

Dekompressionsmodelle

Einführung und Übersicht

Dr. Michael Melter

Vortrag zur
VDST/CMAS TL2 Theorie Vorbereitung – 11.02.2011
in Frankfurt am Main

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

**wird eine DCS
zuverlässig verhindert!**

Fachbereich Ausbildung

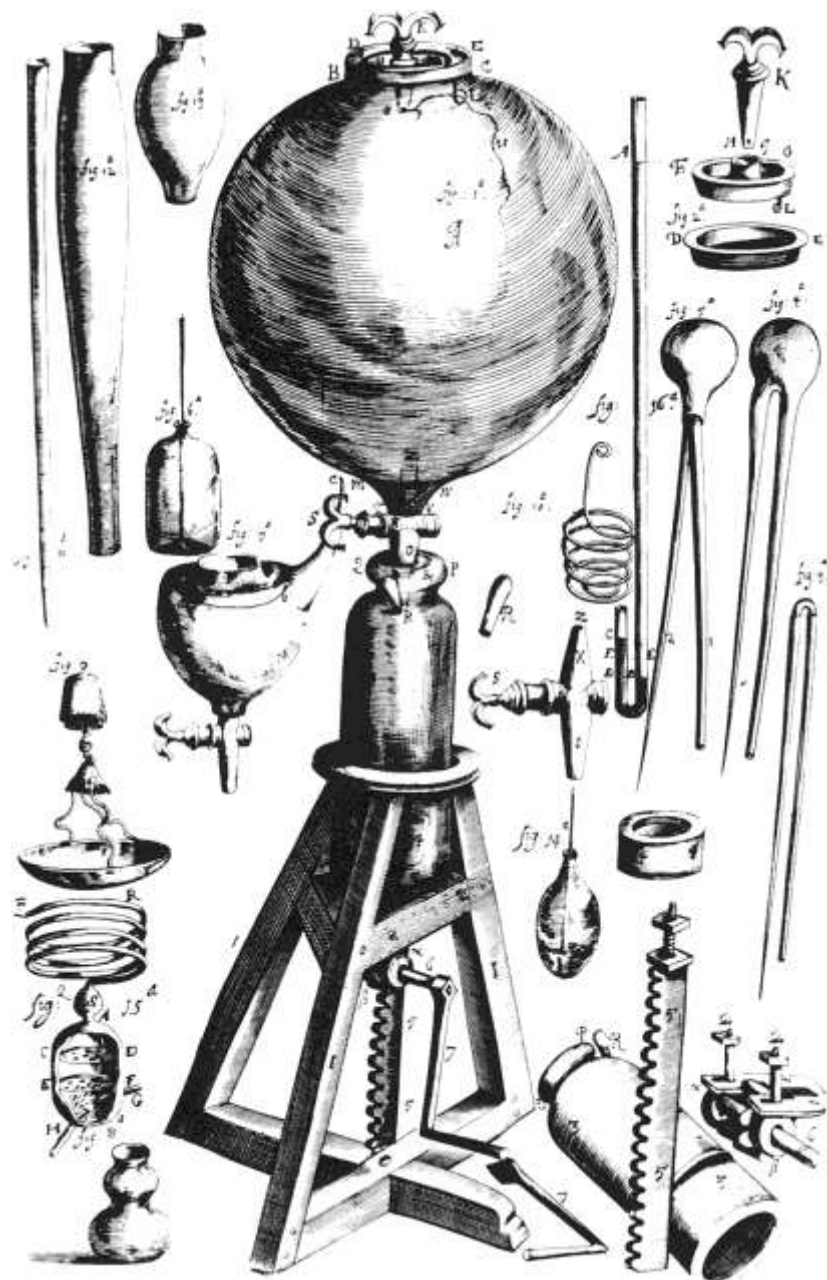
Übersicht

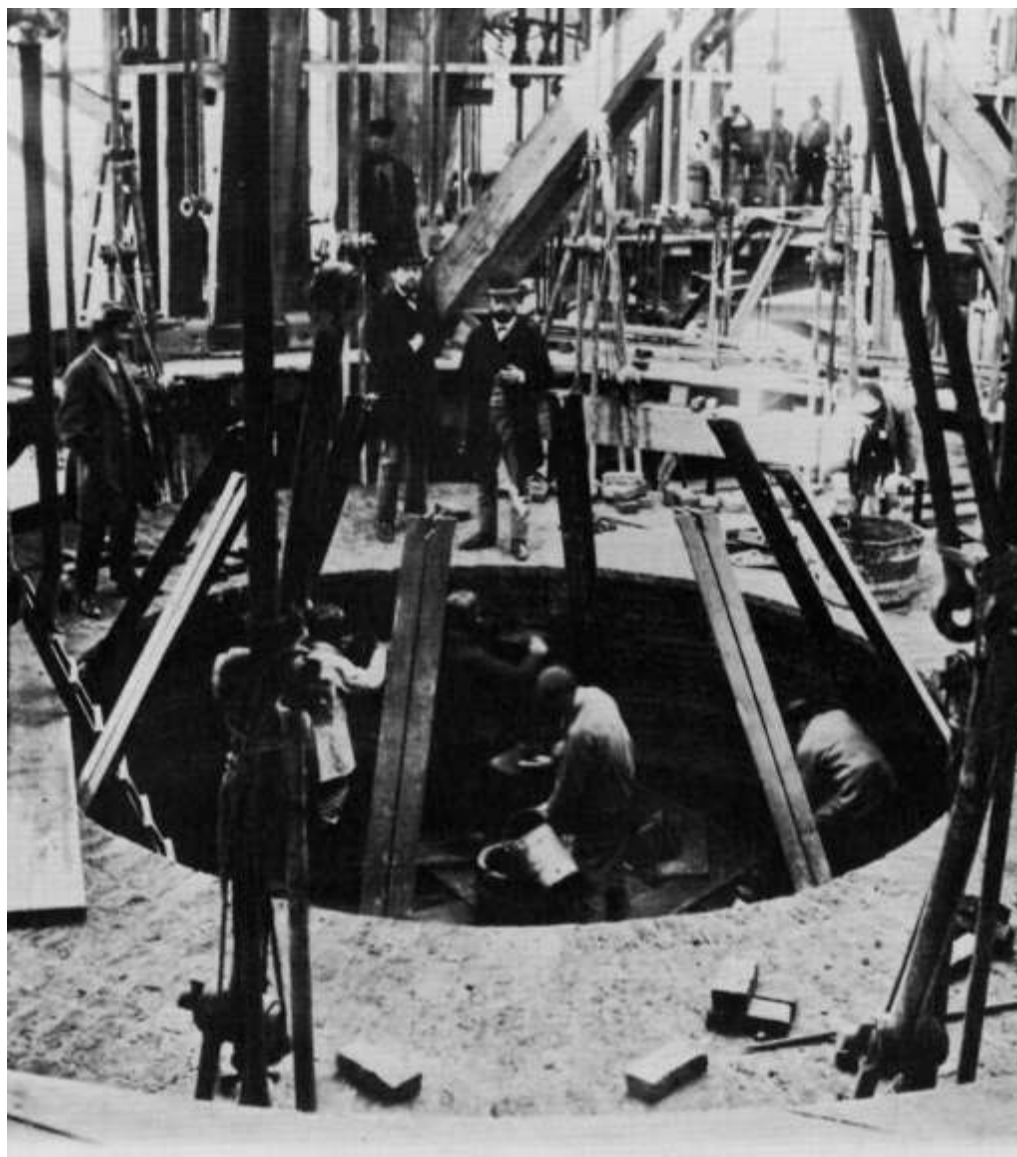
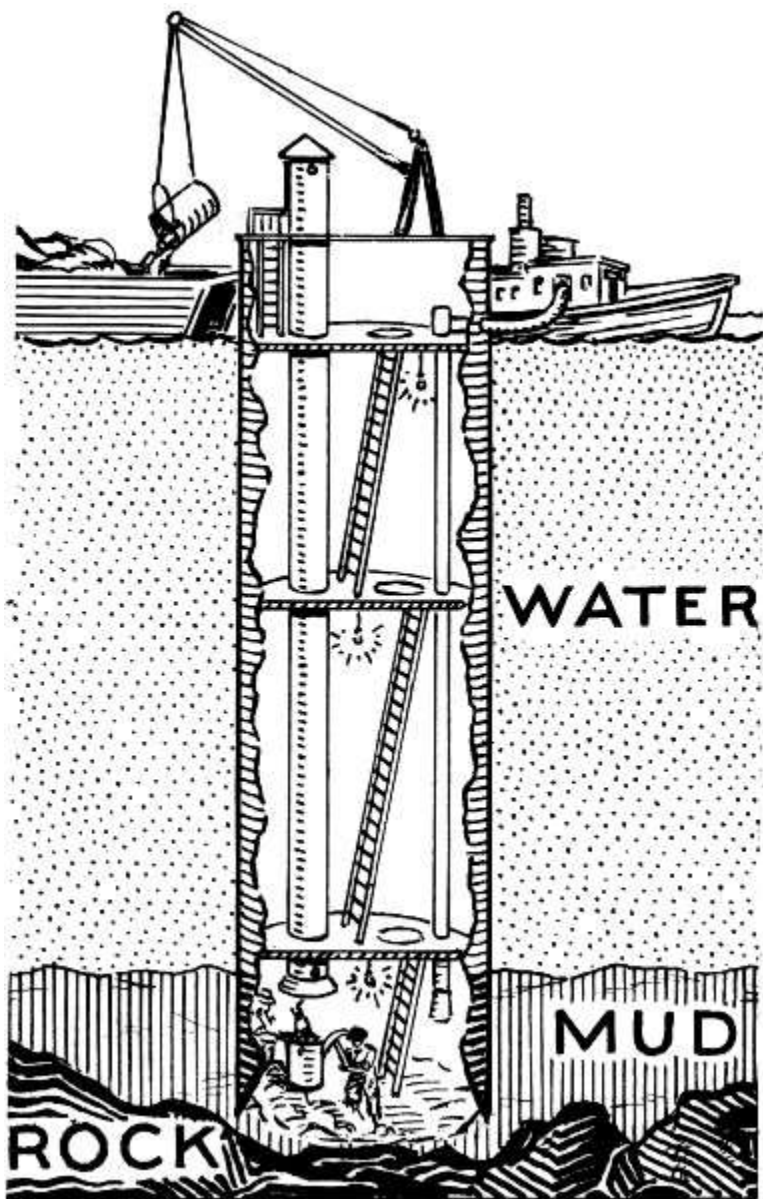


