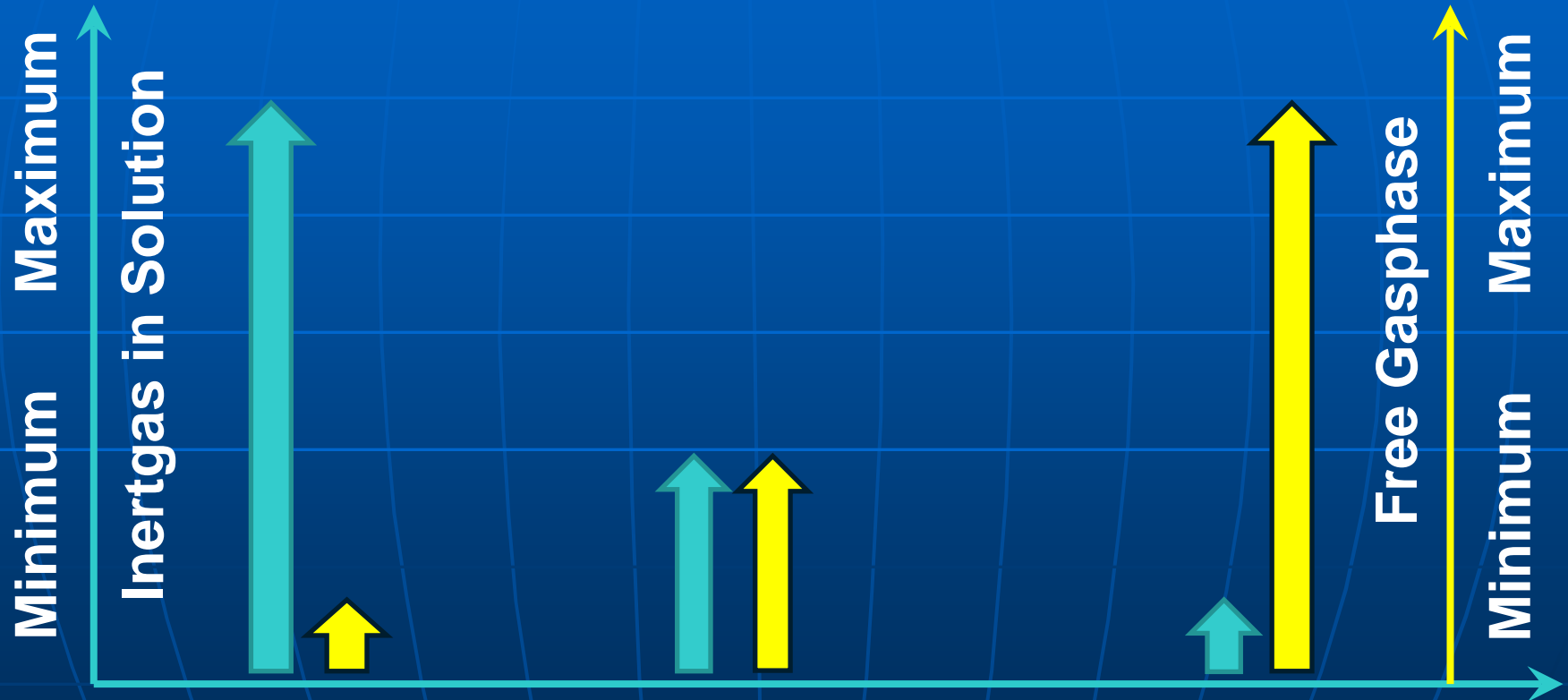


Nochmehr Bonus Material! für D-A-CH Teilnehmer!

Die Materialien sind i.d.R. mit copyrights versehen;
sie sind ausschließlich für die Teilnehmer des Bühlmann
Symposiums gedacht und nur für private
und/oder wissenschaftliche Zwecke zu verwenden.

P_{ss} ;
Super-
saturation

Bubbles;

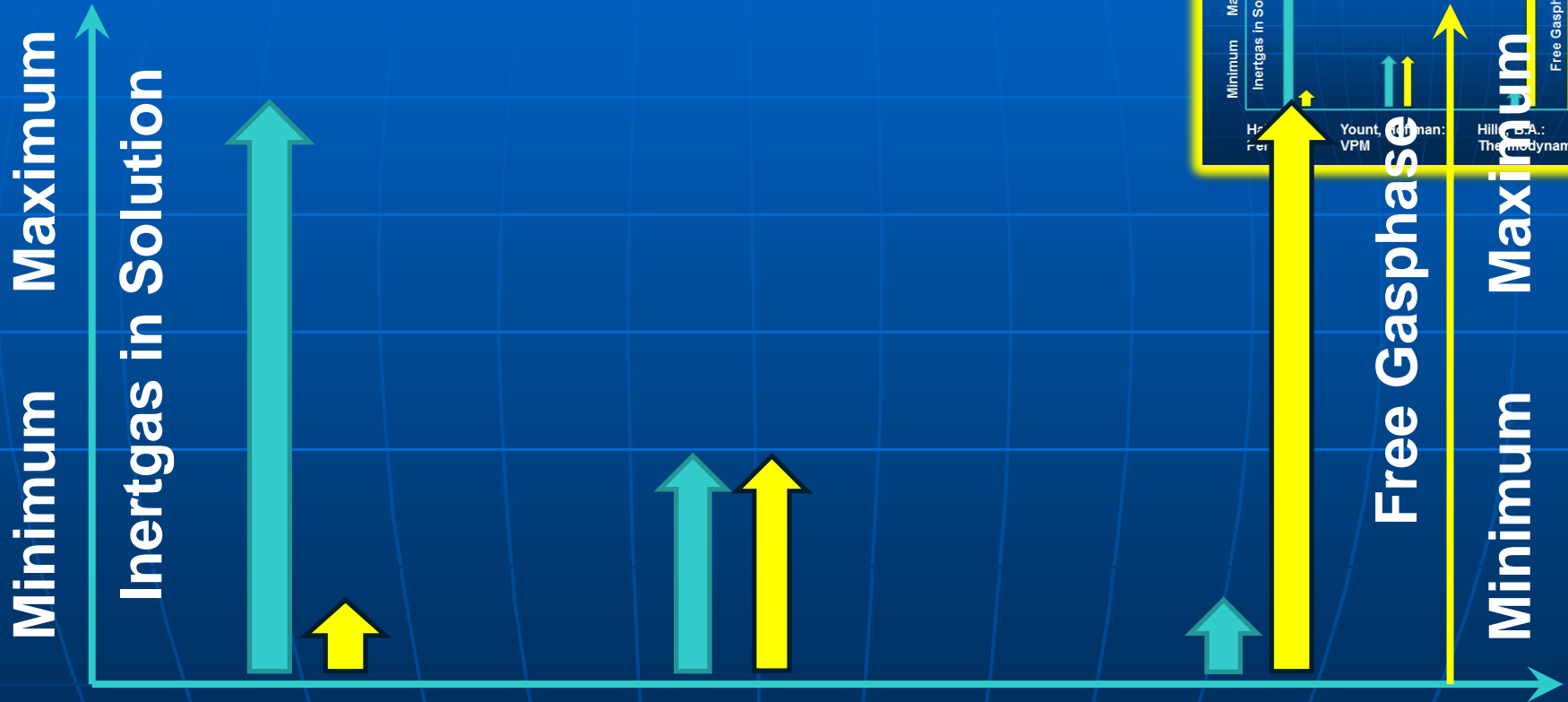


Haldane:
Perfusion

Yount, Hoffman:
VPM

Hills, B.A.:
Thermodynamic

P_{ss} ;
Super-
saturation



Complexity:

Linear;
M-type eq.

2 Inertgas
iterated t_D

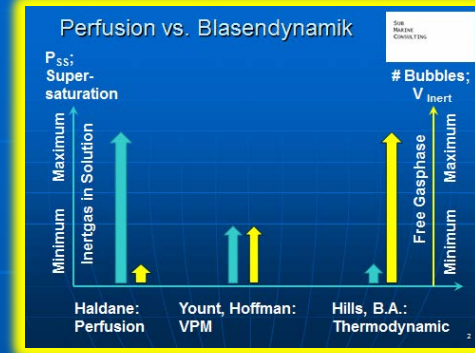
Quadratic;
iterated P_{ss} &
 t_D

Bessel: $J_0 J_1 Y_0 Y_1$
(Gauss-Legendre)²

Haldane:
Perfusion

Yount, Hoffman:
VPM

Hills, B.A.:
Thermodynamic



Nochmehr Bonus Material! für D-A-CH Teilnehmer:

- Interview mit Hannes Keller, 1998, anlässlich einer G-Tech Konferenz. Das Interview ist ein Auszug aus dem Buch von Bernd Aspacher „Enzyklopädie des technischen Tauchens“ [54], S. 364 – 367,
- 3 Auszüge aus Spiegel und FAZ 1960 - 1963
- 1991 aus dem UWF Magazin
- Weitere Referenzen / Quellen zu den Dekompressions-Modellen
- Auszüge aus den Proceedings „Underwater Physiology Symposium“
 - Vol. 3, 1967, Hannes Keller: Use of Multiple Inert Gas Mixtures in Deep Diving, S. 24 – 32
 - Vol. 4, 1971, A. A. Bühlmann: Decompression in Saturation Diving, S. 221 - 228

Ich war schon immer ein verrückter Kerl

Interview mit Hannes Keller, 1998



Hannes Keller, Vater des Gaswechsels, als Referent auf der *G-Tech*-Konferenz

BA:

Hannes, jeder Freak aus der Tauchszene kennt dich, wann war denn so deine aktive Zeit, wann fanden diese berühmten Tauchgänge statt.

HK:

Das waren drei Jahren, 1959 bis 1962.

BA:

Das war vor nahezu 40 Jahren, dann musst Du jetzt ja schon über 70 Jahre alt sein.

HK:

Nein, ich bin 64, ich war eben ein frühreifer Knabe, ich war damals 25 Jahre alt.

BA:

Wie bist du damals zum Mischgastauchen gekommen?

HK:

Also, eigentlich war ich schon immer ein Erfinder, der sich neue Dinge ausdenkt, ein Techno-Freak. Das liebste im Leben für mich ist zu forschen und zu entwickeln, irgend eine Idee soweit zu bringen, bis sie funktioniert. Ich schau schon immer den Mädchen nach - aber wenn das Mädchen nach links läuft und nach rechts läuft die Musik mit Techno, dann laufe ich der Musik hinterher. Ich habe viele Vermögen ausgegeben für Forschung. Die Taucherei hat mich dann auch irgendwann interessiert und ich habe beschlossen, den Weltrekord zu brechen und dazu muss man einige Erfindungen machen, wie z.B. eine schnelle, effektive Dekompressionsberechnung; und dann habe ich diese eben erfunden.

BA:

Wie populär war Mischgastauchen damals in Europa, gab es noch andere, die dies taten?

HK:

Das einzige, was es überhaupt gab, waren die Forschungen der englischen und der amerikanischen Marine. Die Amerikaner hatten im US-Navy-Manual bereits 1959 Heliumtabellen drin, die zwar nicht richtig waren, aber immerhin Anhaltspunkte gaben. Die Engländer haben es auch versucht, auf 180 Meter für 4 Minuten, mit 20 Stunden Dekompression. Die Admiralität kam daraufhin zu dem Schluss: "Tieftauchen ist möglich, aber die Dekompressionskosten sind zu hoch".

BA:

Deine Tauchgänge damals, waren die oberflächenversorgt oder hattest du Gas direkt dabei?

HK:

Wir haben beides gemacht. Ich habe immer Wert darauf gelegt, dass ich genügend Gas dabei habe, reichlich, ich hatte immer große Flaschen dabei. Ich bin nie runtergeschwommen, sondern immer auf einer Plattform gefahren, so dass man unbeschränkt Gas mitnehmen konnte. Zusätzlich hatte ich meistens Schlauchverbindungen.

BA:

Ihr hattet damals auch immer Kommunikation zur Oberfläche?

HK:

Ja, ohne Kommunikation wäre ich keinen Meter unter Wasser gegangen, grundsätzlich nicht, es wäre auch töricht, denn Tieftauchen ist experimentell: In dem Moment, wo ich in den Anzug steige, geht das Kommando an jemanden an der Oberfläche. Ich bin dann nur noch eine arme weiße Maus, die hofft, dass sie irgendwie davonkommt.

BA:

Aus was bestanden denn die Tauchanzüge damals?

HK:

Das war meistens gummiertes Tuch, es gab schon recht anständige Anzüge. Es gab damals von Spirotechnique schon einen perfekten Anzug.

BA:

Du bist damals sicher auch dem Cousteau begegnet.

HK:

Er hat mir angeboten in sein Team zu kommen; er hat mir sehr geholfen. Er hat mir die Versuche in Frankreich ermöglicht, den ersten simulierten 300 Meter Tauchgang. Er hat mir einen Vertrag mit Spirotechnique verschafft, die mir Equipment geliefert haben und einiges Geld bezahlt. Er hat aber gesagt, dass man in seinem Team nur eine Person berühmt machen könne, und das sei natürlich er selbst; und mein Name würde verschwinden. Ich sagte: "Aber ich bin der Erfinder, ich denke mir die Dinge aus, die sich gegenwärtig niemand anders ausdenkt und das ist doch auch was, das möchte ich schon honoriert haben". Er sagte: "Hannes, hör mal, die Kunst ist nicht zu erfinden, sondern zu wissen, was man erfinden muss". Ich glaubte das nicht und habe das Angebot abgelehnt, denn ich wollte selber berühmt werden, damit die Mädchen mir nachlaufen. Ich denke auch, dass Cousteau Zeit Lebens ein Problem hatte mit guter Technik. Er hat eine Playboy-Technik gemacht mit seiner Untertasse. Auch sein Schiff war eine Wiedererfindung des Rotorschiffes, das war einfach keine gute Technik.

BA:

Erzähl uns doch mal die Geschichte mit den Ärzten in der COMEX-Kammer.

HK:

Das war in der Experimentierkammer der französischen Marine in Toulon. Diese hatte einen wassergefüllten Teil für die 300 Meter Simulation, wassergefüllt deshalb, um deinen

Temperaturanstieg zu vermeiden. Darüber war eine luftgefüllte Behandlungskammer, dort waren die Ärzte auf 60 Meter. Ich bin mit den Ärzten auf 60 Meter gefahren, dann stieg ich runter in die Nasskammer. Der Deckel wurde geschlossen und bei mir wurde der Druck auf 300 Meter erhöht, sehr schnell, in 2½ Minuten. Man wusste damals ja noch gar nicht, was mit dem menschlichen Körper geschieht auf 300 Meter. Ich wurde dann zurückgefahren und ich ging hinauf zu den Ärzten, die mich kurz untersuchten. Meine Dekompression für die 300 Meter dauerte 30 Minuten, die der Ärzte für 60 Meter dauerte 45 Minuten. Als ich dann draußen war, habe ich mich ganz schnell umgezogen, ich legte eine Krawatte um, der Knopf war vorher schon gemacht, und als die Ärzte herausgekrochen sind, stand ich da und habe sie mit einem ekelhaft süffisanten Lächeln gefragt, ob sie irgend etwas spüren oder Effekte erkennen und ob ich sie verarzten soll, aber wir haben alle gelacht - die konnten ja auch nichts dafür, dass ihre Tabellen eben langsam sind.

