

SUB
MARINE
CONSULTING

Dekompression

Manual Version 2016 / 17
Band II:
Algorithmen, Theorien &
Fortgeschrittene Anwendungen

THE

SUB
MARINE
CONSULTING

GROUP

TEL AVIV – SAN FRANCISCO – STUTTGART

WWW.SMC-DE.COM

1. Vorwort / Motivation

**“Each diver must become a decompression specialist!”
The Technical Diving Handbook, Gary Gentile, p. 178**

(sinngemäß: “Jeder Tekkie hat gefälligst Deko-Spezialist zu werden!!!”)

Die freundliche Vorwarnung!

Obacht: dies ist kein Lehrbuch für TEC-Novizen und erst recht keines für frischgebackene Taucher. Wenn dich die nachfolgenden Seiten nicht langweilen oder gar frustriert zurücklassen sollen, prüfe bitte jetzt, in welchem Umfang du die erforderlichen Voraussetzungen erfüllst (siehe Abschnitt „Voraussetzungen“ weiter unten).

Da dies der zweite Band der Serie zum Thema „Dekompression“ ist, beinhaltet er weitere mathematische Details zu den Algorithmen, Theorien und ihre physiologischen Grundlagen sowie fortgeschrittene Anwendungen und ihre medizinischen Grenzen. Damit wird vom Umfang, der Detailtiefe und vom Anspruch die Grenze der traditionellen (Tec-) Taucherausbildung wesentlich überschritten! Dies ist also keine Fortsetzung der Reihe: „Deco for Dummies“ ... oder so ähnlich, sondern müßte eigentlich im Untertitel auf neudeutsch heißen:

„Decompression for Scientists and Engineers“

Tipp:

Falls du über die Voraussetzungen noch im Zweifel bist, beschaffe dir den ersten Band dieser Serie. Es ist das Manual zum PADI & SSI Specialty „Tauchcomputer & Tauchtabellen“; erhältlich über: www.SMC-de.com. Dort werden die Grundlagen, also eine Einführung in die wesentlichen Ideen und Konzepte der Dekompressionsphysiologie und der Dekompressionsrechnung sowie viele Tauchtabellen und historische & aktuelle Tauchcomputer gezeigt und deren Funktionsweise erklärt.

Die meisten Probleme beim Tauchen, auch beim technischen Tauchen, treten in den folgenden Gebieten auf:

- Atemgasmanagement (zu wenig, das falsche ...)
- Tarierung (zuviel oder zuwenig Gewicht, Handhabungsprobleme mit Bleisystem/Auftriebskörper/Trocki)
- Gesundheitliche Probleme (Überanstrengung, Auskühlung oder Überhitzung, Krankheit, fehlende Fitness, ...)
- Strömungen und Tiefe (Narkose und/oder CO₂ Vergiftungen)
- Psychologische Dinge wie: Orientierung in der Höhle verloren, Leine nicht benutzt, ...
- rein technische Probleme: Automat, Computer, Lampe, Maske, Scooter, etc. defekt, Tabelle weg: und keine Redundanz vorgesehen; Rebreather nicht eingeschaltet, Wassereinbruch im Scrubber, in der Leine verfangen!

in der Regel einhergehend mit der Mißachtung des Buddy- / Team Prinzips. Allen diesen Gebieten und dem damit zusammenhängendem Risikomanagement wird in den meisten Kursen ausreichend Zeit gewidmet. Probleme oder gar Todesfälle im Zusammenhang mit der Dekompression treten vergleichsweise hierzu eher seltener auf. Was soll dann ein Spezialkurs zum Thema „Dekompression“ vermitteln?

Dass die übliche Ausbildung zum Sporttaucher bei Kenntnissen bezüglich sogenannten Nullzeit-Tauchgängen (NDL TG) stehen bleibt, soll hier nicht diskutiert werden. Allenfalls wird

noch „versäumte Dekompression“ erwähnt und daß echte Deko-TG gefährlich und kompliziert sein sollen. Aus dem Blickwinkel des zunehmenden Durchschnittsalters sowie der abnehmenden körperlichen Fitness des durchschnittlichen Hobby-/Urlaubstauchers ist diese Vorgehensweise bei der traditionellen Tauchausbildung mit „Sicherheit“ sinnvoll!
(Zahlen aus den USA von 1996: das Durchschnittsalter des Tauchers ist 37 Jahre, Durchschnittseinkommen: 73.500 US \$)

Ziel und Absicht dieses Handbuches (auf neudeutsch: Scope):

Wir wollen hier jedoch im Bereich des exponierten (technischen, wissenschaftlichen, militärischen und kommerziellen) Tauchens die physiologischen und physikalischen Grundlagen erarbeiten und mit diesen Kenntnissen anwendbare, relativ sichere und auch erweiterbare Dekompressions-Strategien propagieren.

Da die medizinischen Vorgänge beim Auftreten von Dekompressionskrankheiten (= Decompressionsickness, englisch abgekürzt: DCS) derart komplex sind, wollen wir ebenso ein gesundes Mißtrauen gegenüber Tauchcomputern vermitteln sowie den Blick für die Einfachheit und Unzulänglichkeit der bisherigen Tauchtabeln und Dekompressions-Modelle schärfen! Letzten Endes wird das Unwissen über DCS/DCI-Phänomene in den sogenannten „Kompartimenten“ und den hinzudefinierten Halbwertszeiten versteckt. Darüberhinaus gibt es hier noch den einen oder anderen Tipp über die physiologischen Hintergründe des DIVE Progrämmchens (Info und kostenloser download: http://www.divetable.info/dwnld_g.htm): ihr könnt das Progrämmchen nehmen, um eure run-times, die Mischgas-Computerle oder eure gekaufte Desktop-Dekosoftware zu kontrollieren.

Letztenendes kann auch ein Blick auf die Statistik helfen, den Fokus für diesen Spezialkurs einzustellen. DCS ist ein relativ seltenes Phänomen ([dazu gibt es ein ganzes Kapitel „Statistik ...“](#)), bei Sport-TG tritt es ca. 1 - 4 x pro 10.000 TG auf. Davon sind ca. 50 % durch Protokoll- / Regelverletzungen bedingt. Wenn irgendein Idiot die Aufstiegswarnungen seines Tauchcomputers mißachtet, zur falschen Zeit das falsche Gas atmet (oder atmen muß wegen Fehler der Top Side, wie z.B. am 7.8.1945 im tragischen Fall des armen Arne Zetterström), seine Tabellen-Planungen oder run-times irgendwie anders korrumpiert, sprechen die Dekompressionsforscher von „deserved hit“, d.h. einer „verdient“ erworbenen Dekompressions-Krankheit. Dagegen ist kein Kraut gewachsen, dieser Kurs hier schon gleichgarnicht. Aber die anderen 50 %, die „undeserved hits“, also diejenigen DCS Fälle, bei denen alles nach Vorschrift ablief und trotzdem in der Kammer endeten: um die wollen wir uns kümmern, und, hoffentlich, nach Abschluß diese Kurses genügend Spezialisten-Wissen, Ideen und Handlungsanleitungen propagieren um damit die Rate ganz individuell nochweiter nach unten zu drücken!

Gleichzeitig soll genau dieses, aus dem Zeitraum des 19. Jahrhunderts bis heute, gewachsene und sehr breit gefächerte und manchmal recht mühsam zu erlangende und weit verstreute bisherige Spezialwissen in kompakter, komprimierter und verständlicher Form einem weiteren Kreis zugänglich gemacht werden. Da manche Themen wiederholt, aber unter anderen Aspekten und auch zeitlichen Horizonten dargestellt werden, ist hierbei auch eine historische (Weiter-)Entwicklung zu beobachten. Als zusätzlicher Hintergedanke steht die kontinuierliche Weiterentwicklung von Dekompressionsalgorithmen und Desktop Deco Software durchaus im Raum. Darüberhinaus wäre es schön, wenn wir hier eine solide Wissensbasis vermitteln könnten um damit gut ausgebildete Berufs-, Militär- oder auch TEC-Taucher zu befähigen, praktische Erfahrungen und Verbesserungen in die theoretische Welt der Dekompressionsforscher zu spiegeln.

Zum Thema „Deko“ noch ein paar pointierte (☺) Aussagen:

1. **„Es gibt keine Nullzeit Tauchgänge!“ (Dr. Bernd Aspacher (⚓ ' τ, (*) G-Tech Konferenz 16.11.2002, Esslingen)**
2. **„Every Dive is a Decompression Dive!“ (ALBI, CE 1985 in Elat / Israel(**))**
3. **... because at the time the Navy had decided you couldn't do decompression diving. Somehow, it was inherently dangerous, and the only way you could do decompression diving was if the country itself was under attack. (Dr. Edward Thalmann, Naval Forces under the Sea: The Rest of the Story [113], p. 68**
(Als ca. 1979/80 der Real-Time Algorithmus für die const.-pO₂ Tabellen für den MK 15 Rebreather eingeführt wurden.)
4. **There is really no such thing as a “no-decompression” dive. (Alex Brylske, [121] “Beating The Bends”, p. xii)**

(sinngemäße Interpretationen der obigen „grünen Sprüche“ 2 – 4:

2. JEDER TG ist ein Deko-TG!!!
3. ...damals hatte die USN entschieden, daß du keine Deko-TGs machen durftest. Irgendwie muß es prinzipiell gefährlich gewesen sein, der einzige Weg, Deko-TGs zu machen war, wenn das ganze Land angegriffen wurde.)
4. Also, so was wie ein „Nullzeit-TG“ gibt es überhaupt nicht!!

Damit ist zum Einen die statistische Natur von Dekompressionskrankheiten gemeint, zum Anderen die Tatsache, daß jeder Aufstieg zwangsläufig eine Dekompression bedeutet, vor allem wenn auch die vorgeschriebene/sinnvolle maximale Aufstiegsgeschwindigkeit eingehalten wird! Das peinlich genaue Einhalten einer Dekompressionsvorschrift (sei es aus einer Deko-Tabelle oder die Anzeige auf dem Tauchcomputer) schützt niemanden vor DCS! Dieses mehr oder weniger zufällige Verhalten ist ein wesentlicher Unterschied zu anderen Tauchunfallarten, wie z.B. dem relativ plötzlichen Auftreten einer Konvulsion durch Sauerstoffintoxikation bei pO₂ = 4,0 Bar oder der Bewußtlosigkeit bei einem Sauerstoffpartialdruck von weniger als 0,1 Bar.

Die Dekompressionsvorschriften beruhen eher auf Erfahrungen denn auf nachrechenbaren Tatsachen. Als abschliessendes Beispiel mag die Verkürzung der Nullzeiten dienen, auch als Veranschaulichung des Verfalldatums vermeintlich gesicherten Wissens:

- U.S.Navy Tabelle (1965): 30 m / 25 min.
- ZH-83 (Bühlmann): 30 m / 20 min.
- Deco 2000 (2000): 30 m / 15 min.

Die geschilderten Unkenntnisse, die statistischen Verhaltensweisen sowie die noch recht junge Disziplin der hyperbaren (Überdruck-) Medizin läßt uns gemeinsam folgenden Schluß ziehen, der auch als Motto über diesem Spezialkurs stehen könnte: wir haben es hier weniger mit einer exakten Wissenschaft zu tun, dafür eher mit einer Kunst und gesundem Menschenverstand, halbwegs sinnvolle Deko-Empfehlungen zu formulieren!

“SWAG’s: this might be a Scientific Way At Guessing!“
R. W. Hamilton, The Proceedings of the 1990 Hypobaric Decompression Sickness Workshop, p. 208

(sinngemäß: „WWW: dies könnte ein Wissenschaftlicher Weg zum Würfeln sein!)

Weiterhin finden recht zahlreiche Ergebnisse aus verwandten Zweigen der hyperbaren Medizin Eingang in diese Domaine: diese stammen aus Forschungen mit [Caisson \(Tunnel\)-Arbeitern](#) und Fliegern. Dem prinzipiellen Unterschied in den Tauchbedingungen zwischen Caissonarbeitern und (Sport)-Tauchern ist ein eigener Abschnitt gewidmet.

