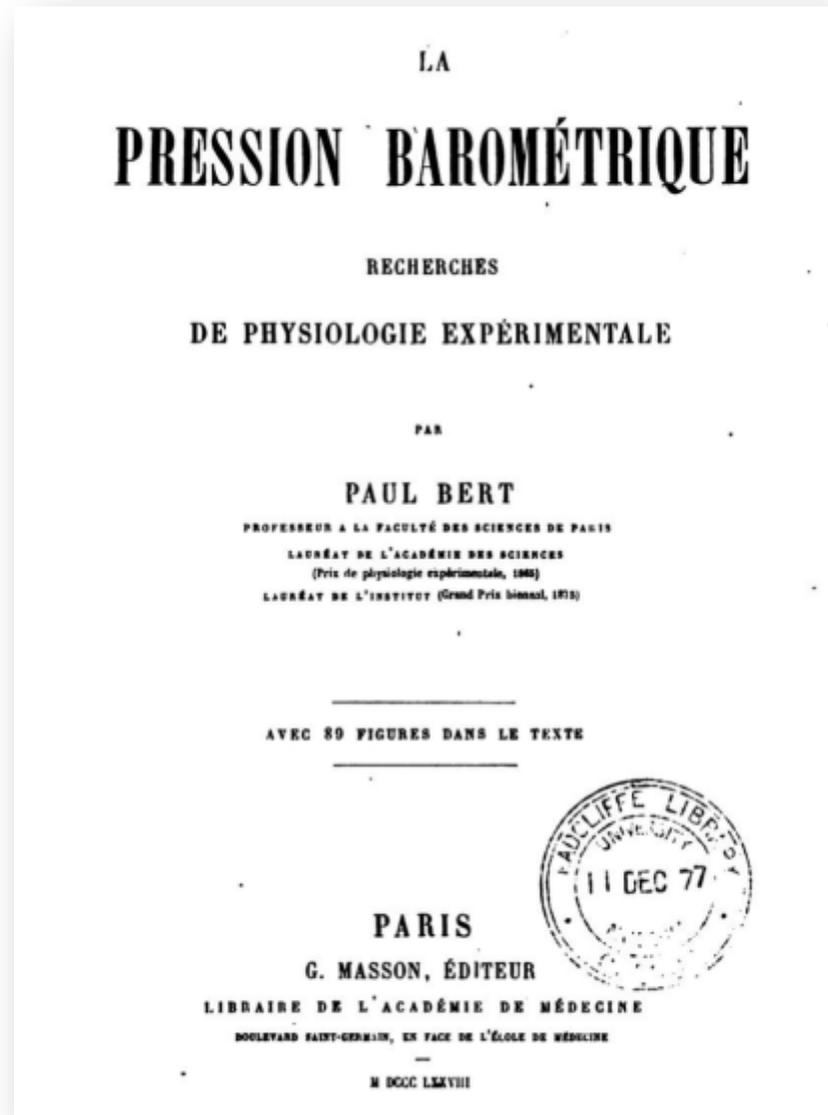
„A disease frequently induced by remaining for some time in an **atmosphere of high pressure**, as in caissons, diving bells, etc.

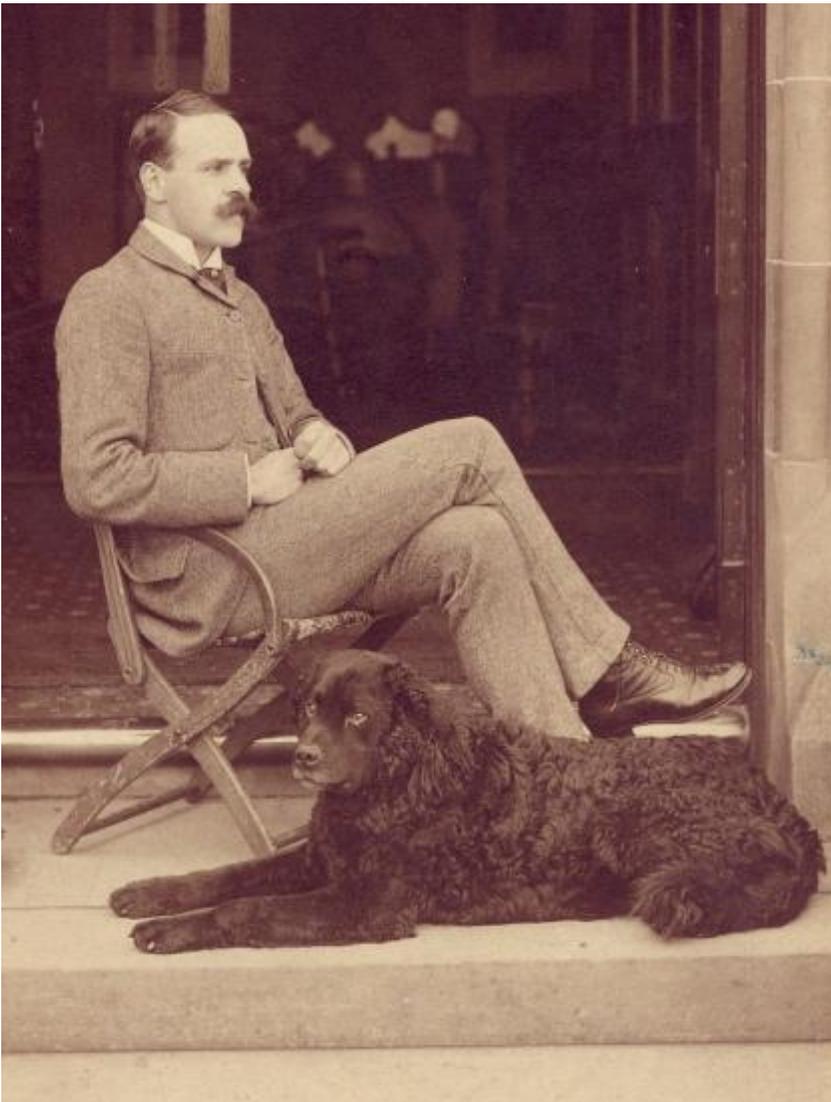
It is characterised by **neuralgic pains** and **paralytic symptoms**.

It is variously explained, most probably as due to *congestion of internal organs* with subsequent stasis of the blood.“



Paul Bert (1833-1886)





John Scott Haldane (1860-1936)

## THE PREVENTION OF COMPRESSED-AIR ILLNESS.

By A. E. BOYCOTT, D.M.,  
G. C. C. DAMANT,  
*Lieut. and Inspector of Diving, R.N.*,  
AND J. S. HALDANE, M.D., F.R.S.

(From the Lister Institute of Preventive Medicine.)

[With 7 Figures and 3 Plates.]

### CONTENTS.

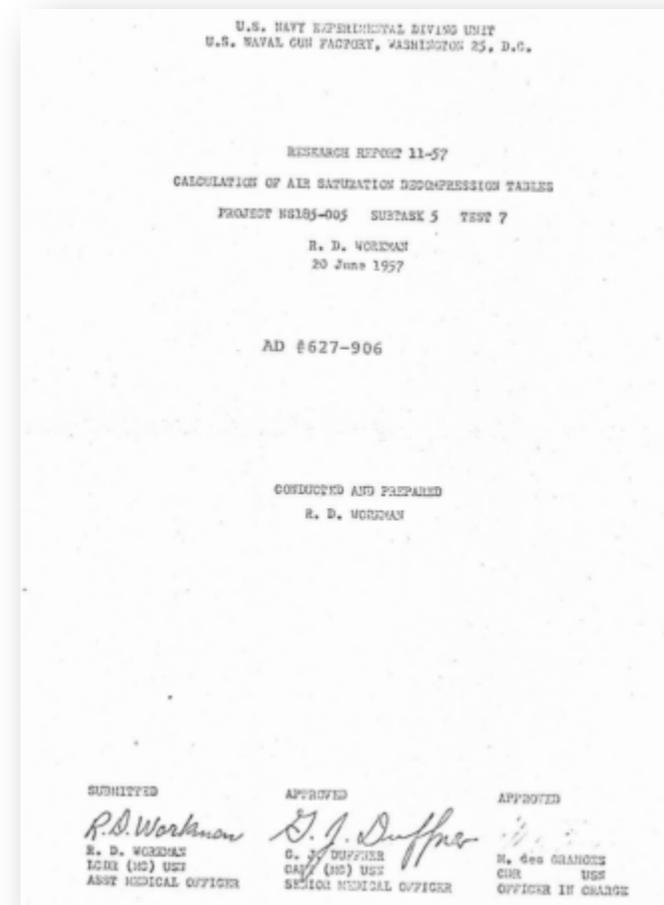
	PAGE
Introduction . . . . .	343
<b>Part I. Theoretical.</b>	
A. The rate of saturation of the body with nitrogen during exposure to compressed air . . . . .	345
B. The rate of desaturation of the body with nitrogen during and after decompression . . . . .	350
C. The limits of safety in decompression . . . . .	355
D. Practical measures for avoiding compressed-air illness:	
(1) Diving . . . . .	358
(2) Work in caissons and tunnels . . . . .	372
<b>Part II. Experimental.</b>	
1. Apparatus . . . . .	377
2. Choice of experimental animals and results with large and small animals . . . . .	378
3. Respiratory exchange of goats . . . . .	380
4. Method of conducting the experiments . . . . .	382
5. Symptoms observed in goats . . . . .	385
6. Results of the goat experiments . . . . .	394
7. Individual variation among the experimental animals . . . . .	403
8. Pathology of caisson disease in goats . . . . .	410
Summary . . . . .	424
Appendix I. Human experiments in the pressure chamber . . . . .	426
" II. Human experiments in deep diving . . . . .	429
" III. Protocols of some goat experiments . . . . .	436
" IV. Tables for decompression of divers . . . . .	442