BA:

Wie bist Du damals mit dem Bühlmann in Kontakt gekommen?

HK:

Ich wollte eigentlich Wasserstoffversuche machen und war von der Frage beunruhigt, ob Wasserstoff dem Körper irgend etwas komisches antut, wie z.B. eine Änderung des PH-Wertes im Blut, oder dass sonst irgend etwas im Körper mit Wasserstoff reagieren könnte. Ich wollte Bühlmann fragen, was er davon hält. Er hielt von Wasserstoff gar nichts. Dadurch wurden diese Fragen auch nicht beantwortet. Aber wir beschlossen, mit Helium zu arbeiten. Das ist zwar teurer, aber was soll's. Dann hat er sich für die Sache interessiert und ich war froh, dass ein Arzt dabei war - auch weil ich Respektabilität brauchte. Ich war einfach der Erfinder, der verrückte Kerl, der Irre, der unverantwortliche Dinge tut, der aus den Tauchclubs rausgeschmissen wurde und in der Presse verschrien war als Aufhetzer der Jugend für gefährliche Rekorde. Der Bühlmann verschaffte mir Respektabilität und später kam dann natürlich auch medizinische Forschung hinzu. Mit der Dekompression hatte er gar nichts zu tun - die Idee mit dem Gaswechsel war meine Idee und ich habe es gerechnet. Später bin ich dann ausgestiegen und Bühlmann machte medizinische Forschung und Behandlung - da war ich Laie, das war sein Gebiet.

BA:

Man könnte aber dennoch sagen, dass Du derjenige warst, der den Bühlmann auf diesen Weg brachte.

HK:

Ja natürlich, und er hat angebissen. Er war sehr begeisterungsfähig. In meinem Leben habe ich die Leute nie gemocht, die nicht verführbar sind.

BA:

Was habt ihr zwei gemacht, welche Tauchgänge, welche Projekte.

HK:

Es ging im Wasser bis zum 300-Meter Versuch in Kalifornien. Wir sind mit einer Glocke in 4 Minuten abgetaucht, haben die Glocke auf dem Grund gelandet. Dann bin ich ausgestiegen. Bei diesem Versuch sind leider zwei schwere Unfälle passiert, dann habe ich abgebrochen. Dieser tragische Versuch hat aber gezeigt, dass es geht: Man kann auf 300 Meter arbeiten. Ich habe dann mit Shell Oil gesprochen, die hatten Lust, weiter zu machen. Wir haben einen Forschungsvertrag unterschrieben und Shell hat das ganze Know-How gekauft. Wir haben dann in Zürich das Labor richtig ausgebaut.

BA:

Wir haben gerade mit Software einen deiner damaligen Tauchgänge nochmals durchsimuliert. Deine Deko-Zeiten waren damals viel kürzer. Sind wir heute viel zu vorsichtig oder warst Du damals hart an der Kante?

HK:

Ich war an der Kante, aber das wusste ich damals nicht. Man muss schon sehen, dass ich die Regeln ein bisschen verletzt habe. Aber bei experimentellen Tauchgänge ist es im Zweifelsfall klüger, sich einen Deko-Unfall einzufangen, aber man kommt schnell raus und kann abbrechen, wenn etwas schief geht. Bei uns war immer die Gefahr, dass technisch was schief geht. Wenn ich dann schon näher an der Oberfläche bin, im Vergleich zu einer guten Dekompression, ist Abbrechen einfacher. Alles musste schnell gehen. Die Amerikaner haben gesagt, man soll nicht schneller absteigen als 100 Meter pro Stunde - ich hab das in einer Minute gemacht. Das hat natürlich HPNS gegeben, ich habe gezittert, aber es hat mich nicht beunruhigt. Aber wenn ich schnell hätte raus müssen, so wäre dies möglich gewesen - ansonsten wäre ich der Gefangene der Tiefe gewesen, und davor hatte ich Angst.

BA:

Du hast 1962 mit dem Tauchen komplett gebrochen. Was hast Du anschließend gemacht?

HK:

Dann kamen viele Jahre der Forschung, technische Entwicklungen. Ich habe z.B. Druckkammern gebaut für die türkische und griechische Marine und für John Leight und die Lousitania. Dann habe ich ein Tieftauchsystem gebaut mit 70 Tonnen Material und habe einen Tauchanzug entwickelt. Ich musste viele Berechnungen mit dem Computer machen und mir wurde klar, dass in der Zukunft keine Entwicklung ohne Computer auskommen wird. Tauchen und Computer ging gleichzeitig aber nicht, und so sagte ich mir, mach mal was Neues. Ich hab dann in einer Fertigungsstraße Computer gebaut, die gingen auch ganz gut. Und als der Umsatz auf 10 Millionen pro Jahr hochging, dann musste ich finanzielles Management machen. Das hat mich überhaupt nicht interessiert. Dann habe ich das Ganze für ein paar Millionen verkauft und mir einen Rolls Royce gekauft. Ich habe mich dann auf Software konzentriert.

BA:

Was steht für die Zukunft noch an?

HK:

Nun, die Softwareentwicklung hat sich völlig verändert. Die Art von Programme, die ich gemacht habe, braucht heute niemand mehr. Und da niemand in meiner Familie die Firma fortführen wollte, habe ich es sein lassen. Mich hat schon immer Politik und die Folgen der technischen Automation und der Arbeitslosigkeit interessiert, das hat mich schon immer beschäftigt. Ich habe Computertechnik gemacht und den Leuten gesagt, dass sie damit Arbeitsplätze einsparen könnten. Mir wurde gesagt, das dies unsozial sei, und ich sagte "Nein, der Computer arbeitet schneller und besser und der Wohlstandskuchen wird dadurch größer". Ich dachte, dass es den Menschen leichter fällt einen großen Kuchen zu verteilen als einen kleinen. Die Wahrheit ist aber umgekehrt und das ist paradox - das bedarf einer politischen Lösung. Ich bilde mich deshalb gerade zum Politologen aus.

BA:

Wenn jetzt junge Taucher 40 Jahre später wieder auf ihre Techniken zurückgreifen, freut dich das?

HK:

Das macht schon Spaß, natürlich, das ist schon begeisternd. Es gibt jedoch schon einige waghalsige Projekte, die Unfälle werden nicht ausbleiben, es ist gefährlich. Auf der anderen Seite, ich bin ein wenig gespalten, ich sehe, dass einige Dinge nicht so seriös gemacht werden, wie ich mir das wünschen würde. Die Amateure sind eben doch die Amateure, es fehlt an den Mitteln und die Sicherheit ist fragwürdig. Andererseits darf man das Dasein nicht banalisieren. Ich möchte nicht in einer Welt leben, die nicht auch ein bisschen gefährlich ist. Ich möchte keine Unfälle herbeiwünschen. Ich habe die Risiken in Kauf genommen, ich denke, sie gehören ein bisschen zum Leben.

Froschmann taucht 155 Meter
 23. AUG. 1960 F.A.Z. D 11
 BRISSAGO (Schweiz), 22. August (dpa). Der Schweizer Froschmann Hannes Keller hat am Sonntag einen neuen Rekord im Tieftauchen aufgestellt. Keller erreichte bei einer Schwimmzeit von 34 Minuten im Lago Maggiore eine Tiefe von 155,65 Metern. Der bisherige Rekord betrug 132 Meter.

F.A.Z.
 23.8.1960

Mit „Diogenes“ dreihundert Meter tief

ROMANSHORN, 25. Oktober (dpa). Mit einem neuartigen Tauchgerät will der Schweizer Tiefseeforscher Hannes Keller im November an der kalifornischen Küste bis in eine Tiefe von dreihundert Metern vorstoßen. In diesen Tagen hat er mit dem neuen, aus Stahl konstruierten Tauchgerät, das er „Diogenes“ nennt, erfolgreiche Versuche auf dem Bodensee unternommen: Das Gerät erreichte vor Romanshorn (Schweiz) innerhalb von sechzehn Minuten eine Tiefe von 130 Metern. Das Gerät ermöglicht es den Insassen, mit Tauchanzügen und Spezialgeräten die Kapsel zu verlassen und später in die Kammer zurückzukehren.

F.A.Z.
 26.10.1962

Fahrlässigkeit bei Tauchexperiment

FAZ DE D. U. W. 26. OKT. 1962
 LOS ANGELES, 30. Januar (AP). 1963 von einem amerikanischen Untersuchungsgericht eingesetzter Sachverständigenausschuß hat entschieden, daß der Schweizer Tiefseetaucher Hannes Keller nicht aus grober Fahrlässigkeit an dem Tod zweier Tauchsportler schuld war. „Gewisse Verletzungen der Sicherheitsvorkehrungen“ während des Experiments vor der kalifornischen Küste, bei dem am 3. Dezember der 35 Jahre alte Engländer Peter Small und der neuzehnjährige Student Christopher Whittaker ums Leben gekommen waren, seien jedoch nicht auszuschließen.

F.A.Z.
 4.1.1963

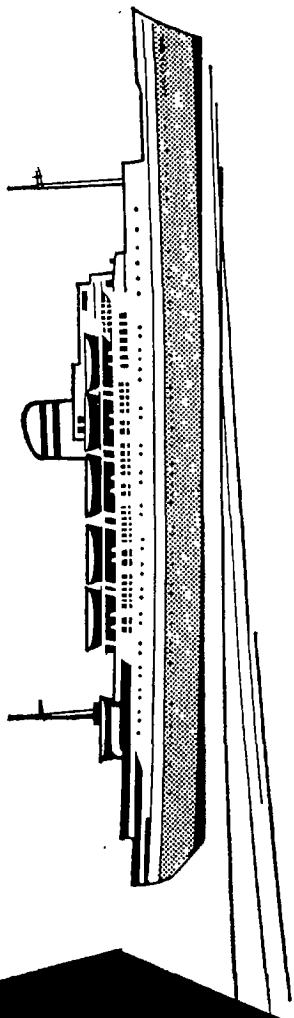
Bei dem Experiment sollte eine von Keller erfundene neuartige Gasmischung erprobt werden, die angeblich gefahrloses Tauchen bis in mehrere hundert Meter Tiefe ermöglicht. Während Keller selbst den Versuch gut überstand, starb Small infolge Drucküberlastung der inneren Organe, und Whittaker kam bei dem Versuch, Small zu bergen, ums Leben.

D. MAASDAM

15024 BRT

ab Februar 1963
im regelmäßigen
Verkehr zwischen

**BREMER-
HAVEN**



und
**NEW
YORK**

Auskunft bei allen Reisebüros

Holland-Amerika Linie

BREMERHAVEN • ROTTERDAM • IRLAND • USA/CANADA

SPORT

TAUCHEN

WELTREKORD

Tod vor Santa Catalina

Aus der Tiefe blubberten Blasen hoch. Männer und Frauen an Bord des Expeditionsschiffes starrten angespannt ins Wasser, um den Verlauf des gefährlichen Experiments zu verfolgen. Ziel des Unternehmens war ein Weltrekord im Tieftauchen: Zum erstenmal sollten sich Schwimmer in einer Tiefe von 300 Metern bewegen und außerdem zwei Flaggen in den Meeresboden pflanzen. Resultat des Weltrekordversuchs: zwei Tote.

Einziger Überlebender des Unglücks im vergangenen Monat vor der kalifornischen Insel Santa Catalina war der Initiator des Unternehmens, der 28jährige Schweizer Mathematiklehrer und Sporttaucher Hannes Keller.

Obwohl ihm der vorletzte Woche veröffentlichte Bericht eines amtlichen amerikanischen Untersuchungsausschusses „offensichtliche Mißachtung der Tauchsicherheitsbestimmungen“ vorwarf, betrachtet Hannes Keller den verhängnisvollen Rekordversuch sogar als „gelungen“. Keller: „Mit diesem Schritt ist der letzte unbekannte Raum dem Menschen erschlossen worden.“

Seit über vier Jahren experimentiert der eidgenössische Tauchsportler an einer Methode, die den Millionen Sporttauchern mit Gummianzug und Atemgerät gefahrlos Tiefen erschließen soll, in die sich bis heute die kühnsten Militär-Froschmänner nicht wagen dürfen.

Bleisohlenbeschwerte und helmbewehrte Taucher in Taucheranzügen vermögen mit Luftversorgung von oben Tiefen bis zu etwa 100 Meter zu erreichen; arbeiten können sie allerdings bestenfalls noch in 60 Meter Tiefe. Panzertaucher in druckfesten Rüstungen kommen zwar auf etwa 200 Meter; ihre Arbeitsleistung ist indes in jeder Wassertiefe stark begrenzt, weil sie zu unbeweglich sind.

Gering waren bisher auch die Möglichkeiten der mit Atemmasken und Gummianzug ausgerüsteten Froschmänner, obwohl sie sich besser bewegen können als Taucher mit schwerem Gerät. Die größte Tiefe, in der Froschmänner je arbeiteten, betrug — bei der Bergung eines vor Honolulu gesunkenen amerikanischen U-Bootes — 84 Meter.

Grund dieser Begrenzung nach unten ist ein physikalischer Effekt: Die unter Druck atmenden Taucher nehmen außer Sauerstoff, der sich mit den roten Blutkörperchen verbindet, auch Stickstoff auf, der sich im Körper löst. Sobald der Druck beim Aufstieg nachläßt, wird der Stickstoff frei und bildet Blasen, die im Blut zu einer lebensgefährlichen Gasembolie führen können. Diese Erscheinungen der sogenannten Taucherkrankheit lassen sich vermeiden, indem der Taucher für den Aufstieg — die Dekompressionsphase — genügend Zeit aufwendet.

Jenseits der 60-Meter-Grenze droht Tauchern eine weitere Gefahr: Sie können dem sogenannten Tiefenrausch verfallen. Er kann neben Halluzinationen

auch Ohnmachten und damit leicht den Tauchertod auslösen.

Taucher und Marinespezialisten experimentieren seit langem mit Gasgemischen, um diese Gefahren zu reduzieren und größere Tauchtiefen zu erreichen. Versuche, bei denen der Stickstoff durch das leichtere Helium ersetzt wurde, gestatteten zwar Tauchtiefen von über 150 Metern, zwangen jedoch zu bedeutend längeren Auftauchzeiten. So gelang einem englischen Marine-Taucher 1958 mit 184 Metern ein Weltrekord; der Mann brauchte jedoch zum Auftauchen volle 20 Stunden.

„Die bisherigen Methoden sind unzureichend“, befand Mathematiker Keller, nachdem er alle Tauchverfahren geprüft hatte. Er beschloß, eine eigene Methode zu entwickeln. Keller untersuchte, wie sich Gase im Verhältnis zu Flüssigkeiten in lebenden Geweben unter verschiedenen Druckverhältnissen verhielten. Er ermittelte, was der Körper nach seiner Ansicht in verschiedenen Tiefen benötigt und stellte diesen Werten entsprechende Gasgemische her. Die Zusammensetzung seiner Gas-Cocktails hält er geheim, doch gilt in



Rekordtaucher Keller
In 300 Meter Tiefe ein Gas-Cocktail

Taucherkreisen als ausgemacht, daß Keller Sauerstoff, Helium und einige weitere Edelgase mixte.

Tatsächlich schien Keller die Lösung der bisherigen Tieftauchprobleme gelungen. Nach Laborversuchen in der Universität Zürich und einigen Tests in schweizerischen Seen ließ sich der Mathematiker im Juni 1961 gemeinsam mit dem amerikanischen „Life“-Reporter MacLeish auf einer Plattform 222 Meter tief in den Lago Maggiore versenken. Die beiden Weltrekordler konnten in der ungewöhnlich kurzen Zeit von nur 45 Minuten zum normalen Druck zurückkehren.