Resultate aus der Fliegerei bzw. Raumfahrt wollen wir hier nicht berücksichtigen. Zum einen sind die Druck- und damit die Risikoprofile ja komplett anders: zu Beginn des Tauchganges, beim abtauchen und der Grundphase herrscht i.d.R. kein DCS-Risiko, erst dann beim auftauchen, gegen Ende des TGs. Beim Fliegen bzw. bei EVA's (extra vehicular activity) der Raumfahrer setzt bereits zu Beginn der Mission die Druckentlastung und damit auch das Risiko ein: hierbei werden nämlich i.d.R. bei Atmosphärendruck gesättigte Versuchspersonen einem (relativ plötzlichen) Unterdruck (z.B.: von 1,0 auf 0,2 Bar bei einem Druckverlust in der Kabine) ausgesetzt.

**“Es gibt auch Antipoden: unser “Unten” ist ihr “Oben”.
Diogenes Laertius: Pythagoreische Kosmologie, 3. Jh. BCE**

Dies wird als „[explosive Dekompression](#)“ bezeichnet. Das Druckverhältnis von 5 (1,0 : 0,2) sowie das Volumenverhältnis ist beim Auftauchen von 40 m Tiefe zur Oberfläche durchaus vergleichbar (Boyle-Mariotte), nicht jedoch die relative Zusammensetzung der Gase (pCO₂ und pH₂O im Gewebe sind relativ ungeändert, nicht jedoch der pN₂ der mit der Höhe naturgemäß abnimmt) sowie die absolute Menge der bewegten Inertgasmoleküle (Henry). Hierbei gleichen die Flieger / Raumfahrer eher Sättigungstauchern und nicht Bounce-/Jump-/Sprint-Divern. Desweiteren ist das zeitliche Einsetzen, die sogenannte „Latenz“ der DCS Symptome total verschieden: im Schnitt treten diese ca. 1 - 2,5 h und auch noch viel später nach der Druckentlastung auf. Auch sind die Reaktionen auf eine Rekompresionstherapie anders geartet: ganz offenbar reagieren hypobare DCS Symptome besser auf eine Rekompresion als solche durch eine hyperbare Exposition: die Erfolgsraten sind dokumentiert höher, vermutlich durch den, in der Höhe, vergleichsweise etwas geringeren N₂-Partialdruck in den Blasen. Weiterhin haben die geänderten (relativ erhöhten) pCO₂ und pH₂O Auswirkungen auf die Größe des „[Sauerstoff-Fensters](#)“ ([siehe den gleichnamigen Abschnitt weiter unten](#): es wird kleiner) und somit Einfluß auf Blasen-Größe (die werden deshalb und wegen dem reduzierten Umgebungsdruck, größer) und Stabilität (die werden aus diesem Grunde instabiler)! Aus diesem Grunde an dieser Stelle hier eine sehr gute Übersicht zu genau den o.g. Themen (Quelle: Development of an Operational Altitude Decompression Sickness Computer Model: Feasibility Study Results PE -62202F Sulaiman, Z.M., Scoggins T.E., Pilmanis, A.A., Ripley P.E., Melkonian A., Wang Y. KRUG Life Sciences, Inc. 11923 Radium San Antonio, Tx 78216, August 1995. Sowie eine weitere Quelle: Proceedings of the Hypobaric Decompression Sickness Workshop, Brooks Air Force, June 1992). Hier gibt es Graphen und Tabellen zum Sauerstoff-Fenster beim Fliegen sowie eine Zusammenfassung der wichtigsten Deko-Modelle, saubere mathematische Herleitungen sowie ca. 200 weiterführende Literaturstellen. Ebenfalls zu dieser Thematik hier zu empfehlen: Van der Aue et al.: NEDU Report 8-49 von 1949.

**“As what is above, so is below!”
Tabula Smaragdina (Esoterische Anleitung zu unserer o.g. Thematik ...)**

(sinngemäß: „Wie Oben so auch Unten!“)

Nichtsdestotrotz hier noch eine eher etwas allgemeinere Bemerkung: Deko-TG sollten nur von erfahrenen, hierfür speziell ausgebildeten Tauchern / Taucherinnen unternommen werden. Körperliche Fitness und angepaßte Ausrüstung sind ein Muß!!! Echte Deko-TG dürfen nur sorgfältig geplant, sinnvoll vorbereitet und präzise kontrolliert durchgeführt werden. Andernfalls kann das Ergebnis leicht ein Aufenthalt in der Kammer sein!

Für den interessierten Leser/Kursteilnehmer sind in den Kapiteln „[Originalliteratur](#)“ die wichtigsten grundlegenden Literaturstellen dokumentiert. Die Zusammenfassung historischer Werke und aktueller Skripte, üblicherweise alle in Englisch, sei als Startpunkt für eigene Nach-

Forschungen anempfohlen! Aus gleichem Anlaß ist auch das Kapitel „Formelkram“ etwas ausführlicher gestaltet! Als weitere Quelle diene nicht nur [die Bücherliste von:](#)

<http://www.divetable.info/books/index.htm>

(die Zahlen in eckigen Klammern [] bei den Quellen beziehen sich hierauf) sondern auch und vor allem die ca. 500 NEDU (Naval Experimental Diving Unit) Reports (seit 1915, ca. 35.000 Seiten), die Reports von NMRI sowie die ca. 51 UHMS workshops (seit 1973, ca. 10.000 Seiten), die UHMS Meetings (Underwater and Hyperbaric Medical Society) und das UHMS Underwater Symposium von 1955 – 2004 (ca. 5.800 Seiten), die sogenannten „Annual Scientific Meetings“ (ASM) der UHMS sowie Veröffentlichungen im „Journal of Applied Physiology“ (JAP); weiterhin die hervorragenden Dokumente aus dem SEA GRANT Depository (ca. 40 Dokumente mit ca. 3.800 Seiten, 150 MB (sind keine Bilder 'drinne ...): alles in allem ca. 19.000 Dateien in 1.600 Ordnern, welche ca. 38 GB Platz auf unserer Server C-Platte beanspruchen (per 10/2015)...

Auf der Gratwanderung zwischen Physik, Mathematik, Physiologie und Anatomie einerseits und Erfahrung, Nichtwissen (=Statistik) und Spekulation andererseits wünscht SubMarineConsulting allen Beteiligten viel Spaß, gute Nerven und Durchhaltevermögen.

Abschliessend noch ein Zitat von zwei Kollegen von uns (A. Marroni, D.H. Elliot, DAN Europe Foundation; aus der Veröffentlichung „Advanced Recreational Diving: Advantages and Hazards“):

“The technical diver also seems to possess a faith in the mathematical accuracy of decompression theory which is difficult to share!”

Unsere sinngemäße Übertragung: „Der technische Taucher als solcher besitzt einen starken Glauben in die mathematische Exaktheit der Dekompressions-Theorie. Dieser Glaube ist nur sehr schwer nachvollziehbar!“ (Kein weiterer Kommentar von unserer Seite ...)

Damit sind wir auch schon bei einem weiteren Fokus dieses Manuals und Kurses: die meisten Materialien der TEC-Ausbildungsorganisationen weisen bezüglich unseres Themas hier Fehler (im schlimmsten Fall), Lücken (i.d.R.) und Schwächen (bestenfalls) auf. Dem soll abgeholfen werden: betrachtet den Kurs als Ergänzung und Erweiterung dessen, was ihr in euren „deco procedures“ (oder wie auch immer der entsprechende Kurs heissen soll) gelernt habt.

Der neueste (und jetzt auch wirklich allerletzte) Fokus dieses Manuals: als erweitertes Handbuch zur DIVE Software ☺ ▲ ☺ ... (hier nochmals der Link zur DIVE Info-Seite: http://www.divetable.info/dwnld_g.htm)

Gleichzeitig sind aber auch die Grenzen unseres eiteln Tuns hier, d.h. unserer Taucherei und dieses Manuals resp. dieses Kurses aufgezeigt: wir müssen uns auf die Einsatzgebiete a) bis f) beschränken. Für die Taucher normobar bleibende Expositionen g), h) & i) spielen für uns naturgemäß keine Rolle. (Quelle der Graphik: Medical Aspects of Harsh Environments; Vann D., Vorosmarti J., Vol. 2, Chapter 30, p. 926):

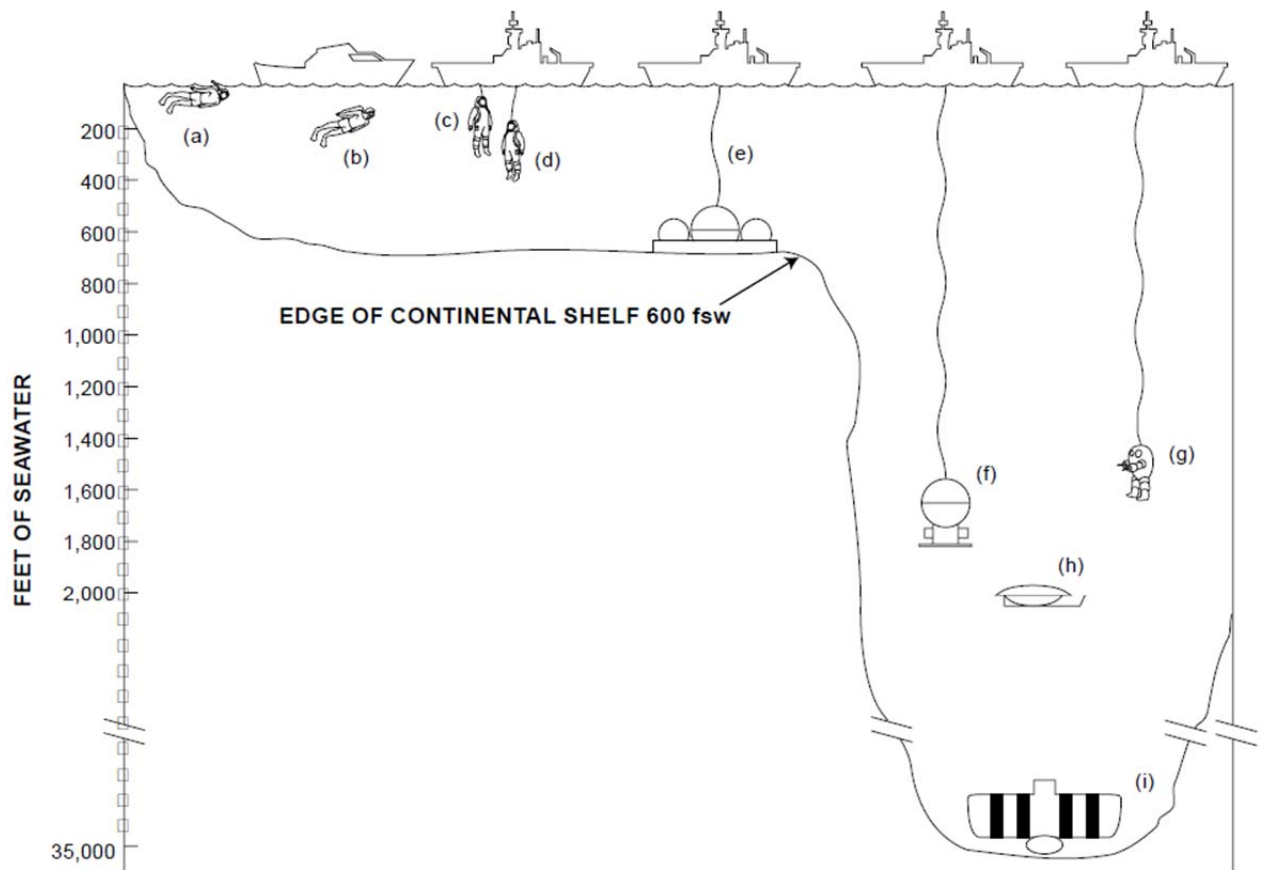


Fig. 30-1. Various forms of diving and other submarine activities in relation to ocean depth. (a) Breath-hold diving is usually not deeper than 45 fsw, although some divers can go deeper. (b) Self-contained underwater breathing apparatus (scuba) diving on air is usually limited to 130 fsw. (c) Surface-supported air diving is usually limited to 180 fsw, US Navy, or for commercial diving in the United States, 220 fsw. (d) Surface-supported helium-oxygen diving without a bell is usually to a depth of about 300 fsw, because of the problems of long decompressions; (e) the deepest habitat operation, 520 fsw; (f) the deepest saturation diving at sea operation, 1,510 fsw; (g) the deepest dive in an armored 1-atm suit, 1,440 fsw. (h) Research submersibles can operate to depths of about 2,000 fsw; (i) the bathyscaphe *Trieste* has been to the deepest-known depth of the ocean, 35,800 fsw, in the Marianas trench. Note that the ordinate, marking depth, has been shortened. If this graphic were drawn to scale, a page at least 1.26 m long would be required to display ocean depth to the bottom of the Marianas trench.