# Fachbereich Ausbildung

## US Navy



- US Navy verwendet von 1912 bis 1960 das Modell von Haldane
- **Robert D. Workman**
  - Captain in der NEDU (Navy Experimental Diving Unit)
  - Mediziner
  - Erkennt Probleme mit den Haldane-Tabellen bei längeren, tieferen Tauchgängen
  - Führt den „M-Wert“ ein
  - Führt zusätzliche langsamere Kompartimente ein
  - Erkennt die Verwendbarkeit von Computern zur Dekompression





Albert Bühlmann (1923-1994)

- **Erste Untersuchungen zum Bergseetauchen**
- **M-Wert Definition unterschiedlich zu Workman**
- **Erweitert die Kompartimente auf zunächst 12 (ZHL12), dann 16 (ZHL16), später wieder 8 (ZHL8ADT), diese dafür adaptiv**
  - Grundlage für UWATEC Tauchcomputer seit 1982 (Aladin, Aladin Pro, Air X, ...)
- **Standardwerk: „Tauchmedizin“**
- **Vater der VDST/CMAS Tabelle (zusammen mit Max Hahn)**

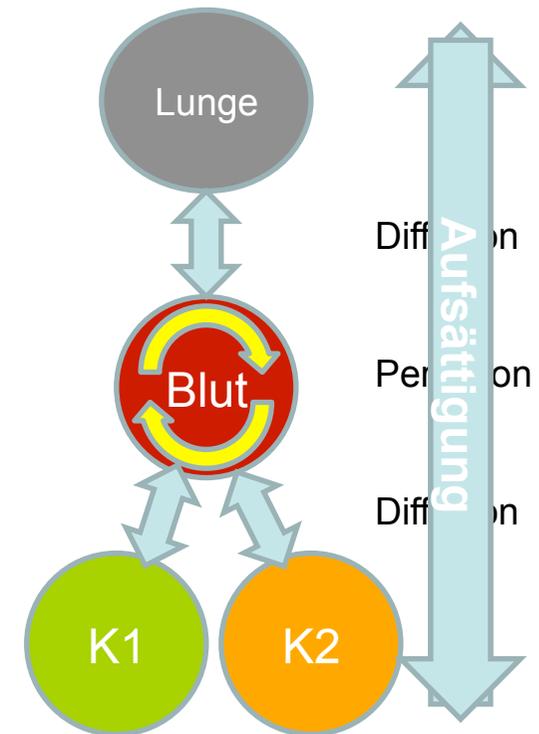
# Fachbereich Ausbildung

## Das klassische Modell

Haldane/Workman/Bühlmann



- Kompartimente
  - als Modell für Gewebe
- Diffusion
  - Motor: Ungleichgewicht von Konzentration (Druck)
  - Luft  $\leftrightarrow$  Blut und Blut  $\leftrightarrow$  Gewebe
  - Untersättigung = Ursache für Aufsättigung
  - Übersättigung = Ursache für Entsättigung
- Perfusionskontrolle (keine Diffusionskontrolle)
- Starke Idealisierung
- Einphasenmodell: Keine Grenzflächen
  - Keine Gasblasen



# Fachbereich Ausbildung

## Formelwerk



- Grundlage: Exponentieller Zerfall
- Analog: Zerfallsprozesse in der Natur
  - z.B. radioaktiver Zerfall

$$N_t = N_0 \cdot e^{-k \cdot t}$$

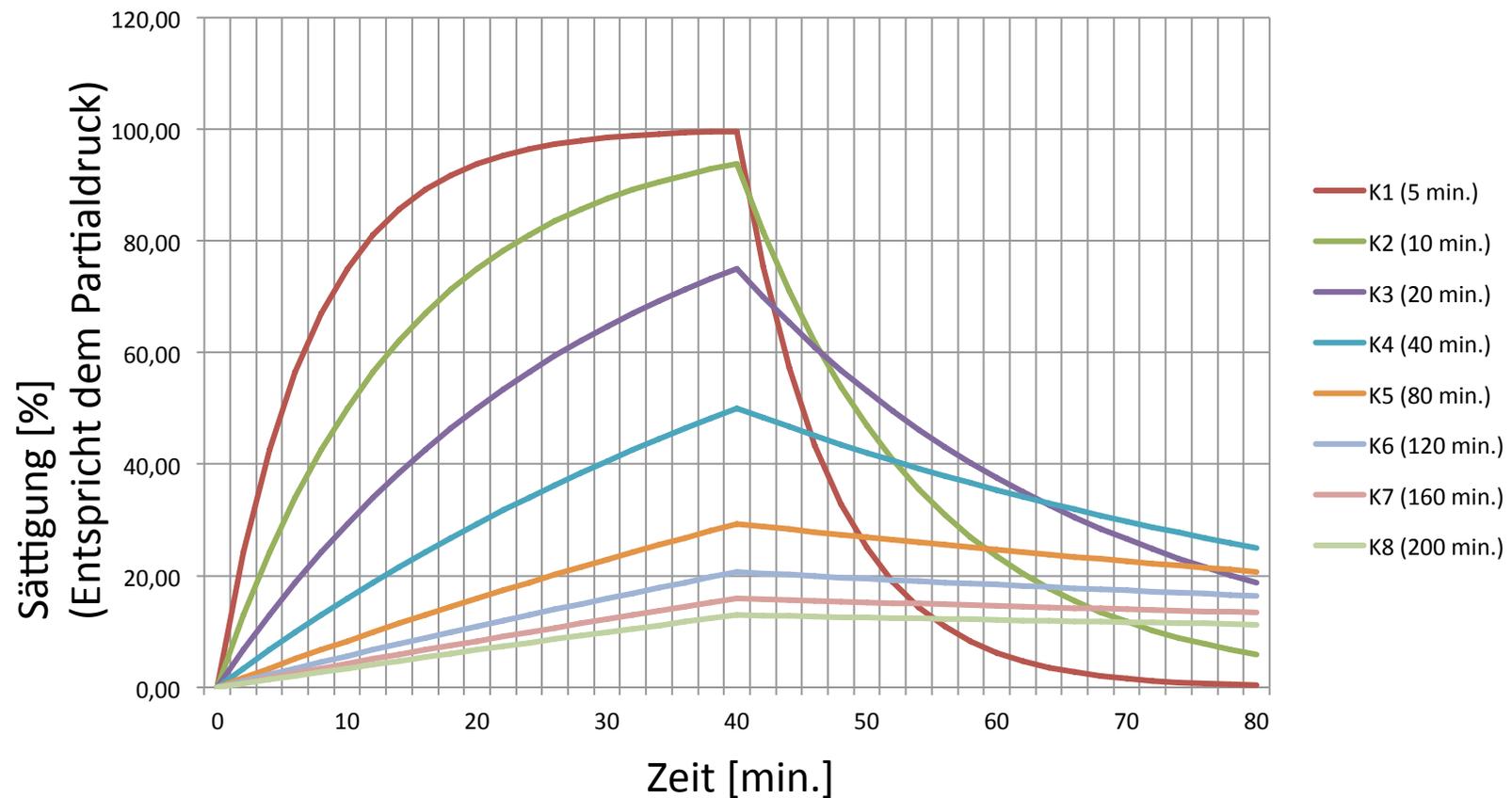
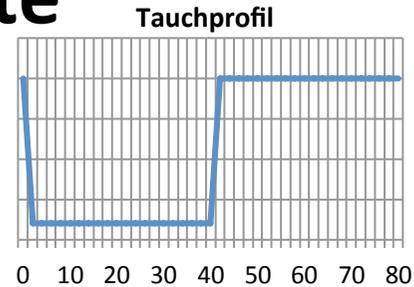
$N$  = Sättigung