Kellers zweiter Weltrekordversuch — vor der Insel Santa Catalina — endete

indes fatal. Um auf 300 Meter Tiefe zu kommen, hatte der Schweizer eine fünf Tonnen schwere Taucherglocke bauen lassen, die er „Diogenes 62“ nannte. Die Glocke, behängt mit Kellers verschiedenen Gasflaschen, sollte Keller und seinen englischen Tauchgefährten, Peter Small, wie eine Art Förderkorb auf die vorgesehene Tiefe bringen. Bei gleichem Innen- und Außendruck sollten sie ihren Druckbehälter durch eine Bodenklappe verlassen, nach beendetem Tauchmanöver wieder betreten und wieder an Bord des Expeditionsschiffes gehievt werden. Ein Probetauchen auf 92 Meter verlief völlig zufriedenstellend.

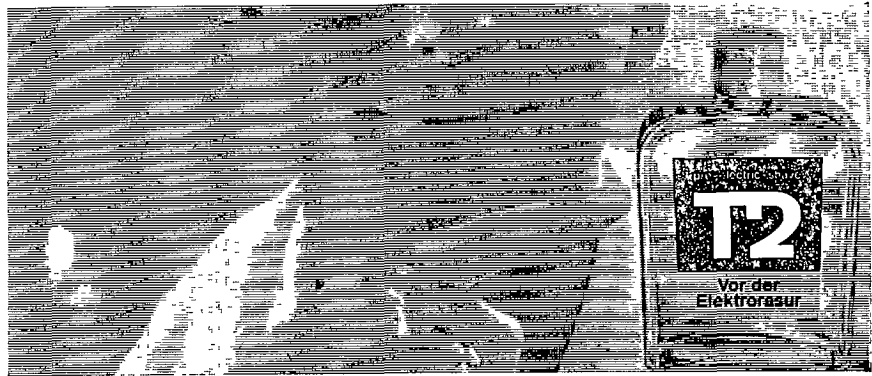
Doch zwei Tage später zeigte sich beim eigentlichen Rekordversuch, daß auf 300 Meter Tiefe offenbar versagte, was in Tiefen von 92 und 222 Metern funktioniert hatte: Ein Defekt der Apparatur versorgte die Taucher plötzlich nicht mehr mit der rechten Menge Keller-Gas.

Keller hatte gerade den Versuch abgebrochen, die Schweizer Flagge und das Sternenbanner in den Meeresboden zu pflanzen. Da sich die bunten Tücher infolge leichter Strömung mit den Schläuchen seines Atmungsgeräts verheddert hatten, warf er sie einfach ab, kehrte in die Glocke zurück und schloß die Luke, als er merkte, daß sein Gemisch knapp wurde. Er fühlte die Ohnmacht nahen, riß sich die Atemmaske ab und sank um. Wenig später erging es Mittaucher Small ebenso. Beide atmeten fortan zwangsläufig nur normale Preßluft.

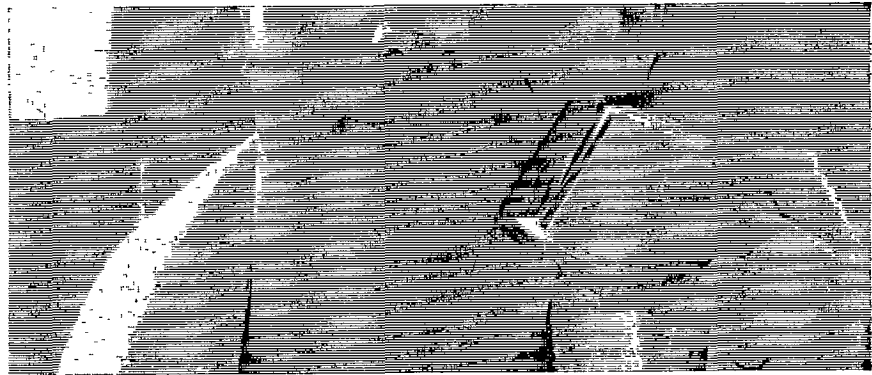
Da das Unglück mittels einer kleinen Fernsehkamera an Bord des Schiffes beobachtet werden konnte, wurde die Glocke innerhalb von 17 Minuten auf 60 Meter Tiefe gezogen, wo das Atmen normaler Preßluft die verunglückten Taucher nicht mehr gefährden konnte. Jetzt aber drohte der sorgfältig berechnete Dekompressionsplan durcheinanderzugeraten, weil im Innern der Glocke zu niedrige Druckverhältnisse herrschten: Sie war offenbar nicht dicht verschlossen. Zwei Hilfstäucher schnallten sich Gasflaschen mit Kellers Spezialgemisch auf den Rücken und sprangen ins Wasser, um den Schaden — eine eingeklemmte Gummiflosse — zu beseitigen. Einer der Rettungstaucher, der Engländer Chris Whittaker, tauchte nicht wieder auf.

Unterdessen waren die beiden Insassen der Glocke zwar aus ihrer Bewußtlosigkeit erwacht. Als „Diogenes 62“ jedoch an Bord gezogen und nach der vorsorglich auf sechseinhalb Stunden ausgedehnten Dekompressionszeit geöffnet wurde, war Small schon gestorben. Als Todesursache ermittelte der Gerichtsarzt genau das, was Keller mit seinem neuartigen Tauchverfahren verhindern wollte: eine Gasembolie.

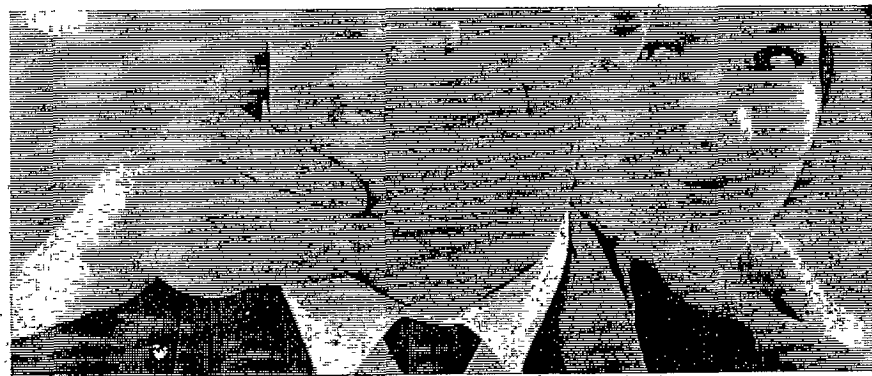
Um die Schuldfrage zu klären, verlangte der Untersuchungsrichter eine Analyse des Keller-Gasgemisches. Doch daran konnte dem Schweizer Taucher nicht gelegen sein: Keller will sein Tauchverfahren kommerziell auswerten und hat schon mit dem Ölkonzern Shell-AG und der US-Marine Kontakt aufgenommen. Um sein Geheimnis zu wahren, ließ er aus sämtlichen Vorratsflaschen das Gas ab, ehe der Richter zu packen konnte.



Zuerst T2



dann rasieren



viel länger glatt



Sie rasieren sich elektrisch? Noch besser geht's mit T2. Wenige Tropfen genügen! Straffende Wirkstoffe glätten die Haut, machen den Bart schnittfest. Das Barthaar wird herausgedrückt — der Scherkopf kann viel tiefer fassen. Sie rasieren sich noch leichter — noch schneller — noch gründlicher mit T2.

T2 Tonicum DM 2.50, 4.20

Die vorteilhafte
Großflasche DM 7.50

**T2 Gelee für besonders
empfindliche Haut
Tube DM 2.85**

**T2 auch in der Schweiz
und in Österreich**

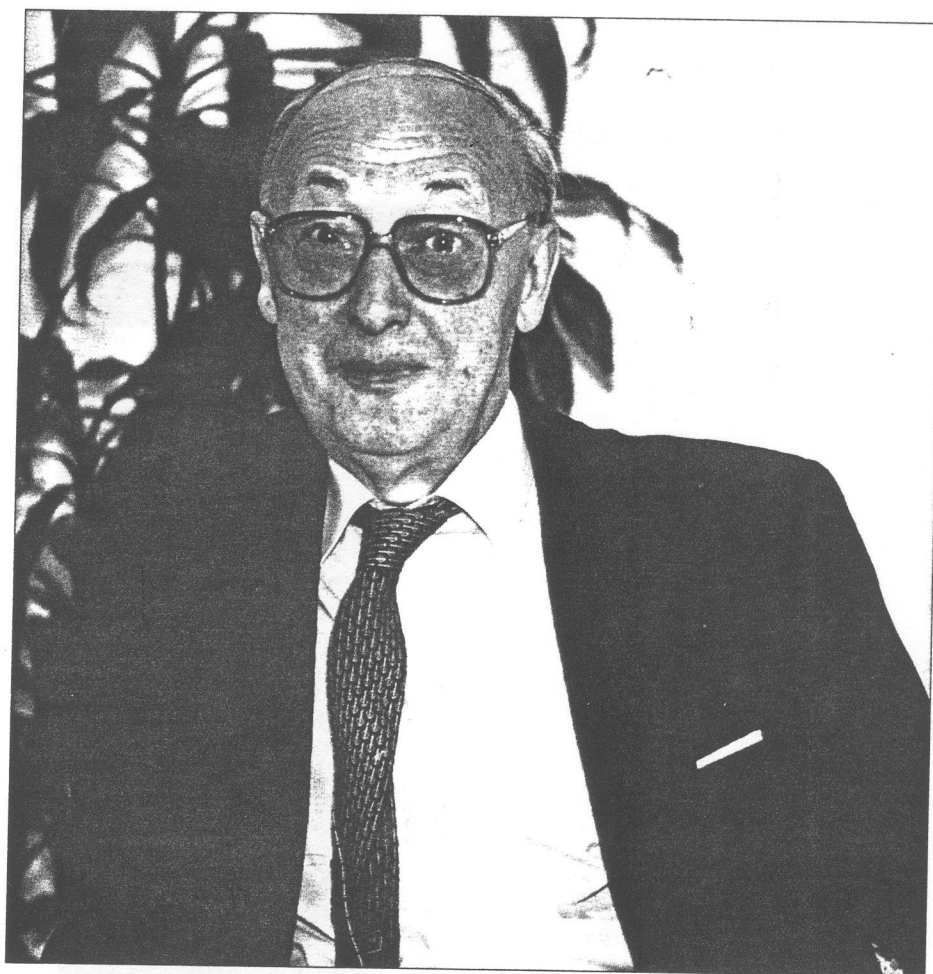
Auch Ihr Apparat rasiert noch besser mit T2

Professor Dr. med. Albert A. Bühlmann

Berufs- und Sporttaucher verdanken dem Züricher Universitätsprofessor Bühlmann viel – manche sogar ihr Leben.

Als Vater der Bühlmann-Tauchtabellen und Mitentwickler der ersten elektronischen Tauchcomputer zählt der Professor zu den großen Pionieren des Tauchsports.

Da die Tauchcomputer in den letzten Monaten wegen der Mikrobläschen-Berechnung wieder Schlagzeilen machten, hat UWF den Eidgenossen befragt, denn der sollte es ja wissen – wir waren gespannt.



Prof. Dr. med. Albert A. Bühlmann war lange Jahre Leiter des Departments für Innere Medizin am Universitätsspital Zürich. Dank seiner Initiative wurde bereits 1959 eine Überdruckkammer in Zürich in Betrieb genommen. Bühlmann-Tauchtabellen waren jahrzehntelang die stummen Begleiter Tausender von Sporttauchern, ob im Meer oder im Bergsee. Auch als die ersten Tauchcomputer 1983 auf den Markt kamen, war der Tauch-Doktor daran beteiligt. Aus Hunderten von simulierten Durchgängen entstand eine Software, die es erstmals verstand, das Tauchprofil des Tauchers kontinuierlich zu erfassen und zu berechnen. Der Name des Tauchcomputers: Decobrain!

Die in Zürich ermittelten Daten standen zeitweilig im Widerspruch zu den in den USA ermittelten Werten. Auch hatte jede Nation eigene Dekotabellen – identisch war keine. Ein Zustand, der sich in den heutigen Tauchcomputern fortsetzt. Manche berücksichtigen angeblich Mikrobläschen, andere nicht.

Die tauchmedizinische Forschung war in Zürich immer praktisch orientiert. Daraus entstand ein allgemein anwendbares Rechenmodell für die Dekompression, das System ZH-L16 – eine originäre Schweizer Leistung. Sowohl geeignet für die kurzen Tauchgänge mit Luft, wie sie von Sporttauchern durchgeführt werden, als auch für den tagelangen Aufenthalt in größeren Tiefen mit Mischgas.

Interview mit Prof. Dr. Bühlmann Thema: Tauchcomputer und Mikrobläschen

UWF: Stichwort Mikrobläschen: Bitte erklären Sie unseren Lesern den Begriff einmal mit einfachen Worten.

Prof. B.: Mikrobläschen sind solche, die man mit dem bloßen Auge nicht mehr sehen kann. Man benötigt ein Mikroskop. Es ist falsch zu sagen, daß Mikrobläschen diejenigen sind, die man nicht mit dem Doppler-Effekt (scheinbare Verschiebung der Wellenlänge des Schalls bei Annäherung oder Entfernung der Schallquelle) orten kann. Natürlich müssen sie hierbei in Bewegung sein, um sie nachweisen zu können.

UWF: Wie gefährlich sind Mikrobläschen, und wann treten sie überhaupt auf?

Prof. B.: Blasen, die im Gewebe steckenbleiben, machen Schäden, das ist hinreichend bekannt. Sie entstehen im allgemeinen durch ungenügende Dekompression, aber auch durch zu schnelle Aufstiege. Es kommt auf die Menge der Mikro-

blasen an, aber man kann daran sterben, gar keine Frage.

Mikroblasen kennt man im übrigen schon seit den Anfängen der Taucherei, das ist nichts Neues. Früher konnte man Mikroblasen nur feststellen, wenn der Tote sezziert wurde. Heute macht man das mit Ultraschall am lebenden Körper.

UWF: Können Mikrobläschen Langzeitschäden verursachen?

Prof. B.: Wenn in der Lunge etwas passiert, sei es durch nachlässiges Dekomprimieren oder zu schnelle Aufstiege, können Mikroblasen in die Lungenkapillaren eingeschwemmt werden. Sie kommen dann auf die arterielle Seite des Blutkreislaufs, und es entsteht eine Gasembolie. Oft bemerkt man diese latenten Vorgänge nicht, es sind dann Schäden ohne klinische Bedeutung. Die Gefahr liegt in der Häufigkeit und ist unabhängig vom Amateur- oder Berufstaucher.

UWF: Eine gewisse Verunsicherung unter den Tauchern kann nicht geleugnet werden, wenn ein Computer Dekozeiten anzeigt und andere hingegen nicht. Eigentlich müßten doch alle ungefähr gleich

1992 03/91

rechnen, wenn sie auf dem letzten Stand der Forschung und Technik wären?