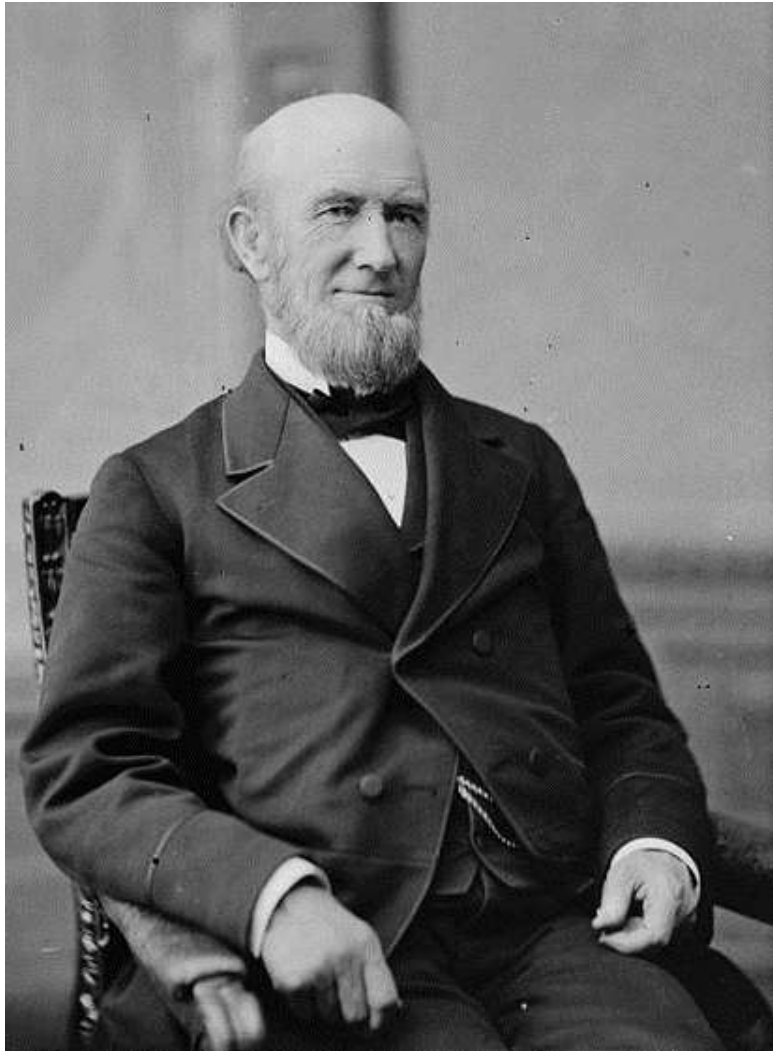
- Eine kurze Geschichte der Dekompression
- Klassische Dekompressionsmodelle
- Moderne Dekompressionsmodelle
- Vom Modell zum Computer
- „Take-Home-Message“



Robert Boyle (1627-1691)







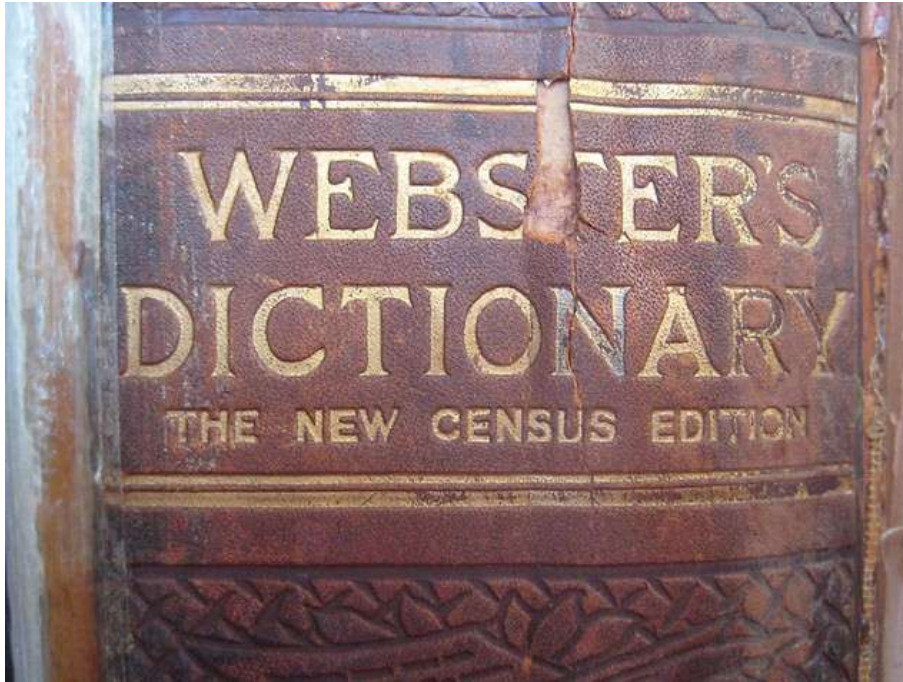
James Buchanan Eads (1820-1887)



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



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



1913

Caisson disease (med.)