Abbildung 1-1: Einsatzgrenzen und Grenzen unseres Tuns hier

Dipl. Phys. "ALBI"
 PADI Master Scuba Diver Trainer Instructor # 33913
 SSI Advanced Instructor # 12653
 Technical Extended Range Instructor
 Esslingen, C.E. Januar 2001 (2. Version)

Stand des Dokuments: c:\dive\Manuals\Deko-Spezi\update_16\Manual_SMC_Graphiken.docx,
 vom 17.12.2015, Anzahl Seiten: 430, ohne die Anhänge, Formelsammlung etc.

Version für: <adrian.roth.schweiz@gmail.com>; von 12/2015

(**) C.E. = Common Era, engl.: also in etwa: „nach der Zeitenwende“, analog AD, jedoch ohne die dahinterstehenden religiösen Annahmen

(*) ל'ט = Se La, hebräische Abkürzung: Ehre sei seinem Andenken!



Abbildung 1-2: TEC am Bodensee

**“That’s diving, no picnic!”
David “Dudu” Vered, Elat / IL, C.E. 1986**

(sinngemäß: “Hey Leute: bewegt euch! Das hier ist echtes Tauchen und kein Kinder-Picknick!”)

5. zu den einzelnen Kapiteln ...

**“... damit der Leser wisse, welche Farbe das Glas hat, durch das er schauen muß!”
Arno Schmidt, Die Gelehrtenrepublik**

Natürlich kann diese Zusammenstellung nur ein **partielles** Bild vom aktuellen Wissensstand, von aktuellen Tabellen, Computern und Experimenten und Veröffentlichungen liefern. Die Auswahl ist durchaus subjektiv geprägt. Letzten Endes ist die didaktische Aufbereitung sowie die Brauchbarkeit für einen Spezialkurs und natürlich der Nutzen für das praktische Tauchen die Maxime. Sicherlich spielt unsere Erfahrung in –zig tausenden von TG, mit vielen, vielen Computern und fast allen gebräuchlichen (und ungebräuchlichen) Tabellen und Gasmischen eine Rolle. Nichtsdestotrotz haben wir versucht, eine relativ umfassende Darstellung zu liefern.

Im Kapitel „[Handwerkszeug](#)“ werden in loser Folge die wesentlichen Begriffe eingeführt und lexikonartig erläutert. Diese Begriffe tauchen dann immer wieder auf, hauptsächlich bei den „[Modellen](#)“. Dort werden die zentralen Dekompressionsmodelle in knapper und, so es ging, nicht-mathematischer Form erklärt. Diese Darstellung wurde bewußt so gewählt, da jedes der angeführten Modelle mit einem immensen Formelapparat ausgestattet ist und jeweils für ein mehrtägiges Spezialseminar reichen würde. Für Formelfreaks gibt es das spezielle Kapitel „[Formelkram](#)“ im Anhang welches hauptsächlich die ZH-L12/16 Formeln zusammenstellt sowie die Koeffizienten der älteren Perfusionsmodelle und die wichtigsten Formeln zum „tiny“ RGBM,

also den RGBM Modellen, die auch in handelsüblichen Tauchcomputern bzw. den üblichen Desktop-Decosoftwares laufen (diese Modelle werden auch: „modified RGBM“, „recreational RGBM“, „folded over ZH-L“, oder auch „Haldane imbedded“ bezeichnet).

Ist ein Thema aus dem „Handwerkszeug“ durch einen Befehl oder eine Prozedur über unser Tauchgangsimulationsprogrammchen „DIVE“ abzubilden, erscheint am Ende des Abschnitts ein griechisches Delta (für D wie „DIVE“): (Δ).

Wir werfen auch einen Blick hinter die physiologischen Kulissen, d.h. ins Innere des Körpers. Ein paar Details nehmen wir mit und werden damit sofort die bereits geschilderten Unzulänglichkeiten und Vereinfachungen der Modelle viel besser verstehen.

Die „[Merkwürdigkeiten](#)“ und auch die „[statistische Absicherung](#)“ sowie die „[Grenzen der Modelle](#)“ sowie die „[Verringerung von Risiken](#)“ sind einfache Listen, zunächst pure Aufzählungen verschiedener Fakten: diese werden dann im Kurs ausführlich diskutiert da ein breiter Raum für Interpretationen geboten wird.

Die tatsächliche Durchführung wird dann in „[Dekompression in der Praxis](#)“ vorgestellt, mit den „Notfällen“ und abschliessend den üblichen professionellen „[Rekompressionstechniken](#)“ mittels einer Deko-Kammer.

Zwischenzeitlich (2012) ist ein ganz neues Kapitelchen hinzugekommen: [Sättigungstauchen](#). Diese relativ alten Methoden aus den Zeiten des kalten Krieges rücken durch die ganz aktuell weiter zunehmende Tiefen von Caisson-/Tunnelarbeiten wieder in den Vordergrund.

Vielleicht abschliessend noch eine weitere Vorwarnung: dies ist **kein (sic!) 100%** wissenschaftlicher Text, sondern ein Zusammenstellung dessen, was zur Zeit aktuell und geprüft bzw. manchesmal auch bewährt ist: es soll ein (wenigstens halbwegs) lesbares Manual für Tauchschüler darstellen und keine Doktorarbeit! Aus diesem Grunde haben wir nicht für jede Textstelle und jedes Zitat die entsprechende Quelle erwähnt, sondern nur bei einigen ganz wenigen und zentralen Aussagen! Damit ersichtlich ist, welche Dinge wir uns nicht aus den Fingern gesaugt haben, sind die Zitate und Bilder üblicherweise in der Originalsprache geblieben... (Na ja: so war das zumindest in der Anfangszeit, so von 2000 – 2010, gedacht. Nachdem sich aber die Anzahl der Nachfragen: „Wo habt ihr dieses denn her? ... und jenes?? Wo kann ich noch mehr Details nachlesen???“ gehäuft hatten, haben wir uns entscheiden, die „flüssige“ Lesbarkeit zugunsten einer klareren Quellenlage zu opfern ...und ein paar weitere, insbesondere auch historische, Quellen zu nennen. Stand 2012 haben wir zusätzliche 250 Quellen genannt. Allerdings hat das nicht ganz 100%ig geklappt, nachdem einiges innerhalb der letzten 10 bis 15 Jahre irgendwo in den Weiten des WWW verschwunden ist ... Sachdienliche Hinweise, die zur Ergreifung der einen oder anderen unklaren Quelle führen, werden wir freundlich registrieren

Im Gegenzug, um das Ganze ein bisschen spannender zu machen, haben wir etwas Prosa eingefügt, erweitert um [Historische Bemerkungen], ein paar thematisch nicht ganz so eng verwandte [Exkurse] und noch mehr „[grüne Sprüche](#)“. Diese gehören u.U. auch nicht direkt zum Thema, sind aber oft als Hintergrundinfo oder als Stimmungsbild oder einfach auch zur Abrundung bzw. zur heiteren Auflockerung der „trockenen“ Materie nicht ganz unnützlich. Deshalb sind auch die Übersetzungen aus dem Englischen keine wortwörtlichen Übertragungen sondern eher atmosphärisch stimmige Interpretationen die auch etwas über den Kontext preisgeben. Zusätzlich haben wir ca. 150 dokumenten-interne Hyperlinks zur leichteren Nachverfolgbarkeit eingepflegt sowie Inhaltsverzeichnisse der (ca. 235) Abbildungen, der (ca. 65) Tabellen sowie der (ca. 80) Formeln.

Im Anhang findet ihr auch eine paar kleine Tabellen, sicherlich nicht ganz vollständig, mit den Übersetzungen der hier vorkommenden Fachausdrücken mit den (meist) griechischen Wurzeln sowie der [englischen Medizin-Begriffe](#). Gleichzeitig versuchen wir, die englische Tauch-

Terminologie einzuführen: üblicherweise in Klammern (...) hinter dem deutschen Fachbegriff, so es einen sinnvollen gibt. Bei Worten wie „back gas“ oder „stage“ o.ä. verbleiben wir bei dem einfacheren und deutlicheren Original.

Bottom Line: es werden hier jede Menge unterschiedlichster Theorien und Methoden, Tabellen und Prozeduren vorgestellt: zunächst kommentarlos! Es wird auch nicht der Versuch unternommen, das eine über das andere zu erheben oder gar eine Empfehlung auszusprechen! Ganz das Gegenteil soll erreicht werden: nämlich mit der hier dargebotenen breiten Basis eine persönliche und unabhängige, aber fundierte Meinung zu entwickeln und dann eine selbstständige Entscheidung zu treffen (und nicht etwa eine die durch Verbands-Scheuklappen oder Ausbildungs-Dogmen bzw. Kurs-Brimborium und Plastik-Kärtchen beeinflusst wird ...)

Nochamal zur gefälligen Erinnerung: wir reden hier zwar viel über „Modelle“, jedoch sind diese „Modelle“ hier eher Rechenvorschriften im Sinne einer Inertgas-Buchhaltung für Kompartimente. Auch ganz ausgefeilte Rechenvorschriften (Algorithmen) sollten uns nicht über die Tatsache hinwegtäuschen, daß es sich nicht um ein Modell im streng wissenschaftlichen Sinne handelt. Ein Modell welches diesen Ansprüchen genügt, müßte in der Lage sein, die Vorgänge bei der Blasenentstehung mittels „ersten Prinzipien“ abzuleiten und Vorhersagen zu machen, wo und wann Blasen entstehen und welche Auswirkungen diese haben, bzw. welche Inertgasdosis ab welchem Druckgradient wann und wo und welche DCS Symptome hervorrufen wird: **keines** der hier besprochenen „Modelle“ taugt hierzu! Nochmals: die Deko-Empfehlungen beruhen ausschließlich auf Erfahrung. Das wollen wir nicht vergessen, sonst fallen wir einem Phänomen anheim, welches Hills (B.A.) schon vor langer Zeit als „**Computer Narcosis**“ bezeichnet hat.

**“The only constant in DCS research remains its mystifying variability!”
Paul Weathersby**

(sinngemäß: „Das einzig wirklich konstante an der DCS-Forschung ist diese geheimnisvolle Variabilität!“)

6. Voraussetzungen

**„Nur jene möchte ich zum Lesen veranlassen, die ernsthaft mit mir meditieren und ihren Geist von den Sinnen sowie von allen Vorurteilen wegführen können und wollen!“
René Descartes**

Zum Besuch des Kurses und zum genüßlichen Verarbeiten dieses Manuals solltet ihr am Besten ein bisschen technisches Englisch beherrschen und ein Tauchcomputer- / Tauchtabellen-Specialty absolviert haben (z.B. dasjenige vom TSC-ES) sowie mindestens eine Advanced EAN und/oder Technical Nitrox Zertifikation vorweisen. Habt ihr weiterhin noch eine andere TEC Zertifizierung wie TRIMIX: umso besser! Wenn ihr dann noch Spaß habt an Formeln, physiologischen Grundlagen und ein bisschen ingenieurmäßig unterwegs seid, stehen euch die Pforten zum „deco workshop“ und zu diesem Manual weit offen!!!