Prof. B.: Diese Unsicherheiten gab es schon immer, denken Sie nur an die verschiedenen Tabellen. Die Behauptung, daß es Tauchcomputer gibt, die Mikrobläschen berechnen können, ist Unsinn. Alle modernen Computer geben viel kürzere Nullzeiten und längere Dekozeiten vor als die veralteten Tabellen auf der Basis der US-Navy, die ja immer noch in Gebrauch sind. Mit den unterschiedlichen Nullzeiten der Geräte werden wir wohl leben müssen, wenngleich hier manches übertrieben wird. Zehn Minuten Nullzeit auf 30 m Tiefe, wie es ein bekannter Tauchcomputer anzeigt, halte ich für total überzogen, damit gängelt man den Taucher.

UWF: Gibt es eine Statistik, aus der sich herauslesen läßt, ob die Tauchunfälle seit der Benutzung von Tauchcomputern zugenommen haben? Man muß dabei selbstverständlich in Dekounfälle und Tiefenrauschunfälle unterscheiden.

Prof. B.: Man sollte eine solche Statistik eher an der Zahl der Taucher und der Häufigkeit ihrer Abstiege erstellen. Hier ist zu sagen, daß die tödlichen Unfälle prozentual abgenommen haben, obwohl wesentlich mehr getaucht wird als früher. Ob das an den Computern liegt, kann nicht eindeutig belegt werden.

Tatsächlich haben aber Hautsymptome und Muskelschmerzen zugenommen. Sicherlich durch Wiederholungstauchgänge und Einschwemmen von Mikroblasen in die Lungen. Ausgenommen sind davon aber Rückenmarkschäden; die bei Wiederholungstauchgängen nicht öfter vorkommen als bei Ersttauchgängen.

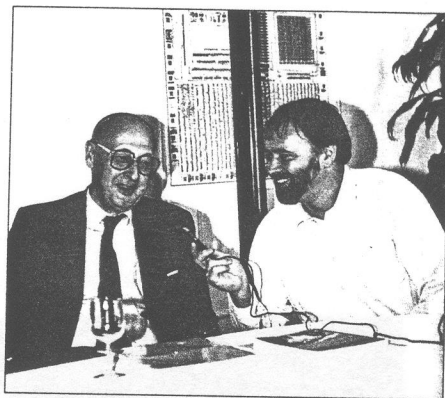
Als Resümee ist zu sagen, daß das Tauchen mit Computern – was die Schwere der Tauchunfälle anbelangt – weitaus sicherer geworden ist. Einfach, weil die Nullzeiten kürzer geworden sind.

UWF: Wo fängt nach heutigem Wissensstand die dekopflichtige Tiefe an?

Prof. B.: Das echte Sättigungstauchen beginnt bei etwa 8 m Tiefe. Wer in dieser Tiefe mehr als 15 Stunden bleibt, kommt aus der Nullzeit. Aber auch, wer jeden Tag mehrere Stunden in diesen Tiefen verbringt, sättigt sich langsam voll und muß irgendwann dekomprimieren.

UWF: Multi-Level-Tauchen und auch Jo-Jo-Tauchen erfreuen sich anscheinend größerer Beliebtheit, als man denkt. Für wie gefährlich halten Sie solche Praktiken, z. B. innerhalb von 15 Minuten dreimal auf 50 m abzutauchen?

Prof. B.: Das Risiko, Barotraumen, Lungenüberdehnungen oder Lungenrisse und Innenohrschäden zu bekommen, steigt mit jedem dieser Ab- und Aufstiege. Durch zu schnelle Aufstiege entsteht ein zusätz-



„Leider wird über das Thema Tauchcomputer, Nullzeiten und Mikrobläschen oft unqualifiziertes Zeug geredet.“

liches Risiko, daß sich im arteriellen Blut Blasen bilden.

UWF: Kann ein Tauchcomputer Jo-Jo-Tauchen rechenmäßig erfassen, oder steht einem der elektronische Black-out ins Haus?

Prof. B.: Das ist zweifellos ein Problem, mit dem wir uns beschäftigen. Wir müssen allerdings unterscheiden in Multi-Level und Jo-Jo-Tauchen, letzteres geht immer bis zur Oberfläche und ist vergleichsweise viel gefährlicher. Ob Tauchcomputer diese Art des Tauchens erfassen können, ist eine elektronische und Software-Frage. Hierzu kann nur ein Computerhersteller Auskunft geben.

UWF: Inwieweit hängt das Rechenmodell eines Tauchcomputers mit der Vermarktung zusammen? Etwa in dem Sinne: längere Nullzeiten gleich höhere Verkaufszahlen?

Prof. B.: Das weiß ich nicht, denn darüber liegt mir kein Zahlenmaterial vor. Aber zweifellos ein interessanter Aspekt.

UWF: Uns sind Fälle bekannt, da kamen Leute in den Tauchshop und verlangten einen Tauchcomputer, aber keinen x-beliebigen, sondern den mit den längsten Nullzeiten. Fängt hier nicht der Irrsinn an?

Prof. B.: Richtig – aber genauso unsinnig ist es, den Computer mit den kürzesten Nullzeiten zu verlangen. Das kann meines Erachtens auch kein Verkaufs- oder Kaufargument sein. Wichtig ist das Programm insgesamt. Nur die Nullzeiten zu verkürzen, ist Quatsch, sonst kommt man auf Dekozeiten, die nicht mehr vertretbar sind. Leider wird über das Thema insgesamt allzuoft unqualifiziertes Zeug geredet. Nehmen Sie z. B. Jürgen Herrmann, Mitentwickler des ersten Tauchcomputers Decobrain, und Dr. Max Hahn, Sachgebietsleiter im VDST, die sich beide in Tauchmedizinische Bereiche einmischen, obwohl sie keine medizinische Promotion haben. Den wirren und sich

meist selbst widersprechenden Aussagen nach zu urteilen ist Herr Herrmann für mich sowieso ein Psychopat. Dr. Hahn ist ein Physiker und kann sicherlich besser rechnen als ich, kann auch Statistiken erheben, hat aber nicht die geringste experimentelle Erfahrung.

UWF: Werden in Zukunft die Tauchprogramme konservativer rechnen, etwa im Sinne der Berufstaucher-Tabellen?

Prof. B.: Berufstaucher-Tabellen sind nicht konservativer ausgelegt als die für den Sporttaucher. Berufstaucher-Tabellen sind häufig sogar ungenauer, wir haben das selbst festgestellt. Sie gelten in der Regel nur für Meeresabstiege. Sporttaucher glauben aber manchmal, daß sie sich an die Tiefe gewöhnen und so dem Tiefenrausch besser begegnen können. Eine sehr riskante Theorie.

UWF: Die nach Ihnen benannten Bühlmann-Tabellen sind eigentlich jedem tauchenden Menschen ein Begriff. Wie entstehen solche Werte?

Prof. B.: Tabellen entstehen durch Beobachtungen und Experimente. Das hat schon Haldane so gemacht. Aus den Werten entsteht irgendwann ein Rechenmodell. In Zürich haben wir solche Versuche in der Druckkammer gefahren. Man hat sich international auf zwölf Individuen geeignet, die dasselbe Tauchprofil unter Arbeitsbedingungen abfahren. Hat keiner Probleme, geht man davon aus, daß der gemütlich tauchende Urlauber erst recht keine haben wird. Zur Sicherheit gibt man noch einen Tiefenzuschlag hinzu. Als dann erfolgen die Umrechnungen auf die verschiedenen Höhen. So in etwa läuft es ab.

UWF: Stimmt es, daß der VDST ihre normale Deko-Tabelle nicht mehr empfiehlt, sondern aus Sicherheitsgründen die Bergsee-Tabelle ab 250 m vorschlägt?

Prof. B.: Ist mir nicht bekannt! Vielleicht geht das auf Vorschläge von Dr. Max Hahn zurück.

UWF: Nennen Sie uns einmal Wunschfunktionen und Rechenvorschläge, die ein Tauchcomputer Ihrer Meinung nach beherrschen sollte, die aber noch nie verwirklicht wurden?

Prof. B.: Das Problem der Wiederholungstauchgänge wird bis jetzt nur unbefriedigend erfaßt. Möglicherweise rechnen die Geräte sogar noch zu sicher. Eine Erweiterung der Kompartimente (Gewebegruppen) von jetzt 6 oder 8 auf die von mir gewünschten 16 würde genauere Zeiten liefern. Aber das ist nicht so einfach, denn die Geräte würden dadurch größer werden. Im Grunde sind alle Computer rechenmäßig verbesserungsfähig.

UWF: Herr Professor Bühlmann, wir danken Ihnen für das Gespräch. ■

Der Streit geht weiter!

Kommentare Stellungnahmen Interviews

Kommentar von Dipl.-Phys. ETH Hannes Keller, Winterthur, Schweiz

„Den wirren und sich meist widersprechenden Aussagen nach zu urteilen, ist Herr Hermann für mich sowieso ein Psychopath.“

Dieser Satz steht in einem Interview des UWF mit Prof. Dr. Bühlmann. Nachdem die Divetronic die Technologie, die Herr Dipl.-Ing. H. Hermann entwickelt, verkauft hat, Herr Hermann zudem in wichtigen Verhandlungen über einen Transfer einer weiteren, von ihm entwickelten Technologie steht, betrachte ich es als angebracht, die Interessen von Scubapro und der Firma Keller mit dieser Klarstellung zu schützen.

Ein Blick in den neuen Brockhaus: „Psychopathen sind abnorme Persönlichkeiten, die infolge ihres Andersseins mit sich und der Welt nicht zurechtkommen. Viele hochwertige Menschen sind in diesem wertfreien Sinn psychopathisch. Lebensuntaugliche und Asoziale sind dagegen minderwertige Psychopathen“.

Wo soll man hier die Aussage von Herrn Prof. Bühlmann einordnen?

Kann man einen Mann, der als 25jähriger den Geldadel von Liechtenstein überzeugt hat, mehrere Millionen in seinen Tauchcomputer zu investieren, der kürzlich für viel mehr Geld die von ihm entwickelte Technologie der renommiertesten Firma der Tauchbranche verkauft hat, als lebensuntauglich einstufen? Nach den Normen unserer Gesellschaft kaum. Bleibt also die

andere Möglichkeit: Herr Hermann eine hochwertige Persönlichkeit, die, da die Normalen mit ihm nicht zurechtkommen, als abnorm eingestuft wird?

Etwas Tauchgeschichte soll das Verhältnis Hermann, Bühlmann, Hahn aufklären.

Wie es mit den Geräten heute noch geschieht, hatte der erste brauchbare Tauchcomputer, der „Hans-Hass-Deco-Brain“, nach seinem Erscheinen viel Lob, aber auch ebensoviel Kritik von den Experten des Faches bekommen. Jürgen Hermann stand durch die finanzielle Situation der ersten Divetronic unter enormem Druck und feuerte zwischen den Fronten des Tabellenkrieges gegen alle Kritiken. Er hatte sich bald, nebst vielen anderen, mit Prof. Bühlmann und Dr. Hahn angelegt. Er machte sich zum Opfer der schwelenden Differenzen zwischen den Dekompres-

sionsexperten, deren Blitze sich über dem Deco Brain entluden. Die Investoren hörten nur noch die Mißtöne und brachen das Orchester abrupt ab.

Als die Firma mit Jürgen Hermann, Prof. Hass und H. W. Keller neu gegründet wurde, brauchte es nicht viel Überzeugung, um die Herren Bühlmann und Hahn zu einer neuen Mitarbeit zu überreden. Sie erkannten beide, daß Jürgen Hermann am weitesten voran war mit der Entwicklung des Tauchcomputers und sie erst mal die Möglichkeit hatten, ihre Dekompressions-theorien in einem Gerät umzusetzen. Alle sprangen über das zerschlagene Porzellan um einer guten Sache willen. Divetronic stellte sich hinter die Fronten nach dem Motto: „Ihr seid die Päpste oder Reformatoren, wir sind die Gutenbergs“.

Damit warfen wir den Ball auch den kritisierenden Größen der USA, England, Frankreich oder Italien zurück, die alle ihre Einflußgebiete wie Fürsten verteidigten. „*Hujus regio, ejus religio*“.

Wer genügend Anhänger hatte, für den war Divetronic bereit, die Bibel in seiner Interpretation zu drucken.

Am Anfang hat die Zusammenarbeit mit Prof. Bühlmann und Dr. Hahn auch gut geklappt. Für ein Projekt einer renommierten Schweizer Uhrenfirma, die Funktionen des Nullzeitcomputers in einer Armbanduhr unterzubringen, hat Herr Prof. Bühlmann ein 6-Gewebe-Modell beige-steuert und Dr. Hahn die Koeffizienten modifiziert. Das 16-Gewebe-Modell des Deco Brain war nicht in die Größe einer Armbanduhr zu packen. Es ließe sich jedoch im Dacor Mikro Brain oder Scubapro DC 11 realisieren, insofern möchten wir Herrn Prof. Bühlmann berichtigen.

In der Folge gab es dann allerdings Meinungsverschiedenheiten zwischen Hahn und Bühlmann, die eine Zusammenarbeit erschwerten, Divetronic den Entscheid für „Papst“ oder „Reformator“ aufzwingen. Da das Einflußgebiet von Dr. Hahn viel größer war und Jürgen Hermann von der Sache her zu Hahn neigte, war die Entscheidung klar.

Im Entwicklungsstadium des NC 11 und DC 11 konnten wir Scubapro in die Entscheidung miteinbeziehen. Scubapro hat sich voll hinter die Sicherheitsphilosophie von Dr. Hahn gestellt.

Herr Prof. Bühlmann hat versucht, sowohl mich wie Herrn Hermann umzustimmen und vor allem für ein Programm zu begeistern, das ihm Jürgen Hermann kostenlos für eine Expedition in den Titicacassee in den Deco Brain gepackt hatte. Wir haben diese Bemühungen, einen miniaturisierten Computer nach seinen Ideen zu entwickeln, bestimmt aber höflich abgewiesen. Das waren unsere letzten Kontakte mit Prof. Bühlmann. ▶

Nachdem sich Herr Hermann mit Herrn Prof. Bühlmann mehrmals im Beisein namhafter Persönlichkeiten getroffen und in Projekten seinen Namen und sein Renommee eingesetzt hat, die ohne Herrn Hermann gar nicht zustande gekommen wären, zieht er mit seiner Aussage über Jürgen Hermann diese Persönlichkeiten notgedrungen mit hinein. Ich nenne nur eine Persönlichkeit hier, da deren Beteiligung an der Divetronic allgemein bekannt ist: Herr Prof. Dr. Hans Hass. ■

Zur Person: Hannes Keller, Dipl.-Phys. ETH ist Inhaber einer Firma mit 200 Mitarbeitern für elektronische Druckmeßtechnik. Die Firma Keller AG hält 50% der Aktien der Divetronic AG. Für Herrn Keller sind solche emotionale Blüten wie dieser Satz bezeichnend für die Tauchbranche. „Die Analogie zu einem Religionskrieg drängt sich förmlich auf“. Vor allem findet er die Profilneurotiker in dieser Branche stark vertreten. Wie Psychopathien können Neurosen positiv und negativ gedeutet werden. Doch die Profilierungssucht nimmt vielfach neurotische Züge an.

Er stellt denn auch klar, daß er mit dem berühmten Taucher Hannes Keller nicht identisch ist. Herr Keller firmiert mit dem Kürzel H. W. Keller, um Verwechslungen zu vermeiden.