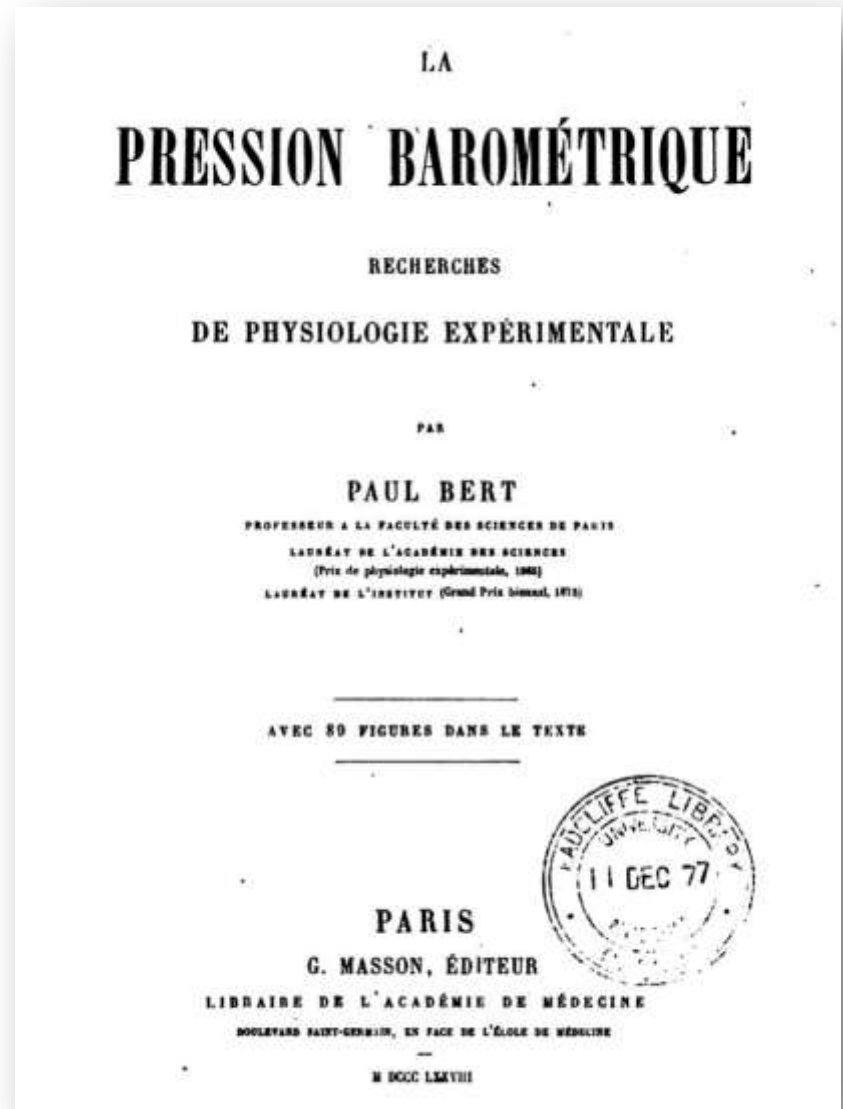
„A disease frequently induced by remaining for some time in an **atmosphere of high pressure**, as in caissons, diving bells, etc.

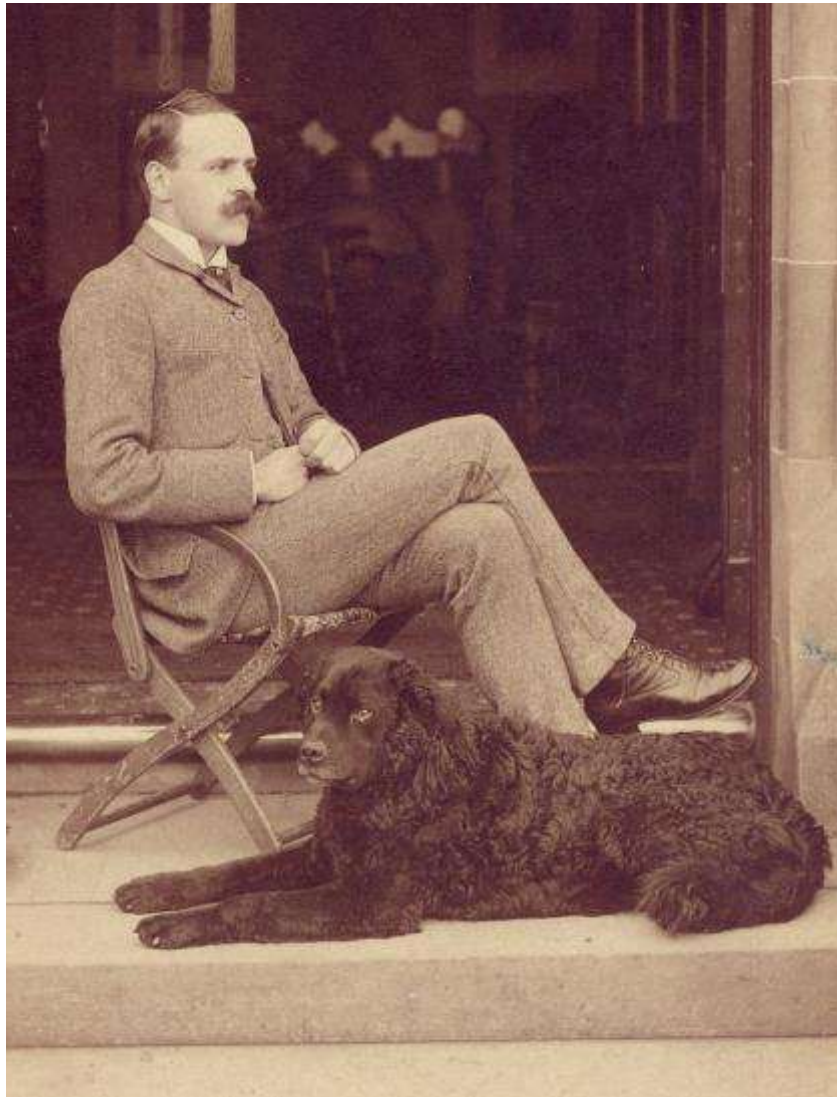
It is characterised by **neuralgic pains** and **paralytic symptoms**.

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



Paul Bert (1833-1886)





John Scott Haldane (1860-1936)

THE PREVENTION OF COMPRESSED-AIR ILLNESS.

By A. E. BOYCOTT, D.M.,

G. C. C. DAMANT,

Lieut. and Inspector of Diving, R.N.,

AND J. S. HALDANE, M.D., F.R.S.

(From the Lister Institute of Preventive Medicine.)

[With 7 Figures and 3 Plates.]

CONTENTS.