$t$  = Zeit[s]

$$k = \frac{\ln 2}{\text{Halbwertszeit}}$$

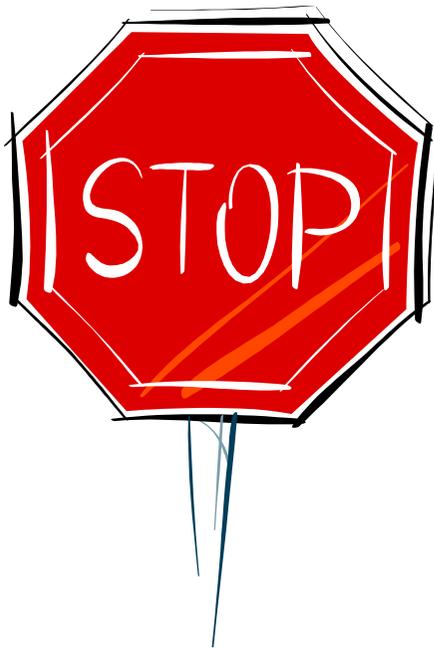
# Fachbereich Ausbildung

## Sättigung der Kompartimente



# Fachbereich Ausbildung

## Kritische Übersättigung



**Gasspannung im Gewebe darf  
bestimmten Wert nicht  
überschreiten, sonst bilden sich  
in DIESEM Gewebe Gasblasen**

$$p \leq M$$

# Fachbereich Ausbildung

## Kritische Übersättigung – Haldane



### Haldane Modell:

- $M = 2 \cdot [\text{Umgebungsdruck}]$
- Gilt für jedes Gewebe/Kompartiment
- Gilt in jeder Tiefe
- Problem: Unfälle bei langen TG in großen Tiefen
- Verwendet bis 1960 (mit kleinen Modifikationen)

