

Vergleich der Anzeigen digitaler Dekompressiometer mit Druckkammertests

Von Max Hahn

Seit vielen Jahren benützen Sporttaucher Dekompressiometer. Ein pneumatischer Analogrechner, der bei Dekompressionspflicht die minimal erlaubte Tiefe anzeigt, hat sehr weite Verbreitung gefunden. Dennoch hat erst das Erscheinen elektronischer Dekompressiometer, mit digitaler Berechnung und Anzeige nicht nur der minimal erlaubten Tiefe, sondern auch der berechneten Dekompressionszeit, neue Impulse für die Dekompressionsforschung gegeben.

Elektronik hat gegenüber Pneumatik einen erheblichen Vorsprung an Genauigkeit, sowohl bezüglich der Wiederholbarkeit als auch bezüglich der Exemplar-Streuung. Diese Genauigkeit ist zwar schon oft höher als sie der Sporttaucher ausnutzen kann, bedeutet aber für die Wissenschaft ein wichtiges Geschenk: Jeder Tauchgang, insbesondere wenn dekompensionspflichtig, ist ein Test des unterlegten mathematischen Modells und seiner Parameter. Noch nie sind Dekompressionsmodelle so häufig und mit einer solchen Vielfalt verschiedener Druck-Zeit-Profile geprüft worden!

Die Programme der ersten Generation elektronischer Dekompressiometer, die 'on line' rechneten und nicht Werte aus gespeicherten Tabellen pflückten, modellierten die Inertgas-Aufnahme und -Abgabe des menschlichen Körpers durch 12 - 16 parallele Kompartimente, die durch eine Zeitkonstante für exponentielle Sättigung und Entsättigung bestimmt waren. Die als maximal zulässig angesehenen Inertgas-Partialdrücke in diesen Kompartimenten sind dabei als lineare Funktionen des Umgebungsdruckes gegeben (Workman 1965; Hennessy & Hempleman 1977). Die je zwei Koeffizienten dieser Toleranzfunktionen sind dabei aus Statistiken über Symptome der Dekompressionskrankheit (decompression sickness, dcs) nach Tauchgängen und Druckkammerversuchen (Bühlmann 1982) sowie aus Ultraschall-Doppler-Blasenmessungen (Spencer, 1976) ableitbar.

Selbst wenn man die zwischen einigen Minuten und ca. 10 Stunden ungefähr geometrisch äquidistant angenommenen Halbwertszeiten eines 16 - Kompartimente - Modells (Bühlmann 1987) als gegeben nimmt, bleiben dann 32 Koeffizienten zu bestimmen. Für kurze Halbwertszeiten, wo das Risiko von Typ II - dcs, d.h. ZNS-Beteiligung, dominiert (Bühlmann 1983), verbieten sich selbstverständlich Versuche, so daß nur die seltenen Unfälle mit hinreichend genau rekonstruierbarem Druck-Zeit-Profil ausgewertet werden können. Aber auch Statistiken über berufliche Tauchgänge beschränken sich auf verhältnismäßig wenige, häufig vorkommende Profile und enthalten kaum Wiederholungstauchgänge, wie sie bei Sporttauchern üblich sind. Druckkammer-Simulationen von Wiederholungstauchgängen (Hahn, Hampe, John 1985; Thalmann 1986) sind aufwendig und dementsprechend selten.

Weiterhin ist - mangels Daten - die Extrapolation von dcs-Häufigkeiten aus Druckkammertests auf die im Sportbereich vielleicht akzeptablen 0,01 % für Typ II - dcs und 0,5 % für Typ I - dcs sehr spekulativ (Tabelle 1). Die Abnahme der dcs-Häufigkeit mit längerer Dekompression des gleichen Druck-Zeit-Profils wird auch von der Verteilung der Gesamtdekompressionszeit auf die Stufen abhängen. Schließlich sind Methoden, die beim Menschen stark inhomogen verteilte Suszeptibilität für dcs durch a-priori-Messung (Ward, McCullough, Fraser 1987) und entsprechende Klassifizierung von Versuchspersonen zu ebnen und damit Statistiken erst Sinn zu geben, noch in Entwicklung.

