

Bühlmann-Rechenmodelle für Tauchcomputer

Bühlmann algorithms for dive computers

Ernst Völlm, dipl.-Ing. ETH

Einleitung

Zu meiner Person

- Taucher seit 1976, Tauchinstruktor seit 1980
- Gründung der Dynatron AG 1987 (Geschäftspartner: Markus Mock)
- Tauchcomputer-Entwicklung von 1984 bis 2011 in der Schweiz
- Zusammenarbeit mit Prof. Bühlmann von 1984 bis zu seinem Tod 1994

About me

- *diver since 1976, diving instructor since 1980*
- *founding of Dynatron AG 1987 (business partner: Markus Mock)*
- *dive Computer development from 1984 to 2011 in Switzerland*
- *collaboration with Prof. Bühlmann from 1984 until his death in 1994*

Inhalt

- Wie alles begann
 - Zusammenarbeit mit Prof. Bühlmann
 - Vom ZH-L16 Modell zum «ALADIN»
 - Der Erfolg des Tauchcomputers
 - Dekompressionscomputer mit ZH-L6
 - Unfallberichte und Studien
 - Das adaptive Bühlmann-Modell
 - Die Post-Bühlmann Ära
 - Aktuelle Bedeutung des Bühlmann-Modells
- *How it all started*
 - *The Collaboration with Prof. Bühlmann*
 - *From ZH-L16 Model to «ALADIN»*
 - *The Success of the Dive Computer*
 - *Decompression Computer with ZH-L6*
 - *Incident Reports and Studies*
 - *The adaptive Bühlmann Algorithm*
 - *The Post-Bühlmann Era*
 - *Actual Importance of Bühlmann's Alogithm*

Wie alles begann

How it all started

Time until 1982



1983 to 1984

Der eigene Bottom-Timer
Our own bottom timer

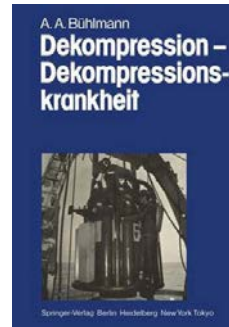


1983 to 1987

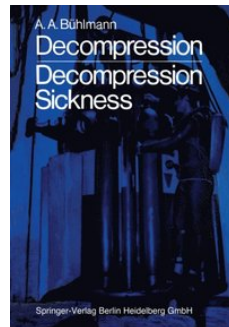


Zusammenarbeit mit Prof. Bühlmann

The Collaboration with Prof. Bühlmann



- 1983 «Dekompression - Dekompressionskrankheit»
- bisherige Forschung im Buch zusammengefasst
- Berechnung der risikoarmen Dekompression
- Meine «Bibel» bis 1987
- Erster Kontakt ungefähr 1984 in seinem Büro