Stellungnahme der Firma Scubapro

Die Tatsache, daß jedes Jahr etliche Dekompressionsunfälle bei der Benützung herkömmlicher Computer vorkommen, kann jeder Taucherarzt bei den Druckkammer-Behandlungszentren bestätigen (siehe hierzu auch Leserbrief Tauchen 6/91, Veröffentlichung Diver 12/90. Sporttaucher 1/91 und andere).

Wir konnten und wollten uns den Erkenntnissen der internationalen Dekompressionsforschung nicht verschließen. Daher rechnet unser Computer nach dem neuesten Kenntnisstand der Wissenschaft, eine Selbstverständlichkeit bei einem neu entwickelten Gerät. Von zuviel Sicherheit kann überhaupt nicht die Rede sein. Dies zeigt auch die Tatsache, daß nun auch in Deutschland eine Tabelle auf dem Markt ist, die diese neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse berücksichtigt, die Deko 92, herausgegeben vom VDST. Bezüglich der Äußerungen über Barotraumen von Herrn Dr. Bühlmann ist zu sagen, daß selbstverständlich ein Dekompressionscomputer Barotraumen nicht verhindern kann. Dies ist auch nicht seine Aufgabe. Hier ist eine vernünftige Ausbildung und entsprechendes Verhalten des Tauchers gefordert. Bei einer Diskussion über Dekompressionsprogramme hat dies aber keinerlei Relevanz. ■

Interview mit Dr. Max Hahn



Sein Werdegang gleicht dem eines Tauchpioniers. Bereits 1950 erkundete er die UW-Welt mit der ABC-Ausrüstung, um dann 1952, als einer der ersten in Deutschland, mit dem Gerätetauchen zu beginnen. Nur wenige können sich auf eine derart langjährige Tauch Erfahrung stützen. Praktisch hat er alle Entwicklungen von der selbstgefertigten Flosse bis zum modernen Tauchcomputer miterlebt und teilweise selbst beeinflusst bzw. erprobt.

Seit 1967 sitzt der promovierte Dipl.-Physiker in den Prüfungs-

kommissionen des VDST, vertritt diesen in den DIN-Ausschüssen und berechnete 1983 zusammen mit Prof. Bühlmann die gleichnamigen Dekotabellen der damaligen Jahre. Als Fachreferent für Tauchwissenschaften berät er internationale Tauchcomputerhersteller, ist Mitglied in vielen Ausschüssen und Gesellschaften für Tauch- und Überdruckmedizin. Die neuen Dekotabellen des VDST tragen samt und sonders seine Handschrift.

Wer ihm medizinische Kenntnisse abspricht, tut ihm unrecht, denn beruflich beschäftigt sich der vielseitige Wissenschaftler seit über 35 Jahren mit Biophysik. Für die Ausübung der UW-Fotografie fehlt ihm nach eigenen Angaben leider die notwendige Zeit, was er sehr bedauert.

UWF: Das Thema Mikrobölschen erhitzt immer noch die Gemüter. Wie ist der letzte Wissensstand darüber?

Dr. M. H.: Man muß unterscheiden zwischen Blasen, die man mit bloßem Auge nicht sehen, aber orten kann, den sog. Mikrobölschen und jenen unter ca. 40 Mikrometer Durchmesser, die auch mit Ultraschall-Doppler nicht mehr hörbar sind. Von letzteren glaubte man lange, daß sie, bei einem erneuten Tauchgang hinreichend verkleinert, allein durch die Oberflächenspannung wieder in Lösung gedrückt, d.h. zum Verschwinden gebracht werden. Heute glaubt man, daß die kleinsten Mikrobölschen – zumindest bei Menschen mit einem rasch reagierenden Gerinnungssystem – so früh von Eiweißschichten umhüllt werden, daß sie der Wiederauflösung entgehen können und so Blasenkeime für den nächsten Aufstieg bilden.

Dekokrankheiten nach Yo-Yo-Tauchen auch in geringen Tiefen sowie neuartige Meßmethoden, die alle Restbestände von nichtgelösten Gasblasen im Blut und sonstiger Körperflüssigkeit erfassen, bieten experimentelle Anlässe zu diesem Schluß.

UWF: Prof. Bühlmann führt ins Feld, daß Sie keine ärztl. Promotion haben und demzufolge vieles aus medizinischer Sicht nicht beurteilen können.

Dr. M. H.: Ganz so ist es nicht. Ich arbeite seit 35 Jahren am biophysikalischen Institut der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf, habe etliche Druckkammerversuche veranstaltet, ein Handbuch für Tauchunfälle bearbeitet und stehe weltweit in regem Austausch mit vielen Tauchmedizinern.

UWF: Stimmt es, daß die meisten Dekotabellen von Naturwissenschaftlern und nicht von Ärzten errechnet wurden?

Dr. M. H.: Nicht alle, aber die meisten. Die ISA-C Tabellen stammen von einem Mathematiker, bei Comex hat ein Ingenieur die Werte errechnet, von den NDC-Tabellen weiß man, daß sie von einem Arzt und Naturwissenschaftler entwickelt wurden.

UWF: Lassen Sie uns mal die provozierende Frage stellen: „Wie gefährlich sind Tauchcomputer in den falschen Händen?“

Dr. M. H.: Kein Tauchcomputer kann und soll den Tauchunterricht ersetzen! In der Betriebsanleitung meines Autos steht auch nicht: „Fahren Sie defensiv und vorausschauend!“

UWF: Welche Dinge sollte ein Tauchcomputer nicht können? Uns ist das nämlich alles ein bißchen zuviel, was sich mittlerweile auf den Displays abspielt.

Dr. M. H.: Leider fallen die Kaufentscheidungen meist anhand werbewirksamer Druckschriften und Annoncen. Und da zählen, vorwiegend bei den Anfängern, die Features! „Was, deiner hat nur 38 Funktionen? Meiner hat 42!“ Es vergeht keiner meiner vielen Vorträge vor Tauchlehrern oder Tauchärzten, ohne daß ich nicht diesen Schwachsinn rüge. Insbesondere unter Wasser sollten nur die wirklich notwendigen Daten – nach Wichtigkeit in der Größe abgestuft – eindeutig und ununterbrochen angezeigt werden.

UWF: Ist es heute noch nötig, zum Tauchcomputer Tabelle und Uhr mitzuführen?

Dr. M. H.: Tabelle und Uhr helfen ja nur, wenn man auch einen Tiefenmesser dabei hat, wobei etliche mechanisch arbeitende Geräte schon nach kurzem Gebrauch erschreckend ungenau sind. Die Wahrscheinlichkeit, daß der eigene und der Computer des Partners ausfallen, ist extrem gering. Und wenn, dann wird nach dem mit den vorsichtigeren Werten aufgetaucht. So einfach ist das.

UWF: Liegen wir mit unserer Vermutung richtig, daß die Tabelle langsam aber sicher ausstirbt und sich sicherheitsbewußte Taucher in absehbarer Zeit mit einem Zweitcomputer ausrüsten werden?

Dr. M. H.: Es kann sein, daß in 10 Jahren die Sporttaucher nur noch Computer verwenden. Gegenwärtig kenne ich viele, die noch mit Tiefenmesser, Tabelle und Uhr tauchen und mit dem Kauf eines Computers vorerst abwarten. Dafür habe ich viel Verständnis, denn billig sind die Dinge ja nicht und ihre Entwicklung läuft fast noch rasanter als bei den Überwassercomputern. Das Dekompressionsproblem lernen Anfänger sowieso am besten in Form einer Tabelle.

UWF: Warum rechnet kein Tauchcomputer wie der andere? Irgendeiner muß doch richtig sein!

Dr. M. H.: Mit dieser Frage wird unterstellt, daß die richtige Dekompression mit

den heutigen Mitteln und Fakten an sich berechenbar ist. Das stimmt aber nur bedingt.

Die Computer unterscheiden sich zunächst dadurch, ob sie a) on-line rechnen oder b) aus gespeicherten Tabellen lesen. Jedes Verfahren hat Vor- und Nachteile, deren Diskussion leicht länger als das gesamte Interview werden könnte.

Rechner vom Typ a) unterscheiden sich schon untereinander durch die Art des implementierten mathematischen Modells, wenngleich die meisten mit parallel geschalteten Geweben mit gleicher Zeitkonstante für exponentielle Auf- und Absättigung rechnen. Aber selbst innerhalb dieser Gruppe gibt es Unterschiede der Gewebeanzahl, der Zeitkonstanten und Übersättigungstoleranzen angenommener Gewebe. Dabei spielen auch Marktingüberlegungen eine Rolle.

Gerade die bei vielen Tauchlehr-Institutionen geltende Regel „Niemals dekopflichtige Tauchgänge!“ ist – bei Licht besehen – das Haupthindernis für die Einführung wirklich risikoarmer Dekompressionen. Als ob nicht jeder Aufstieg sowieso eine Dekompression wäre und die 10 m/min nicht eine Dekompressionsregel. Schamhaft wird dann manchmal eine Sicherheitsstufe in 3 m Tiefe verlangt, nur um nicht Dekostufe sagen zu müssen.

UWF: Streitpunkt vieler Diskussionen sind die Tauchcomputer der Firma Scubapro, der NC 11 und der DC 11. Vergleicht man diese beispielsweise mit dem Aladin-Pro, so treten geradezu unglaubliche Diskrepanzen auf. Wir haben in einem Praxisversuch festgestellt, daß uns der Aladin eine Minute Nullzeit anzeigte, derweil uns der PC 11 fast 15 Minuten auf 3 Meter festhalten wollte. Kann man diese Unterschiede noch mit Logik erklären?

Dr. M. H.: Der Aladin-Pro berücksichtigt die, insbesondere nach höher dekopflichtigen Tauchgängen, durch den Blasen-

anfall verlangsamte Entsättigung. Durch die, gemäß heutigem Wissensstand, wie auch in den Tabellen DCIEM (1990), NDC (1988) und DECO 92 (1992) abgesenkten Übersättigungstoleranzen spielt dieses Problem beim Scubapro DC 11 eine geringere Rolle. Aber er berücksichtigt eben die bei jedem Aufstieg aktivierten Blasenkeime, so daß bei entsprechendem Profil die beobachteten Unterschiede durchaus auftreten können.

Deshalb brauchen die Benutzer eines Aladin-Pro aber keine Angst bekommen. Der Hersteller hat kürzlich Zusatzregeln veröffentlicht, deren Einhaltung diese Risiken vermindern und die da lauten: Mindestens 3 Stunden Oberflächenpause; Wiederholungstauchgänge kürzer planen; niveaugerecht tauchen, also nicht dauernd rauf und runter!

UWF: In manchen Prospekten gewinnt man häufig den Eindruck, daß der Mensch alles gefahrlos mitmachen kann, was der Computer vorrechnet. Müßten Sie als Leiter der technisch-wissenschaftlichen Kommission im VDST nicht darauf hinarbeiten, daß die Tauchcomputer ab 50 m Tiefe eine rote Warnleuchte o. ä. aktivieren sollten?

Dr. M. H.: Ein Tauchcomputer kann weitgehend vor der Dekompressionskrankheit schützen, nicht aber vor Tiefenrausch, Lungenriß, Esoufflement oder Auskühlung.

UWF: Ihr wissenschaftlicher Kontrahent Prof. Dr. med. Bühlmann sagt, daß es keine Tauchcomputer gibt, die Mikrobläschen berechnen können.

Dr. M. H.: Jein! Der Scubapro DC 11 ist ein erster Schritt in diese Richtung. Leider ist er durch den winzigen Prozessor und den günstigen Gerätepreis rechnerisch etwas beschränkt worden. In Kürze wird aber ein erheblich perfekteres mathematisches Modell vorliegen.

UWF: Wo steht die Dekoforschung heute?

Was versteht man unter:

Einem mathematischen Dekompressionsmodell?

Es sind Formeln, in die man Tiefen und Zeiten (Profile), Luftdruck und bestimmte Vorbedingungen eingibt und die dann z.B. Nullzeiten oder Dekozeiten auf vorgewählte Stufen zu berechnen erlauben.

Einem Gewebe?

Der wissenschaftliche Name lautet Kompartimente. Eigentlich sind es gedachte Gefäße für Stickstoff (N₂), die den menschlichen Körper bezüglich der Aufnahme von überschüssigem gelösten Stickstoff nachbilden sollen. Die Zuordnung zu tatsächlichen Geweben wie Muskeln oder Haut ist nur sehr vage möglich.

Exponentieller Auf- und Entsättigung?

Sie entspricht der Annahme, daß die Zu- oder Abnahmegeschwindigkeit des Teildrucks von im Gewebe gelösten N₂ proportional ist zum Unterschied zwischen dem N₂-Teildruck in den Lungenbläschen (Alveolen) und dem im Gewebe. Der Proportionalitätsfaktor (Zeitkonstante) bestimmt, ob es sich um ein schnelles oder langsames Gewebe handelt.

Einer Übersättigungstoleranz?

Es ist der größte, noch unschädlich angesehene Überschuß des N₂-Teildrucks in einem Gewebe über dem Umgebungsdruck. Diese Toleranz hängt nicht nur von der Zeitkonstante, sondern auch in schwer überschaubarer Weise von der Vorgeschichte des Tauchers ab.

Dr. M. H.: *Noch ziemlich am Anfang! Nicht einmal die bisher allgemein angenommene exponentielle Auf- und Ent-sättigung der Gewebe ist gesichert. Sehr genaue Messungen mit Edelgas-Isotopen lassen sich erheblich besser durch eine andere Formel wiedergeben.*

Auch bezüglich der Blasenbildung und Wiederauflösung muß man auf Überraschungen gefaßt sein.

UWF: Früher haben die Tauchsportverbände Lehrgänge für den sachgerechten Umgang mit Uhr und Tabelle veranstaltet. Macht man das heute in ähnlicher Weise auch für die Träger von Tauchcomputern? Ganz unnötig scheint das beim Wissensstand vieler Anwender nicht zu sein.

Dr. M. H.: *Ein zweifellos sehr guter Vorschlag! Allerdings darf man sich über die Schwierigkeiten keine Illusion machen. Nur wenige Ausbilder kennen sich in der Vielfalt der Tauchcomputer wirklich aus. Die Rechenprogramme werden – da sie eine Menge Geld kosten – von den Herstellern nicht veröffentlicht. Der medizinische und mathematische Hintergrund dürfte schließlich manche Zuhörer überfordern. Vermutlich sind auch Pressionen von Herstellern auf solche Seminare zu erwarten. Wie massiv das zugehen kann, zeigt ja das Interview mit Prof. Bühlmann, wo dieser sich sogar zu persönlichen Abqualifizierungen hinreißen ließ.*

UWF: Kommen wir zum Yo-Yo-Tauchen. Damit kann man einen Tauchcomputer doch austricksen, oder?

Dr. M. H.: *Nicht den Computer, sondern sich selbst trickst man aus!*

Auf Yo-Yo-Profilen nicht angemessen zu reagieren, ist der Hauptmangel des von Workman 1965 eingeführten und auch von Prof. Bühlmann verwendeten Dekomodells, welches grundsätzlich nur gelöstes Gas erfaßt und eben nicht die krankmachenden Bläschen. Wollte man allein mit diesem Rechenmodell hinreichend risikoarmes Tauchen erreichen, wären die Nullzeiten wirklich unrealistisch kurz. Entsprechende Zusatzvorschriften stehen bestenfalls in der Bedienungsanleitung oder versteckt in der Taucherpresse.