Selbst für auf 6 parallele, monoexponentielle Kompartimente reduzierte Modelle einiger Dekompressiometer der zweiten Generation ist eine nicht mehrdeutige, etwa auf zwei gültige Ziffern statistisch signifikante Festlegung der Koeffizienten gegenwärtig nicht möglich. Es ist daher nicht verwunderlich, daß die auf dem Markt erhältlichen Dekompressiometer z. T. erheblich unterschiedlich Null- und Dekompressionszeiten anzeigen. Insbesondere für 'langsame' Kompartimente führen kleine Unterschiede der als maximal zulässig angesehenen Partialdrücke zu sehr verschiedenen Dekompressionszeiten (Tabelle 2).

Um vorübergehende, dekompensionsinduzierte Verzögerungen in der Entsättigung (Dick et al. 1984) in monoexponentiellen Kompartimenten für Wiederholungstauchgänge zu berücksichtigen, müssen die Toleranzen weiter abgesenkt werden, als für Einzeltauchgänge nötig erscheint.

von Max persönlich!
beim VDTC Tauchmedizin Seminar (Lübeck)

114

Literatur

Bühlmann AA

Experimentelle Grundlagen der risikoarmen Dekompression nach Überdruckexpositionen

Schweiz. med. Wschr. 112, 48-59, 1982

Bühlmann AA

Dekompression - Dekompressionskrankheit

Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1983

Bühlmann AA

Decompression after repeated dives

Undersea Biomed. Res. 14, 59-66, 1987

Dick APK, Vann RD, Mebane GY und Feezor MD

Decompression induced nitrogen elimination

Undersea Biomed. Res. 11, 369-380, 1984

Hahn M, Hampe P und John S

Wet chamber dives to test algorithms for electronic decompressimeters

Proceedings of the XI. Annual Meeting of the European Undersea Biomedical Society EUBS. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden.

August 21-23, 1985. pp. 203-211

Hennessy TR und Hempleman HV

An examination of the critical released gas volume concept in decompression sickness

Proc. R. Soc. Lond. B 197, 299-313, 1977

Spencer MP

Decompression limits for compressed air determined by ultrasonically detected blood bubbles

J. Appl. Physiol. 49, 229-235, 1976

Spencer MP, Johanson DC und Campell SD

Safe decompression with the Doppler ultrasonic blood bubble detector

Underwater Physiology. Proc. V. Symp. on UWph. Edt CJ Lambutsen, 1976

Stibbe A

Sport - Taucher Handbuch

Verband Deutscher Sporttaucher e.V., Hamburg, 1985

Dekompressionstabelle Bühlmann/Hahn 0 - 250 m

Thalmann ED

Navy experimental diving unit Report No. 8-85 (USA)

Air-N₂O₂ Decompression Computer Algorithm Development, 1986

Ward CA, McCullough D und Fraser WD

Relation between complement activation and susceptibility to decompression sickness

J. Appl. Physiol. 62, 1160-1166, 1987

Weatherby PK, Hays JR, Survanshi SS, Homer LD, Hart BL, Flynn ET und Bradley ME

Statistically based decompression tables. II. Equal risk air diving decompression schedules

Naval Medical Res. Inst., Bethesda, Maryland, USA 85-17, 1985

Workman RD

Calculation of decompression schedules for nitrogen oxygen and helium-oxygen dives

Res. report 6-65, US Navy Exp. Divi Unit. Washington DC, 1965

Tabelle 1

Vergleich von Dekompressionsplänen bei Druckkammertauchgängen (Thalmann 1986) und den Anzeigen des digitalen Dekompressionsmeters DecoBrain II mit Programm P2-3 (Divetronic AG).