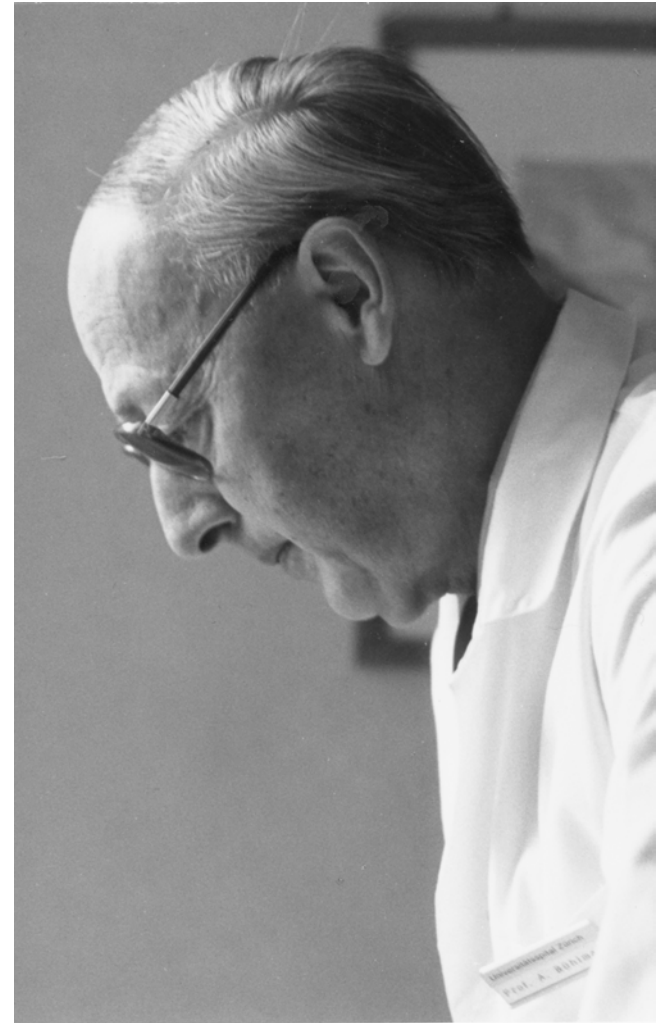


- 1984 «*Decompression - Decompression sickness*»
- *Previous research summarized in the book*
- *Calculation of low-risk decompression*
- *My «bible» until 1987*
- *First contact about 1984 in his office*

Zusammenarbeit mit Prof. Bühlmann

The Collaboration with Prof. Bühlmann

- Ziel: Entwicklung eines kleinen, preiswerten und einfachen Tauchcomputers
 - Tauchcomputer mit Bühlmann-Rechenmodell
 - Vertrauensaufbau und Überzeugungsarbeit
 - Fruchtbare Zusammenarbeit bis er starb
-
- *goal: development of a small, inexpensive and simple dive computer*
 - *dive computer based on Bühlmann's algorithm*
 - *building trust and persuasion*
 - *fruitful cooperation until he died*



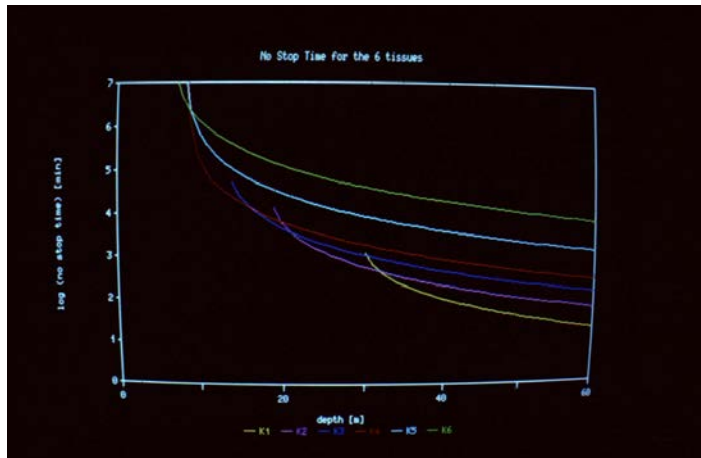
Vom ZH-L16 Modell zum «ALADIN»

From ZH-L16 Model to «ALADIN»

1	2	3	4	5	6	T	t	NZ	IT	tol
7817	0.7846	0.7859	0.7863	0.7866	0.7867	0	1	999.0	-4.27	
8453	0.8126	0.7976	0.7925	0.7898	0.7880	8	1	677.5	-4.26	
9616	0.8656	0.8200	0.8046	0.7960	0.7904	15	1	68.2	-4.24	
1930	0.9727	0.8657	0.8291	0.8088	0.7954	30	1	11.7	-4.19	
4247	1.0060	0.9152	0.8559	0.8228	0.8008	33	1	8.4	-4.14	
5970	1.1786	0.9573	0.8791	0.8349	0.8056	29	1	10.7	-4.09	
7335	1.2593	0.9955	0.9003	0.8461	0.8100	27	1	12.9	-4.05	
8892	1.3511	1.0392	0.9246	0.8590	0.8151	31	1	7.0	-4.00	
8620	1.4536	1.0883	0.9521	0.8736	0.8208	35	1	4.1	-3.20	
2756	1.5776	1.1474	0.9851	0.8912	0.8278	42	1	1.8	-1.92	
4488	1.6880	1.2022	1.0161	0.9077	0.8343	40	1	0.9	-0.88	
5946	1.7893	1.2544	1.0460	0.9238	0.8407	39	1	0.0	-0.81	
6393	1.8480	1.2897	1.0671	0.9354	0.8454	29	1	0.0	-0.26	
5940	1.8661	1.3005	1.0795	0.9425	0.8484	19	1	16.2	-0.01	
4683	1.8457	1.3112	1.0834	0.9453	0.8497	9	1	326.4	-0.76	
3224	1.8111	1.3076	1.0839	0.9464	0.8503	5	1	999.0	-1.64	

