

Dr. Armin Rauen
Ödgarten 12
94574 Wallerfing
Tel. 09936 - 902026
armin@decotrainer.de
www.decotrainer.de

Atemgase beim Technischen Tauchen

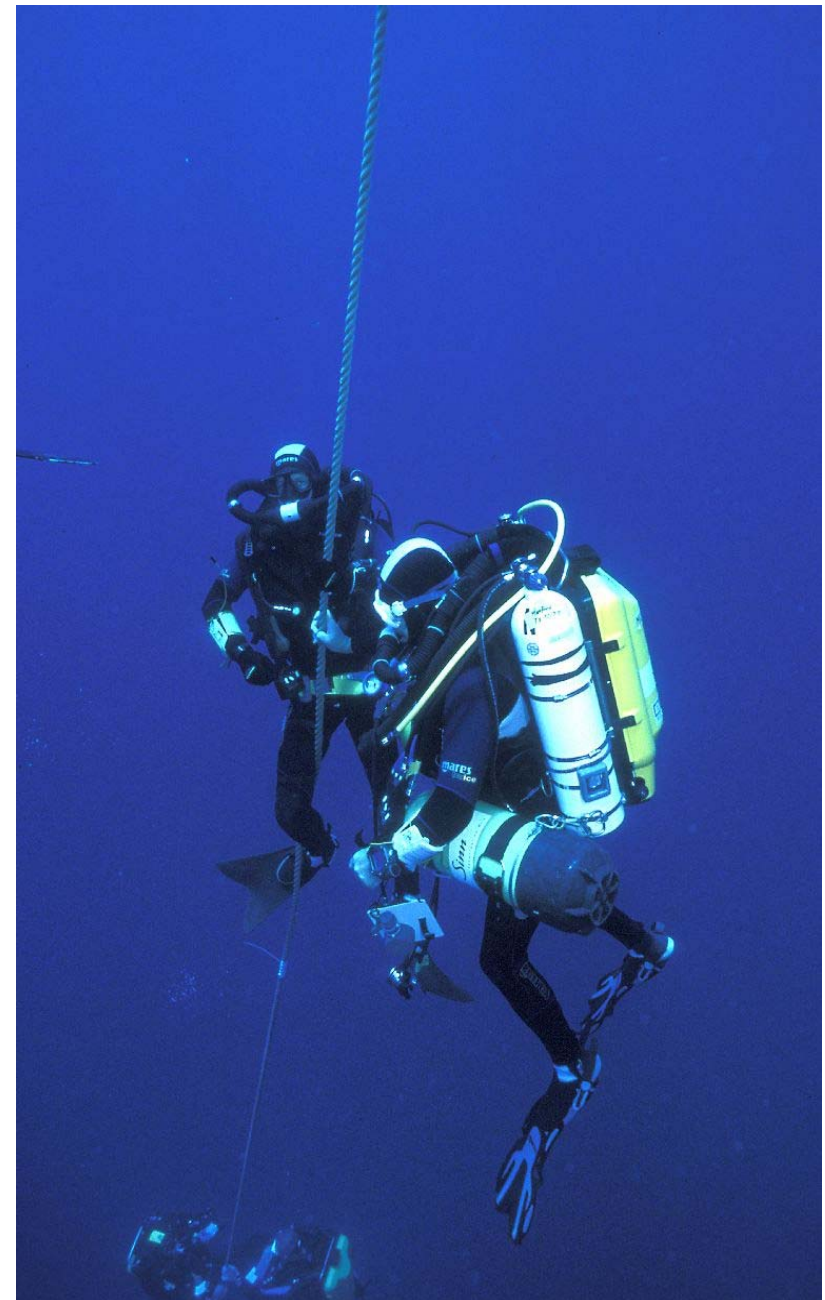
- Teil 2: Isobare Gegendiffusion

Inhalt:

1. Was ist "isobare Gegendiffusion" ?
2. Fallbeispiel: Dekompressionsunfall
3. Innenohr - Dekompressionsunfall durch Gegendiffusion
4. Strategien zum Umgang mit Gegendiffusion
5. Quantifizierung der Gegendiffusion im Decotrainer
6. Zusammenfassung
7. Quellen

Medizin Fortbildungsseminar - Zwiesel - 19.10.2013

überarbeitetes Manuskript vom 12.12.2013



1. Was ist "isobare Gegendiffusion"?

Isobare Gegendiffusion

ist die gleichzeitige Diffusion von Inertgasen in zwei Richtungen: von außen nach innen (in den Körper hinein) und von innen nach außen (aus dem Körper hinaus). Isobar bedeutet, dass die Diffusion **auch** ohne eine Änderung im Umgebungsdruck, also bei gleichbleibendem Umgebungsdruck, abläuft.

- Gegendiffusion kann nur auftreten, wenn mehr als ein Inertgas eine Rolle spielt.
- Gegendiffusion kann auch auftreten, wenn die Druckverhältnisse nicht isobar sind.
- Gegendiffusion tritt immer auf, wenn 2 Inertgase nicht im Gleichgewicht sind (ein Druckgefälle herrscht).