Grundlegende Kenntnisse, wie z.B. Symptome der Dekompressionskrankheit, Unterscheidung nach DCS I & II, AGE / VGE (Rescue Diver Niveau), Erste Hilfe bei DCS Problemen sowie Prinzipien des Umgangs mit Mischgasen und Partialdrücken, desgleichen die Handhabung (irgendeiner) Standard-Tauchtafel wird als bekannt (und gekannt!) vorausgesetzt und wird auch in diesem Kurs nicht wiederholt werden.

Als Einstieg, oder auch als Wiederholung, resp. für euch als Kontrolle ob ihr das bisher Gelernte aus euren vorigen Kursen auch anwenden könnt, soll das Quiz zum Anfang (Teil I) dienen:

beantwortet jetzt die Fragen sofort; nur mit einem Taschenrechner als Hilfsmittel, Zeitdauer max. 10 Minuten.

7. Dank / credits

**“Geister, nicht Körper irren und täuschen sich!”
Baruch de Spinoza**

Dank all denen, die mich in diesem und anderen Projekten (Computer & Dive Tables Specialty Manual, Nitrox Manual, Rebreather Manual, Dekompressions Spezialkurs, Helmtauchen) vorbehaltlos bzw. enthusiastisch unterstützt haben! Dank auch den Organisationen, die mir die copyrights zugestanden haben! Dank für die vielen Infos und Tipps die ich per e-mail erhalten habe! Dank auch an die vielen Divemaster und Instructor-Kollegen, die die Manuals probegelesen haben und sozusagen Versuchskaninchen bei meinen Kursen waren! Namentlich möchte ich vor allem erwähnen:

Jeff Nadler:

damals President DSAT, von dem ich als einer der ersten in Europa das DSAT Skript (Entwicklung und Test des RDP) erhalten habe

Max Hahn:

der mir, lange Zeit bevor der MicroBrain und dann später der DC 11 auf den Markt gekommen ist, es ermöglichte, die Koeffizienten und Nullzeiten dieser Geräte/Tabellen zu studieren

Tobias Dräger:

ehem. Productmanager Rebreather **DRÄGER DIVE**; jaha: und die gute alte DRÄGER Tabelle !!!

Yron Yariv:

NAUI Instructor, ELAT: bei meinem **ersten NITROX Kurs** auf hebräisch Anfang der 90-iger Jahre in Elat, Israel im berühmten AQUASPORT

Dave Dinsmore:

director NOAA diving program (National Oceanic and Atmospheric Administration): guter Input zum NOAA Manual Version 4

Chuck Young:

Master Diver H NSSC der United States Navy (U.S.N): für seine frohe Art, mit dem USN Manual umzugehen ...

Karl E. Huggins:

USC Catalina Hyperbaric Chamber: für seine HUGI Tabelle und Tipps und Tricks damit

Ron Nishi:

Senior Diving Scientist des DCIEM (Defence & Civil Institute of Environmental Medicine) seit 01.04.2002: Defence R & D Canada - Toronto, DRDC Toronto

den PADI Course Directors:

in zeitlicher Reihenfolge: Harald Teltschik, David Jackson, Ben (Bernd K.) Walzinger: für Support, Ideen und feedback ... Insbesondere Ben hat mich durch sein konstantes Interesse an dieser Materie seit 2002 und schließlich durch unseren gemeinsamen workshop im Februar 2006 in Phuket zu Höchstleistungen angespornt ...

GTUEM & CAISSON:

haben durch starkes & nachhaltiges Interesse auch für eine Weiterverbreitung beim Volk der Taucherärzte gesorgt; namentlich mein „Big Double Double-U“ (Willi W. = Welslau) und mein lieber JD (Prof. Dr. Jochen D. Schipke)

Und zum Beginn, und vor Allem: **Rainer Sommerkorn**: der mich in die Geheimnisse des Presslufttauchens und der U.S.Navy Tabelle in der Mitte der 70iger Jahre an meinem geliebten Sinai Strand zwischen Eilat und Ras Mohammad, eingeweiht hat. Seit dieser Zeit bin ich für das normale Leben über Wasser irgendwie verdorben ...

8. Inhaltsverzeichnis

“Wer vieles bringt wird manchem etwas bringen!“
Goethe, „Faust“

1. VORWORT / MOTIVATION	1
5. ZU DEN EINZELNEN KAPITELN	7
6. VORAUSSETZUNGEN	9
7. DANK / CREDITS.....	10
8. INHALTSVERZEICHNIS	11
9. ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	19
10. TABELLENVERZEICHNIS	24
11. FORMELVERZEICHNIS	25
12. EIN QUIZ ZUM ANFANG, TEIL I	27
13. EIN QUIZ ZUM ANFANG, TEIL II	27
14. DAS HANDWERKSZEUG	28
Partialdruck	28
Gesetz von Dalton.....	28
Inertgasaufnahme	29
Gradient	29
Gleichgewicht (engl: equilibrium)	29
Sättigung	29
Gesetz von Henry.....	30
Haldane	33
Kompartimente	36
Körpergewebe	36
Halbwertszeit	36
Exponentialfunktion.....	38
Biologische HWZ	39

Halbwertszeit, physiologische Definition von $t_{1/2}$	39
Löslichkeits- / Diffusionskonstanten (Partitions- / Permeationskoeffizienten).....	39
Verteilung des cardialen Outputs	41
Die „2:1“ Theorie.....	41
Übersättigung	42
Supersaturation Ratio (R_{SS}).....	42
tolerierte Überspannung (tolerierter Umgebungsdruck)	43
M-Wert.....	44
Druckgraph / pressure graph	45
Austauchstufen / Deko-Stufen	48
Austauchzeit / TTS / time-to-surface	48
explosive Dekompression	49
Blasen.....	52
Mikro Blasen (micro bubbles) und Silent Bubbles	52
Von der Mikro-Blase zur Makro-(DCS)-Blase	54
Physik der Blasen.....	55
3 historische Blasenmodelle.....	60
Blasenentstehung	62
Kavitation.....	62
Tribonucleation	64
Blasenkeime / Anzahl Blasen.....	66
Blasenform (reale).....	67
Sekundäreffekte von Inertgasblasen, Microparticles (MP).....	71
feedback loop	75
Doppler-Nachweis / Ultraschall-doppler-Messungen an Inertgasblasen.....	76
Doppler Grade (low, medium, high; bzw.: 0 - 4)	78
Praktische Durchführung einer Doppler-Ultraschallmessung	80
“Bubbler“	83
Zusammenhang zwischen Doppler Grade und DCS	84
DCI vs. DCS und AGE / VGE	85

DCS Typ I, II, III	85
Weitere Sekundäreffekte von Blasen	85
VGE und AGE bei Trimix TG	86
Inertgasdosis (PRT) / "deco stress"	87
Bilder von Hautsymptomen	89
Einteilung der Symptome (klassisch).....	90
Modell zur Behandlung.....	92
Pathogenesis von DCS (Schema im Überblick).....	92
Respiratorischer Koeffizient R_q	94
Ceiling.....	94
Abtauch- und Auftauchrampe	95
Leit- oder Kontrollkompartiment.....	95
Wiederholungsgruppe	96
Zeitzuschlag	97
Oberflächenpause (OFP), surface interval (SI) credit	97
Fliegen nach dem Tauchen, Bergseetauchen	98
Ganzkörper N_2 -Aufnahme	99
Ganzkörper N_2 -Abgabe.....	100
Gegendiffusion (Counterdiffusion, isobaric; ICD)	100
Innenohr DCS	105
Asymmetrische Entsättigung	107
EL Modell	107
Grahams Gesetz	109
Sauerstoff-Fenster (oxygen window).....	110
Physikalische versus chemische Lösung von Sauerstoff im Blut.....	118
Sauerstoff Kaskade (oxygen cascade).....	118
Sauerstoff Effekte	119
Lorrain Smith Effekt	119
Retention (Kohlendioxid R_c , CO_2 Retainer).....	119
Sauerstoff Vergiftung.....	120

R/L Shunt (Rechts-/Links-Shunt)	120
Spätfolgen	122
U-Boot Notaufstieg	124
Adaptation (Adaption, Aklimatisierung).....	129
Vertrauensintervall.....	130
Meyer-Overton.....	134
Atemwegswiderstand	135
15. EINIGE BESONDERHEITEN UND AUCH MERKWÜRDIGKEITEN	137
Individuelle Anfälligkeit	139
Aseptische Knochennekrose (ABN: aseptic bone necrosis, DON: dysbaric osteonecrosis).....	140
DCS und workload.....	149
Einsichten aus der DAN DSL Datenbank	151
Konditionierung vor dem Tauchen	152
16. DIE MODELLE	154
#1 Perfusionsmodelle.....	155
Weiterentwicklungen von #1 (Neo Haldane).....	160
DCIEM.....	164
M-Wert Gleichung	167
ZH-L	169
Kälteadaption	174
PMRC	177
Das „AB-Modell“	180
Das „Ein-Kompartiment-Modell“ (single-tissue)	181
„Kontinuierliche Halbwertszeiten“	182
Seriell & Parallel Kombination	183
VVAL18	184
#2 Diffusionsmodelle.....	187
#3 Thermodynamisches Modell.....	191
#4 VPM: Varying Permeability Model.....	194
#5 RGBM: Reduced Gradient Bubble Model	201

#6 TBDM: Tissue Bubble Diffusion Models	206
Gernhardt & Vann.....	206
Srinivasan & Gerth.....	209
#7 Maximum Likelihood / Statistisch basierte Tabellen	210
Zusammenstellung der Parameter:	222
#8 Hybrid-Modelle.....	223
17. PRAKTISCHER VERGLEICH IN 2 SCHRITTEN	235
RGBM Lufttabellen (für AIR: 27, 30 & 42 m, jeweils 30 & 25 min. GZ)	241
Hahn Lufttabellen (27, 30 & 42 m).....	243
18. DIE PRINZIPIELLEN GRENZEN ALLER MODELLE	245
Multikollinearität	246
19. PRINZIPIELLE SCHWÄCHEN VON PERFUSIONSALGORITHMEN BEI	247
EINEM ODER ZWEI INERTGASEN	247
Prinzipielle Anforderungen und Parameter der Modelle.....	250
Sind 16 Kompartimente besser wie 8?.....	250
20. EINE KLEINE GESCHICHTE DER ANATOMIE UND PHYSIOLOGIE	252
1. Fick'sche Gesetz	252
2. Fick'sche Gesetz	253
Kreislauf.....	254
Gefäße.....	255
Druck- und Strömungsverhältnisse	257
Versorgung der Gewebe.....	263
Gasaustausch in der Lunge:	266
Drei-Dimensionale „random walks“	268
Haldane-Effekt & Bohr-Effekt.....	271
Blutgerinnung	273
Knochen	277
Grundumsatz und Körpergewicht	277

21. DIE STATISTISCHE ABSICHERUNG DER TAUCHTABELLEN	279
Caisson / Tunnelarbeiter	282
22. DEKOMPRESSION IN DER PRAXIS	293
AMV (Oberflächen-Atemminutenvolumen)	293
Analyzer:	294
„Optimal Switch“	299
„Optimal Mix“	301
USN Standardprozeduren:	305
• Air Diving	305
• Surface Supplied Heliox	305
• Heliox const $pO_2 = 0,7$ Bar	305
• EAN const $pO_2 = 0,7$ Bar	305
• Sur-D (Surface Decompression)	305
• Sat (Saturation Diving)	305
DCIEM Standardprozeduren:	305
• Standard Air Decompression	306
• In-Water Oxygen Decompression	306
• Surface Decompression with Oxygen	306
• In-Water Oxygen Decompression	306
• Surface Decompression with Oxygen	306
• Abort Table	306
• Emergency Procedure Decompression	306
Deep Stops (tiefe Stopps)	306
USN und tiefe Stopps (170 feet, 30 min)	310
Wie geht man prinzipiell mit diesen und anderen ungetesteten Tabellen um?	314
Way points	314
Gradienten Faktoren / Gradient Factors GF	314
VGM	316
PDIS	317
Allgemeine Verringerung von Risiken	318