UWF: Plädieren Sie auch dafür, wie Prof. Bühlmann, daß die Gewebegruppen für genaueres Rechnen von heute 6 oder 8 auf 12 oder 16 erweitert werden sollten?

Dr. M. H.: *Solange man überhaupt bei Geweben bleibt, wäre der Sprung von 6 auf 9 beispielsweise ein erfreulicher Gewinn. Bei noch mehr Geweben steigt wohl der Rechenaufwand rascher als der vom Taucher merkbare Komfort.*

Zukünftige Rechenmodelle werden sich weniger in der Quantität als in der Qualität von den heutigen absetzen.

UWF: Herr Dr. Hahn, wir danken Ihnen für das Gespräch.

Bühlmann Symposium 29./30. März 2019

Universitätsspital Zürich

Weitere Quellen für:

→ **Decompression Models: DeMystified**

→ **History and Development of Decompression Algorithms**

General:

R.Y Nishi, P. Tikuisis. CURRENT TRENDS IN DECOMPRESSION DEVELOPMENT: STATISTICS AND DATA ANALYSIS, December 1996, DCIEM No. 96-R-65.

Huggins, Karl E. (1992) The Dynamics of Decompression workbook, 1st. Edition, Ann Arbor, Michigan.

Wienke, B.R.: Equivalent Multi-Tissue and Thermodynamic Decompression Algorithms, Int J Biomed Comput, 24 (1989) 227 – 245.

Wienke, B.R.: On Modern Dive Computers and Operation, NAUI TEC papers, 13.09.2017, S. 23.

PADUA:

Beckman, Edward L. (1976) Recommendations for Improved Air Decompression Schedules for Commercial Diving, Sea Grant HAWAU-T-76-004.

EXPOSER:

Radermacher et al (1990): Nitrogen partial pressures in man after decompression from simulated scuba dives at rest and during exercise, U Biomed. Res., 18(6): 495- 501

PBPK:

Mapleson , W.W. An electrical analogue for uptake and exchange of inert gases and other agents. J. Appl. Physiol. 18: 197 – 204, 1963.

Levitt's PBPK:

Levitt DG. Heterogeneity of human adipose blood flow. BMC Clinical Pharmacology 2007; 7:1.

COMEX A/B:

THE ARTERIAL BUBBLE MODEL FOR DECOMPRESSION TABLES CALCULATIONS; JP Imbert, D Paris, J Hugon Divetech, France. In: EUBS, 2004, S.9

Single Tissue:

Baz, A and A. Seireg. 1979, Single-tissue modeling of decompression schedules. Undersea Biomed. Res. 6(3) : 217 – 229

Continuous HT:

Egi SM, Gürmen NM. Computation of decompression tables using continuous compartment half-lives. Undersea Hyper Med 2000; 27(3): 143 – 153

GFM:

Patent: DE 10 2006 028 085 A1 2007.12.20 Tauchcomputer und Verfahren zur Bestimmung von Gasbildung, Crow, Steven; Lewis, John.
Patent No.: US 7,313,483 B2 Dec.25,2007; Dive Computer and Method for Determining Gas Formation; Steven Crow, John Lewis

3CG:

A new class of biophysical models for predicting the probability of decompression sickness in scuba diving; Saul Goldman, Department of Chemistry and Guelph-Waterloo Physics Institute, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada; J Appl Physiol 103: 484–493, 2007. First published April 19, 2007; doi:10.1152/japplphysiol.00315.2006

CMD:

Voitsekhovich, I. A mathematical decompression model based on biophysical and physiologic laws; Undersea Hyper. Med. 21(2): 209 – 213, 1994.

Articular Bends Model:

A new biophysical decompression model for estimating the risk of articular bends during and after decompression; J. Hugon, J.-C.Rostain, B.Gardette: Journal of Theoretical Biology 283 (2011) S.: 168–179

More bubble models:

Ramachandra Srinivasan & Wayne A. Gerth, 2013:
Mathematical Models of Diffusion-Limited Gas Bubble Evolution in Perfused Tissue, TA 04-13, NEDU TR 13-05, Aug. 2013

TBDM:

Gernhardt, Michael L., Development and Evaluation of a Decompression Stress Index based on Tissue Bubble Dynamics, Dissertation, Institute for Environmental Medicine, Pennsylvania, 1991

#####

Ball R, Himm J, Homer LD, Thalmann ED. Does the time course of bubble evolution explain decompression sickness risk? Undersea Hyperbaric Med 1995 ; 22(3): 263 – 280

Ashida H, Ikeda T, Tikuisis P, Nishi RY. Relationship between two different functions derived from diffusion-based decompression theory. Undersea Hyperb Med 2005; 32(6): 429 – 435;

A biophysical vascular bubble model for devising decompression procedures, Ran Arieli & Abraham Marmur, Israel Naval Medical Institute, Haifa, and Eliachar Research, Physiological Reports ISSN 2051-817X, 2017 | Vol. 5 | Iss. 6 | e13191:

Van Liew, H.D., M.E. Burkhard. Density of decompression bubbles and competition for gas among bubbles, tissue and blood. J. Appl. Physiol. 75: 2292 – 2301, 1993.

Flook, V., R. Nishi, A. Khan. Modelling and Validation of Treatment Tables for Severe Decompression Accidents; in: Operational Medical Issues in Hypo-and Hyperbaric Conditions [les Questions médicales a caractere operationel liees aux conditions hypobares ou hyperbares] ADA395680, DCIEM, Oct. 2000.

#####

Statistically Based Decompression Tables:

a 11-volume series of papers from the NMRI:

Naval Medical Research Institute, Bethesda, Maryland.

- NMRI 85-16, Part I: Analysis of Air Dives: 1950 - 1970
- NMRI 85-17, Part II: Equal Risk Air Diving Decompression Schedules
- NMRI 86-50, Part III: Comparative Risk using U.S. Navy, British, and Canadian Standard Air Schedules
- NMRI 86-51, Part IV: Extension to Air and N₂-O₂ Saturation Diving
- NMRI 89-34, Part V: Haldane-Vann Models for Air Diving
- NMRI 91-84, Part VI: Repeat Dives on Oxygen/Nitrogen Mixes
- NMRI 92-85, Part VII: Selection and Treatment of Primary Air and N₂O₂ Data
- NMRI 92-73, Part VIII: Linear-Exponential Kinetics
- NMRI 96-05, Part IX: Probabilistic Models of the role of Oxygen in Human Decompression Sickness
- NMRI 96-06, Part X: Real-Time Decompression Algorithm using a probabilistic Model
- NMRC 99-01, Part XI: Manned Validation of the LE Probabilistic Model for Air and Nitrogen-Oxygen Diving

Underwater Physiology

PROCEEDINGS OF THE THIRD SYMPOSIUM ON UNDERWATER
PHYSIOLOGY SPONSORED BY THE COMMITTEE ON UNDERSEA
WARFARE OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES—
NATIONAL RESEARCH COUNCIL AND THE OFFICE OF NAVAL
RESEARCH, IN WASHINGTON, D. C., 23, 24, and 25 MARCH 1966.

C. J. LAMBERTSEN / Editor



The Williams & Wilkins Company
Baltimore • 1967

Use of Multiple Inert Gas Mixtures in Deep Diving

The aim of deep diving is effective work at depths down to 1000 ft. in order to explore the Continental Shelves. Throughout this range the most important depths are from 300 to 700 ft.

Progress in research during the past few years has shown that the main physiological problem is that of decompression. From the standpoint of decompression, principally two different diving procedures have to be distinguished: a) *Living at depth* with complete saturation of the body by inert gases. This method is technically very complex, and rapid decompression is not important for the comfort and safety of the divers. b) *Classical diving* with decompression to the surface after each working period. The value of this diving method depends very much on the effectiveness of the decompression method. Short decompression adds to the comfort and the safety of the diver, and determines the level of the technical requirements and the costs. It is the aim of our own research program to minimize decompression for classical diving.

Considering the various breathing gases for use at great depth we immediately see that only helium-oxygen mixtures can be used. Hydrogen might provide another solution, but the basic problems have not yet been solved, and there is a certain probability that hydrogen will upset the body chemistry. The other gases which can be used during a dive are neon, nitrogen and argon. When we considered what the best method would be for minimizing decompression, we first thought about the possible advantages of complex mixtures such as helium-neon-argon-oxygen. We could find no indication that such combinations of inert gases would solve the problem. But there was another simple method, namely the use of different inert gases alternately during decompression (for simplicity I shall call nitrogen an inert gas, since in decompression it behaves like inert gases).

It seemed logical that gas uptake and elimination in the human body during a dive should follow to a certain degree the laws of gas diffusion and, in simplest form the laws of gas diffusion through a thin membrane. Actually this simplification is the basis of the Haldane model. In reality

the processes in the body are enormously more complicated because of the effects of perfusion of tissues with blood and three-dimensional gas diffusion and gas-exchange between the tissues and possibly other factors. Therefore, it is not possible to predict decompression without empirical experimentation.

Two basic laws of gas diffusion important in diving are those described by Graham and Henry. Henry's law states that the gas volume diffusing into a thin layer of liquid in a given time is proportional to the solubility (S) of the gas in that liquid. Graham's law states that the gas volume diffusing into the liquid is inversely proportional to the square root of the molecular weight (M) of the gas. Therefore:

$$\frac{d(\text{gas} - \text{vol})}{dt} \sim \frac{S}{\sqrt{M}}$$

For diving the amount of gas diffusing into a tissue is unimportant. It is of more interest to know how fast saturation of a tissue is reached. Obviously the saturation rate (sat) is proportional to the diffusion rate (gas volume diffusion) and inversely proportional to the solubility:

$$\frac{d(sat)}{dt} \sim \frac{d(\text{gas} - \text{vol})}{dt} \times \frac{1}{S} = \frac{S}{\sqrt{M} \times S}$$

Therefore the saturation rate is inversely proportional to the square root of the molecular weight of the gas and independent of the solubility.

$$\frac{d(sat)}{dt} \sim \frac{1}{\sqrt{M}}$$

A comparison of the inert gases shows that helium saturates 2.65 times faster than nitrogen and 3.16 times faster than argon.

For our considerations about the possible advantage of alternating gases during decompression, we made the following assumptions: When a tissue contains several gases, then the saturation degrees of the gases can be simply added to get the total degree of saturation. The critical ratio most probably is simply in an arithmetic proportion to the ratios for different gases and their saturation degree in the tissue.

$$r_{(\text{He}+\text{N}_2)} = \frac{(r_{\text{He}} \times sat_{\text{He}}) + (r_{\text{N}_2} \times sat_{\text{N}_2})}{sat_{\text{He}} + sat_{\text{N}_2}}$$

Now, when alternating different gases, it is important to consider gas absorption and elimination in the tissue separately. When we integrate the amount of gas getting into the tissue we get a straight line, since the gas diffusion into the tissue concerns pressure and constants. As the tissue approaches saturation, gas elimination also increases. The tissue is satu-

rated when elimination and absorption are equal. Since elimination is proportional to the degree of saturation at any moment, we get the well-known exponential curve (Fig. 75). But it is very important to consider that both processes occur simultaneously. When saturation is reached it does not mean that the gas flow into the tissue has ceased; it means that the gas flows in to and out of the tissue are equal. At equilibrium, "gas activity" has actually reached its maximum level. The point of these comments is that the fastest desaturation or decompression of a tissue is reached when absorption of fresh inert gas is completely stopped. This can be done by breathing pure oxygen. However, at the depths where decompression after deep diving is done this is not possible. But if we have a tissue saturated with a gas that desaturates very fast and now switch over to a gas that saturates very slowly, we have a similar ultimate effect. Bühlmann and I performed an experiment which demonstrates the effects of switching gases.

In experiments in a pressure chamber seven subjects made dives to 120 feet depth with 2 hours bottom time (Fig. 76). During the bottom time after 70 minutes, the inert breathing gas was switched from helium to argon. Immediately the helium began to desaturate rapidly. At the same time argon began to dissolve very slowly, theoretically 3.16 times slower than the helium was being eliminated. After 50 minutes bottom time with argon, the helium had been eliminated while the argon had not yet reached a critical level. The final decompression first with argon and then with pure oxygen was done in 15 minutes. The normal decompression for an air dive would be about 90 minutes; for a helium dive it would be about 60 minutes. Obviously the special trick in this particular experiment was that, of the

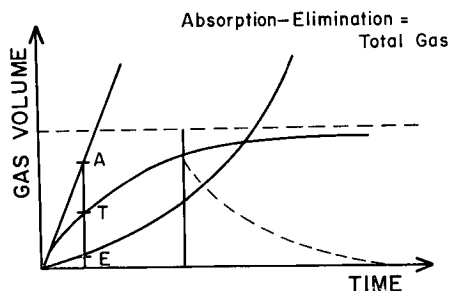


FIG. 75. The time-function of the total amount T of an inert gas which is dissolved in a tissue forms an exponential curve. It begins at zero as fresh, unsaturated tissue, and rises to a fixed level at complete saturation. The curve is the difference of the integrated amount of gas which flows *into the tissue* (at a constant rate for constant conditions) minus the integrated amount of gas which flows *out of the tissue* (the rate raising proportionally with the total amount of gas being present in the tissue at a given moment).

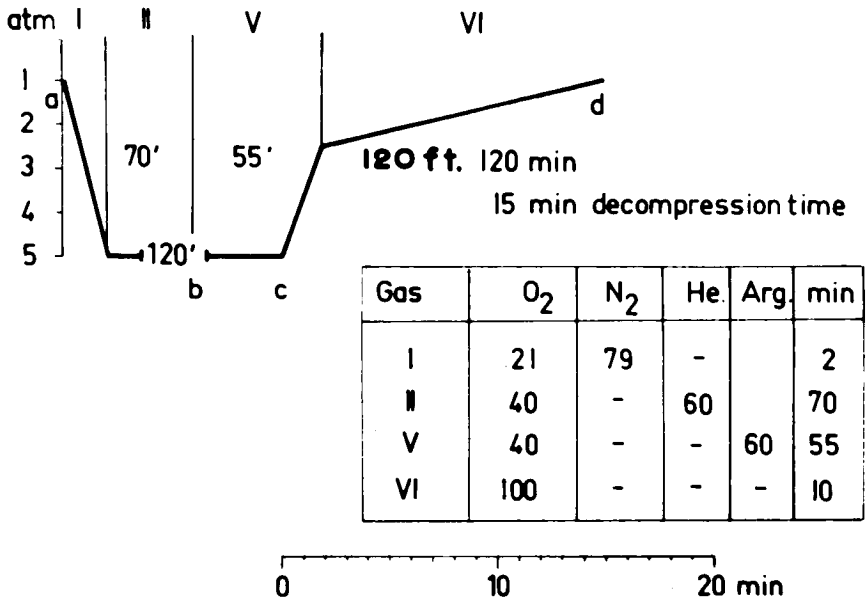


FIG. 76. 120 ft. dive with 120 minute bottom time (7 subjects). (Reproduced by permission, *Journal of Applied Physiology*.) (1)

decompression time of 65 minutes, most was spent on the bottom and according to diving procedures counts as bottom time instead of as decompression. Naturally the success of the method depends entirely on the moment of switching gases. If it is done too early, then the heavy gas may reach a level of saturation where it must be decompressed too, which then goes relatively slowly. If the switching is done too late, no great benefit results.