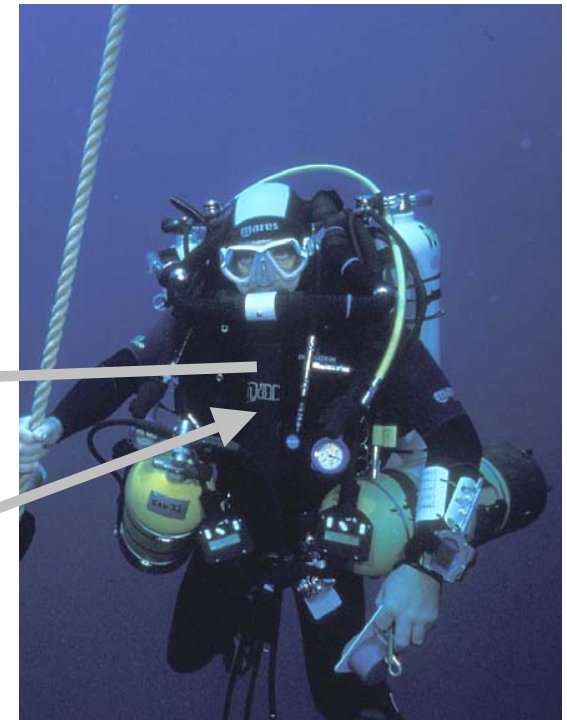
Beispiel:

Nach einem Trimix-Tauchgang wird mit Nitrox dekomprimiert. Der Körper des Tauchers enthält gelöstes Helium (aus dem Trimix) und Stickstoff. Das Atemgas Nitrox enthält kein Helium, aber relativ viel Stickstoff. Effekt:

- Helium diffundiert aus dem Körper über die Lunge ins Ausatemgas
- Stickstoff diffundiert aus dem Einatemgas über die Lunge in den Körper

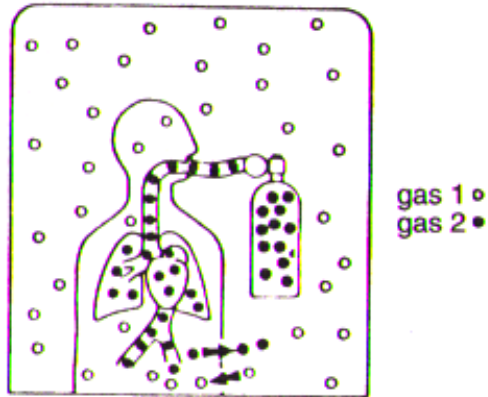
He

N₂



2 Typen von isobarer Gegendiffusion

(1) Oberflächen- Gegendiffusion



Der Taucher ist von einem Gas 1 umgeben und atmet ein anderes Gas 2. Nach einiger Zeit (bei konstantem Umgebungsdruck) bildet sich ein Gleichgewicht aus.

- Der Körper ist mit Gas 2 gesättigt und gibt das Gas über die Haut an die Umgebung ab. Über die Atmung nimmt er ständig die gleiche Menge von Gas 2 neu auf.
- Gleichzeitig dringt das Gas 1 aus der Umgebung über die Haut in den Körper ein. Das eingedrungene Gas 1 wird über die Lunge abgeatmet.

Es bilden sich 2 stabile Druckgradienten: Der Druckgradient von Gas 2 geht vom Körper nach außen, der Gradient von Gas 1 geht von außen in den Körper. Die Verhältnisse bleiben zeitlich konstant.

→ englisch "steady state condition" = Gleichgewichtsbedingung.

Bereits ab den 1970'er Jahren fanden Forscher im Tierversuch heraus, dass die Oberflächen- Gegendiffusion über die Haut Symptome eines Dekompressionsunfalls hervorrufen kann (Lambertsen, 1989). Beispiel: Schweine atmeten ein Atemgas mit Neon als Inertgas. Sie befanden sich in einer Druckkammer mit Helium als Inertgas. Die Schweine bekamen rote Flecken auf der Haut und damit eine [Dekompressionserkrankung der Haut](#).

Warum ?

Graphik: Lettnin (2001): International Handbook of mixed gas diving. Best publishing company.

Je nach Löslichkeit der verschiedenen Gase in verschiedenen Geweben kann sich eine Übersättigung ausbilden.

Erklärung anhand eines realistischen Beispiels:

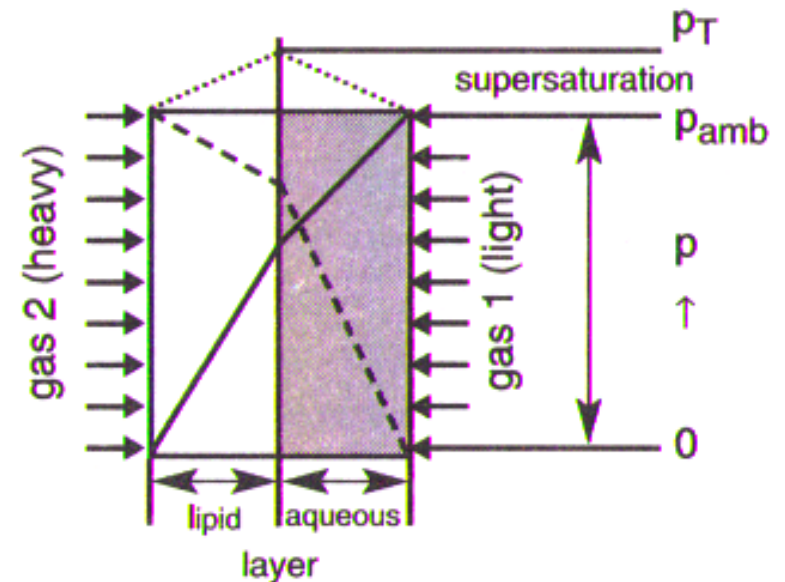
Der Taucher atmet Stickstoff (N_2) aus einem Atemgerät und ist damit gesättigt. Gleichzeitig ist er von Helium (He) umgeben.

→ He diffundiert durch die Haut in den Körper. He löst sich besser in den wasserhaltigen Geweben ("aqueous") als in den fetthaltigen Geweben ("lipid").

→ N_2 diffundiert aus dem Körper durch die Haut in die Umgebung. N_2 löst sich besser in den fetthaltigen Geweben als in den wasserhaltigen.