Optimierte Austauschstrategien / optimierte Deko.....	320
Das Copernicus Modell.....	320
Umgang mit der Sauerstoff Thematik / Ox-Tox	324
NOAA Oxygen Exposure Limits (ZNS Belastung).....	325
OTU Tabelle: Oxygen Tolerance Units; aus NOAA V4 2001, Table 3.7, S. 3-25	327
REPEX.....	328
23. JENSEITS VON 1,6	330
Tauchen mit reinem Sauerstoff: Auszug aus dem U.S. Navy Manual 14-6.....	330
Faktoren, die die ZNS-Toxizität begünstigen	335
FED.....	335
Sauerstoff-Korrektur	336
Sauerstoff-DCS (Oxygen Bends).....	337
Tauchen jenseits von 1,6	339
Pre-Breathing	344
Dekompression und Gas-Logistik bei einem 50 m TRIMIX TG.....	344
21. DEKOMPRESSIONSTRATEGIEN BEI REDUZIERTEM UMGEBUNGSDRUCK (BERGSEETAUCHEN UND FLIEGEN NACH DEM TAUCHEN)	354
22. DEKOMPRESSION BEI SÄTTIGUNGS-TAUCHGÄNGEN	359
23. DEKOMPRESSION BEI REKORD-TAUCHGÄNGEN	376
24. TECHNOLOGIE BEIM BERUFLICHEN TAUCHEN (ÜBERBLICK).....	379
25. NOTFÄLLE WÄHREND DER DEKOMPRESSION.....	387
26. REKOMPRESSIONSTECHNIKEN.....	389
Kammertabellen	395
Die USN Kammertabelle 3	397
Die USN Kammertabelle 6	399
Weitere Kammertabellen	399
HBO / HBO ₂	402
Nasse Rekompresseion (IWR, in water re-compression).....	403

Nargilah-Technik (IWR).....	404
Notfall-Dekompression oder "nachgeholte Dekompression".....	404
100 % Sauerstoff (= normobarer Sauerstoff).....	404
Medikamentöse Behandlung.....	405
Leugnen der Symptome / Stigma der Kammerbehandlung.....	405
27. DISCLAIMER / HAFTUNGSAUSSCHLUß	407
28. KLEINES LEXIKON EINIGER MEDIZIN-BEGRIFFE.....	407
Deutsch (mit den griechischen / lateinischen Wurzeln):.....	407
Englisch:	408
29. INDEX.....	410
30. ORIGINALLITERATUR (BÜCHER & VERÖFFENTLICHUNGEN).....	414
31. ORIGINALLITERATUR (SKRIPTEN).....	417
32. EINE SCHWALBE MACHT NOCH KEINEN SOMMER!	419
33. ... ODER: „DIE KLEINEN GEHEIMNISSE DER TABELLEN-BAUER“	419
34. FEHLERRECHNUNG.....	421
35. ANHANG A: DAS SAUERSTOFF-FENSTER	426
36. ANHANG B: FORMELKRAM	429
37. ANHANG C: DEKOMPRESSION BEI APNOE.....	429
38. ANHANG D: DIE „AHNENTAFEL“	429

**“ ...und da sitz’ ich so auf 100 m ‘rum und fange an zu zittern!
Ich denke: ist das jetzt HPNS oder schon Parkinson?“
ALBI, TECH AUSTRIA, CE 10/2010
(na ja: es war halt a....kalt!)**

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Einsatzgrenzen und Grenzen unseres Tuns hier	6
Abbildung 1-2: TEC am Bodensee	7
Abbildung 14-1: Kompressions- / Dekompressions Paradigma	28
Abbildung 14-2: Inertgasaufnahme und Gradient.....	29
Abbildung 14-3: $l(t)$ für N ₂ in H ₂ O	31
Abbildung 14-4: $l(t)$ für O ₂ , N ₂ , CO ₂	33
Abbildung 14-5: Tierexperimente von Siebe & Gorman, Quelle: [89].....	34
Abbildung 14-6: DCS Messung am Schaf	35
Abbildung 14-7: $p(\text{DCS})$ beim Schaf als Funktion von BF.....	35
Abbildung 14-8: exponentielle Sättigung	37
Abbildung 14-9: prozentuale Sättigung vs (t); bzw. # HWZ (# HT).....	38
Abbildung 14-10: Drei Kompartimente (% Sat. vs. T).....	39
Abbildung 14-11: Schema von Permeations- & Partitionskoeffizient	40
Abbildung 14-12: Verteilung des cardialen outputs	41
Abbildung 14-13: Verhältnisse der kritischen Übersättigungen von 5 Kompartimenten vs. Tiefe	43
Abbildung 14-14: tolerierter Umgebungsdruck vs. Gewebsdruck	44
Abbildung 14-15: M-Werte vs. Tiefe.....	45
Abbildung 14-16: Skizze Druckgraph	46
Abbildung 14-17: Druckgraph.....	48
Abbildung 14-18: 2 Bilder von Tierexperimenten.....	49
Abbildung 14-19: Allometrischer Graph I.....	50
Abbildung 14-20: Allometrischer Graph II	51
Abbildung 14-21: Übersicht über Blasenwege im Körper (grundsätzlich).....	53
Abbildung 14-22: DFU zum Nachweis von Mikro-Blasen.....	54
Abbildung 14-23: Von der Mikro-Blase zur Makro-Blase	55
Abbildung 14-24: Druckverhältnisse an einer kugelförmigen Gas-Blase	57
Abbildung 14-25: Blasenradius r , critical vs. p	58
Abbildung 14-26: Simulation der zeitlichen Entwicklungen $p(t)$ und $r(t)$ bei prä-existierenden Blasen	59
Abbildung 14-27: Wachstum und Kollaps einer (Kavitations-) Blase.....	60
Abbildung 14-28: die drei historischen Blasenmodelle.....	61
Abbildung 14-29: Modell der Blasenentstehung	62
Abbildung 14-30: mechanische Beschädigung durch Kavitationsblasen.....	63
Abbildung 14-31: Kavitationsblasen am Schiffspropeller	64
Abbildung 14-32: Blasenentstehung im Wasserglas I.....	65
Abbildung 14-33: Blasenentstehung im Wasserglas II	66
Abbildung 14-34: Druckstoß und Anzahl der Blasenkeime	67
Abbildung 14-35: Inertgasblase nach explosiver Dekompression (Photo v. Mikroskop)	67
Abbildung 14-36: reale Blasenform, die I.	68
Abbildung 14-37: reale Blasenform; die II: Photo und Modell.....	69
Abbildung 14-38: diverse Blasenformen und einhergehende Gewebsschädigungen	70
Abbildung 14-39: Kollaps einer realen Blase.....	70
Abbildung 14-40: Modell für Gefäßverstopfungen durch Blasen.....	70
Abbildung 14-41: Blasenwege und Reaktionen im Blut-Gefäß.....	71
Abbildung 14-42: Schädigungen im Blutgefäß (Skizze aus HE, Chpt. 30, p.943)	72
Abbildung 14-43: mögliche physiologische Reaktionen im Blutgefäß.....	73
Abbildung 14-44: Schema zu MP, den Mikro-Partikeln (microparticles)	73
Abbildung 14-45: MP und Zellreaktionen bei deco stress.....	74
Abbildung 14-46: MP als Blasenkeime, druckabhängig!	75
Abbildung 14-47: „feedback“ Schleife einer Inertgas (N ₂)- Blase.....	75
Abbildung 14-48: Ultraschall-dopplermessung (CW) mit Versuchskaninchen (re. im Bild ☺) im TSC ES....	77
Abbildung 14-49: Nachweisgrenzen von Doppler-Messungen.....	78
Abbildung 14-50: Doppler-Grades vs. Time (DAN Messung).....	79
Abbildung 14-51: freie Gasphase vs. Doppler Grade (Flook Model)	80
Abbildung 14-52: Blutkreislauf mit dem Ort der Doppler-Messung (nach Hills, B.A.)	81
Abbildung 14-53: Ultraschall-Dopplermessgerät: li. oben, die Meßsonde; unten, die Auswerteeinheit; re.: das akustische Kontaktgel	82
Abbildung 14-54: 2D Echobild von VGE im Herz	83
Abbildung 14-55: Modell-Experiment für "Bubbler "	84
Abbildung 14-56: % DCS vs. Bubble Grade vs. Nitrox / Heliox.....	84

Abbildung 14-57: Schema: DCI / DCS / AGE	85
Abbildung 14-58: VGE & AGE nach Trimix TG	86
Abbildung 14-59: % DCS vs. N ₂ / He.....	87
Abbildung 14-60: PRT / EF aus der DAN DSL Datenbank	88
Abbildung 14-61: deco stress index I (von DCIEM/DRDC).....	88
Abbildung 14-62: Drei Bilder von DCS Hautsymptomen	89
Abbildung 14-63: Kategorien von DCS (nach Hills, B.A.)	91
Abbildung 14-64: Modell zur Kammerbehandlung (nach Hills, B.A.).....	92
Abbildung 14-65: Pathogenese von DCS (Überblicksschema)	93
Abbildung 14-66: Simulation: Drei Kompartimente vs. Zeit bei TG: 70 m / 10 min.....	96
Abbildung 14-67: DIVE Dekoprognose mit GF	96
Abbildung 14-68: USN Leitkompartiment in der OFP.....	98
Abbildung 14-69: M(t) vs. Bergsee / Flughöhe	99
Abbildung 14-70: ICD Simulation I	101
Abbildung 14-71: ICD Hautsymptome (nach [62])	101
Abbildung 14-72: ICD: Hautoberfläche, S. 439.....	102
Abbildung 14-73: ICD: Gewebe, S. 441.....	102
Abbildung 14-74: ICD Simulation II (DIVE)	103
Abbildung 14-75: ICD Simulation III (DIVE).....	103
Abbildung 14-76: ICD Simulation IV (DIVE).....	104
Abbildung 14-77: ICD Simulation V	105
Abbildung 14-78: ICD: Modell für Innenohr	106
Abbildung 14-79: Simulation Innenohr / Gehirn für einen 30 m TG, 25 min	107
Abbildung 14-80: Schema; E vs. E / E-L.....	108
Abbildung 14-81: verschiedene Gaskinetiken	109
Abbildung 14-82: die Größe des Sauerstoff-Fensters	113
Abbildung 14-83: pO ₂ Gradient an Wunden, Quelle: [162], S. 33	115
Abbildung 14-84: Sauerstofflöslichkeit in Vollblut und Blutplasma (chem. & physikal.).....	118
Abbildung 14-85: die Sauerstoff-Kaskade	119
Abbildung 14-86: verschiedene Ox-Tox Effekte.....	120
Abbildung 14-87: PFO (Schema).....	121
Abbildung 14-88: Modell für pulmonalen R-/L Shunt	122
Abbildung 14-89: Hirn-Läsionen.....	122
Abbildung 14-90: Zwei Röntgenbilder von DON.....	123
Abbildung 14-91: Uboot-Notaufstiegsübung im Tauchturm	124
Abbildung 14-92: Tauchturm von Fort Blockhouse, Hampshire, UK	125
Abbildung 14-93: Uboot Notaufstieg	125
Abbildung 14-94: Uboot Notausstieg (Trainingsturm der USN)	126
Abbildung 14-95: Risikofunktion für Uboot-Notaufstiege	127
Abbildung 14-96: Parameter für die Risikofunktion (Quelle: ASM 2015, A13)	127
Abbildung 14-97: P(DCS) für die CNS-DCS	128
Abbildung 14-98: Schemazeichnung Tauchturm (Quelle: HAUX)	129
Abbildung 14-99: Adaption / Adaptation von Caisson-Arbeitern; %DCS vs. TG.....	130
Abbildung 14-100: Binominal-Verteilung für %DCS mit 0, 1, 2 Hits vs. # TG.....	132
Abbildung 14-101: ED01 --> ED50 bei USN und RN.....	134
Abbildung 14-102: Atemwegswiderstand bei 2 Gasmischungen	135
Abbildung 15-1: # DCS Hits unter verschiedenen Situationen	138
Abbildung 15-2: P DCS bei sehr flachen TG.....	139
Abbildung 15-3: Skelett mit Bereichen für DON/ABN.....	141
Abbildung 15-4: DON: vorgeschlagener Mechanismus.....	142
Abbildung 15-5: Querschnitt durch einen Knochen, 43th. UHMS workshop, p.70.....	143
Abbildung 15-6: Wirkungsweise und Röntgenbild von DON	144
Abbildung 15-7: Regelkreis ABN / DON.....	145
Abbildung 15-8: DON bei japan.Tauchern (ASM 2015)	146
Abbildung 15-9: Klientel der o.g. DON Untersuchung (ASM 2015)	147
Abbildung 15-10: 2 Kernspin-CTs einer DON an der Hüfte.....	148
Abbildung 15-11: # DCS und workload	149
Abbildung 15-12: P DCS vs. Zeit und Belastung.....	150
Abbildung 15-13: "Null"-Zeiten und O ₂ -Verbrauch (DIVE).....	151
Abbildung 15-14: M-Werte bei 165 DCS-Fällen (DSL Datenbank)	152
Abbildung 15-15: Konditionierung und Blasenanzahl	152
Abbildung 16-1: die üblichen Perfusions- und Diffusionsstrecken.....	155