Figure 77 shows another such dive with 1 hour bottom time at a 300 ft. depth. A dive to this depth with air and air decompression according to U. S. Navy Diving Manual requires 460 minutes decompression, while a helium dive would require about 200 minutes. We did two different decompressions from 300 ft. One type involved switching to argon and 85 minutes decompression time and one switching to nitrogen and 110 minutes decompression time. The use of argon caused difficulties because of narcosis and did not show clear advantages as compared to nitrogen. Therefore, since that time we have restricted ourselves to the use of helium and nitrogen only.

A series of dives by six subjects to 500 ft. with 30 minutes bottom time is shown in Fig. 78. Here we used a technique which we had applied before in pilot experiments to 800 and 1000 ft. at the experimental diving tank of the French Navy at Toulon. It was not possible to switch from helium to nitrogen as deep as we wanted. Therefore, for the ascent from 500 ft.

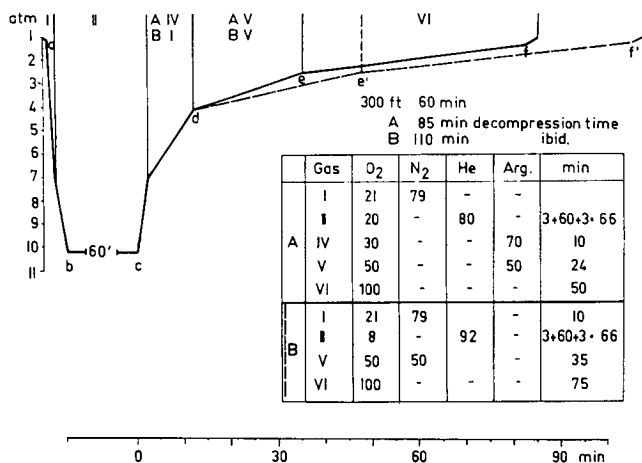


FIG. 77. 300 ft. dive with 60 minute bottom time (9 subjects). (Reproduced by permission, Journal of Applied Physiology.)

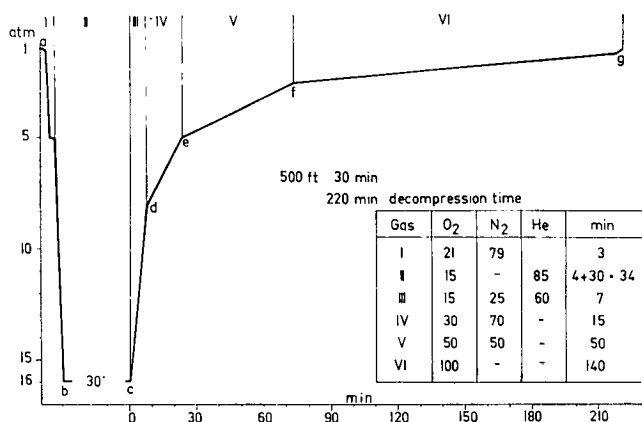


FIG. 78. 500 ft. dive with 30 minute bottom time (6 subjects). (Reproduced by permission, Journal of Applied Physiology.)

to 200 ft. we used a mixture of 60 % helium-25 % nitrogen-15 % oxygen. That was the upper limit of nitrogen at depth. Decompression was 220 minutes.

We experienced difficulties with dives to 650 ft. and 20 minutes bottom time (Fig. 79). Theoretically a decompression of about 140 minutes was expected, but we ultimately needed 270 minutes. For unknown reasons the basis for the decompression calculation used for the other dives, actually the Haldane-model combining helium and nitrogen periods with helium being 2.65 times faster than nitrogen, did not apply any more. Some im-

portant safety factors reducing the theoretical ratio had to be applied. Something was very astonishing. I was subject for the first decompression experiment with 140 minutes decompression time. I developed bends in the elbows, shoulders and knees and was treated for about 5 hours, but there was nothing alarming. The next subject tried with about 170 minutes decompression with about the same result. Another subject, with about 200 minutes decompression, suffered shock due to hypovolemia secondary to extravascular plasma loss. He was treated successfully. Again decompression was increased, to about 220 minutes, and again another subject suffered shock, even worse than the first. Finally with 270 minutes total decompression time we succeeded in decompressing satisfactorily. These experiments showed drastically that after deep dives one individual might

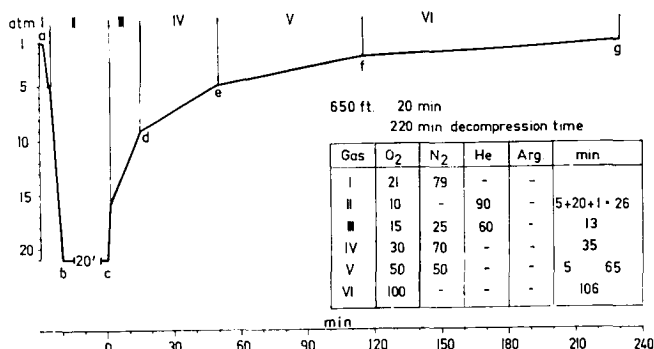


FIG. 79. 650 ft. dive with 20 minute bottom time (5 subjects). (Reproduced by permission, Journal of Applied Physiology.)

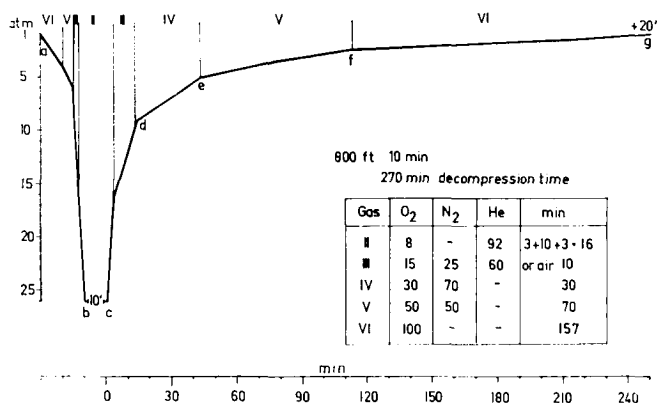


FIG. 80. 800 ft. dive with 10 minute bottom time (2 subjects). (Reproduced by permission, Journal of Applied Physiology.)

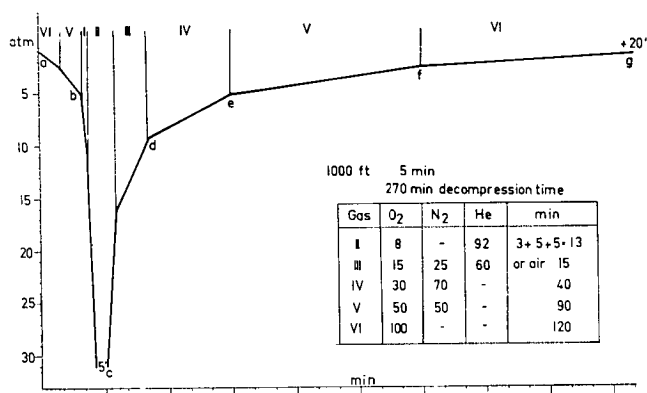


FIG. 81. 1,000 ft. dive with 5 minute bottom time (2 subjects). (Reproduced by permission, Journal of Applied Physiology.)

decompress fast with minor bends or even without any symptoms, while other subjects might suffer very dangerous effects. There is a tendency to interpret a minor degree of bends as an indication that one is close to a successful decompression. Generally this might apply, but it sometimes can lead to serious consequences.

Dives to 800 ft. with 10 minutes bottom time (Fig. 80) and to 1000 ft. with 5 minutes bottom time (Fig. 81) were successful with the same decompression time.

The dives to 300 ft. with 1 hour bottom time and to 1000 ft. with 5 minutes bottom time were performed not only in a pressure chamber but in the open sea, demonstrating that it is possible to use these decompression methods for practical purposes in the sea.

Last year in a series of experiments at 100 ft. with nitrogen and with helium and long exposures, Bühlmann demonstrated that helium really reaches saturation much faster in the body than nitrogen does (to be published). However, apart from the dives I have described, we have no final proof for the validity of the gas switching method. We do think that the experiments described indicate that the method has advantages.

Obviously the number of experiments thus far performed is relatively small, and we are aware that the decompressions described are not safe enough to be used in the water without extremely careful precautions guaranteeing the immediate diagnosis and treatment of decompression sickness.

There are many problems remaining. For example, we do not know whether tissues supersaturated with mixed gases show a different behavior with respect to bubble formation than is to be expected from the assumptions made. It is necessary to learn more about bubble formation and about

critical ratios. The problem of gas diffusion in the body is a complicated process and we are trying to work with the Haldane-model, which is convenient and also useful if one accepts that the theoretical ratio must be changed by an occult safety factor. We foresee the possible application of switching inert gases during shallow dives on the bottom, so that part of the decompression can be done at the bottom. We also hope to apply this to deep dives with bottom times up to about 1 or 2 hours at 700 feet.

REFERENCES

1. Keller, H., and Buhlmann, A. A.: Deep Diving and Short Decompression by Breathing Mixed Gases, *J. Appl. Physiol.* 20: 1267-1270, 1965.

Underwater Physiology

PROCEEDINGS OF THE FOURTH
SYMPOSIUM ON UNDERWATER PHYSIOLOGY

Sponsored by

*Institute for Environmental Medicine
The University of Pennsylvania Medical Center
Physiology Branch, The Office of Naval Research
The Undersea Medical Society*

Edited by C. J. LAMBERTSEN

Biological Sciences Communication Project
The Medical Center
The George Washington University
2001 S St., N. W.
Washington, D. C. 20037



1971

ACADEMIC PRESS NEW YORK and LONDON

DECOMPRESSION IN SATURATION DIVING

A. A. Bühlmann

We started our deep-diving experiments, as amateurs, with the concept that inert gas half saturation times are related to the perfusion of the tissues with blood; that the half-time for a given tissue and the rate of perfusion are determined by inert gas diffusion; and that diffusion depends upon the physical properties of the particular gas, especially its molecular weight.

Despite the fact that some of our original concepts were erroneous, the experiments conducted with H. Keller between 1960 and 1962 were successful (3). In these experiments, pressures up to 1000 FSW were used, physical work was performed in a wet chamber, and short swimming excursions were made in the sea. The extremely short decompression times used—for instance, 270 min after an exposure of 5 min at 1000 ft—were the result of a fast descent, a high O₂ pressure in the range of 2–2.5 atm during the whole dive, and switching from He to N₂ breathing mixtures during the decompression.

Between 1964 and 1966 (2) we were able to confirm the differences between the saturation rates of He and N₂ by dives at 4.0 atm abs. The longest tissue half-time seems to be 480 min for N₂ and 180 for He, as estimated by sufficient decompression to avoid an attack of decompression sickness and by a supersaturation ratio of 1.5 to 1.6:1 (Fig. 1).

After bottom times of 20–72 hr at 4 atm abs while 20% O₂–80% He was breathed, decompressions were made without an incidence of bends by eight subjects breathing 100% O₂, by two subjects breathing 60% O₂–40% He, and by six subjects breathing 30% O₂–70% N₂. After diving exposures on air for 42–48 hr, decompressions were made by eight subjects breathing 70% O₂–30% N₂ (2).

The differences in the saturation and desaturation speed for a constant blood flow in the slowest fatty tissue can be explained by the difference in the oil–water solubility ratio of N₂ and He. The difference in the pressure equilibration rates in watery tissues seems to be determined by the molecular weight of the particular gas, similar to the diffusion-limiting concept. To date, our decompression schedules for mixed-gas decompression have been calculated with a ratio of 2.645:1, N₂ to He, which corresponds to the ratio of the square roots of the molecular weights of N₂ and He.

When there are changes in the activity of divers during long decompressions after deep diving (such as sleeping, resting, and work), the total and regional blood flows vary consid-

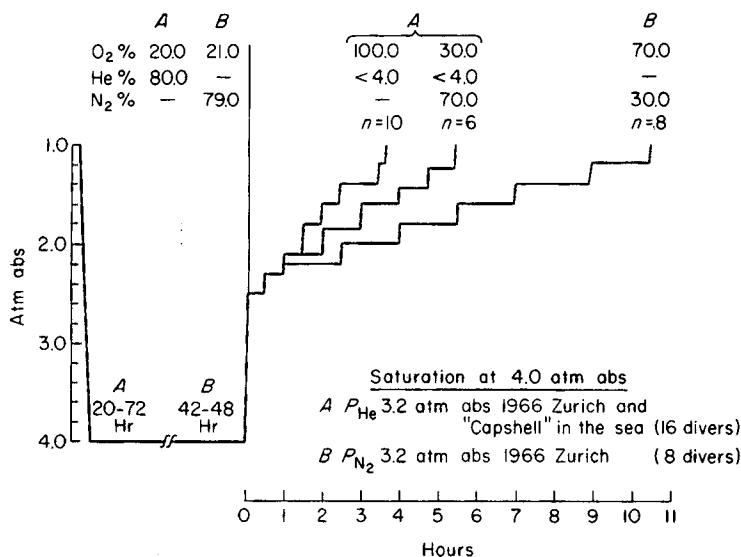


Fig. 1. Saturation at 4.0 atm abs (1 atm abs = 1 kg/cm² = 735 mmHg).

- A. 20-72 hr with 20% O₂-80% He. Decompression time: 215 min with 100% O₂ or 60% O₂-40% He, followed by 330 min with 30% O₂-70% N₂.
 B. 42-48 hr with air. Decompression time: 630 min with 70% O₂-30% N₂.

erably. Our calculations are therefore based on 240 min as being the longest He tissue half-time, and 640 min the longest N₂ half-time (1).

It has been determined through preliminary experiments with bottom times of up to 6 hr at 23 atm abs that the supersaturation ratio of 1.6:1 suggested by Haldane is too large for deep dives, and that the same ratio is not applicable to all tissues. The supersaturation ratio has to be drastically reduced, especially for the slow tissues that control the whole decompression schedule following saturation dives (5, 6). Our present experience in tolerated supersaturation ratios, gathered from saturation dives made between 1967 and 1969 at 23 and 31 atm abs with excursions to 36 atm abs, is set out in Fig. 2.

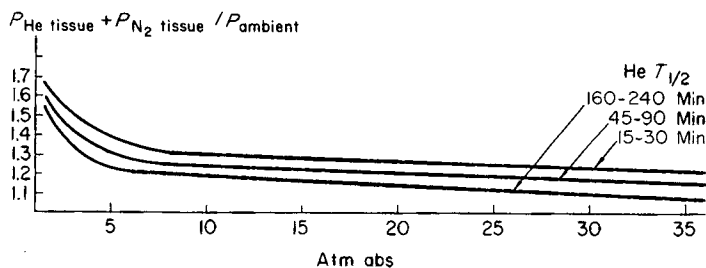


Fig. 2. Tolerated supersaturation factor (ordinate) for fast tissues with He half-times to 30 min; for slower tissues, from 45 to 90 min; and for the slowest tissues, from 160 to 240 min, correlated with the total inert gas pressures in the respective tissues (abscissa). The stages of decompression were calculated according to these supersaturation factors.