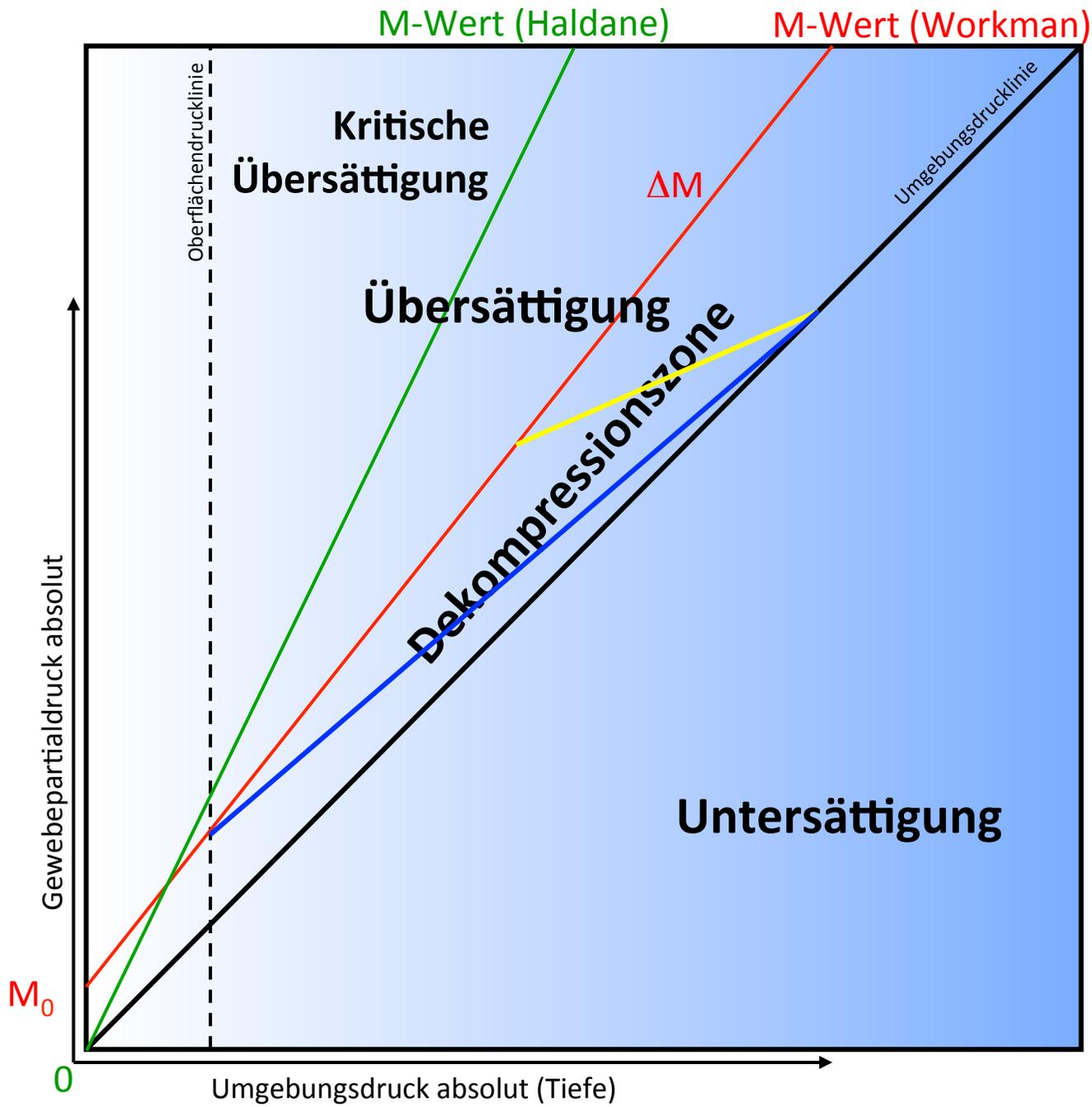
# Fachbereich Ausbildung

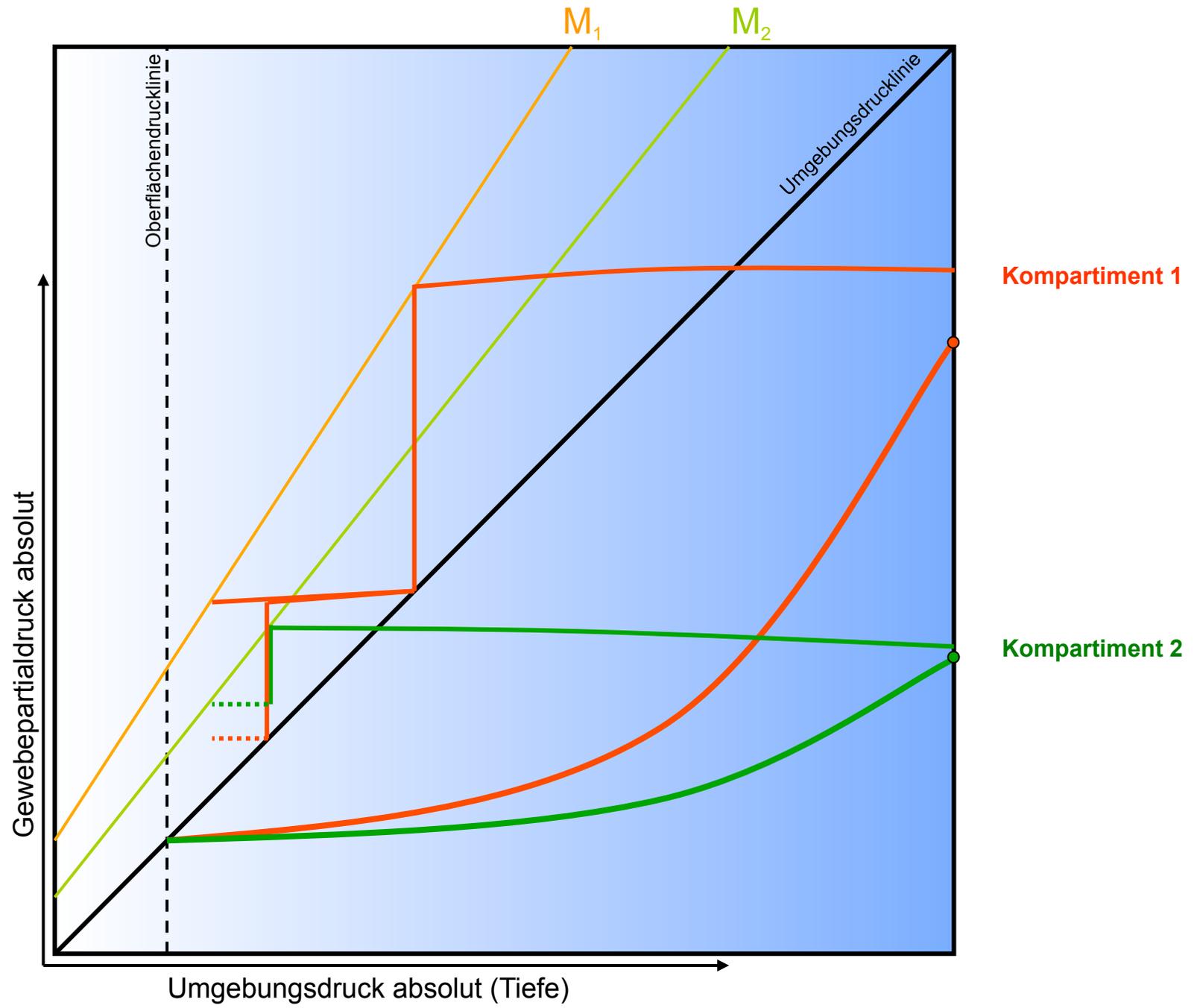
## Kritische Übersättigung – Workman



### Workman/Bühlmann Modell:

- M ist **empirischer** Wert
- Basis: „gewünschte“ DCS-Häufigkeit
- M hängt von Tauchtiefe ab
- M ist, wie die Halbwertszeit auch, jeweils für das betrachtete Kompartiment charakteristisch
- Abgeleitete Tabellen gelten jeweils nur für eine definierte Aufstiegsgeschwindigkeit



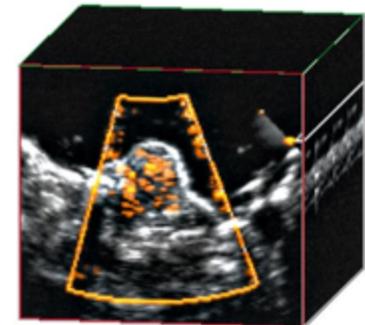


# Fachbereich Ausbildung

## Grenzen der klassischen Modelle von Haldane/Workman/Bühlmann



- Problem bei klassischer Dekompression
  - Ultraschallmessungen zeigen Blasen...
    - ...auch wenn keine Symptome der DCS vorliegen
    - ...auch wenn korrekt dekomprimiert wurde
    - ...auch vor dem TG sind immer schon Blasen vorhanden
  - Wenn aber immer Blasen vorhanden sind...
    - ...vergrößern sich diese bei JEDEM Aufstieg
    - ...kann auch beim Einhalten der M-Wert Grenze eine DCS auftreten

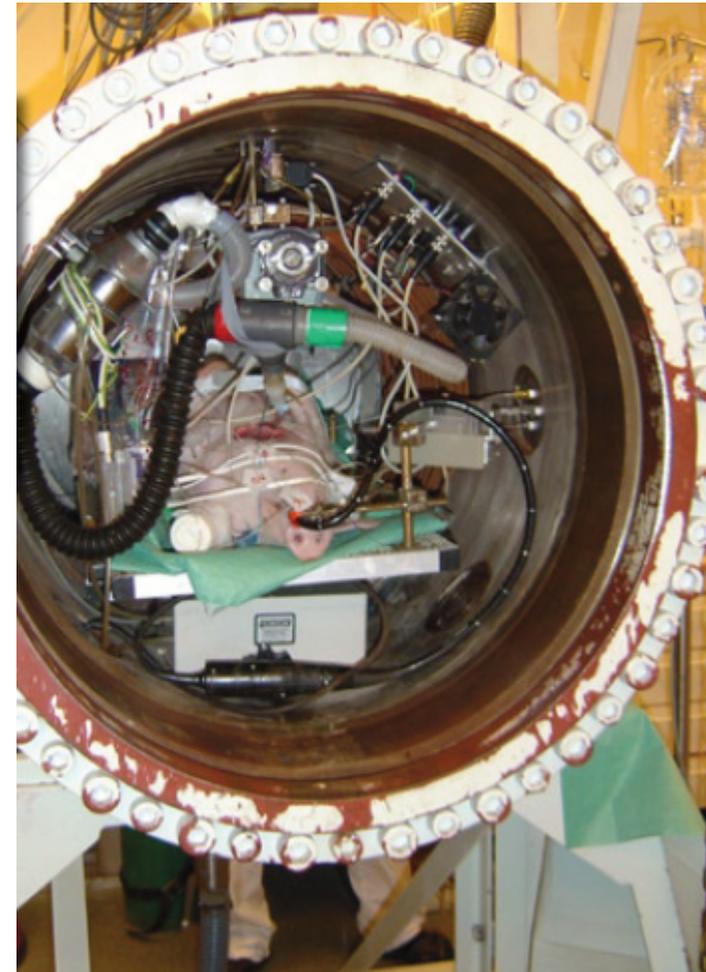


# Fachbereich Ausbildung

## Zweifel am klassischen Modell



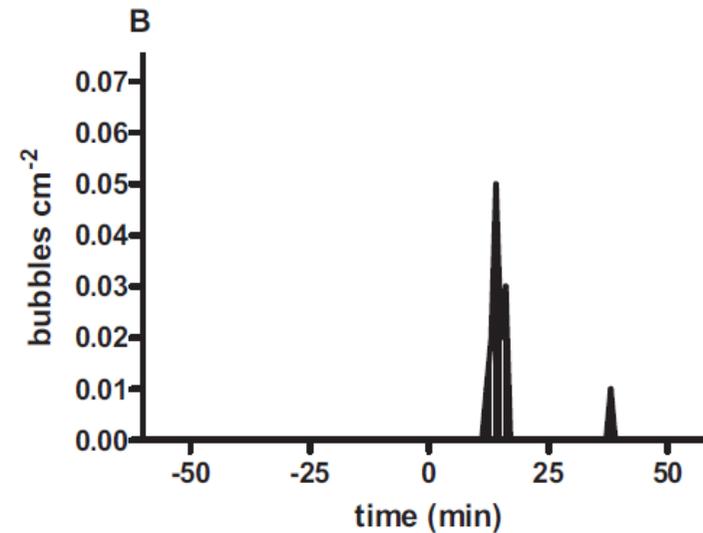
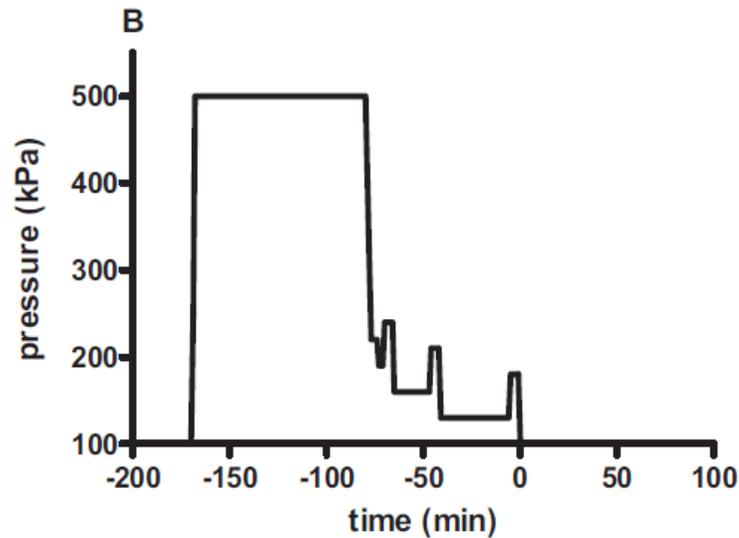
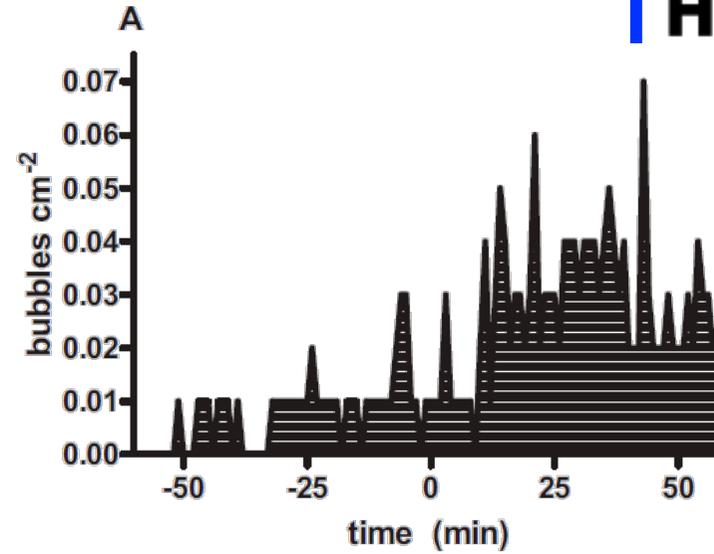
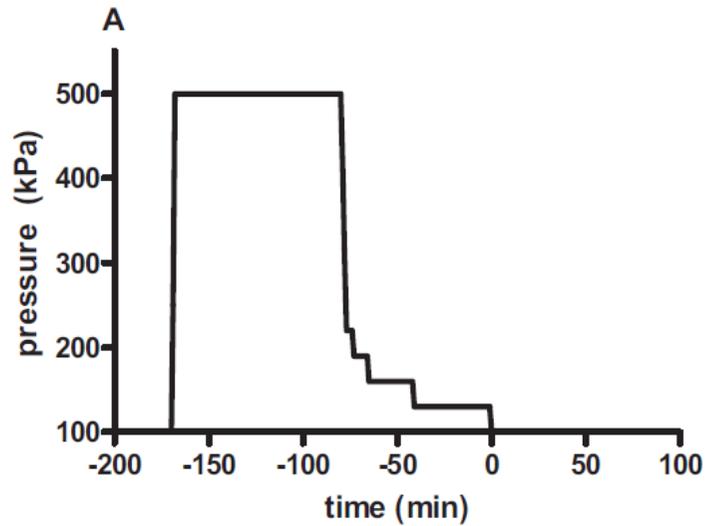
- TEE unter Vollnarkose
- Tiefe: 40m, GZ: 90min.
- US-Navy Stopps:  
8/12-19/9-45/6-80/3  
werden halbiert (!)
- **Letzte 5min. eines jeden Stopps wieder 5m tiefer**
- „Jojo-Dekompression“