8:23 AM

- Computer Simulationen am MS-DOS PC
- Performance der Hardware versus Rechenmodell ZH-L16
- 6 Kompartimente anstelle von 16 (ZH-L6)
- Anpassungen nötig für mindestens den gleich hohen Sicherheitslevel wie ZH-L16
- Arbeiten wurden am Abend oder am Wochenende durchgeführt



- Computer Simulations with MS-DOS PC
- Performance of hardware versus calculation model ZH-L16
- 6 compartments instead of 16 (ZH-L6)
- adjustments needed to guarantee at least the same safety level as ZH-L16
- All work was carried out in the evening or during the weekend

Vom ZH-L16 Modell zum «ALADIN»

From ZH-L16 Model to «ALADIN»

ALADIN 1987

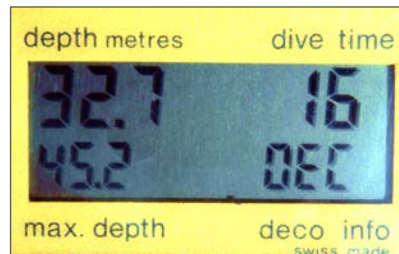
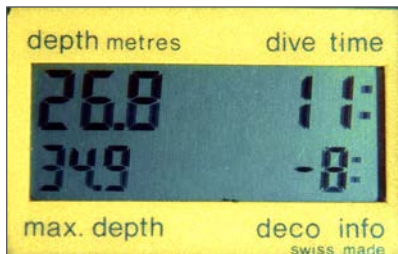


Eigenschaften:

- einfach in der Anwendung
- klein und leicht
- Nullzeit-Tauchcomputer
- Batterielaufzeit mehrere Jahre
- zuverlässig

Attributes:

- *simple to use*
- *small and light*
- *no-stop dive computer*
- *several years of battery life*
- *reliable*



Vom ZH-L16 Modell zum «ALADIN»

From ZH-L16 Model to «ALADIN»



Dekompressionserfahrung für die Höhe (1987)

- 1987 Tauchexpedition der British Army im Titicacasee
- Tests: Bühlmann-Tabellen und ALADIN Computer mit angepassten Höhenbereichen
- Übernahme der Bühlmann-Tabellen für Tauchen in der Höhe durch die bolivianische Marine nach erfolgreichem Abschluss der Expedition



Elevated Altitude decompression experience (1987)

- *1987 British Army dive expedition at Lake Titicaca*
- *Tests: Bühlmann tables and ALADIN computers with adapted altitude ranges*
- *Bolivian Navy takes over Bühlmann tables for dives at elevated altitude after the successful completion of the expedition*

Der Erfolg des Tauchcomputers

The Success of the Dive Computer

Die Tabellen und Tauchcomputer der 1. Generation werden durch eine neue Generation ersetzt

The tables and dive computers of the 1st generation are replaced by a new generation



entscheidend waren:

- Grösse und Gewicht
- Batterielaufzeit
- Kosten
- Zuverlässigkeit
- vielleicht „Swiss made“

crucial were:

- *size and weight*
- *battery life*
- *cost*
- *reliability*
- *may be „Swiss made“*