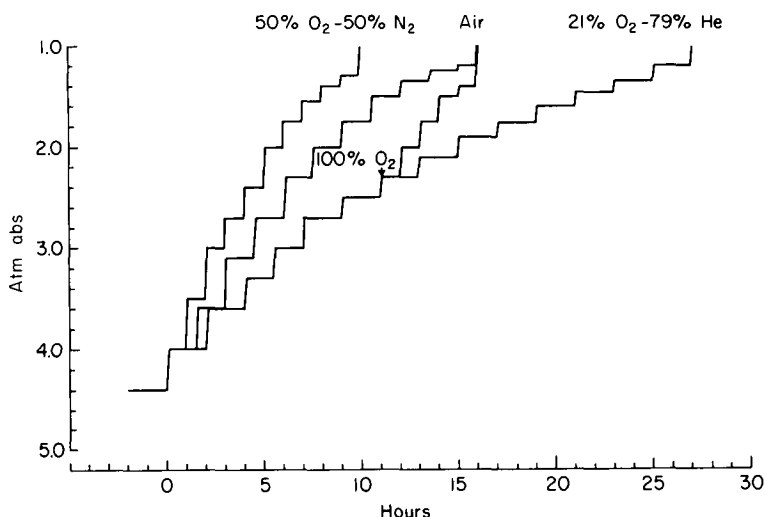


FIG. 3. Final decompression below 4.0 atm abs after saturation diving with O₂-He mixtures. 27 hr with 21% O₂-79% He (not performed); 16 hr with 21% O₂-79% He and with 100% O₂ below 2.4 atm abs (not performed); 16 hr with air below 4.0 atm abs; 10 hr with 50% O₂-50% N₂ below 3.3-4.0 atm abs.

So-called "vertigo bends" can occur if the limits—45–90 min—shown on the middle curve of Fig. 2 are exceeded. The lower curve represents the slow tissues, such as those about the joints, in which the more typical attack of bends occurs. To determine the supersaturation ratios, the inert gas partial pressures of He and N₂ have to be added together. In all our experiments, final decompression was calculated on an approximate ratio of 1.5:1.

After deep diving with exposures lasting some hours to saturation, decompression was simplified by putting O₂, He, and air directly into the pressure chamber. This method eliminated the need for preliminary preparation of gas mixtures and the need for breathing apparatus. The decompression procedures are identical once the same inert gas pressure of He and N₂ is reached in the tissues with a He half-time of 180–240 min. The P_{O_2} is below an average of 1 atm with a short and transient increase above 2 atm when a mixture of 50% O₂-50% N₂ is used. In all our chamber experiments, we maintained a comfortable temperature and a relative humidity of 70–90%, and eliminated practically all CO₂ from the chamber.

We performed two versions of the final decompression below 4.0 atm abs, first with a breathing mixture of 50% O₂-50% N₂, and second with air. The time difference is only 4–6 hr. We now prefer to avoid the risk of O₂ poisoning by using air in the final stage of decompression, and we accept He contamination of up to 5% in the chamber atmosphere (Fig. 3).

Based on the same supersaturation ratios, calculations indicate that the final stage of decompression would take 27 hr when the breathing mixture is 21% O₂-79% He, as opposed to 16 hr when air is breathed. However, we have never performed a total decompression using only O₂-He with a low O₂ concentration. The frequency of minor attacks of bends, some of which disappeared without treatment, was not high, but shows that we have neared the limit in shortening decompression time.

We have performed three saturation dives at 23.0 atm abs without decompression troubles.

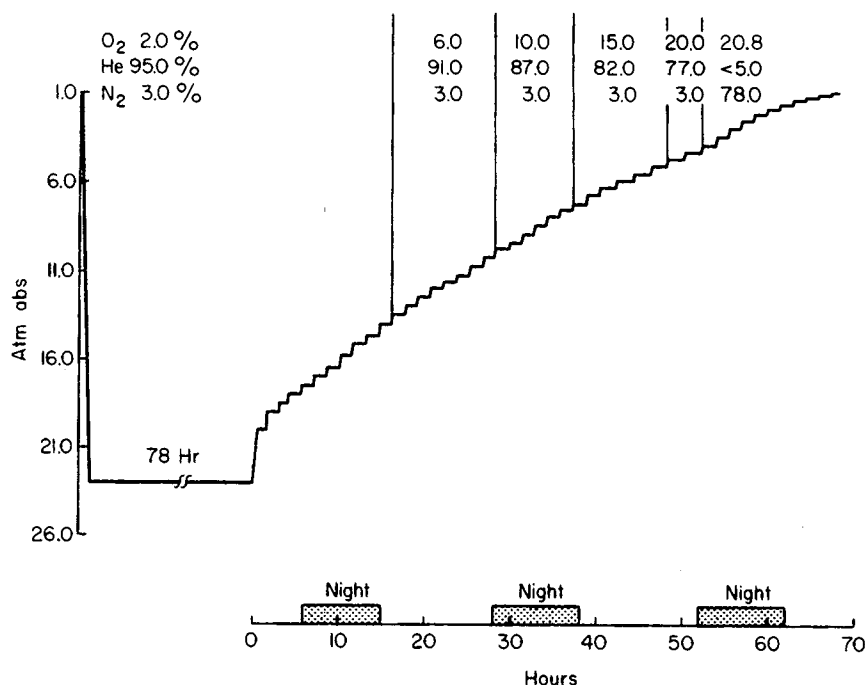


FIG. 4. Decompression after saturation at 23.0 atm abs with 93–95% He. Stepwise increase of O₂ concentration and inert gas change from He to N₂ during the final phase below 4.0 atm abs. Total decompression time: 62–64 hr if 50% O₂–50% N₂ is breathed below 4.0 atm abs, and 68 hr if air is breathed below 4.0 atm abs. 78 hr 23 atm abs (P_{He} 22.0 atm abs): R. Gamba, age 47; E. Landolt, age 22; A. Kaelin, age 21; H. Molnar, age 22; J. P. Beltrami, age 27. 68 hr decompression time: June 18–24, 1968, Deep Trials Unit, Alverstoke. 64-hr decompression time: May 5–11, 1967, Zürich, with 50% O₂–50% N₂ less than 4.0 atm abs. 62 hr decompression time: July 17–20, 1967, Zürich, with 50% O₂–50% N₂ less than 4.0 atm abs.

Two experiments were done involving four different subjects in our dry chamber in Zürich; and one experiment was done with three divers of the Deep Trials Unit of the Royal Naval Physiological Laboratory at Alverstoke, England. The latter divers made swimming excursions and did other physical work in the wet compartment of the pressure chamber (Fig. 4) (6).

The decompressions were not carried out continuously but in steps lasting 60–120 min. Beginning with 50% O₂ at 4.0 atm abs, two subjects showed mild symptoms of O₂ toxicity, such as paresthesia of the fingertips and twitching of facial muscles. The successful final decompression with normal air in England confirmed to us the validity of our concepts and calculations derived from the experiments in Zürich.

“Vertigo bends” occurring in our three Zürich experiments, which lasted to 4 hr at 31 atm abs and involved six different subjects, gave us some information on the handling of supersaturation factors in the pressure range of 31 atm abs. We made a faster initial decompression, and each time one diver had trouble. Since the divers had to be recompressed for treatment, a longer total decompression time was obviously required. Figure 5 shows the corrected decompression schedule after a bottom time of 4 hr at 31 atm abs.

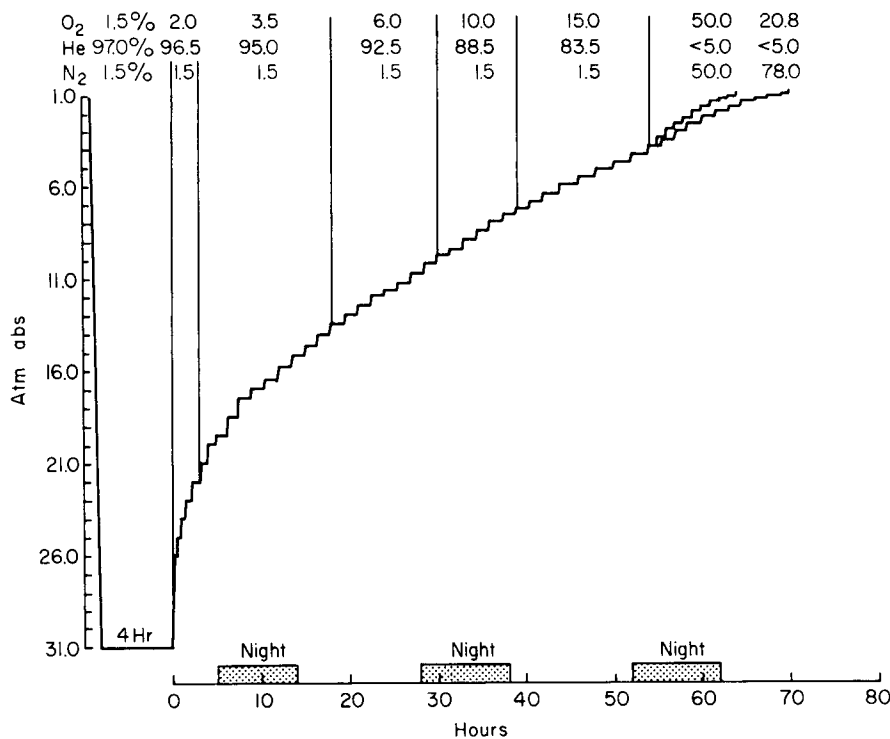


FIG. 5. Bottom time 4 hr at 31.0 atm abs with 96-97% He; compression time of 30 min not included in bottom time. Stepwise increase of O₂ concentration and inert gas change from He to N₂ during the final phase below 4.0 atm abs. Total decompression time: 64 hr if 50% O₂-50% N₂ is breathed below 4.0 atm abs. 4 hr 31 atm abs (P_{He} 30.0 atm abs): R. Gamba, age 46; J. P. Beltrami, age 27. 64 hr decompression time breathing 50% O₂-50% N₂ at 4.0 atm abs, May 14-18, 1968. (70-hr decompression time breathing air at 4.0 atm abs.)

Another saturation dive at 31 atm abs was performed in February, 1969, at the Royal Navy's facilities in Alverstoke. On the first day, three divers made an excursion from 31 to 36 atm abs for 1 hr. During the second and third days, they made excursions lasting 2 hr to 36 atm abs, and engaged in swimming and other physical activity in the water (Fig. 6). We performed an extensive program of tests and medical measurements, and it seems to me important to

TABLE I
TYPES OF DIVES PERFORMED AT ZÜRICH AND ALVERSTOKE, FOLLOWED BY
MULTIPLE INERT GAS DECOMPRESSION

Final decompression stage after
1. Repetitive dives during 24 hr with a total bottom time of 8-12 hr at 23.0 atm abs
2. Saturation at 23.0 atm abs
3. Bottom time of 2-4 hr at 31.0 atm abs
4. Saturation at 31.0 atm abs

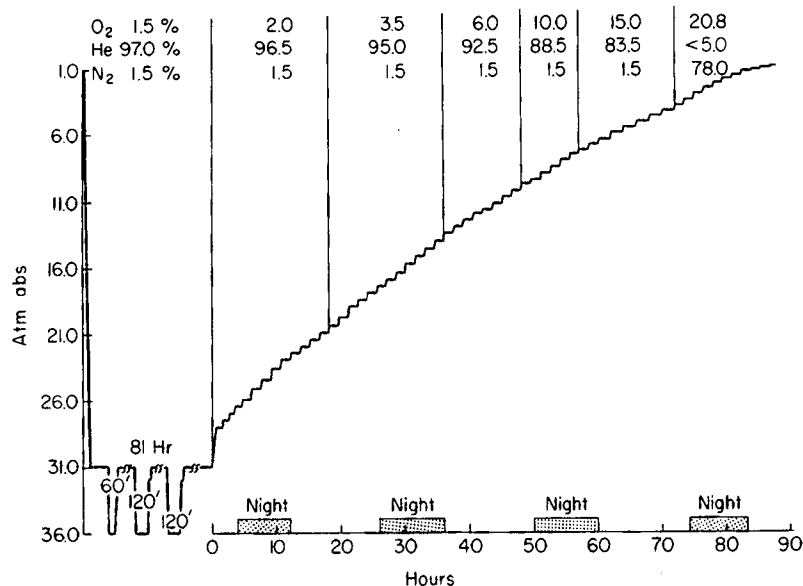


FIG. 6. Decompression after saturation at 31.0 atm abs with 97% He. During the first, second, and third days, excursions were made to 36.0 atm abs utilizing the same breathing mixture. Total decompression time: 88 hr if air is breathed below 4.0 atm abs. Procedure is similar to that of Fig. 5, except that the rapid decompression from depth has not been used. 81 hr 31 atm abs (P_{He} 30.0 atm abs): E. Landolt, age 23; A. Kaelin, age 22; H. Molnar, age 24. 88-hr decompression time: Feb. 3-10, 1969, Deep Trials Unit, Alverstone.

stress that we did not find any real reduction in motor activity, motor coordination, and attention span at 31 or 36 atm abs during any of these dives, except during the first hour after initial compression from 1 to 31 atm abs (which took 30 min in Zürich and 70 min in Alverstone). Decompressions in the dives from 36 to 31 atm abs took 20 min for the 1-hr excursion and 30 min for the excursions lasting 2 hr. Total decompression, scheduled to last 88 hr, was trouble-free, except for one diver who had pains in his knees during the last hours, and was separated for additional decompression lasting 4½ hr. It might be mentioned that this diver,

TABLE II

INCIDENCE OF MINOR BENDS FOLLOWING THE INERT GAS DECOMPRESSIONS SHOWN IN TABLE I

Breathing mixtures	No. of decompressions	No. of minor bends	No. of subjects
50% O ₂ -50% N ₂ below 3.3-4.0 atm abs	16	1	8
21% O ₂ -79% N ₂ below 4.0 atm abs	6	1	4
Total	22	2	8 ^a

^a 8 different subjects.

in contrast to the other two, who had made recent dives, had made his last dive 12 months before the saturation experiment (4). A tabulation of the types of dives performed and the breathing mixtures used during decompression, in addition to the number of subjects who developed decompression sickness, is shown in Tables I and II.

If we compare the results of our decompression procedures with those of American, British, and French investigators who have used only O_2 -He mixtures after short and saturation dives, we can conclude that the method of mixed-gas decompression described in this paper is not less safe than the other, and is certainly more economical in time.

REFERENCES

1. Bühlmann, A. A. (1969). The use of multiple inert gases in decompression. In "The Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work" (P. B. Bennett and D. H. Elliott, eds.), pp. 357-385. Williams & Wilkins, Baltimore, Maryland.
2. Bühlmann, A. A., Frei, P., and Keller, H. (1967). Saturation and desaturation with nitrogen and helium at 4 atm. *J. Appl. Physiol.* **23**, 458-462.
3. Keller, H., and Bühlmann, A. A. (1965). Deep diving and short decompression by breathing mixed gases. *J. Appl. Physiol.* **20**, 1267-1270.
4. Bühlmann, A. A., Matthys, H., Overath, G., Bennett, P. B., Elliott, D. H., and Gray, S. P. (1970). Saturation exposures of 31 atm abs in an oxygen-helium atmosphere. *Aerosp. Med.* **41**: 394-402, 1970.
5. Schreiner, H. R. (1968). Safe ascent after deep dives. *Rev. Subaquat. Physiol. Hyperbar. Med.* **1**, 28.
6. Waldvogel, W., and Bühlmann, A. A. (1968). Man's reaction to long-lasting overpressure exposure. Examination of the saturated organism at a helium pressure of 21-22 ATA. *Helv. Med. Acta* **34**, 130-150.