Abbildung 16-2: # Kompartimente & HWZ-Spektrum vs. Zeit	159
Abbildung 16-3: die 6 Koeffizientenmatrizen in DIVE.....	160
Abbildung 16-4: Haldane Modell mit 5 parallelen Kompartimenten.....	161
Abbildung 16-5: DCAP Stammbaum.....	162
Abbildung 16-6: OSI Druckkammer; 1965 bei Sättigungs-TG auf 200 m.....	163
Abbildung 16-7: OSI Logo Abbildung 16-8: OSI Lab.....	163
Abbildung 16-9: DCIEM Modell mit 4 seriellen Kompartimenten	164
Abbildung 16-10: Dekompressions-Modelle: Seriell vs. Parallel	165
Abbildung 16-11: M vs. Umgebungsdruck für 5 Kompartimente.....	167
Abbildung 16-12: Fit über alle M_0 -Werte	168
Abbildung 16-13: Fit über alle ΔM -Werte	169
Abbildung 16-14: Kompartiment mit HWZ = 27 min.	170
Abbildung 16-15: a-Koeffizienten vs. HWZ.....	172
Abbildung 16-16: b-Koeffizienten vs. HWZ	173
Abbildung 16-17: Ptiss,tol @ Pamb 1 Bar (mit ZH-L 16 Koeffizienten).....	173
Abbildung 16-18: Temperaturverlauf in der Nordsee.....	175
Abbildung 16-19: MPTT vs. Stopp-Tiefe für He.....	176
Abbildung 16-20: PMRC mit DIVE	177
Abbildung 16-21: Hauttemperatur (geschätzt) vs. Doppler-Grade.....	177
Abbildung 16-22: Pt, tol bei He / N2 vs. HWZ nach Bühlmann.....	178
Abbildung 16-23: 8 Kompartimentmodell mit variabler Perfusion (unten).....	179
Abbildung 16-24: die Hyperfläche des Ein-Kompartiment-Modell	182
Abbildung 16-25: Hyperfläche der kontinuierlichen HWZ	183
Abbildung 16-26: LE und EE Entsättigung (mit X-over point).....	184
Abbildung 16-27: P(DCS) für VVAL18 und USN1957.....	186
Abbildung 16-28: britisches Ein-Kompartiment-Diffusionsmodell (slab = Platte, Scheibe, Stab)	188
Abbildung 16-29: Inertgaskonzentration vom Ort x und der Zeit t.....	191
Abbildung 16-30: Übersichtsskizze des Thermodynamischen Modells (nach Hills, B.A.)	193
Abbildung 16-31: Dekompressionsprofil aus dem thermodynamischen Modell.....	193
Abbildung 16-32: Vergleich gemessenes thermodynamisches Profil mit USN Tabelle	193
Abbildung 16-33: Thermodynamischer Ansatz (Hills).....	194
Abbildung 16-34: Dekompressionsprofil VPM vs. USN	195
Abbildung 16-35: Pss vs. t: vom Keim zur Blase.....	196
Abbildung 16-36: Modell der Blasenoberfläche	197
Abbildung 16-37: Modell des Surfactant Moleküls.....	198
Abbildung 16-38: VPM vs. USN Profil.....	199
Abbildung 16-39: Anzahl Blasenkeime vs. Radius.....	200
Abbildung 16-40: Wiederholungsfaktor vs. OFP.....	202
Abbildung 16-41: Regenerationsfaktor vs. Zeit.....	202
Abbildung 16-42: reversed profile Faktor vs. Tiefe des Wdh.-TG	203
Abbildung 16-43: Reduktion von G0.....	204
Abbildung 16-44: Perfusion und Diffusion an der Gasblase	206
Abbildung 16-45: P DCS vs. Gasmenge (Dosis).....	208
Abbildung 16-46: TBDM Simulation bei einem SAT TG.....	209
Abbildung 16-47: P DCS über Dosis (allgemein)	212
Abbildung 16-48: P DCS über Grundzeit bei NDG-TG @ 60 ft.	213
Abbildung 16-49: Hyperfläche einer Risikofunktion vs. Stoppzeiten	214
Abbildung 16-50: P DCS und Risikofunktion vs. OFP	217
Abbildung 16-51: P DCS für 3 ähnliche 60 fsw-TG Profile.....	218
Abbildung 16-52: Risikofunktion für verschiedene Gaskinetiken.....	219
Abbildung 16-53: Risikofunktionen für ein 3 Kompartiment-Modell.....	220
Abbildung 16-54: P DCS Möglichkeiten bei DIVE (Bsp. Trimix TG).....	221
Abbildung 16-55: P DCS Möglichkeiten bei DIVE (Luft TG)	222
Abbildung 16-56: Fit Behnke / GFM.....	224
Abbildung 16-57: 3CG Model: Kompartimentstruktur	225
Abbildung 16-58: P(DCS) Vergleich 120 fsw, 30 min bei 3CG und anderen.....	226
Abbildung 16-59: Levitt's PBPK (Parallele & Serielle Kompartimente).....	229
Abbildung 16-60: PBPK: P tiss vs. T.....	230
Abbildung 16-61: Serielle + 8 parallele Kompartimente	231
Abbildung 16-62: PBPK Modell, Schema nach Bischoff & Brown (1966).....	232
Abbildung 16-63: Articular Bends Model.....	233
Abbildung 16-64: CS2T Schema.....	234

Abbildung 16-65: Perfusions-Diffusions Modell (nach Perl).....	234
Abbildung 17-1: Maxe-Hahn-Spezialtabelle (aus meinem privaten Archiv).....	244
Abbildung 18-1: Doppler Grade vs. Alter und Geschlecht.....	246
Abbildung 18-2: Doppler Grade vs. Reisedauer (li.) und max. Tiefe (re.).....	247
Abbildung 20-1: Geometrie eines Krogh-Zylinders.....	254
Abbildung 20-2: Schema Lungen- und Körperkreislauf.....	255
Abbildung 20-3: Aufbau von Blutgefäßen.....	256
Abbildung 20-4: Endothel vs. Muskel & chem. Faktoren.....	257
Abbildung 20-5: Strömungsgeschwindigkeit und Druckverhältnis im Blutkreislauf.....	258
Abbildung 20-6: Geschwindigkeitsprofil in einem Blutgefäß.....	259
Abbildung 20-7: qualitative Skizzen zur Blutviskosität & HK.....	260
Abbildung 20-8: Laminarer und turbulenter Blutfluß.....	261
Abbildung 20-9: Prinzipskizze: Totraum / Ablösezone im Blutgefäß.....	262
Abbildung 20-10: Viskosität von Blut & HK Wert.....	263
Abbildung 20-11: Schema: Kapillarbett.....	264
Abbildung 20-12: Details zum Blutdruck in beiden Kreisläufen.....	265
Abbildung 20-13: Fraktale Dimensionen von Ventilation / Perfusion in der Lunge.....	266
Abbildung 20-14: Schema: Alveole.....	267
Abbildung 20-15: Schema: Geometrie für 3-dim "random walks".....	268
Abbildung 20-16: Gasaustausch am roten Blutkörperchen.....	270
Abbildung 20-17: Teil (ein Viertel) eines Hb-Moleküls.....	270
Abbildung 20-18: Hb vs. PO ₂ (PCO ₂ und Temperatur).....	271
Abbildung 20-19: Schema: Haldane und Bohr-Effekt.....	272
Abbildung 20-20: Physikal. & chem. Lösung von CO ₂	272
Abbildung 20-21: menschlicher Halsbereich mit Rezeptoren.....	273
Abbildung 20-22: Übersicht über mögliche Blasenwege.....	274
Abbildung 20-23: Schema: Blasen im AB-Modell.....	274
Abbildung 20-24: AB Modell und BORA.....	275
Abbildung 20-25: Schema: Blasenwege und DCS.....	276
Abbildung 20-26: Bau eines Oberschenkelknochens.....	277
Abbildung 20-27: Grundumsatz und Körpergewicht (nach Kleiber).....	278
Abbildung 21-1: DCAP 170 fsw / Air.....	281
Abbildung 21-2: historischer "Caisson" zum Brückenbau, S. 342.....	283
Abbildung 21-3: diverse Überdruckschleusen.....	287
Abbildung 21-4: aktueller Caisson (Querschnitt).....	288
Abbildung 21-5: echter historischer Caisson für Hafen-Arbeiten, S. 342.....	289
Abbildung 21-6: historische Rekompensationskammer an Bord eines Schiffes, S. 342.....	290
Abbildung 21-7: Tunnelarbeiter in der Deko-Kammer.....	291
Abbildung 21-8: DCAP Tmx für Tunnel/Caisson.....	292
Abbildung 22-1: 2 Handheld Analyzer.....	294
Abbildung 22-2: 2 Mischgasanalyser.....	296
Abbildung 22-3: Stage Tank: Rigging & Beschriftung.....	298
Abbildung 22-4: Wieviele Flaschen?.....	298
Abbildung 22-5: Optimal Switching Time.....	299
Abbildung 22-6: Latenz beim Gaswechsel.....	300
Abbildung 22-7: optimaler Mix N ₂ vs. He.....	300
Abbildung 22-8: Low / High Density Bubbles vs. N ₂ / He.....	302
Abbildung 22-9: O ₂ -Trapez ("Affenschaukel").....	302
Abbildung 22-10: zeitliche Entwicklung von Gasblasen (He, Ar, N ₂).....	304
Abbildung 22-11: # Blasen vs. Stopptiefe (Andi Pilmanis).....	307
Abbildung 22-12: # Blasen vs. OFP & Aufstiegsgeschwindigkeit.....	308
Abbildung 22-13: Verschiedene "deep stop" Strategien.....	309
Abbildung 22-14: Druckgraph und GF.....	315
Abbildung 22-15: Dekoprognose (Tmx-TG) mit GF bei DIVE.....	316
Abbildung 22-16: "deep stop" Vorschläge bei DIVE (Tmx 20/30/50).....	318
Abbildung 22-17: Übersichtsschema COPERNICUS.....	321
Abbildung 22-18: COPERNICUS Hyperfläche "deco stress".....	322
Abbildung 22-19: Copernicus TTS 24 m / 70 min.....	323
Abbildung 22-20: Modell: Blase an Gefäßwand.....	324
Abbildung 22-21: NOAA Ox-Tox Limits.....	326
Abbildung 22-22: 4%-Abnahme der Vitalkapazität.....	328
Abbildung 23-1: Pulmonale- & ZNS-Ox-Tox Limits vs. Zeit.....	331