Dekompressionscomputer mit ZH-L6

Decompression Computer with ZH-L6

Aladin Pro 1988



- vollwertiger Dekompressionscomputer
- immer noch einfach zu benutzen
- ZH-L6 wurde immer noch eingesetzt
- *Decompression calculation added*
- *Still simple to use*
- *ZH-L6 was still used*

Unfallberichte und Studien

Incident Reports and Studies

- „Boomjahre“ zwischen 1987 und 2000
 - mehr Taucher, Zwischenfälle nahmen zu
 - bessere Informationen, Zunahme der Studien
 - Themen: Mikrogasblasen, PFO
- „booming years“ between 1987 and 2000
 - more divers, incidents increased
 - better information, increasing number of studies
 - topics: micro gasbubbles, PFO

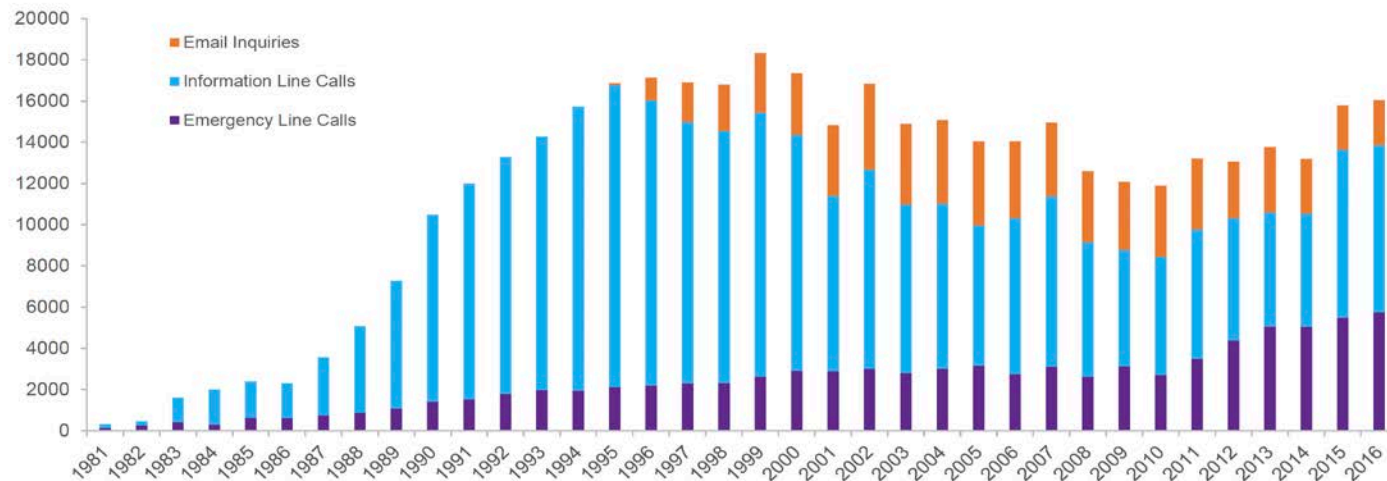


Figure A-7. Annual volume of inquiries to DAN Medical Services, 1981–2016
(number of divers not known, but probably proportional to inquiries)

Unfallberichte und Studien

Incident Reports and Studies



incident databases:

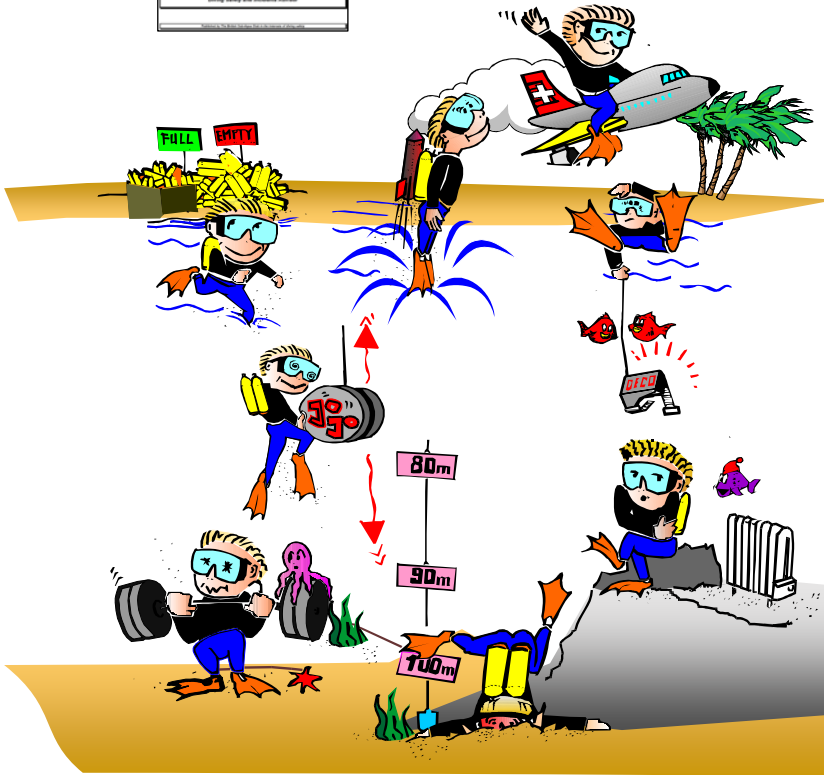
- DAN incidents report
- BSAC incidents report

Immer gleiche Risikofaktoren:

- Anstrengung während des Tauchgangs
- Unterkühlung am Ende des Tauchgangs
- tiefe Tauchgänge
- schnelle Aufstiege
- Jojo-Tauchgänge
- Wiederholungstauchgänge
- Fliegen nach dem Tauchen

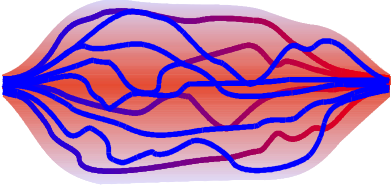
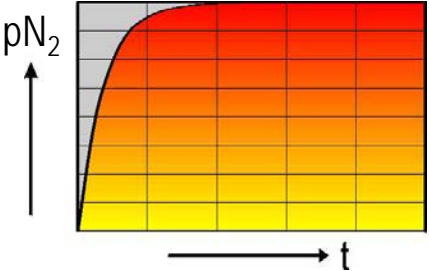
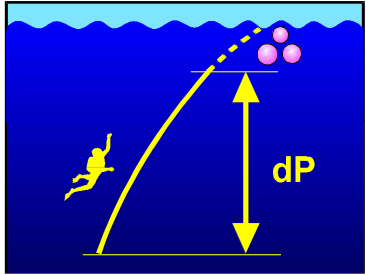
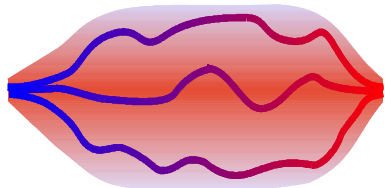
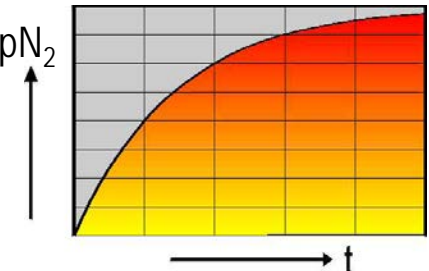
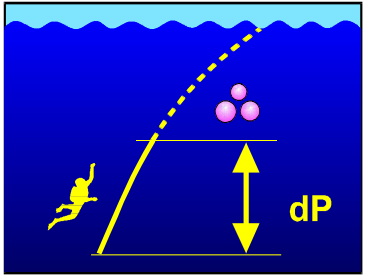
Always the same risk factors:

- *Physical effort while diving*
- *Hypothermia at the end of the dive*
- *deep dives*
- *fast ascents*
- *yo-yo diving*
- *repetitive dives*
- *Flying after diving*