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

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





Albert Bühlmann (1923-1994)

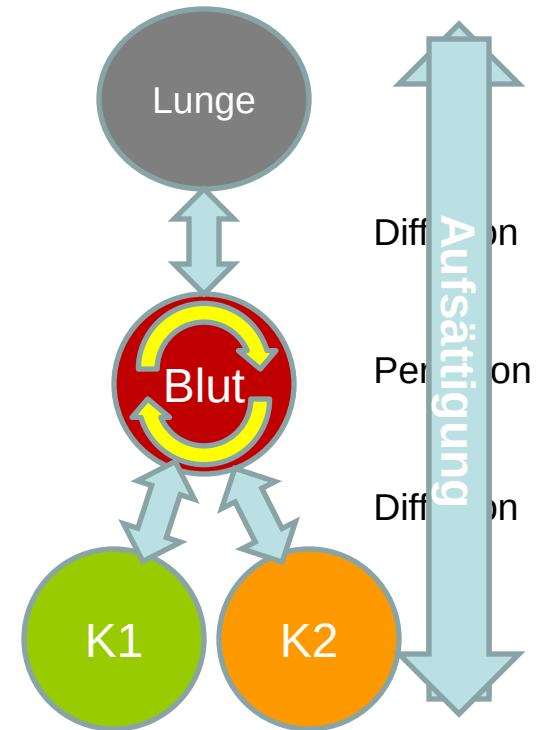
- **Erste Untersuchungen zum Bergseetauchen**
- **M-Wert Definition unterschiedlich zu Workman**
- **Erweitert die Kompartimente auf zunächst 12 (ZHL12), dann 16 (ZHL16), später wieder 8 (ZHL8ADT), diese dafür adaptiv**
 - Grundlage für UWATEC Tauchcomputer seit 1982 (Aladin, Aladin Pro, Air X, ...)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

Das klassische Modell

Haldane/Workman/Bühlmann



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



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

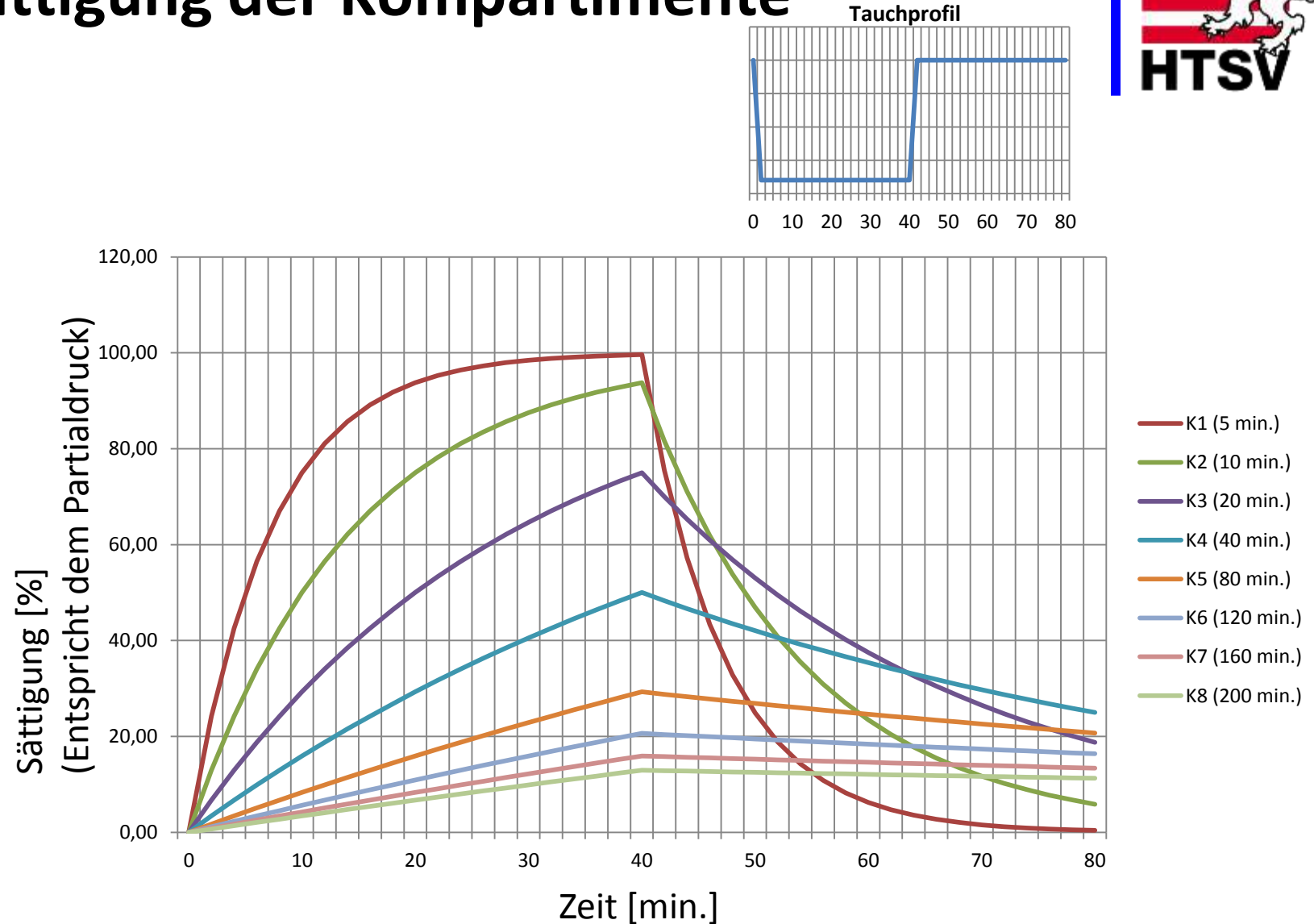
$$N_t = N_0 \cdot e^{-k \cdot t}$$

N = Sättigung

t = Zeit[s]

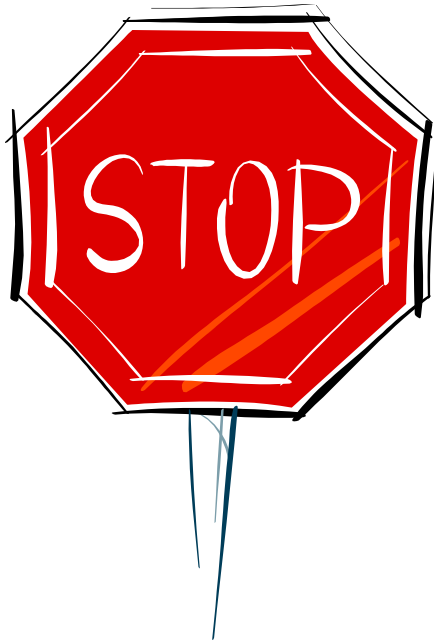
$$k = \frac{\ln 2}{\text{Halbwertszeit}}$$