*Møllerløcken/Gutvik (2007)*

# Fachbereich Ausbildung

## Jo-Jo Paradoxon (Møllerløkken)



# Fachbereich Ausbildung

## Folgen

- Beobachtungen
  - Müdigkeit nach Tauchgängen
    - insbesondere bei kurzen und tiefen Tauchgängen
  - DCS trotz korrekter Austauschpausen
    - individuelle Faktoren? (PFO, ...)
    - sehr selten, relativ zu anderen Tauchunfällen!

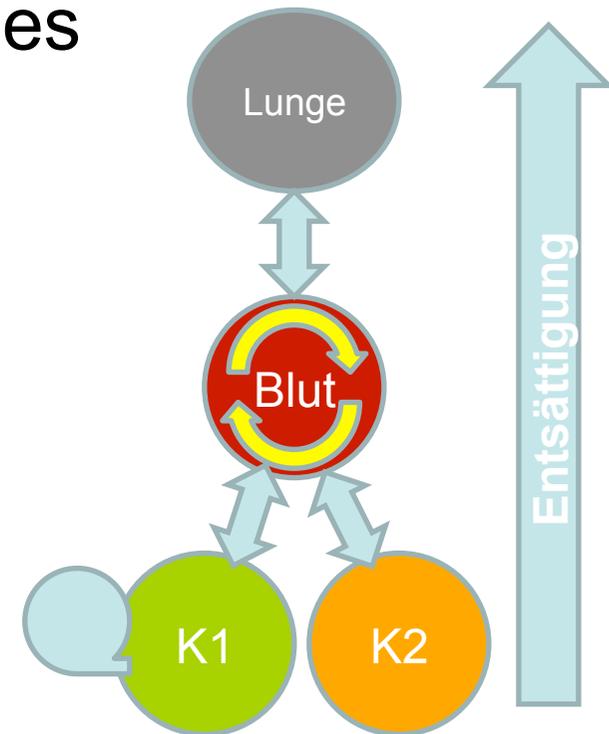


# Fachbereich Ausbildung

## Einfluss symptomloser Blasen auf die Dekompression



- Partialdruck des gelösten Gases im Gewebe bzw. im Blut sinkt
- Folge
  - Geringeres Diffusionsgefälle
  - Geringere Entsättigungsrate
- „Sättigungsfalle“
- Diffusionskontrolle



# Fachbereich Ausbildung

## Verbesserungsmöglichkeiten



- **Sicherheitsstopps**
- **neo-Haldane Modelle** (z.B. Bühlmanns ZHL8ADT)
  - längere Dekozeiten auf klassischen Dekotiefen
  - kürzere Nullzeiten; vor allem bei Wiederholungs-TG
- **„Pyle Stops“**
- **Gradientenmethode**
- **Zweiphasenmodelle** (Blasenmodelle)
  - Gänzlich „andere“ Physik
  - Deutlich komplexere Mathematik
  - Drei unterschiedliche Ansätze
    - Thermodynamisches Modell
    - VPM – Variable Permeability Model
    - RGBM – Reduced Gradient Bubble Model

Ergebnis:  
„Deep Stops“

# Fachbereich Ausbildung

## Einfluss von Sicherheitsstopps



- US-Navy Studie
  - Tauchgang auf 30 m Tiefe, 25 min. Grundzeit

TABELLE DI DECOMPRESSIONE  
**U.S. NAVY**  
PER IMMERSIONI CON ARIA

METRI	MINUTI	TAPPE DI DECOMPRESSIONE				METRI	MINUTI	TAPPE DI DECOMPRESSIONE				METRI	MINUTI	TAPPE DI DECOMPRESSIONE			
		12	9	6	3			12	9	6	3			12	9	6	3
12	200			0	24	40			0	33	20			0			
	210		2			50		10			25			3			
	230		7			60		17			30			7			
	250		11			70		23			40		2	21			
15	270		15		80		2	31		50		8	26				
	100		0		90		7	39		60		18	36				
	110		3		100		11	46		70		1	23	48			
	120		5		110		13	53		80		7	23	57			
18	140		10		120		17	56		90		12	30	64			
	160		21		27	30		0	36	15			0				
	180		29		40		7			20			2				
	60		0		50		18			25			6				
70		2		60		25		30				14					
21	80		7		70		7	30		40		5	25				
	100		14		80		13	40		50		15	31				
	120		26		90		18	48		39		10	0				
	50		0		100		21	54		15			1				
30	60		8		25		0		39	20			4				
	70		14		30		3			25			10				
	80		18		40		15			30			3	18			
	90		23		50		2	24			40		10	25			
39	100		33		60		9	28		50		3	21	37			
	110		2	41	70		17	39									
	120		4	47	80		23	48									
	130		6	52	90		3	23	57								

if  
op  
op

Austauschtabelle DECO 2000

Stopp in	6	3	m	Stopp in	9	6	3	m	Stopp in	12	9	6	3	m
12	36			D	27	6			B	39	6			
54				E	10				C	9				
72				F	14				D	12				
90				G	18				E	15				
108				G	22				F	18				
15	24			D	26				F	21				
	36			E	30				G	24				
	48			F	34				G	27				
	60			G	38				G	30				
18	72			F	42				G	33				
	84			G	46				G	36				
	96			G	50				G	39				
	108			G	54				G	42				
21	15			C	6				B	45				
	25			D	9				C	18				
	35			E	12				D	19				
	45			F	15				D	22				
24	55			F	18				E	25				
	65			G	21				F	28				
	75			G	24				F	31				
	85			G	27				F	34				
27	11			C	30				F	37				
	16			D	33				G	40				
	21			D	36				G	43				
	26			E	39				G	46				
30	31			E	42				G	49				
	36			F	45				G	52				
	41			F	48				G	55				
	46			F	51				G	58				
33	51			G	6				C	61				
	56			G	9				D	64				
	61			G	12				D	67				
	66			G	15				D	70				
36	71			G	18				E	73				
	76			G	21				F	76				
	81			G	24				F	79				
	86			G	27				F	82				
39	91			G	30				F	85				
	96			G	33				G	88				
	101			G	36				G	91				
	106			G	39				G	94				
42	111			G	42				G	97				
	116			G	45				G	100				
	121			G	48				G	103				
	126			G	51				G	106				
45	131			G	54				G	109				
	136			G	57				G	112				
	141			G	60				G	115				
	146			G	63				G	118				
48	151			G	66				G	121				
	156			G	69				G	124				
	161			G	72				G	127				
	166			G	75				G	130				
51	171			G	78				G	133				
	176			G	81				G	136				
	181			G	84				G	139				
	186			G	87				G	142				