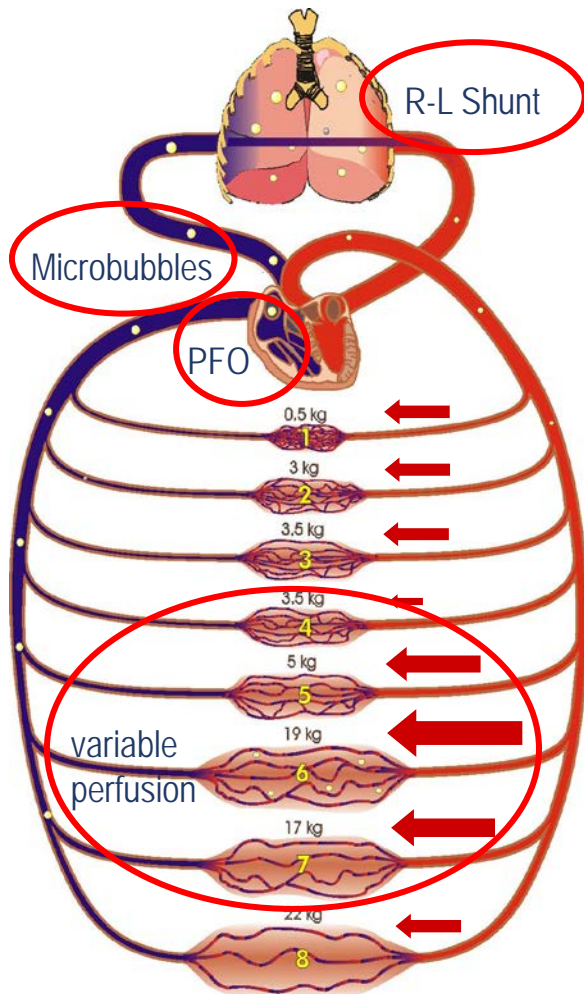
Das adaptive Bühlmann-Modell

The adaptive Bühlmann Algorithm

ZH-L16	Grundprinzipien des Modells ZH-L16 vs. des adaptiven Modells ZH-L8 ADT <i>Basic Principles of the Model ZH-L16 vs. the adaptive Model ZH-L8 ADT</i>			ZH-L8 ADT
compartment A	starke Durchblutung  high blood perfusion	fast saturation 	high supersaturation tolerance 	compartment C
compartment B	niedrige Durchblutung  low blood perfusion	slow saturation 	low supersaturation tolerance 	compartment C

Das adaptive Bühlmann-Modell

The adaptive Bühlmann Algorithm



Verbessertes Rechenmodell für mehr Sicherheit:

- Berücksichtigung von Anstrengung/Abkühlung, 8 Kompartimente mit variablen Halbwertszeiten und Übersättigungstoleranzen
- Mikrogasblasenmodell \Rightarrow ermöglicht auf Risikosituationen präventiv zu reagieren
- Sicherheitseinstellungen (später verbessert für Taucher mit PFO)
- Das adaptive Modell ZH-L8 ADT entsteht

Improved calculation model for more security:

- *Consideration of work/cooling, 8 compartments with variable half-life times and supersaturation tolerances*
- *Microbubble model \Rightarrow allows for a preventive response to risk situations*
- *Security settings (later improved for divers with PFO)*
- *The adaptive model ZH-L8 ADT is created*

Das adaptive Bühlmann-Modell

The adaptive Bühlmann Algorithm

Aladin Pro 1994



ZH-L8 ADT Implementation im Aladin Air-X:

- Deutlich erhöhte Leistung der Hardware
- Messung der Anstrengung über den Luftverbrauch via drahtlos gesendetem Flaschendruck
- Spezialversion für DAN Europe's Projekt SAFE DIVE (Marroni et al.)

ZH-L8 ADT Implementation in Aladin Air-X:

- *Significantly increased hardware performance*
- *Physical effort is measured by air consumption via wirelessly sent cylinder pressure*
- *Special version for DAN Europe's SAFE DIVE project (Marroni et al.)*

Der ALADIN Air X wurde 1994 an der BOOT in Düsseldorf zusammen mit Prof. Bühlmann präsentiert. Kurz darauf verstarb er. Die Zusammenarbeit mit einem grossartigen Wissenschaftler wurde abrupt beendet.