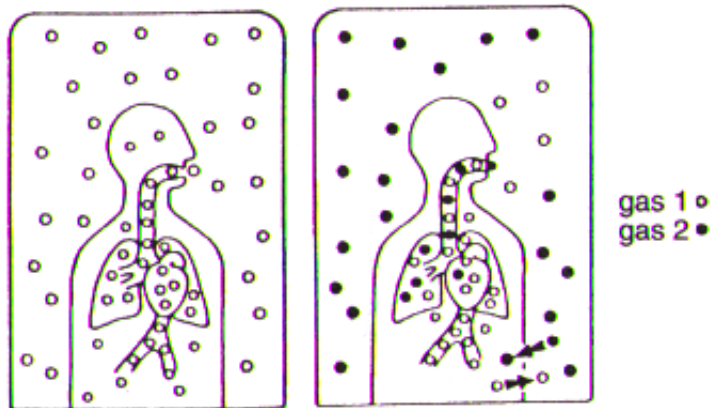
→ An der Grenze zwischen den Geweben haben die beiden Lösungsdruckkurven einen "Knick". Die Summe der beiden Lösungsdruckkurven bestimmt die gesamte Sättigung mit Inertgas. Die Summe hat an der Grenzfläche ein Maximum und übersteigt den Umgebungsdruck.

Es kommt zu einem "Stau" und damit zu einer Übersättigung ("supersaturation"). Die Übersättigung löst die Dekompressionserkrankung aus.



Graphik: Lettnin (2001): International Handbook of mixed gas diving. Best publishing company.

(2) Gegendiffusion der Tiefengewebe



Der Taucher atmet ein Gas 1. Nach einiger Zeit ist er mit dem Gas gesättigt. Dann atmet er das andere Gas 2.

- Das Gas 1 diffundiert jetzt aus dem Körper nach außen
- Das Gas 2 diffundiert gleichzeitig in den Körper

Die Diffusion erfolgt hauptsächlich über die Atmung.

Je länger der Taucher das neue Gas 2 atmet, um so mehr sättigt er sich mit diesem Gas und umso mehr entsättigt er sich mit dem alten Gas 1. Nach einer genügend langen Zeit ist er mit dem Gas 2 vollständig gesättigt.

→ englisch "transient condition" = Ungleichgewichtsbedingung, dynamischer Prozess.

Die Lösungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Inertgase sind unterschiedlich. Beispiel: Helium löst sich 2.65 mal schneller als Stickstoff.

→ Ein Gaswechsel von einem "langsamen" Gas (N_2) auf ein "schnelles" Gas (He) kann auch unter isobaren Bedingungen zu einer Übersättigung führen. Helium geht aus dem Atemgas schneller in den Körper hinein, als N_2 aus dem Körper abgeatmet werden kann. Die Summe der Inertgase kann den Umgebungsdruck übersteigen. Von diesem Effekt können im Prinzip alle Gewebe betroffen sein, insbesondere die tiefen Gewebe, nicht nur die Haut als Oberflächengewebe.

Graphik: Lettnin (2001): International Handbook of mixed gas diving. Best publishing company.

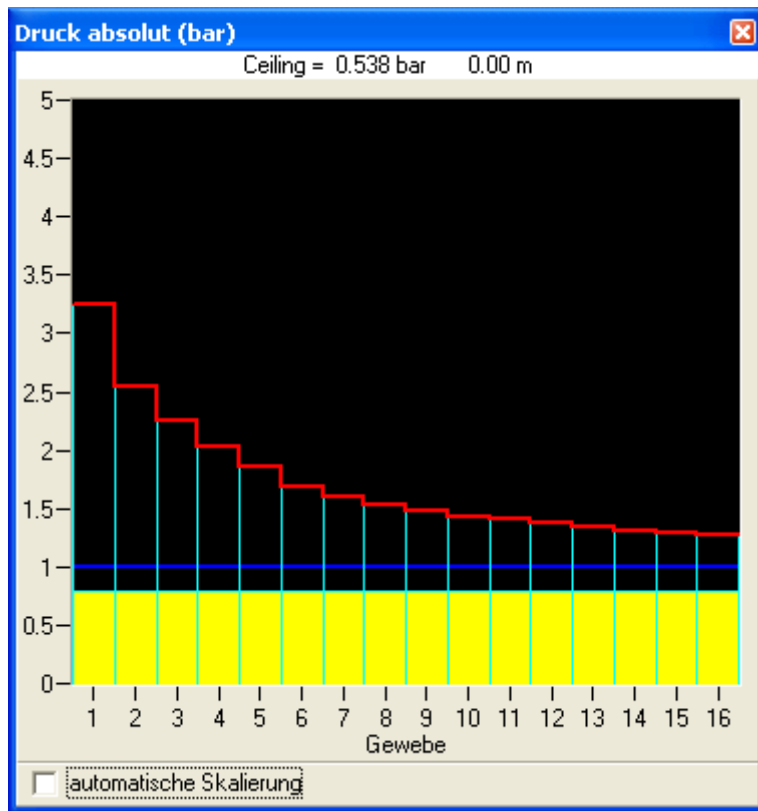
Beispiel: Gegendiffusion durch Atemgaswechsel von Luft auf HeliOx bei Umgebungsdruck = 1 bar