0 - 700m ü. N.N.  
Aufstieg mit 10m/min

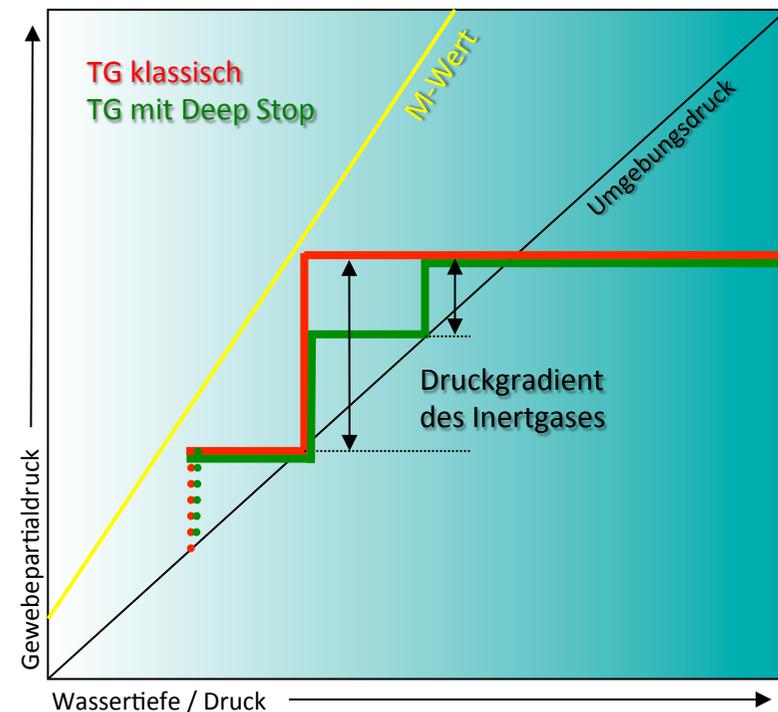
i. auf 3 m

# Fachbereich Ausbildung

## Deep Stops



- **Ziel**
  - Reduktion des Gradienten der Gewebepartialdrucke zum Umgebungsdruck
- **Deep Stops**
  - „Pyle Stops“ nach tiefen Tauchgängen
  - Gradientenmethode
  - Zweiphasenmodelle
- **Nachteile**
  - zus. Aufsättigung der langsameren Gewebe in der Tiefe muss später wieder kompensiert werden
  - Gradient steigt leicht für die langsameren Gewebe am Ende des TG
  - Balance zwischen Vor- und Nachteilen!



# Fachbereich Ausbildung

## „Pyle Stops“



- Richard Pyle (Meeresbiologe und „Fisch-Verrückter“)
  - Bei „Fisch-Sammel-TG“ wesentlich weniger Müde als bei anderen TG auf gleiche Tiefe und mit gleicher Grundzeit
- Vorgehensweise
  - Hälfte zwischen maximaler Tiefe und erster Dekotiefe (2-3min.)
  - Wenn mehr als 9m zum ersten Dekostopp: erneut halbieren (usw.)
  - Beispiel:  
45m maximale Tiefe, 1. Dekostopp bei 9m

Erster „Pyle-Stop“:  $(45+9)/2 = 27\text{m}$

Abstand zum Dekostopp:  $27-9 = 18\text{m}$  (>9m)

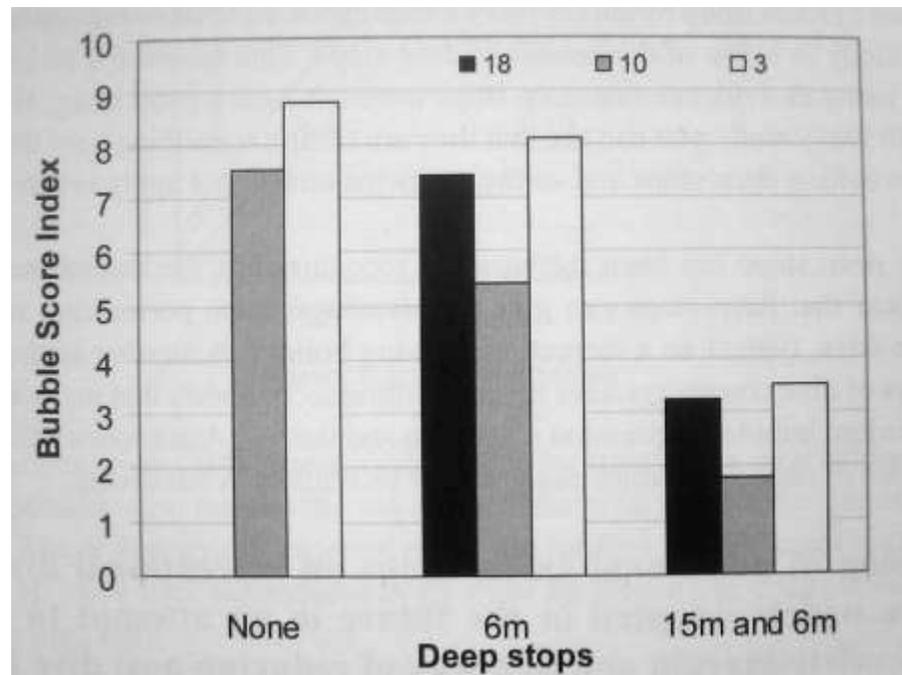
Nächster „Pyle-Stop“:  $(27+9)/2 = 18\text{m}$

# Fachbereich Ausbildung

## „Pyle Stops“ – Was bringt's?

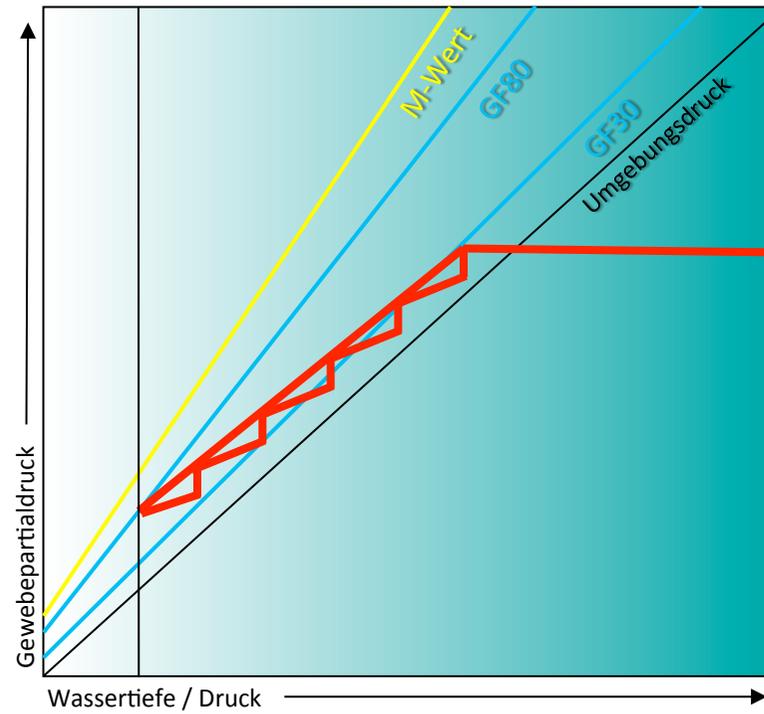


- DAN Studie:  
2 TG, 25m/25min., 3,5h Oberflächenpause, 25m/20min.  
Sicherheitsstopp (5min. auf 6m), verschiedene Aufstiegsgeschwindigkeiten