The ALADIN Air X was presented in 1994 at BOOT in Düsseldorf together with Prof. Bühlmann. He died shortly thereafter. A collaboration with a great scientist was terminated abruptly.

Das adaptive Bühlmann Modell

The adaptive Bühlmann Algorithm

Kurze Zusammenfassung eines Films von SRF DRS über die Entwicklung und Umsetzung des Rechenmodells ZH-L8 ADT in den Aladin Air-X 1992

Short summary of a film by SRF DRS about the development and implementation of the ZH-L8 ADT calculation model in the Aladin Air-X 1992

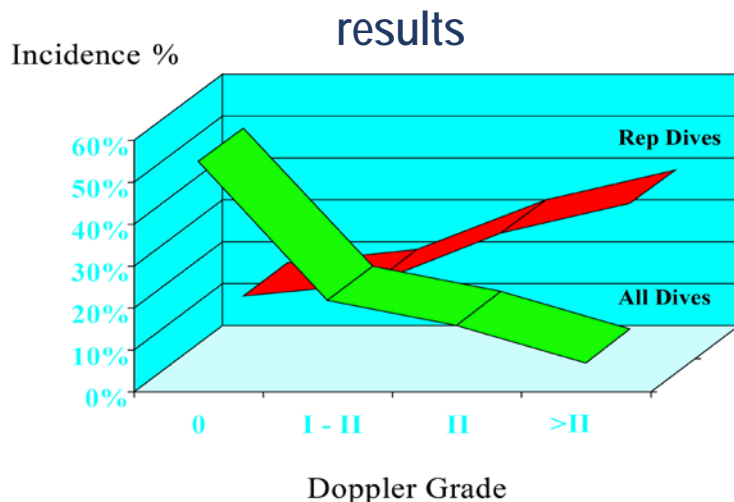
Die Post-Bühlmann Ära

The Post-Bühlmann Era

Research project SAFE DIVE (DAN Europe)



- Modifizierte Aladin Air X (DAN Black Boxes) sind die Tauchrecorder für das SAFE DIVE Projekt
- 2105 vollständig überwachte Sporttauchgänge
- 575 freiwillige Taucher
- 1058 Tauchgänge mit Dopplermessung
- 521 Tauchgänge mit erweitertem Dopplermonitoring für 75 bis 90 Minuten nach dem Tauchgang

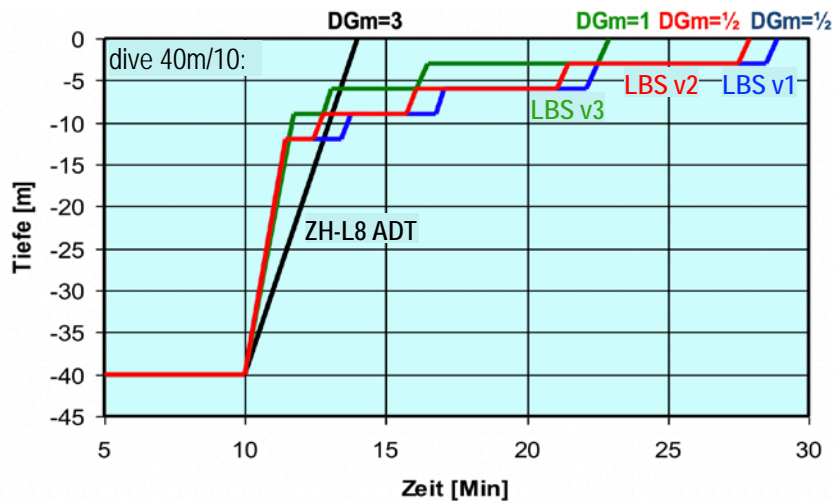


- *modified Aladin Air X (DAN black boxes) were used as dive recorders for the SAFE DIVE project*
- *2105 fully supervised recreational dives*
- *575 volunteer divers*
- *1058 dives with a doppler monitoring*
- *521 dives with extended doppler monitoring for 75 to 90 minutes post dive*