Sättigung mit Luft (N₂) bei 1 bar

21 % O₂
79 % N₂

30 min HeliOx bei 1 bar

21 % O₂
79 % He



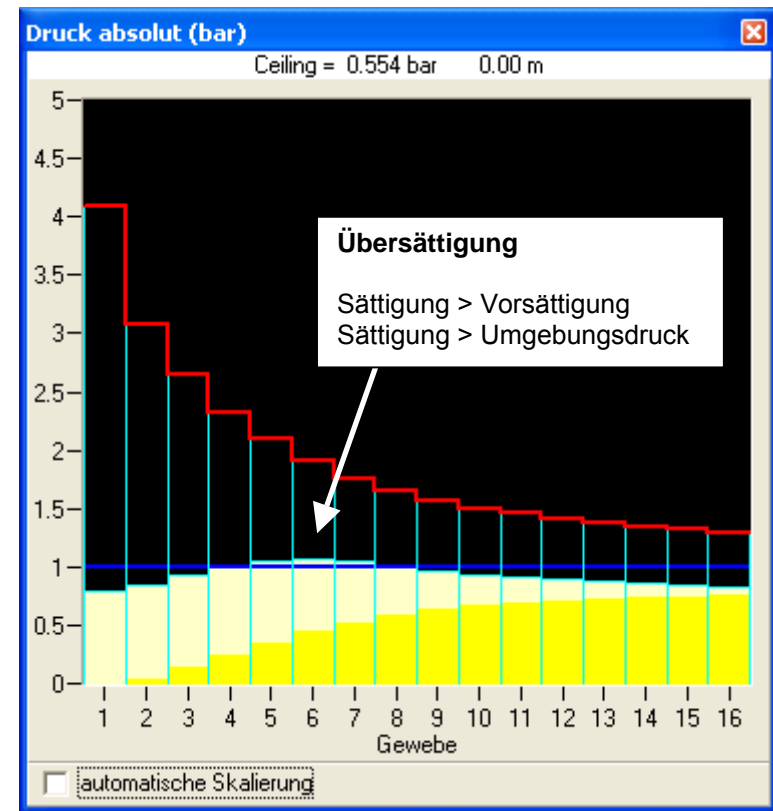
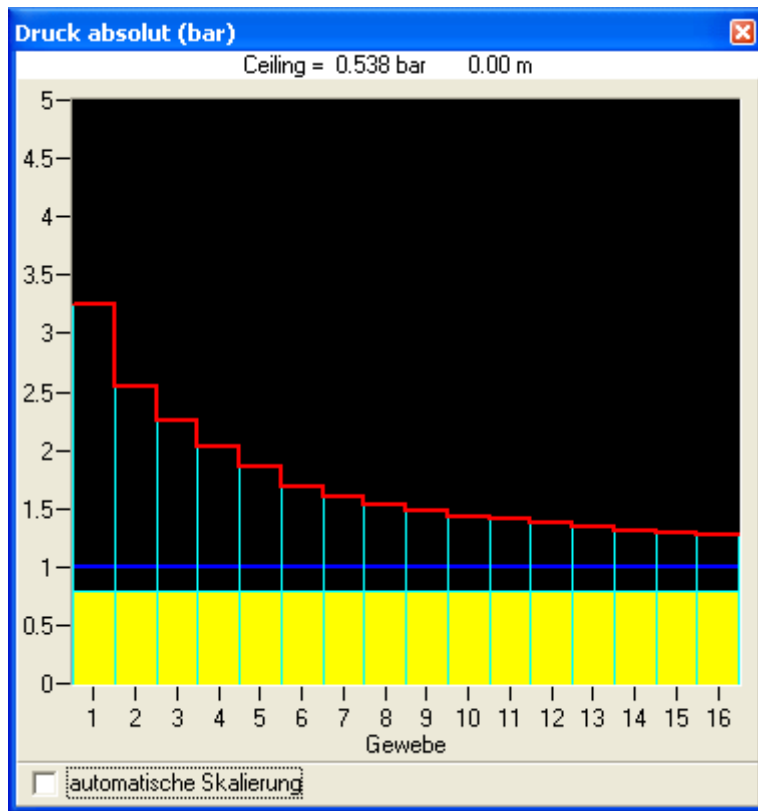
Beispiel: Gegendiffusion durch Atemgaswechsel von Luft auf HeliOx bei Umgebungsdruck = 1 bar

Sättigung mit Luft (N₂) bei 1 bar

21 % O₂
79 % N₂

30 min HeliOx bei 1 bar

21 % O₂
79 % He



Berechnet mit "Decotrainer".

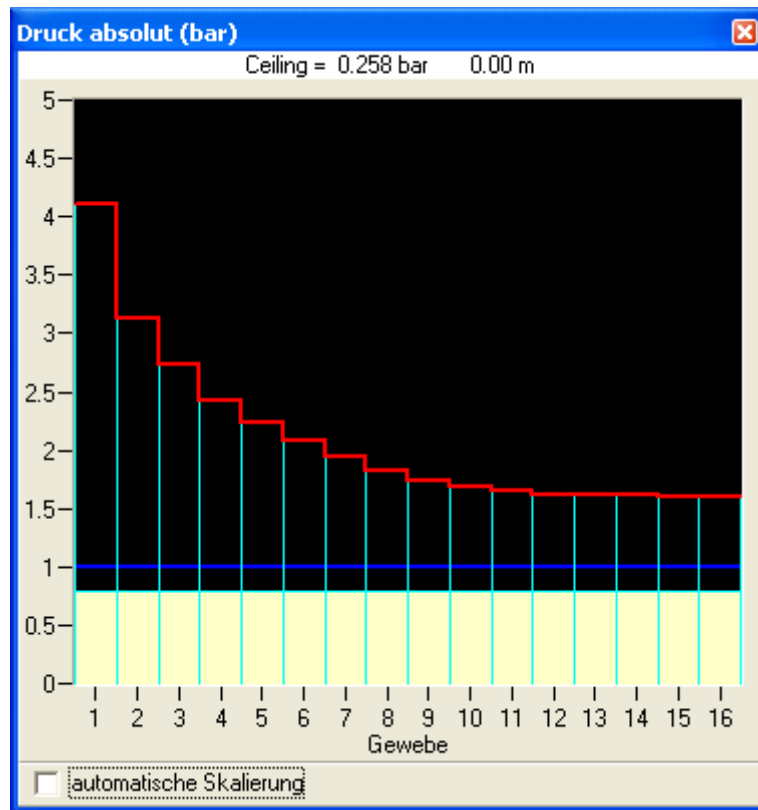
Gegenbeispiel: Gegendiffusion durch Atemgaswechsel von HeliOx auf Luft bei Umgebungsdruck = 1 bar