# Fachbereich Ausbildung

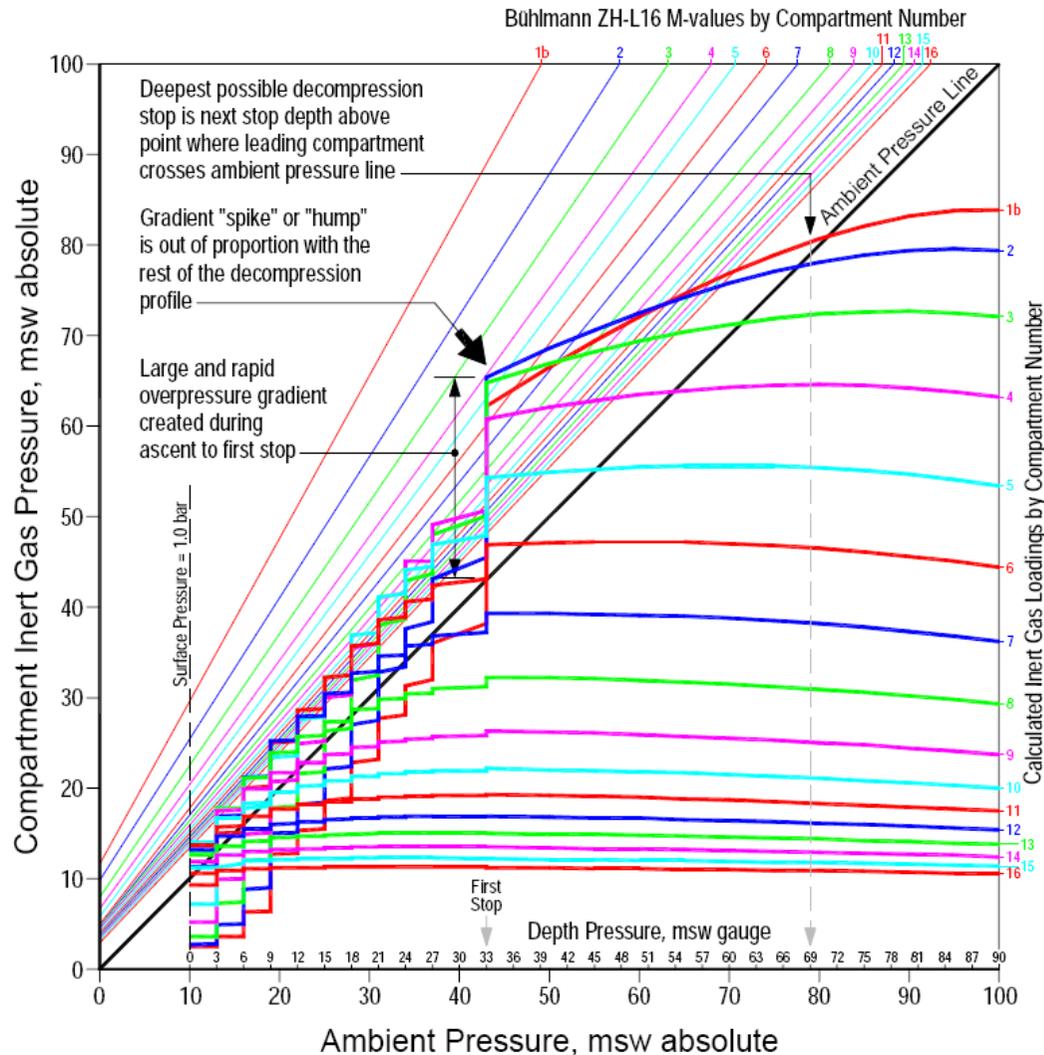
## Gradientenmethode



# Fachbereich Ausbildung



Pressure Graph: Complete Decompression Profile Using Conventional Calculation Method



Notes:

1. 13/50 Trimix dive to 90 msw (293 fsw) for 20 minutes bottom time.
2. Deco mixes: Nitrox 36% at 33 msw, Nitrox 50% at 21 msw, and Nitrox 80% at 9 msw.
3. Conservatism factor is minimal (15%).
4. Ascent rate is 10 msw/min.
5. Inert gas loadings are shown leaving the bottom at 20 minutes run time.
6. Run times are leaving the stop.
7. This deco profile is representative for the typical deep "bounce dive."

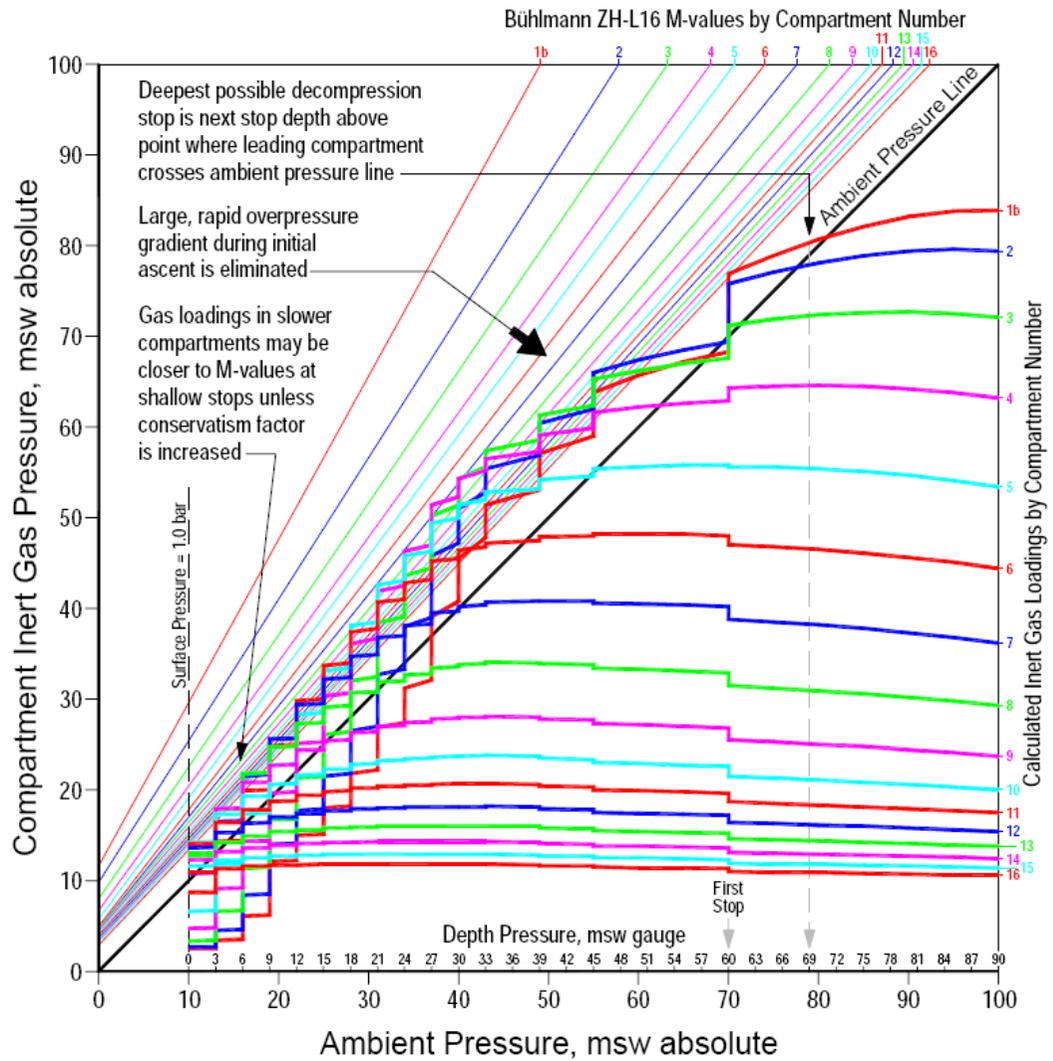
Decompression Table

Stop (msw)	Run (min)						
33	29	15	45	0	100		
27	31	12	51				
24	33	9	60				
21	36	6	73				
18	40	3	99				

# Fachbereich Ausbildung



Pressure Graph: Complete Decompression Profile  
Using Richard Pyle's Method For Deep Stops



Notes:

- 13/50 Trimix dive to 90 msw (293 fsw) for 20 minutes bottom time.
- Deco mixes: Nitrox 36% at 33 msw, Nitrox 50% at 21 msw, and Nitrox 80% at 9 msw.
- Conservatism factor is minimal (15%).
- Ascent rate is 10 msw/min.
- Inert gas loadings are shown leaving the bottom at 20 minutes run time.
- Run times are leaving the stop.
- Deep stops result in higher gas loadings in slower compartments at shallow stops.