Sättigung der Kompartimente



Fachbereich Ausbildung

Kritische Übersättigung



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

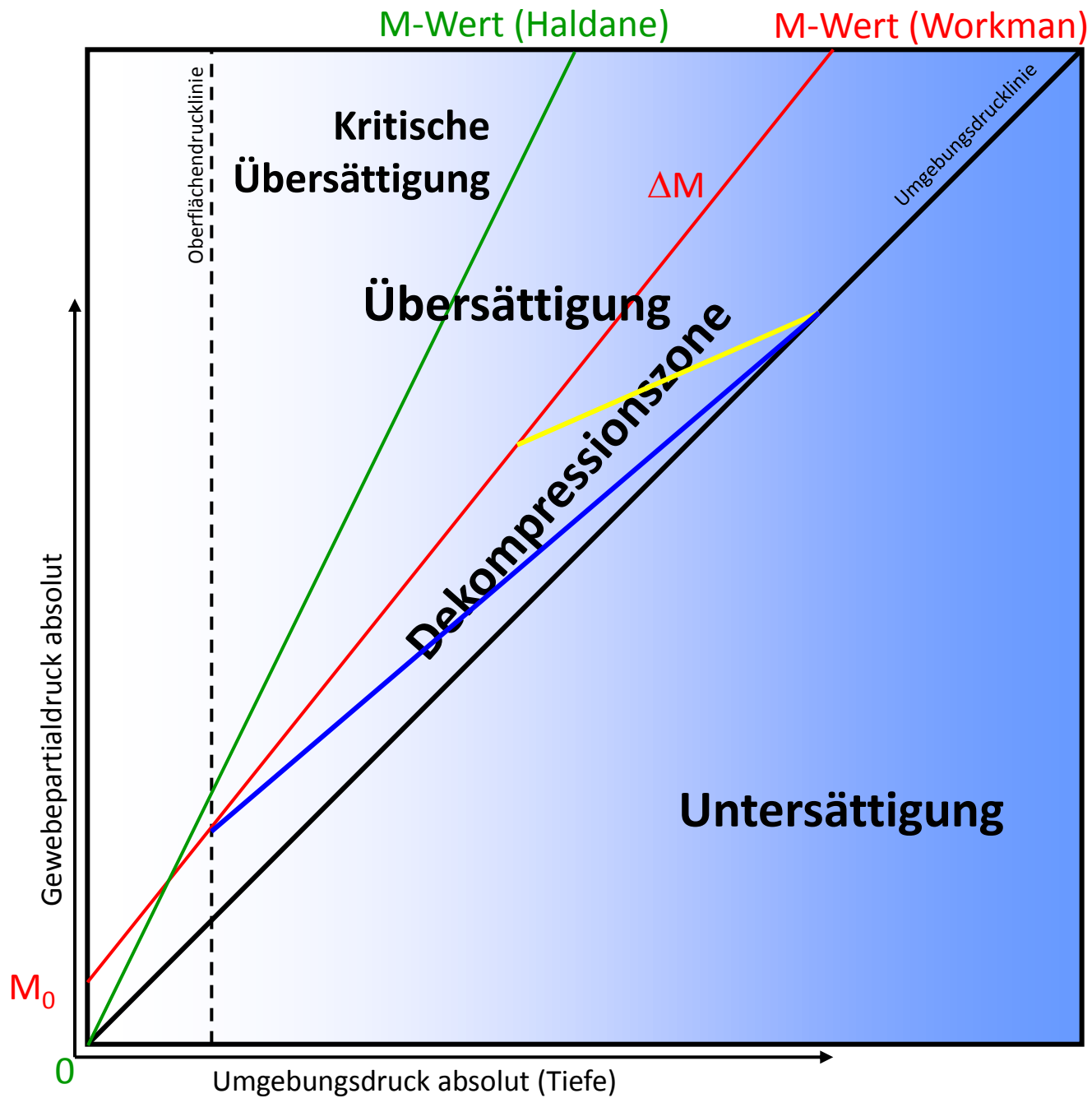
$$p \leq M$$

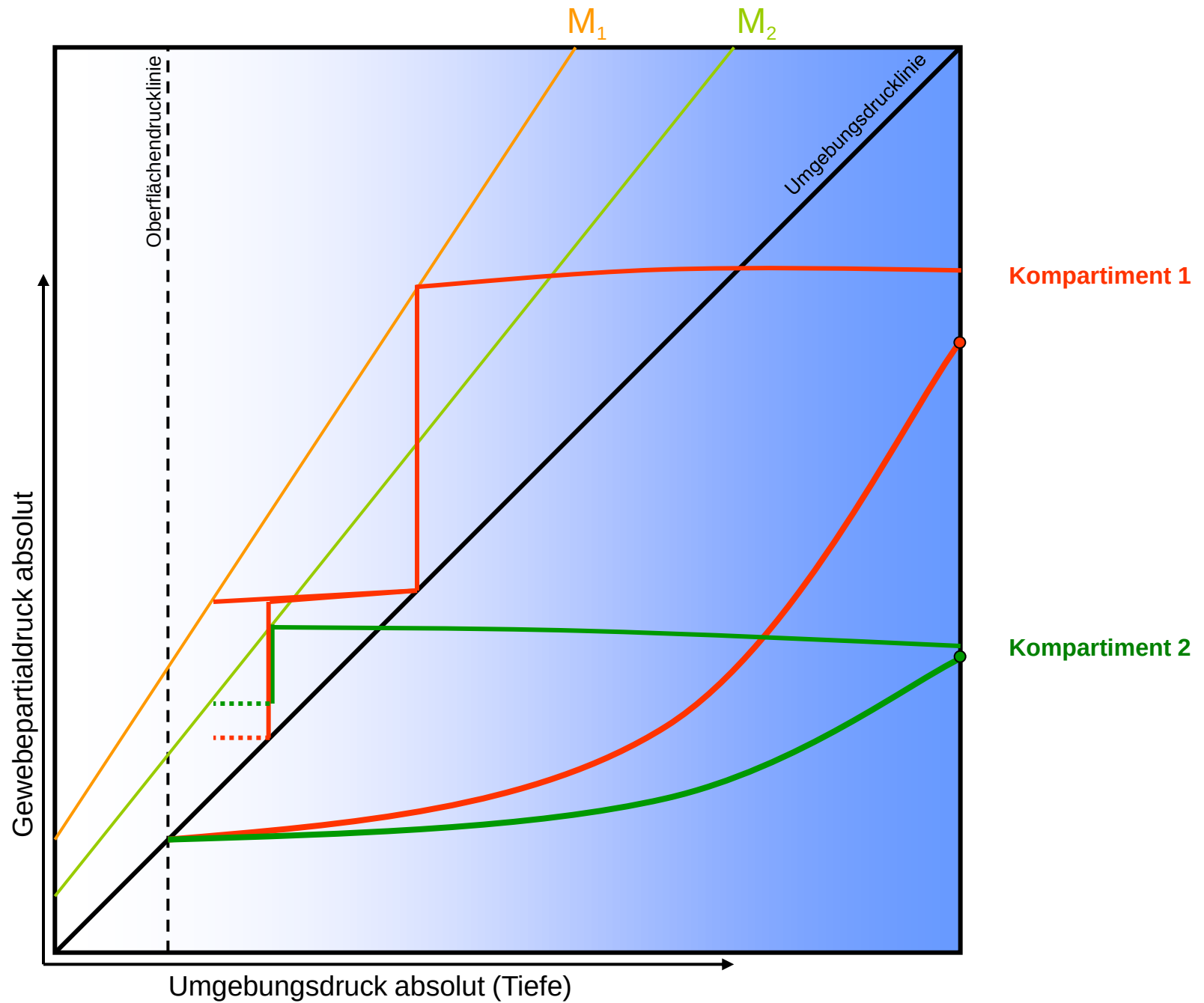
Haldane Modell:

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

Workman/Bühlmann Modell:

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

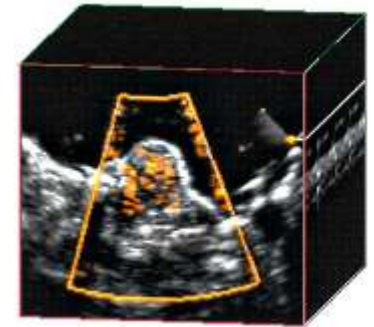




Grenzen der klassischen Modelle von Haldane/Workman/Bühlmann



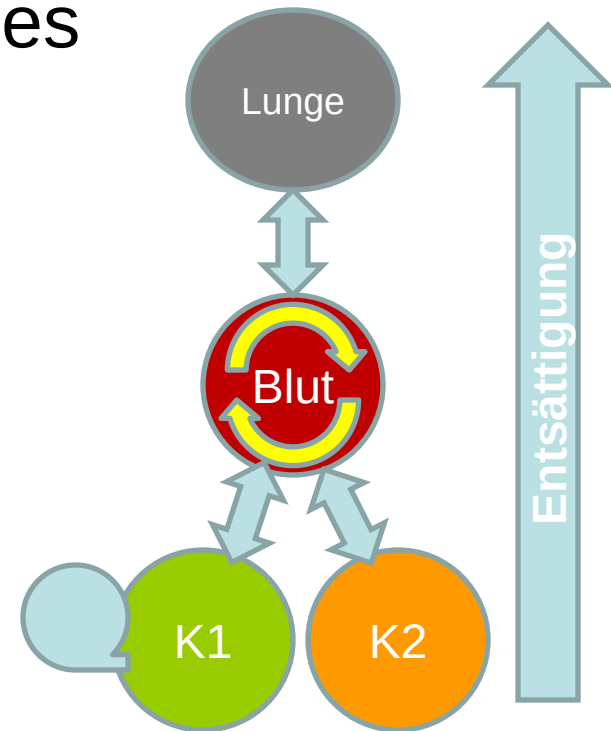
- Problem bei klassischer Dekompression
 - Ultraschallmessungen zeigen Blasen...
 - ...auch wenn keine Symptome der DCS vorliegen
 - ...auch wenn korrekt dekomprimiert wurde
 - ...auch vor dem TG sind immer schon Blasen vorhanden
 - Wenn aber immer Blasen vorhanden sind...
 - ...vergrößern sich diese bei JEDEM Aufstieg
 - ...kann auch beim Einhalten der M-Wert Grenze eine DCS auftreten
- Beobachtungen
 - Müdigkeit nach Tauchgängen
 - insbesondere bei kurzen und tiefen Tauchgängen
 - DCS trotz korrekter Austauschpausen
 - individuelle Faktoren? (PFO, ...)
 - sehr selten, relativ zu anderen Tauchunfällen!



Einfluss symptomloser Blasen auf die Dekompression



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



Verbesserungsmöglichkeiten



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

Ergebnis:
„Deep Stops“

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

TABELLE DI DECOMPRESSIONE

U.S. NAVY

PER IMMERSIONI CON ARIA

METRI	MINUTI	TAPPE DI DECOMPRESSIONE				METRI	MINUTI	TAPPE DI DECOMPRESSIONE				METRI	MINUTI	TAPPE DI DECOMPRESSIONE			
		12	9	6	3			12	9	6	3			12	9	6	3
12	200			0		24	40			0		33	20			0	
	210			2			50			10			25			3	
	230			7			60			17			30			7	
	250			11			70			23			40		2	21	
	270			15			80		2	31			50		8	26	
15	100			0		27	90		7	39		36	60			18	
	110			3			100		11	46			70		1	23	
	120			5			110		13	53			80		7	23	
	140			10			120		17	56			90		12	30	
	160			21			130		21	54			100		15	31	
18	180			29		30	140		26		39	110		18	36		
	60			0			150		30				120		21	41	
	70			2			160		34				130		24	46	
	80			7			170		38				140		27	51	
	100			14			180		44				150		31	57	
21	120			26		33	190		50		43	160		35	63		
	50			0			200		56				170		39	69	
	60			8			210		62				180		43	75	
	70			14			220		68				190		47	81	
	80			18			230		74				200		51	87	
	90			23		36	240		80		47	210		55	93		
	100			33			250		86				220		59	99	
	110			41			260		92				230		63	105	
	120			47			270		98				240		67	111	
	130			52			280		104				250		71	117	

if

op

op

at 3

A

45

face

Austauschtabelle DECO 2000

Stop n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000
--------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

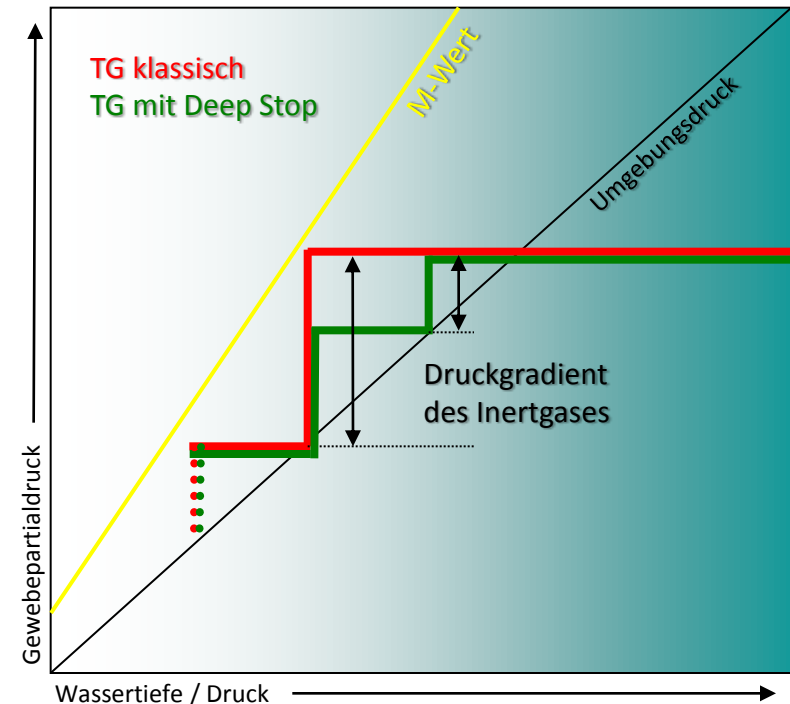
Stop n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	5
--------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

n. auf 3 m

Deep Stops



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



„Pyle Stops“



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

Erster „Pyle-Stop“:

$$(45+9)/2 = 27\text{m}$$

Abstand zum Dekostopp:

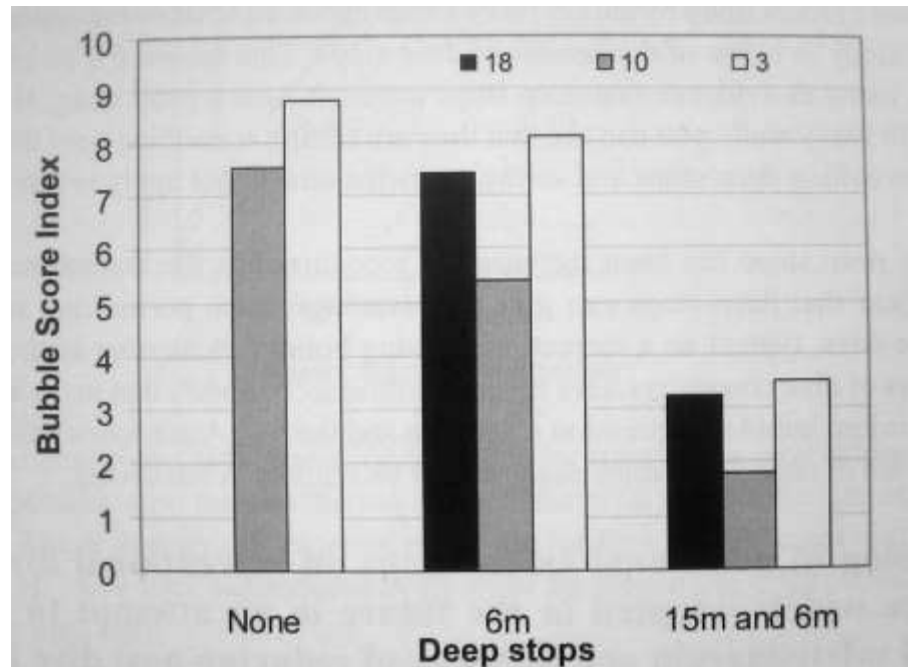
$$27-9 = 18\text{m} \quad (>9\text{m})$$