Abbildung 23-2: Versuchsaufbau von Donald.....	332
Abbildung 23-3: 2 Ox-Tox Kurven (Donald).....	334
Abbildung 23-4: FED.....	335
Abbildung 23-5: O2-Korrekturen in DIVE	336
Abbildung 23-6: O2-Korrekturen	337
Abbildung 23-7: Deko-Kammer nach einem Brand	338
Abbildung 23-8: Lambertsen O2-Schema.....	339
Abbildung 23-9: DCAP O2 Limits.....	340
Abbildung 23-10: Extrapolation von NOAA und USN Ox-Tox Limits.....	341
Abbildung 23-11: CNS-O2 Limits, Bereich von 0,55 bis 2,5 atm.....	343
Abbildung 23-12: %ZNS Ox Tox bei 6,1 m.....	352
Abbildung 23-13: %ZNS Ox-Tox bei 6,4 m.....	352
Abbildung 23-14: %ZNS Ox-Tox bei 6,0 m.....	352
Abbildung 23-15: %ZNS Ox-Tox bei 6,2 m.....	352
Abbildung 23-16: Programmierfehler, die I.....	353
Abbildung 23-17: Programmierfehler, die II.....	353
Abbildung 23-18: Programmierfehler: die III!	354
Abbildung 21-1: Extrapolationen bei reduziertem Umgebungsdruck	357
Abbildung 22-1: Kostenvergleich der Tauchverfahren	359
Abbildung 22-2: Habitat (Schemazeichnung für Exkursionen).....	361
Abbildung 22-3: Profil eines Sättigungstauchganges (Schema)	362
Abbildung 22-4: 3 verschiedene Dekompressionsprofile bei Sättigungs-TG	363
Abbildung 22-5: Sättigungsdruck vs. Umgebungsdruck.....	364
Abbildung 22-6: Schemazeichnung "Sealab III" (Quelle: HAUX)	366
Abbildung 22-7: Fünf Bilder von den Sea Lab Experimenten.....	367
Abbildung 22-8: 2 Skizzen: TEKTITE Aufbau.....	368
Abbildung 22-9: Tektite II, BVI (Photo courtesy of Bates Littlehouse).....	369
Abbildung 22-10: TEKTITE II all female team in crews quarters, incl. Sylvia Earle (black & white suit) ...	370
Abbildung 22-11: Sättigungstauchen bei Tunnelarbeiten	372
Abbildung 22-12: Ersteinsätze von SAT, Quelle: HAUX.....	375
Abbildung 22-13: Einsatziefen von SAT, Quelle: HAUX.....	375
Abbildung 23-1: Hannes Keller, Dezember 1962	377
Abbildung 23-2: 1000 ft dive on Heliox (1962)	378
Abbildung 23-3: Jens Hilbert bei seinem 240 m TG am 12.8.2002 im Roten Meer	378
Abbildung 24-1: Ölfelder in der Nordsee, aus [167]	380
Abbildung 24-2: Tiefen- & Zeitzonen beim beruflichen Tauchen.....	381
Abbildung 24-3: Komponenten eines DDS / Sat Systems	382
Abbildung 24-4: Aufbau einer PTC	383
Abbildung 24-5: Phasen eines Sat TG (anhand DDS).....	384
Abbildung 24-6: Heißwasser-Anzug (mit Kirby-Morgan Helm)	385
Abbildung 24-7: Schema: Heißwasser-System; Anzug & Atemgasheizung, Quelle: [167].....	386
Abbildung 24-8: Tiefengrenzen des Tauchereinsatzes, "diverless production systems"	387
Abbildung 26-1: DCS Blase (im Mikroskop).....	390
Abbildung 26-2: DCS Blase im Gewebe (Schema)	391
Abbildung 26-3: Gasblase im Blutgefäß (Schema).....	392
Abbildung 26-4: Biochemie der DCS, I.....	392
Abbildung 26-5: Biochemie der DCS, II	394
Abbildung 26-6: VGE vs. Zeit bei nach 48h Luft-TG.....	394
Abbildung 26-7: Druckentlastung und Einsetzen der Symptome.....	395
Abbildung 26-8: USN Kammertabelle 3	398
Abbildung 26-9: USN Kammertabelle 6A	398
Abbildung 26-10: USN Kammertabelle 6	399
Abbildung 26-11: STOLT / COMEX Tabelle.....	399
Abbildung 26-12: OSI Tabelle 7	400
Abbildung 26-13: CF Tabelle 8.....	401
Abbildung 26-14: HTC Tabelle.....	402
Abbildung 26-15: Boyle-Mariotte mal ganz praktisch	403
Abbildung 26-16: O2-Nargilah	404
Abbildung 26-17: zeitliche Entwicklung von DCS-Blasen (Zeit bis zur Auflösung)	406
Abbildung 26-18: Blasenwachstum & Gehirnüberlebenszeit	407
Abbildung 34-1: Drei Mischgas-Tauchcomputer im aktuellen Vergleich.....	424
Abbildung 38-1: Die „Ahnentafel“	430

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiele für I bei 37 ° Celsius (in ml / bar L) für verschiedene Gase.....	30
Tabelle 2: Löslichkeitskoeffizienten I versch. Gase.....	31
Tabelle 3: Löslichkeitskoeffizient K.....	32
Tabelle 4: Perfusionsraten im menschlichen Modell.....	36
Tabelle 5: Halbwertszeiten (HWZ) und prozentuale Sättigungen.....	37
Tabelle 6: Löslichkeiten und Diffusionskonstanten.....	40
Tabelle 7: modifizierte Rss der USN.....	42
Tabelle 8: ED50 und Sättigungszeiten.....	50
Tabelle 9: Meßfrequenz vs. Eindringtiefe.....	77
Tabelle 10: statistische Verteilung DCS Symptomen.....	90
Tabelle 11: verschiedene Rq.....	94
Tabelle 12: Wiederholungsgruppenalphabet nach USN und N2-Partialdruck.....	97
Tabelle 13: Ganzkörper N2 Abgabe.....	100
Tabelle 14: Partialdrücke im menschlichen Metabolismus bei 1 Bar.....	112
Tabelle 15: O2-Fenster (nach Momsen).....	112
Tabelle 16: CO2: Retention & Partialdruck.....	120
Tabelle 17: R/L Shunt nach Bühlmann.....	121
Tabelle 18: 3 Tabellen # DCS Hits vs. Vertrauensintervall.....	131
Tabelle 19: # TG vs. P DCS.....	132
Tabelle 20: relative narkotische Wirkung nach [63], S. 304.....	135
Tabelle 21: HWZ vs. M-Werte (Bob Workman).....	157
Tabelle 22: Zusammenhang zwischen M ₀ und HWZ Tau (B. Wienke).....	157
Tabelle 23: 15-Kompartiment Modell nach Heinz Schreiner.....	158
Tabelle 24: PADUA Werte-Matrix.....	159
Tabelle 25: HWZ vs. Übersättigung (von 1906 --> 1965).....	166
Tabelle 26 Geschichte der USN Tabellen von 1915 bis 2009.....	166
Tabelle 27: M0 für super- & hyperschnelle Kompartimente (Fit).....	168
Tabelle 27: ΔM für super- & hyperschnelle Kompartimente (Fit).....	169
Tabelle 28: HWZ und Perfusion vs. Temperatur.....	174
Tabelle 29: HWZ vs. MPTT Generator-Variablen.....	176
Tabelle 30: Modell mit 8 Kompartimenten für Mischgase.....	180
Tabelle 31: Seriell & Parallel Kombination.....	184
Tabelle 32: MPTT nach VVAL18 für N2.....	185
Tabelle 33: MPTT nach VVAL79 für N2.....	186
Tabelle 34: NDL Vergleich USN / Hempleman.....	189
Tabelle 35: Hempleman Diffusionsgesetz nach t ^{1/2}	189
Tabelle 36: VPM Profil vs. USN und RNPL.....	199
Tabelle 37: HWZ vs. M0 für 5 Kompartimente in 4 versch. Modellen.....	201
Tabelle 38: P DCS 1% und 5% vs. Tauchtiefe, I.....	208
Tabelle 39: Blasenevolutionsmodelle nach Srinivasan & Gerth.....	210
Tabelle 40: P DCS vs. NDL und Tauchtiefe, II.....	215
Tabelle 41: P DCS 1%, 2,3% und 5% vs. Tauchtiefe, III.....	216
Tabelle 42: PBPK 8 Kompartiment Modell, Mapleson.....	227
Tabelle 43: PBPK - Mischgas, Valerie Flook.....	228
Tabelle 44: Testtauchgang Luft, 42 m, 25 min.....	238
Tabelle 45: Testtauchgang Heliox20, 42 m, 25 min.....	239
Tabelle 46: Testtauchgang Heliox16, 42 m, 30 min; USN und DCIEM.....	240
Tabelle 47: # Kompartimente, HWZ vs. Tauchcomputertypen.....	240
Tabelle 48: Vergleich Haldane vs. USN 2008 für 100 feet TGs.....	247
Tabelle 49: Haldanes Tabellen I & II (aus Davis, [89], S.103).....	248
Tabelle 50: Viskositätskoeffizienten.....	262
Tabelle 51: P DCS für verschiedene Organisationen und Tabellentypen.....	279
Tabelle 52: Austauschzeiten TG auf 500 feet / 30 min.....	281
Tabelle 53: USN 2008: 170 feet / Air.....	282
Tabelle 54: modifizierte Blackpool-Tabelle.....	284
Tabelle 55: Seattle-Tabelle und # DCS.....	285

Tabelle 56: Caisson-Tabelle mit O2 Deko (japanisch).....	286
Tabelle 57: #DCS Hits vs. Tote bei historischen Tunnelprojekten	289
Tabelle 58: Vergleich Druckluftverordnung 1972 / modifiziertes ZH-L 16 (1989)	291
Tabelle 59: Auszug aus Tunnel-Trimix Tabelle	292
Tabelle 60: O2 und Luftverbrauch vs. Arbeitslast (nach USN)	293
Tabelle 61: Korrekturtabellen für Handheld Analyser	295
Tabelle 62: USN Standardprozeduren von 1937 --> 2008	305
Tabelle 63: DCIEM Standardprozeduren	306
Tabelle 64: Beispiel "deep stops" mit DECO2000	310
Tabelle 65: TG Parameter mit TST = const. = 174 min.....	310
Tabelle 66: IANTD Luft Tabelle für „accelerated deco“ mit EAN >75	311
Tabelle 67: PDIS, I.....	317
Tabelle 68: PDIS, II	317
Tabelle 69: die zwei Ox-Tox Varianten.....	325
Tabelle 70: NOAA ZNS	325
Tabelle 71: NOAA ZNS für außergewöhnliche Belastungen	326
Tabelle 72: OTU Tabelle nach Hamilton / REPEX, I.....	327
Tabelle 73: REPEX Tabelle nach Hamilton, II	328
Tabelle 74: max. O2-Zeit nach USN.....	330
Tabelle 75: Nitrox MOD aus der MDv 450/1.....	331
Tabelle 76: Symptome von ZNS Ox-Tox (nach Donald)	334
Tabelle 77: % Symptome bei ZNS-Ox-Tox vs. Tiefe / Zeit (Donald)	334
Tabelle 78: O2-Korrektur: Flook Modell	337
Tabelle 79: NOAA ZNS Dosen @ ca. 100 % bei verschiedenen Implementierungen.....	340
Tabelle 80: ZNS Dosen von 1,2 - 2,5 Bar pO2 & Extrapolationen (Ex.)	342
Tabelle 81: NOAA Limits > 1,6 atm pO2 (mathematisch)	342
Tabelle 82: Professional Divers Handbook, Quelle [167], S. 317	343
Tabelle 83: OTU Tabelle nach [167], S. 318.....	344
Tabelle 84: NAUI RGBM Trimix Tabelle für TX 16 % O2, 24 – 40 % He, 44 – 60 % N	347
Tabelle 85: IANTD Trimix Tabelle für TX 20 % O2, 25 % He, 55 % N2	347
Tabelle 86: NAUI RGBM Helitrox Tabelle für TX 26 - 30 % O2, 13 – 17 % He, 53 – 61 % N2	349
Tabelle 87: USS Monitor Heliox TG	350
Tabelle 88: Fliegen nach dem Tauchen & Bergseetauchen	358
Tabelle 89: Kompressionsraten (für SAT / USN).....	360
Tabelle 90: USN Dekompressionsraten für Sättigungs-TG bis 500 ft.....	360
Tabelle 91: Dekompressionszeiten von 30 bis 686 m Sättigungstiefe	362
Tabelle 92: DUKE/GUSI/GKSS Trimix-Sat.profil bis 680 m	371
Tabelle 93: NOAA Deko bei Luft-Sättigung auf 13 m	373
Tabelle 94: Auswahl an Sättigungsexperimenten (unten, s. nächste Seite).....	373
Tabelle 95: Tiefengrenzen für Tauchen & Schweißen	376
Tabelle 96: 240 m TG von Jens Hilbert (2002).....	379
Tabelle 97: USN 1943 Air Recompression Procedures	396
Tabelle 98: die Tabelle der Tabellen	397
Tabelle 99: Tiefen und "NDL"-Vergleich.....	424