Sättigung mit HeliOx (He) bei 1 bar

21 % O₂
79 % He

30 min Luft bei 1 bar

21 % O₂
79 % N₂



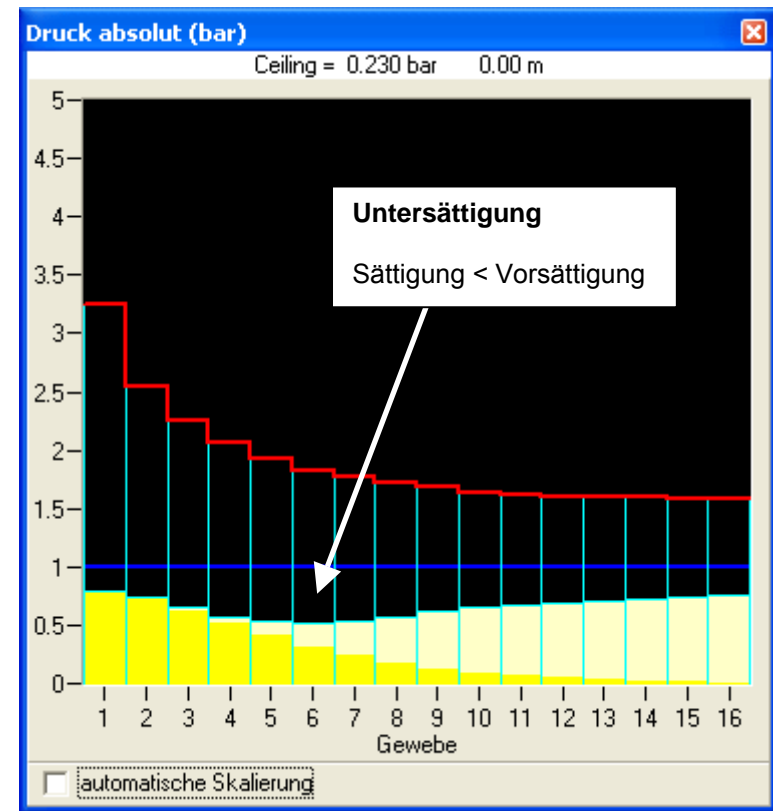
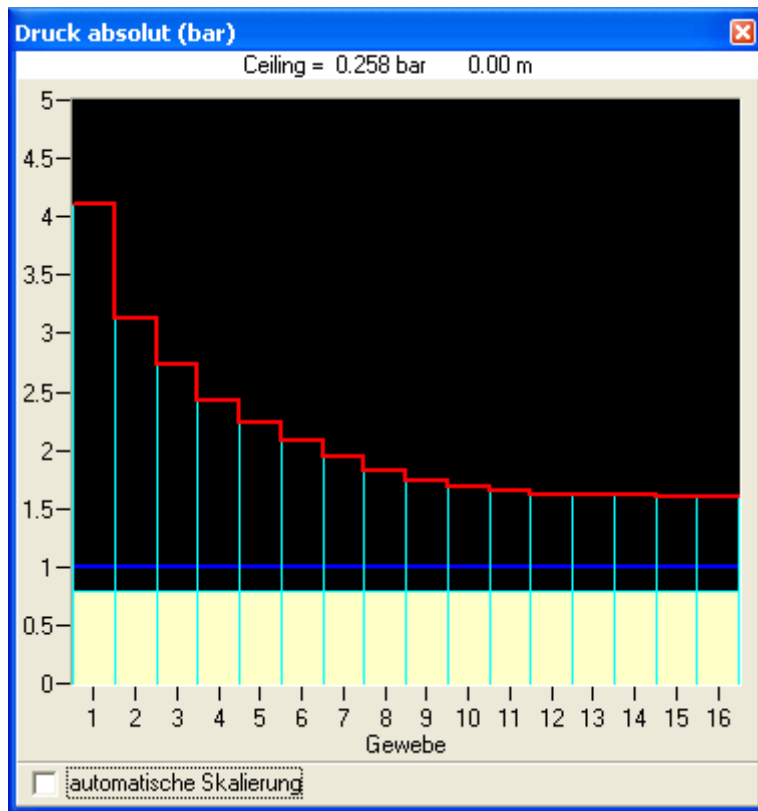
Gegenbeispiel: Gegendiffusion durch Atemgaswechsel von HeliOx auf Luft bei Umgebungsdruck = 1 bar

Sättigung mit HeliOx (He) bei 1 bar

21 % O₂
79 % He

30 min Luft bei 1 bar

21 % O₂
79 % N₂



Berechnet mit "Decotrainer".

Gaswechsel und Blasenentstehung

D'Aoust und Lambertsen (1983) untersuchten den Zusammenhang zwischen verschiedenen Gaswechseln und der Entstehung von Gasblasen. Versuchstiere waren Ziegen bei einem Druck entsprechend 60 m Tiefe. Ergebnis:

Gaswechsel von → nach	Maximales Druckverhältnis	Gasblasen entstehen?
He → N ₂	0.861	nein
H ₂ → N ₂	0.890	nein
Ar → N ₂	1.015	nein
Ne → H ₂	0.939	nein
Ne → He	0.978	nein
N ₂ → H ₂	1.076	sehr wenige
H ₂ → He	1.080	sehr wenige
N ₂ → He	1.139	ja
N ₂ → Ne	1.160	ja
Ar → He	1.123	ja / sehr viele / "near fatal results"

"Schwere" und "leichte" Inertgase

Gas	Wasserstoff	Helium	Neon	Stickstoff	Argon
Chemisches Formelzeichen	H ₂	He	Ne	N ₂	Ar
Molekülmasse (relativ)	2.02	4.00	20.18	28.02	39.95

"leicht"  "schwer"

Zwischenstand:

Gegendiffusion findet immer statt, wenn zwei oder mehr Inertgase verwendet werden. Ohne Inertgaswechsel keine Gegendiffusion.