Nächster „Pyle-Stop“:

$$(27+9)/2 = 18\text{m}$$

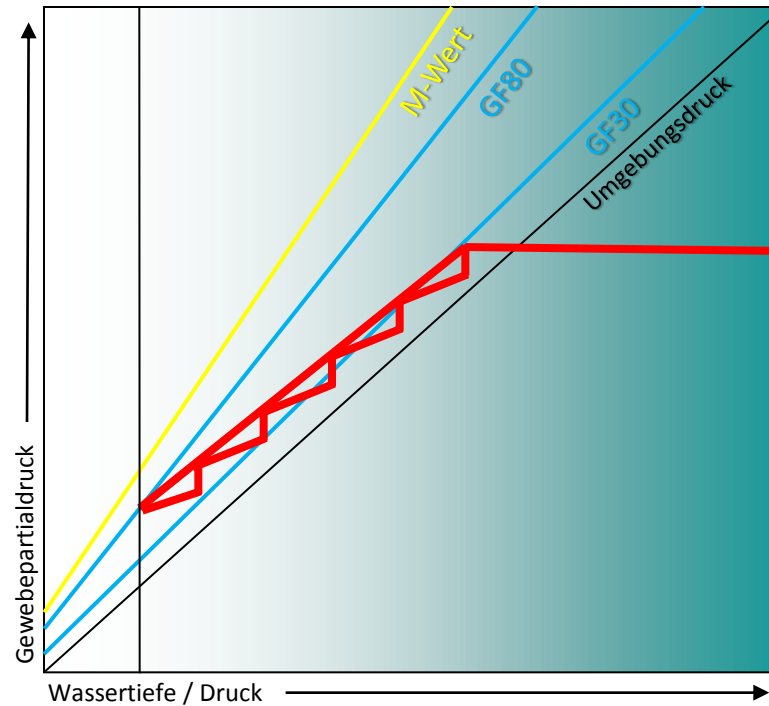
„Pyle Stops“ – Was bringt's?

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



Fachbereich Ausbildung

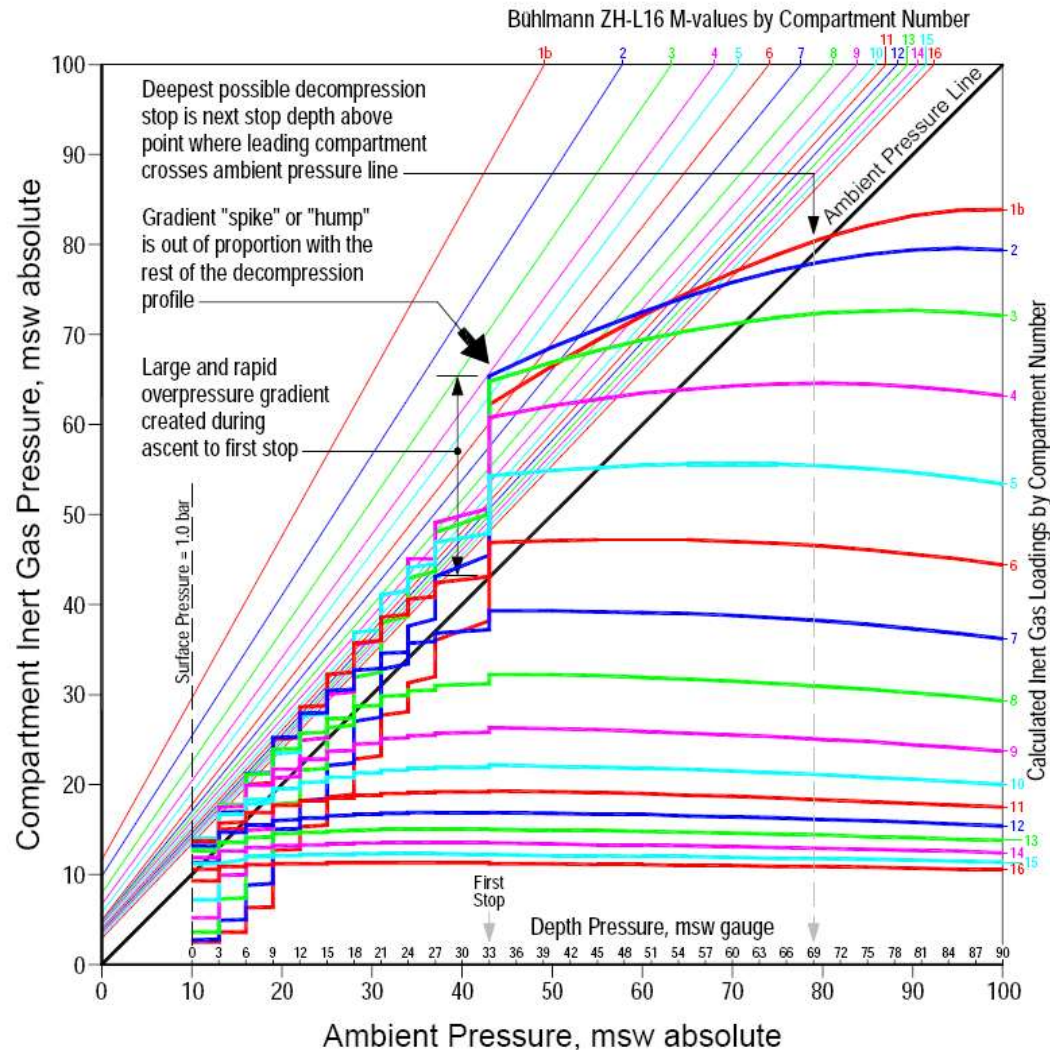
Gradientenmethode



Fachbereich Ausbildung



Pressure Graph: Complete Decompression Profile Using Conventional Calculation Method



Notes:

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

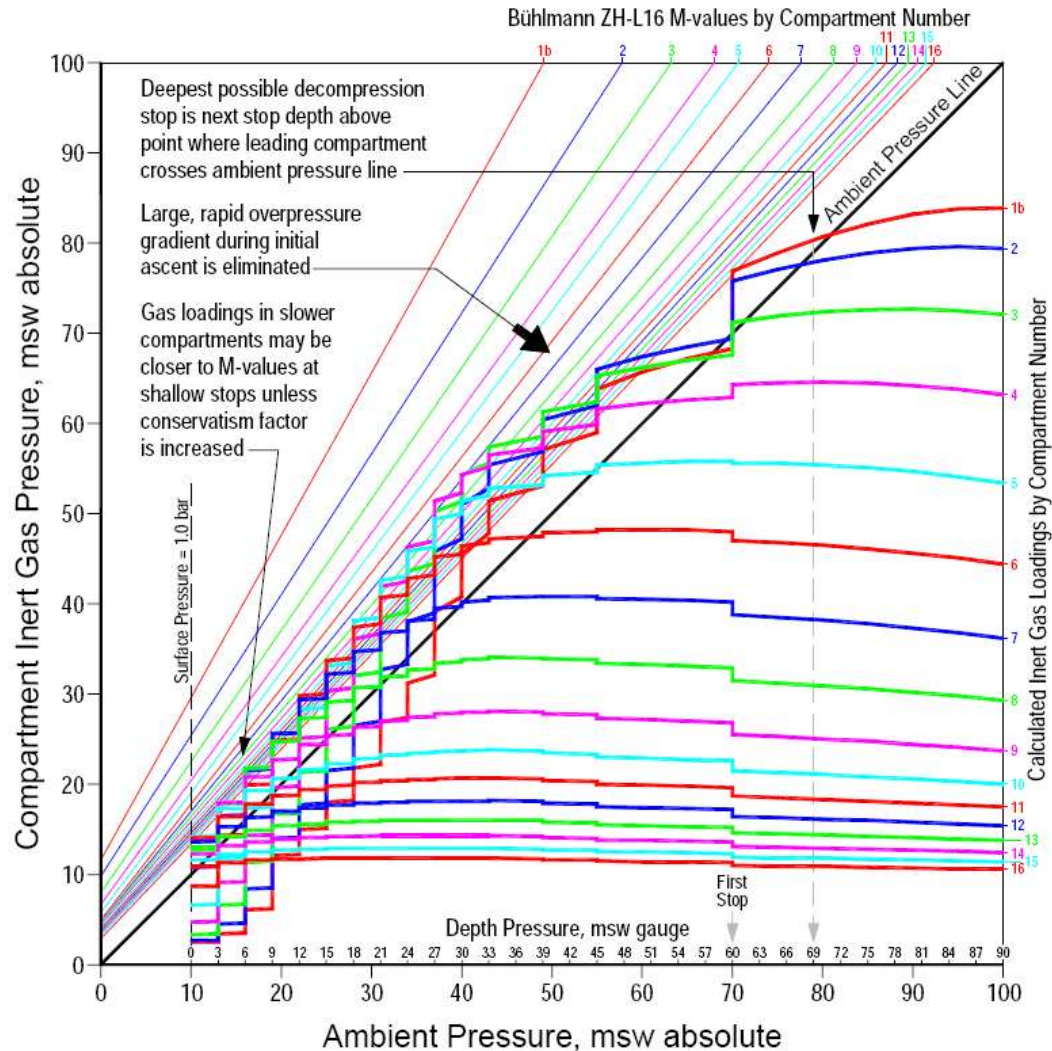
Decompression Table

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

Fachbereich Ausbildung



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



Notes:

1. 13/50 Trimix dive to 90 msw (293 fsw) for 20 minutes bottom time.
2. Deco mixes: Nitrox 36% at 33 msw, Nitrox 50% at 21 msw, and Nitrox 80% at 9 msw.
3. Conservatism factor is minimal (15%).
4. Ascent rate is 10 msw/min.
5. Inert gas loadings are shown leaving the bottom at 20 minutes run time.
6. Run times are leaving the stop.
7. Deep stops result in higher gas loadings in slower compartments at shallow stops.

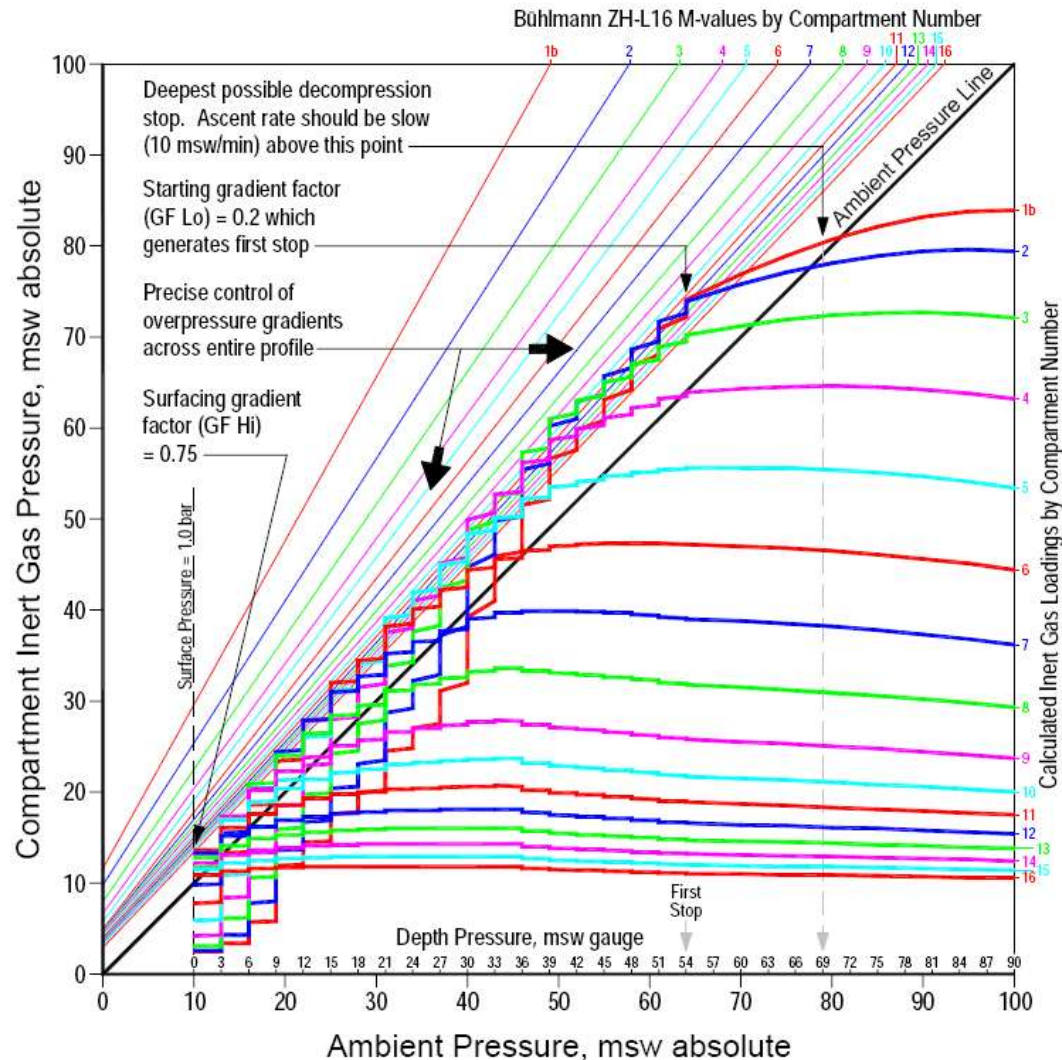
Decompression Table

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

Fachbereich Ausbildung



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



Notes:

1. 13/50 Trimix dive to 90 msw (293 fsw) for 20 minutes bottom time.
2. Deco mixes: Nitrox 36% at 33 msw, Nitrox 50% at 21 msw, and Nitrox 80% at 9 msw.
3. Conservatism is by gradient factors.
4. Ascent rate is 10 msw/min.
5. Inert gas loadings are shown leaving the bottom at 20 minutes run time.
6. Run times are leaving the stop.
7. Proximity of gas loadings to M-values is controlled by gradient factors.

Decompression Table

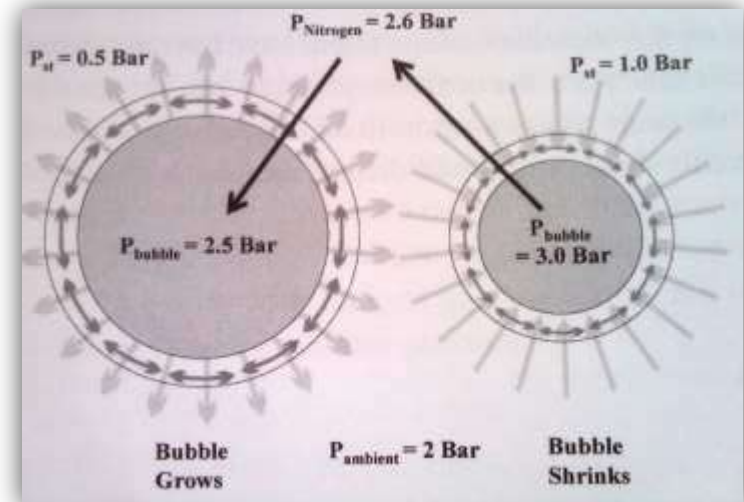
Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)
54	24	39	30	24	40	9	71
51	25	36	33	21	44	6	87
48	26	33	34	18	47	3	119
45	27	30	36	15	53	0	120
42	28	27	38	12	61		

Fachbereich Ausbildung

Zweiphasenmodelle



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



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

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



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

Fachbereich Ausbildung

eine Auswahl an „Deep Stoppers“



ZHL8ADT



ZHL8ADT
VPM



RGBM



ZHL8+



ZHL8ADT-GF

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



Dekompression ist (noch) keine
völlig verstandene Wissenschaft!

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

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

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

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