Die Post-Bühlmann Ära

The Post-Bühlmann Era

Research project DAN DSL special 01/2000, Low bubbling stops (LBS)



- 14 Versuchspersonen, 70 Tauchgänge
- 5 Tauchgang-Profile (inkl. Rep. Tauchgänge)
- 4 Versuchsreihen mit verschiedenen LBS
- *14 subjects, 70 dives*
- *5 dive profiles (incl. repeated dives)*
- *4 test series with various LBS*

Results:

- ➔ Mit Doppler nachweisbare Blasen können mit geeigneten LBS sehr stark reduziert werden
- ➔ Taucher mit offenem Foramen Ovale könnten mit LBS das Risiko minimieren
- ➔ Das LBS Verfahren wurde ungefähr 2001 im Modell ZH-L8 ADT umgesetzt
- ➔ *Doppler detectable bubbles can be greatly reduced with suitable LBS*
- ➔ *Divers with open foramen ovale could minimize the risk with LBS*
- ➔ *The LBS procedure was implemented in the model ZH-L8 ADT about 2001*

Die Post-Bühlmann Ära

The post-Bühlmann Era

Prof. Bühlmann's Lebenswerk

Prof. Bühlmann's life's work



- Prof. Bühlmann legte Wert auf die Aktualisierung des Buches
- 2 weitere Auflagen erschienen, nun mit dem Titel «Tauchmedizin»
- Die 4. Auflage enthält die Beschreibung des Modells ZH-L8 ADT. Leider verstarb er vor dem Erscheinungstermin
- Die 5. und letzte Auflage haben Dr. Peter Nussberger und ich wo nötig ergänzt. Bühlmann's Lebenswerk lebt darin weiter.

- *It was important to Prof. Bühlmann to keep the book up to date*
- *2 further editions were released, now entitled "Diving Medicine"*
- *The 4th edition contains the description of the model ZH-L8 ADT. Unfortunately, he died prior to the release date*
- *Dr. Nussberger and I supplemented the 5th and last edition where necessary. Bühlmann's life's work lives on in it.*

Aktuelle Bedeutung des Bühlmann-Modells

Actual Importance of Bühlmann's Algorithm

ZH-L8 ADT

- CRESSI (mit RGBM)
- SCUBAPRO/UWATEC
- UEMIS



ZHL-16c

- AQUALUNG
- DEEPBLUE
- GARMIN
- MARES (mit GF)
- OCEANIC



ZH-L16b

- SEAC
- RATIO



- Mehrzahl bedeutender Tauchcomputer-Hersteller verwenden das Bühlmann-Modell
- Hersteller haben von anderen Rechenmodellen auf das Zürcher Modell gewechselt
- *A majority of major dive computer manufacturers are using the Bühlmann model*
- *Some manufacturers have changed from other calculation models to the Zurich model*

Schlusswort

Closing Words

- Professor Bühlmann hat nach seiner Forschungstätigkeit für das professionelle Tauchen viel zum sicheren Freizeittauchen beigetragen. Neben seiner wissenschaftlichen Tätigkeit hat er nie den praktischen Nutzen für die Tauchcommunity aus den Augen verloren.
 - Er war bereit, seine eigenen Ideen zu hinterfragen und nach reiflichem Nachdenken offen für Verbesserungen.
 - Die Zusammenarbeit mit ihm war die interessanteste und spannendste Zeit meiner bisherigen beruflichen Tätigkeit.
-
- *After his research work for professional diving, Prof. Bühlmann has contributed a lot for safe recreational diving. Beside his scientific work, he has never lost the view for the practical benefits of the diving community.*
 - *He was ready to reappraise his own ideas and - after careful reflections - he was open for improvements.*
 - *The cooperation with him was the most interesting and exciting time of my professional activity up to now.*