Gegendiffusion kann beim Technischen Tauchen eine Dekompressionserkrankung hervorrufen, wenn ...

(1) ... das Umgebungsgas ein "leichteres" Gas ist als das Atemgas. In dem Fall wird das "leichte" Gas über die Haut aufgenommen und kann eine Dekompressionserkrankung der Oberflächen-Gewebe (Haut) auslösen.

→ Der Fall spielt beim technischen Tauchen praktisch keine Rolle. Beispiel: Trimix als Gas im Trockentauchanzug und Nitrox als Atemgas. Helium wird im Anzuggas nicht verwendet, weil die Wärmeleitfähigkeit zu groß ist und damit der Wärmeverlust. Argon als beliebtes Anzuggas ist ein "schweres" Gas, was einer Dekompressionserkrankung entgegen wirkt.

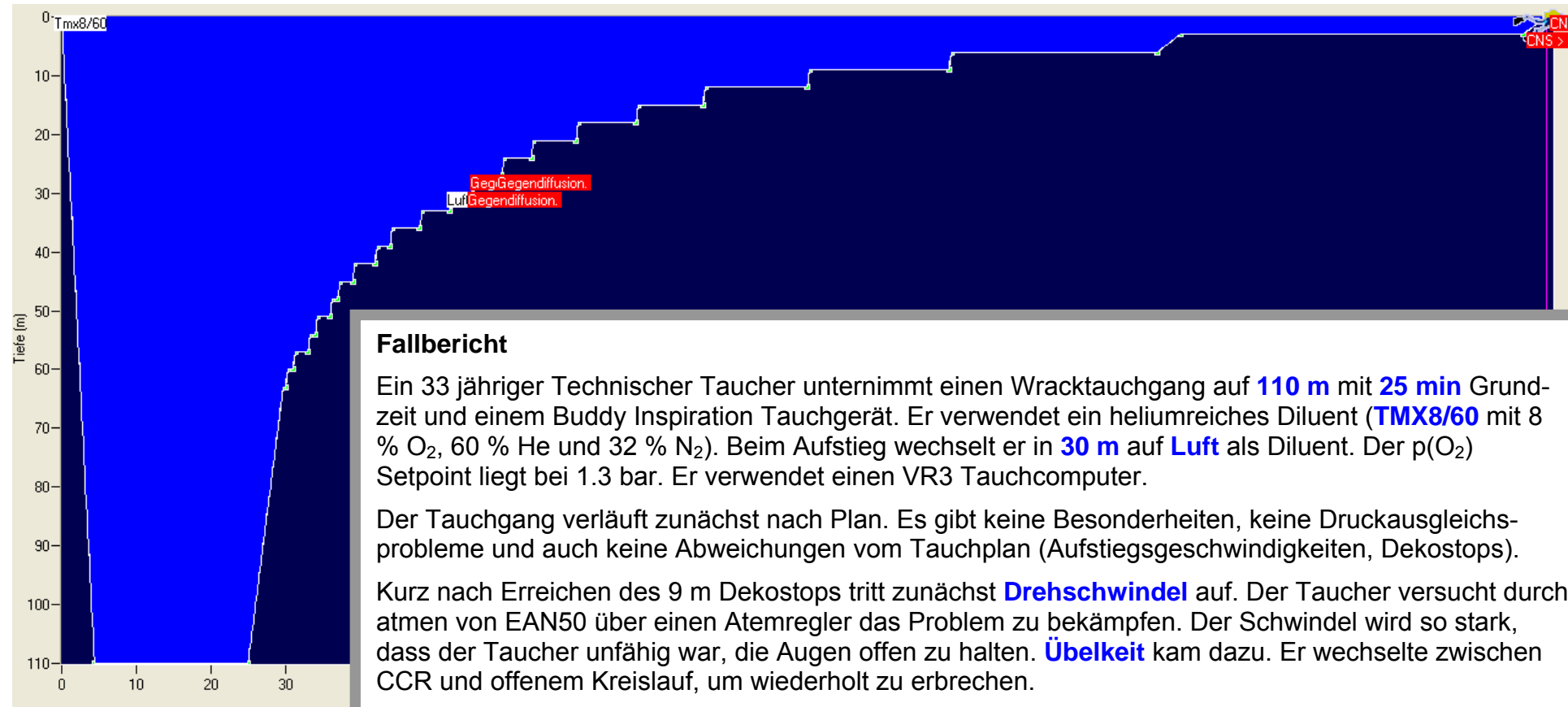
(2) ... ein Atemgaswechsel erfolgt von einem "schweren" Gas zu einem "leichten" Gas. Hier löst sich das leichte Inertgas aus dem Atemgas schneller im Körper als umgekehrt der Körper das schwere Inertgas abatmen kann.

→ Auch dieser Fall spielt beim technischen Tauchen normalerweise keine Rolle. Beispiel: Tauchgang mit Luft, Gaswechsel auf Trimix. Dieser Gaswechsel kommt nur in der Kompressionsphase (beim Abtauchen) vor. In der Phase ist der Körper weit von einer Sättigung und damit einer Gefährdung entfernt. In der Dekompressionsphase würde so ein Gaswechsel die Austauschzeiten verlängern und wird daher nicht angewandt.