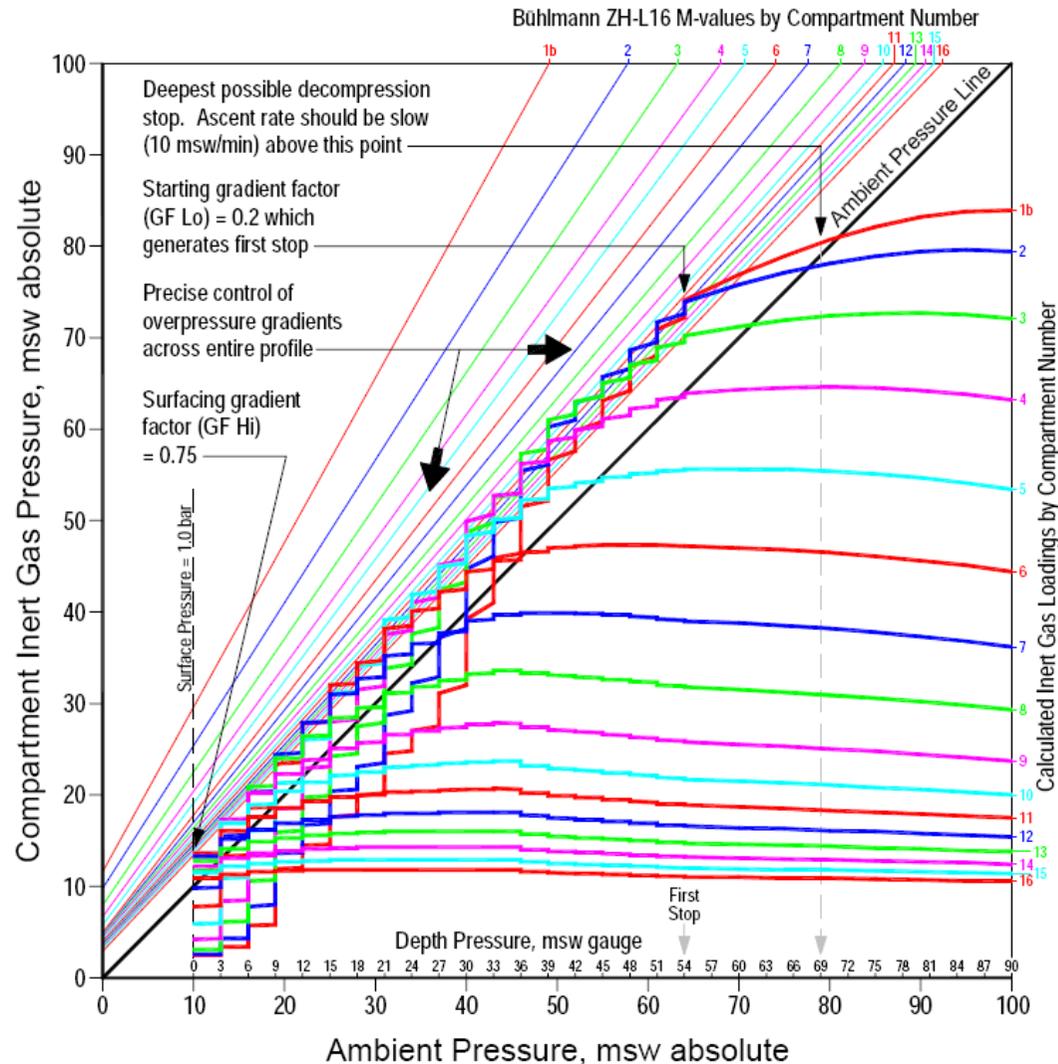
Decompression Table

Stop (msw)	Run (min)						
60	26	27	35	12	57		
45	29	24	37	9	66		
39	31	21	40	6	81		
33	32	18	44	3	109		
30	33	15	49	0	110		

# Fachbereich Ausbildung



## Pressure Graph: Complete Decompression Profile Using Gradient Factors To Control Entire Profile



Notes:

- 13/50 Trimix dive to 90 msw (293 fsw) for 20 minutes bottom time.
- Deco mixes: Nitrox 36% at 33 msw, Nitrox 50% at 21 msw, and Nitrox 80% at 9 msw.
- Conservatism is by gradient factors.
- Ascent rate is 10 msw/min.
- Inert gas loadings are shown leaving the bottom at 20 minutes run time.
- Run times are leaving the stop.
- Proximity of gas loadings to M-values is controlled by gradient factors.

Decompression Table

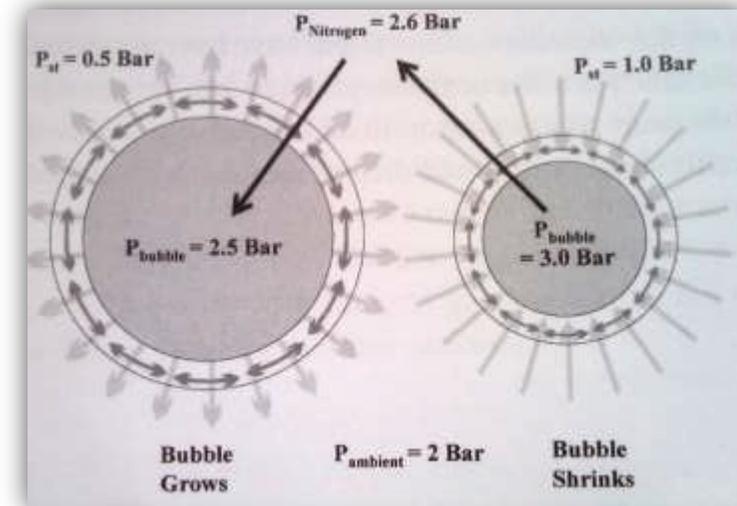
Stop (msw)	Run (min)						
54	24	39	30	24	40	9	71
51	25	36	33	21	44	6	87
48	26	33	34	18	47	3	119
45	27	30	36	15	53	0	120
42	28	27	38	12	61		

# Fachbereich Ausbildung

## Zweiphasenmodelle



- Symptomlose Blasen sind immer vorhanden (im Gleichgewicht mit gelöstem Gas)
  - Grund: u.A. Kavitation im Blutkreislauf
  - Stabilisiert durch: Surfactant
- Wachstum der Blasen soll eingeschränkt werden  $\Rightarrow$  „Deep Stops“
- Kräfteverhältnisse
  - Gasdruck in der Blase
  - Umgebungsdruck um die Blase
  - Oberflächenspannung der Blase (Funktion der Blasengröße)
- Druck in der Blase immer größer als Umgebungsdruck
- Große Blasen werden zu Lasten kleinerer Blasen größer
- **Problem: Blasentoleranz beim einzelnen Menschen?!?**



# Fachbereich Ausbildung

## „Thermodynamisches Modell“



- Brian Hills (1970)
  - Australischer Doktorand
  - Studie über japanische Perlentaucher vor Australien
    - 90m Tiefe TG
    - Tauchprofile mit Deep Stops aber wesentlich kürzeren flachen Deko Stopps
    - Insgesamt wesentlich kürzere Tauchzeit
    - Weit weg von klassischen Dekompressionsplänen
    - Einigermaßen Funktional
  - Artikel im „Bennet/Elliot“
  - Thermodynamisches Gleichgewicht im Zweiphasenmodell
  - Stieß auf massiven Gegenwind

# Fachbereich Ausbildung

## VPM (Varying Permeability Model)



- David Yount (1980)
  - Leiter einer Forschungsgruppe an der Universität Hawaii
  - Surfactants stabilisieren die Blasen
  - Kritisches Totalvolumen von freiem Gas führt zu DCS
  - Maximalgradient während Aufstieg muss eingehalten werden
  - Rechenmodell veröffentlicht
  - Beliebt im Bereich des technischen Tauchens
  - Viele Verbesserungen bis heute
  - Shareware V-Planner (Hemingway/Baker)

# Fachbereich Ausbildung

## **RGBM** (Reduced Gradient Bubble Model)



- Bruce Wienke (1995)
  - Bereichsleiter Kernwaffensimulation im Los Alamos National Laboratory
  - Aus VPM entwickelt
  - Kein offener Algorithmus (Suunto, Mares)
  - Berücksichtigt Sauerstofffenster
  - Viele Gradientenfaktoren für Sonderfälle
    - Wiederholungs-TG, Umkehrprofile, Non-Limit-Tauchen, Bergseetauchen

# Fachbereich Ausbildung

## eine Auswahl an „Deep Stoppers“



ZHL8ADT



ZHL8ADT  
VPM



RGBM



ZHL8+



ZHL16-GF

# Fachbereich Ausbildung

## Zusammenfassung



- VPM/RGBM ist ebenso empirisch wie die klassischen Modelle
- Einzige echte Lösung: Blasendetektion
- Deep Stops verringern **nicht** die Tauchzeit/den Luftbedarf
- Deep Stops verringern die Bildung von Mikroblasen
- Aufstiegsgeschwindigkeiten nie überschreiten
- Kein „Nullzeitsurfen“
- ggf. Aufstiegsgeschwindigkeiten in der Tiefe reduzieren
- Sicherheitsstopps durchführen
- ggf. „Deep Stops“ einbauen
  - besonders bei Tauchgängen mit kurzen Zeiten auf größeren Tiefen
  - „alte“ Computer rechnen danach korrekt weiter
- Neue Computer sind seit einiger Zeit auf dem Markt
  - Je komplexer, desto fehleranfälliger



# Fachbereich Ausbildung

## Antithese



Dekompression ist (noch) keine  
völlig verstandene Wissenschaft!

Die *empirische Methodik*,  
die *starke Vereinfachungen der Realität*  
und die *rein statistische Erfolgskontrolle*  
fordert vom Taucher Verständnis  
für die Anwendung der Methoden  
und für deren Grenzen.

## Fachbereich Ausbildung

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



*„Ich vermute, dass das  
Universum nicht nur  
sonderbarer ist  
als wir vermuten –  
es ist sonderbarer als  
wir überhaupt  
vermuten können.“*

[John Scott Haldane](#) (1860-1936)