Profil												
Signatur	Tiefe	Grundzeit	Dekompression: min in						Gesamt- aufstiegszeit min	dcs/n	95 % Vertrauensgrenzen	
	m	min	18 m	15 m	12 m	9 m	6 m	3 m			p_u /%	p_o /%
Th 5/3	18,4	180					20	90	111	4/10	12,16	73,76
Th 5/2	18,4	180					28	124	153	1/20	0,13	24,87
P2-3	18,4	180					44	181	227	?		
Th 11/1	36,8	60				9	23	55	89	1/20	0,13	24,87
Th 11/2	36,8	60				21	26	98	147	1/29	0,09	17,76
P2-3	36,8	60			6	17	41	90	158	?		
Th 15/1	46,1	40			3	12	26	42	86	2/10	2,52	55,61
Th 15/2	46,1	40			3	12	26	53	97	1/28	0,09	18,35
P2-3	46,1	40	1	3	5	13	30	75	132	?		
Th 30/1	30,7	31	Oberflächenpause 60						2			
Th +	30,7	20							2	2/10	2,52	55,61
P2-3	30,7	31							2			
+	30	20	Oberflächenpause 49						13			
									16	?		
Th 30/2	30	30							2			
+	30	16	Oberflächenpause 60						2	3/10	6,67	65,25
P2-3	30	30							2			
	30	16	Oberflächenpause 51						11			
									3	?		

Die Vertrauensgrenzen p_u und p_o geben mit 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit an, innerhalb welcher Grenzen die prozentuale Häufigkeit von Symptomen der dcs für 'unendlich' viele Versuchspersonen gleicher Suszeptibilität (!) liegt.

Tabelle 2

a) Nullzeiten/Minuten

Tiefe/m:	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45
Gerät; Quelle:												
Aladin (Uwatec)	110	70	48	35	24	17	15	12	9	7	5	4
Skinny Dipper (Orca)	137	74	54	39	32	23	20	13	11	9	8	6
SML (Suunto)	132	74	53	38	29	23	18	13	11	9	8	6
P2-3 (Divetronic)	117	75	55	36	25	20	14	13	12	11	10	9
P2-4 (Divetronic)	175	95	57	39	28	21	16	14	12	10	9	9
Weatherby et al. (1985), 5 %*170	120	80	80	60	50	50	40	30	30	30	30	30
Weatherby et al. (1985), 1 %*100	70	40	25	15	10	8	7	5	5	4	4	4
Thalmann (1986)	173	92	63	48	40	32	27	23	20	18	16	15
Stibbe (1984), 0-250 m <i>Vdst</i>	192	99	65	40	27	21	17	15	9	7	6	5

*) berechnete dcs-Wahrscheinlichkeit

b) Profil: 30 m (4 bar); 120 min; Haltezeiten/min

Stufe/m:	12	9	6	3 ;	Gesamt-Aufstiegszeit:
Aladin	9	32	47	115	203
P2-3	18	44	82	340	484
P2-4	3	24	42	82	151
Weatherby et al. (1985), 5 %	1	6	113	227	347
Weatherby et al. (1985), 1 %	2	8	180	342	532
Thalmann (1986)	20	27	103	289	439

c) Profil: 50 d 2; 50 h 4; 58 d 0,1; 58 h 11,8; 50 a 0,1; 50 h 12;

1. Ziffer = Tiefe in m; d = Abstieg, h = Halt, a = Aufstieg; 2. Ziffer = Zeit in min

Stufe/m:	Haltezeiten in min						Aufstiege mit 10 m / min	
	18	15	12	9	6	3	Gesamt-Aufstiegszeit/min	dcs/n
P2-2		3	4	8	16	34	72	4/15
Aladin		2,4	3,4	8,4	20	44,4	83	?
P2-3	2	3	5	9	27	62	113	?

4/4