→ Umgekehrt verkürzt die Gegendiffusion die Austauschphase, wenn während der Dekompressionsphase ein Atemgaswechsel vom "leichten" zum "schweren" Inertgas erfolgt. Das ist eine übliche Praxis.

→ Gegendiffusion braucht uns also nicht zu interessieren?

2. Fallbeispiel: Dekompressionsunfall



Fallbericht

Ein 33-jähriger Technischer Taucher unternimmt einen Wracktauchgang auf **110 m** mit **25 min** Grundzeit und einem Buddy Inspiration Tauchgerät. Er verwendet ein heliumreiches Diluent (**TMX8/60** mit 8 % O₂, 60 % He und 32 % N₂). Beim Aufstieg wechselt er in **30 m** auf **Luft** als Diluent. Der p(O₂) Setpoint liegt bei 1.3 bar. Er verwendet einen VR3 Tauchcomputer.

Der Tauchgang verläuft zunächst nach Plan. Es gibt keine Besonderheiten, keine Druckausgleichsprobleme und auch keine Abweichungen vom Tauchplan (Aufstiegsgeschwindigkeiten, Dekostops).

Kurz nach Erreichen des 9 m Dekostops tritt zunächst **Drehschwindel** auf. Der Taucher versucht durch atmen von EAN50 über einen Atemregler das Problem zu bekämpfen. Der Schwindel wird so stark, dass der Taucher unfähig war, die Augen offen zu halten. **Übelkeit** kam dazu. Er wechselte zwischen CCR und offenem Kreislauf, um wiederholt zu erbrechen.

Trotz der ernstesten Probleme beendete der Taucher planmäßig seine Dekopflucht. Er wurde anschließend zunächst auf dem Boot mit 100 % Sauerstoff behandelt und in eine Druckkammer gebracht, wo er etwa 4 Stunden nach dem Zwischenfall eintraf. Der Schwindel hatte sich mittlerweile etwas verbessert. Er wurde mehrfach in der Druckkammer behandelt. Alle Symptome verschwanden. Der Taucher wurde wieder vollständig gesund, mittlerweile taucht er wieder.

Es gab keine Anzeichen für ein Barotrauma oder eine "normale" Dekompressionserkrankung. Die Diagnose war "**isolierte Innenohr- Dekompressionskrankheit**".

Quelle: Doolette & Mitchell (2003) : Biophysical basis of inner ear decompression sickness. J. Appl. Physiol. 94: 2145-2150

3. Innenohr- Dekompressionsunfall durch Gegendiffusion

Innenohr

Das Innenohr (*Auris interna*) ist neben dem **Mittel-** und **Außenohr** ein Teil des **Ohres** bei **Wirbeltieren**. Es besteht bei Säugetieren aus der **Hörschnecke** (lat.: *Cochlea*) und dem **Gleichgewichtsorgan**.

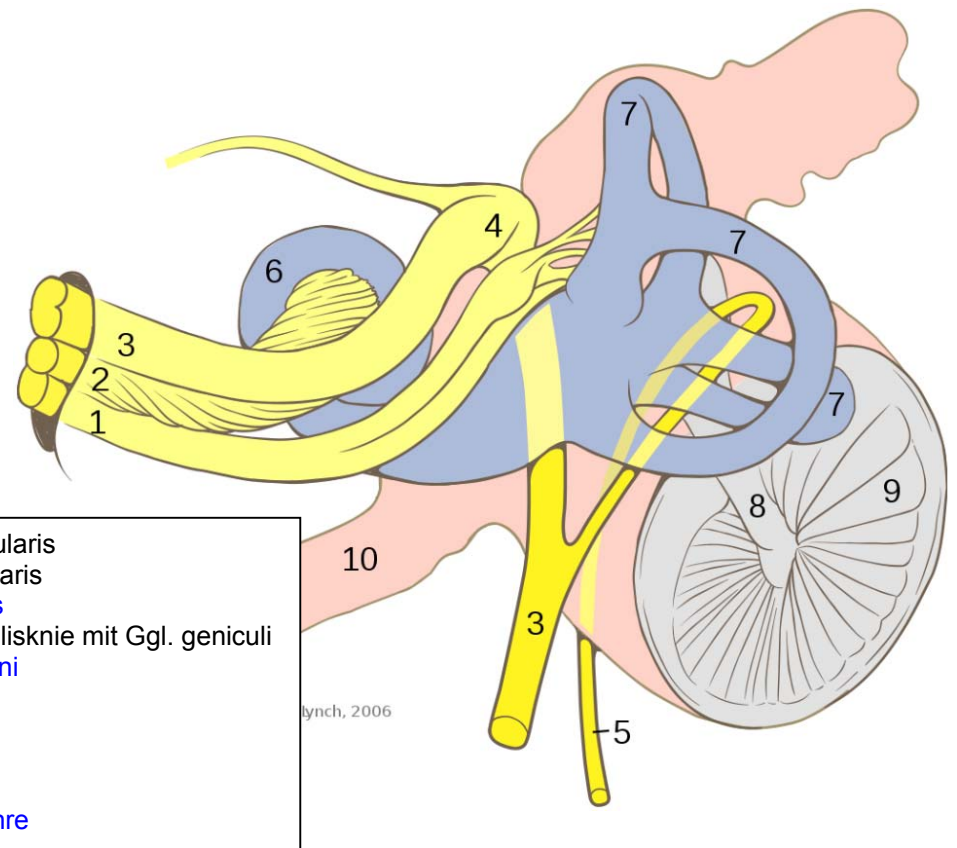
Das Innenohr ist ein komplex gestalteter Hohlraum im **Felsenbein**, der als *knöchernes Labyrinth* (*Labyrinthus osseus*) bezeichnet wird. Es ist von einem **Knochen**material umgeben, das nach dem Zahnschmelz das härteste Material im menschlichen Körper darstellt.