11. Formelverzeichnis

Formel 11-1 Gesetz von Henry.....	30
Formel 11-2 Löslichkeitskoeffizient $L=L(t)$	31
Formel 11-3 Halbwertszeit	39
Formel 11-4 Übersättigung.....	42
Formel 11-5 tolerierte Überspannung.....	43
Formel 11-6 Blase: Druckbilanz	55
Formel 11-7 Blase: Partialdrücke.....	56
Formel 11-8 Laplace: Oberflächenspannung	56
Formel 11-9 Blasengröße und Kompressionsmodul	56
Formel 11-10 Blasenübersättigung	58
Formel 11-11 Blasenradius $r = r(t)$	58
Formel 11-12 Bernoullische Gleichung	63

Formel 11-13 Tribonucleation	65
Formel 11-14 Doppler-Effekt	76
Formel 11-15 P alveolar & Rq	94
Formel 11-16 Ganzkörper N2-Aufnahme	99
Formel 11-17 Formfaktor	99
Formel 11-18 Gaswechsel & ICD	104
Formel 11-19 Sauerstoff-Fenster (I.)	111
Formel 11-20 Sauerstoff-Fenster (II.)	114
Formel 11-21 Sauerstoff-Fenster (III.)	114
Formel 12-1 workload und HWZ	150
Formel 13-1 $M = M(d)$ und Delta-M	156
Formel 13-2 $M = M(HWZ)$	167
Formel 13-3 Generatorfunktion für USN-NDL	169
Formel 13-4 Koeffizienten (a- & b-) und HWZ	171
Formel 13-5 P tiss., tol & HWZ	173
Formel 13-6 P tiss. im AB-Modell	180
Formel 13-7 Ein-Kompartiment Modell	181
Formel 13-8 Slab Model (K)	188
Formel 13-9 $NDL = NDL(C)$	188
Formel 13-10 VPM: kritisches Volumen	197
Formel 13-11 RGBM und Gradientenfaktoren	204
Formel 13-12 TBDM: $r=r(t)$	206
Formel 13-13 P(DCS) und L	211
Formel 13-14 Hill Dosisgleichung	211
Formel 13-15 Linearisierung der Dosisgleichung	212
Formel 13-16 LL und L	212
Formel 13-17 Überlebenskurve	214
Formel 13-18 Risiko-Integral	216
Formel 13-19 logit Southerland	220
Formel 13-20 Logit und P(DCS) für 3 Methoden	223
Formel 14-1 diverse TTS	236
Formel 16.0-1 linearer Massenfluss	248
Formel 16.0-2 nichtlinearer Massenfluss	248
Formel 17-1 1. Fick'sches Gesetz	252
Formel 17-2 2. Fick'sches Gesetz	253
Formel 17-3 Krogh Geometrie	253
Formel 17-4 Gesetz von Hagen-Poiseuille	258
Formel 17-5 Newton'sches Viskositätsgesetz	259
Formel 17-6 Reynolds'sche Zahl	261
Formel 17-7 mittlere Diffusionsgeschwindigkeit und Wegstrecke nach N Kollisionen	267
Formel 17-8 mittlere wahrscheinlichste Distanz bei 3-dim. „random walks“	268
Formel 17-9 Ventilation / Perfusion	269
Formel 19-1 Standard GF	315
Formel 19-2 OTU	327
Formel 19-3 O2 HWZ, alt	329
Formel 19-4 Lambda O2, alt	329
Formel 19-5 O2 HWZ, NOAA neu	329
Formel 19-6 Lambda O2, NOAA neu	329
Formel 20-1 Anpassung der NOAA Limits	342
Formel 22-1 Kompressionsaufwand	359
Formel 22-2 Vann k-Formel	363
Formel 34-1 Fehlerfortpflanzung	422

12. Ein Quiz zum Anfang, Teil I

**“YADD“
Yet Another Dumb Diver (Tekkie Bla-Bla)**

- 1) Du tauchst mit einem Nitrox 60 in unserem alten Tauchturm (Tiefe = 10 m):
Partialdruck von Sauerstoff und Stickstoff?
- 2) Was bedeutet „MOD“?
- 3) Wie groß ist die MOD für ein EAN 40?
- 4) Was bedeutet „EAD“?
- 5) Wie groß ist die EAD für ein Gemisch Nitrox 32 und einer Tauchtiefe von 40 m?
- 6) Was ist ein „Best Mix“?
- 7) Welches ist der Best Mix für eine Tauchtiefe von 42 m?
- 8) Nimm irgendeine Standard-Lufttabelle, Tauchgang auf 43 m für 25 Minuten: Deko-Zeiten und Austauschzeit, kompletter Luftverbrauch bei einem Oberflächen-AMV von 20 L / min für die bottom phase und 11 L/min für die Deko-Phase. Ab 6 m soll mit reinem Sauerstoff dekomprimiert werden: %CNS, OTU sowie Gasverbrauch.
- 9) Nenne drei Symptome der Dekompressionskrankheit, Typ I
- 10) Nenne drei Symptome der Dekompressionskrankheit, Typ II

13. Ein Quiz zum Anfang, Teil II

**“The more you know the longer you live!“
Tom Angel, Sanford Marine Services**

(sinngemäß: „Je mehr du weißt, desto länger lebst du!“)

Hier könnt ihr prüfen, wieviel Wissen noch von eurem Tauchcomputer/Tauchtabellen Specialty bzw. eines äquivalenten Spezialkurses noch präsent ist: probiert die Lösungen einfach im Kopf zu rechnen.

- 11) Betrachte 3 Kompartimente (mit den Nummern: I, II, III) mit den HWZ: 10, 20, 60 min. Der TG sei ein Kastenprofil, die Tiefe (=Druck) also konstant über die ganze Dauer der Grundzeit. Nach wievielen Minuten ist das schnellste Kompartiment zu ca. 98 % gesättigt, das mittlere Kompartiment II zu 87,5 % und das langsamste Kompartiment zu 50 %?

12) Angenommen, der obige TG sei auf 40 m, Grundzeit = 60 min. Der tolerierte Umgebungsdruck für das Kompartiment I betrage ca. 2 Bar. Wie lange muß man (ca.) warten, bis zur Oberfläche aufgetaucht werden darf? Oder andersherum: wie lange (ca.) muß ein hypothetischer Deko-Stopp in 10 m Tiefe sein?

14. Das Handwerkszeug

„... es irrt der Mensch so lang er strebt.“
Goethe, Faust

Das grundlegende Paradigma zum Thema „Deko“ sieht allgemein anerkannt so aus:

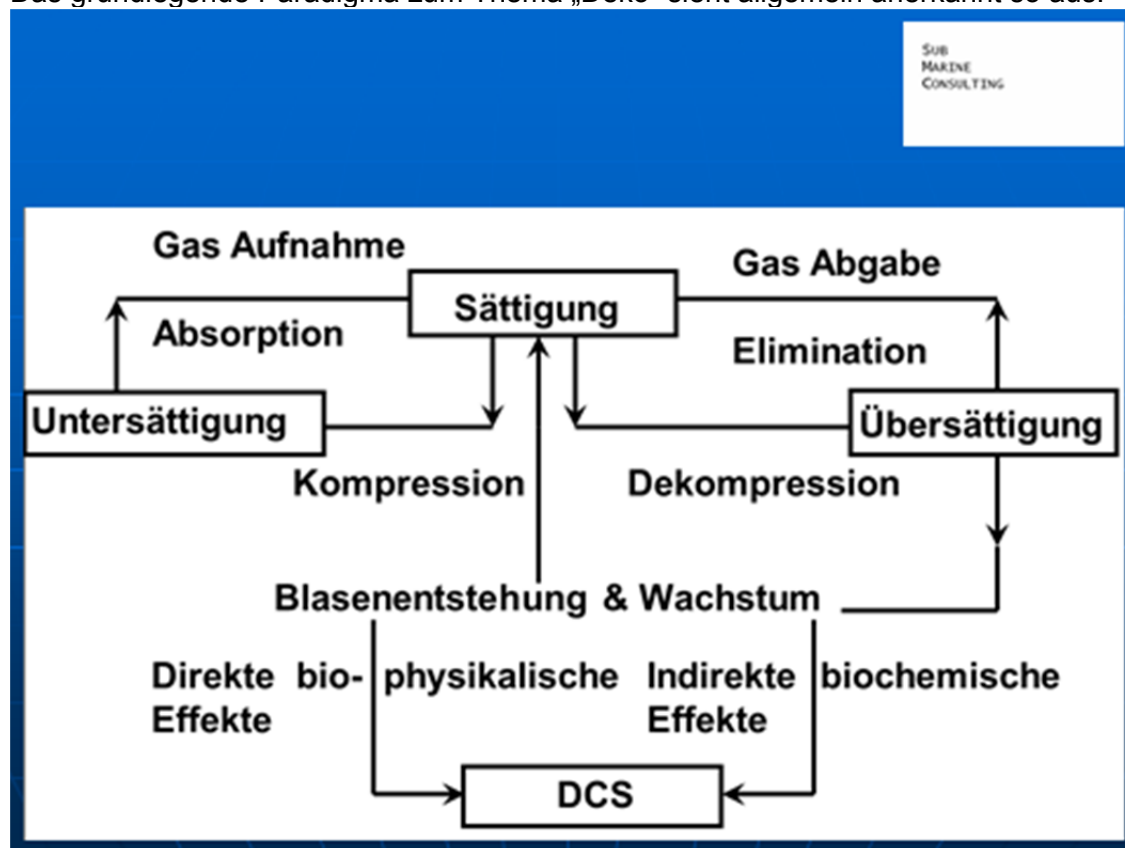


Abbildung 14-1: Kompressions- / Dekompressions Paradigma

(Quelle, z.B.: [63], S. 420):

Partialdruck

ist der Teildruck eines Gases gemäß dem Dalton'schen Gesetz, die Summe aller Partialdrücke ergibt dann den Gesamtdruck. Bsp.: du atmest in einer Tiefe von 70 m in Süßwasser (= ca. 8 Bar absoluter Druck) ein Trimix15/60 (15 % Sauerstoff, 60 % Helium, Rest = 25 % Stickstoff):
 $p_{O_2} = 8 * 0,15 = 1,2$ Bar, $p_{He} = 8 * 0,6 = 4,8$ Bar, $p_{N_2} = 8 * 0,25 = 2$ Bar.
 (Vgl. auch die Formel (51a) im Formelanhang)

Gesetz von Dalton

(Vgl. auch die Formel (51) im Formelanhang).

Ende der Leseprobe:

Danke für das Herunterladen und danke für dein Interesse!

Wie kommt man nun 'ran an die restlichen ca. 400 Seiten?

Ganz einfach:

Entweder die **druckbare Komplett-Version zum download** bestellen:

einfach per e-mail bei:

director@SMC-de.com

oder aber

zum **„deco workshop“** im TSC ES, dem Tauchsportcenter Esslingen (www.tauchturm.com) anmelden: dort erhaltet ihr während des Workshops immer das aktuellste Manual als PDF.

Weitere Infos zum „deco workshop“ (Termine, Preise, Inhalte & Voraussetzungen(!))

entweder über das TSC ES oder hier:

<http://www.divetable.info/workshop.htm>

Viel Spaß!

Und:

auf bald beim „deco workshop“ im Tauchsportcenter Esslingen!

Hier der Link zum Katalog aller Manuals & Kurspräsentationen:

<http://www.divetable.info/Flyer/Katalog.pdf>