Der Hohlraum ist mit einer Flüssigkeit gefüllt, die als Perilymphe bezeichnet wird. In diesen flüssigkeitsgefüllten Hohlraum ist ein dünnwandiges häutiges Labyrinth (*Labyrinthus membranaceus*) eingespannt, welches wiederum mit Endolymphe gefüllt ist.

Zum Mittelohr hin weist das Innenohr, genauer der Perilymphraum, zwei Öffnungen auf. Das „ovale Fenster“ (**Fenestra vestibuli**, Syn. Fenestra ovalis) ist durch die Fußplatte des **Steigbügels** verschlossen und ist die Ankopplungsstelle der **Gehörknöchelchenkette**, an der die durch Schallwellen ausgelöste Schwingungen auf das Innenohr übertragen werden. Die zweite Öffnung ist das „runde Fenster“ (**Fenestra cochleae**), welches durch das sekundäre Trommelfell (*Membrana tympani secundaria*) verschlossen ist und die in der Hörschnecke entstehenden Schwingungen abdämpft.

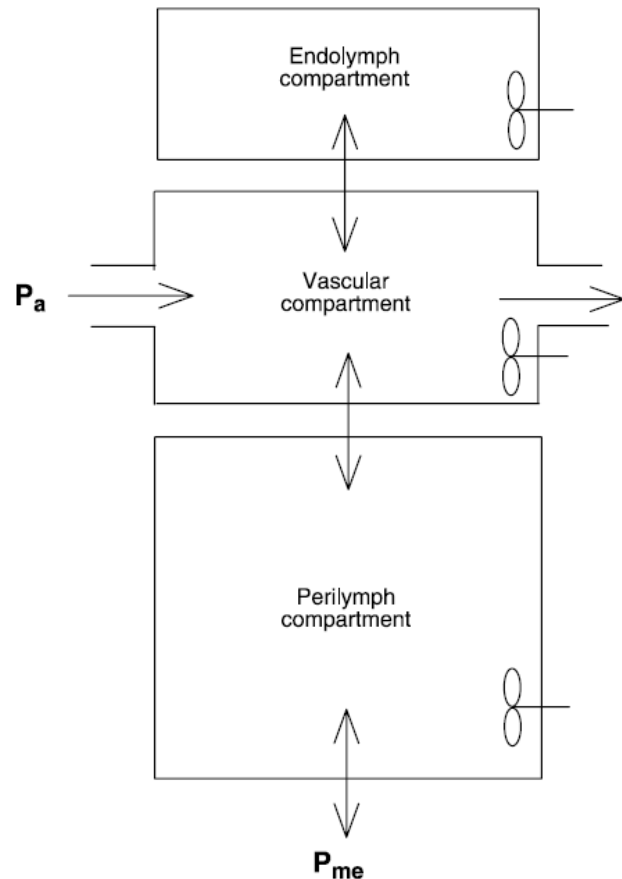
....

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Innenohr>



- 1 Nervus vestibularis
- 2 Nervus cochlearis
- 3 Nervus facialis
- 4 äußeres Fazialisknie mit Ggl. geniculi
- 5 Chorda tympani
- 6 Hörschnecke
- 7 Bogengänge
- 8 Hammerstiel
- 9 Trommelfell
- 10 Eustachi-Röhre

Doolette und Mitchell (2003)



Sie konstruierten ein mathematisches Modell des Labyrinths im Innenohr aus 3 Kompartimenten:

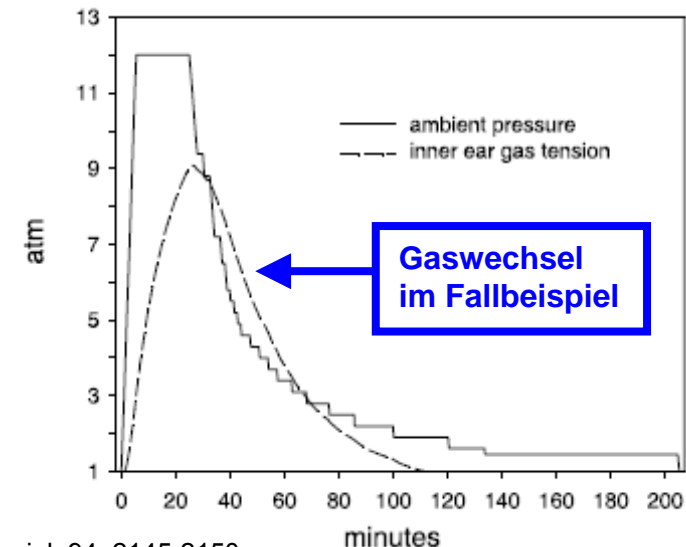
- Endolymph compartment = die Flüssigkeitsfüllung des Innenohrs. Der Gasaustausch erfolgt nur über die Durchblutung.
- Vascular compartment = das gut durchblutete Innenohr.
- Perilymph compartment = Flüssigkeit, in welche das Innenohr eingebettet ist. Der Gasaustausch erfolgt mit dem Blut und der Umgebung.

Ergebnis der Modellrechnung:

Die Gegendiffusion der Inertgase Stickstoff und Helium im Bereich Perilymphe - Labyrinth - Endolympe führt zu einer Übersättigung in der Haut des Labyrinths und in der flüssigen Füllung des Labyrinths (Endolympe).

Schlussfolgerungen:

- Die lokale Übersättigung kann mit normalen Sättigungs-Algorithmen (z.B. nach Bühlmann) nicht berechnet werden.
- Gaswechsel sollten entweder tief oder flach erfolgen, um die maximale Übersättigung des Innenohrs zu vermindern.



4. Strategien zum Umgang mit Gegendiffusion

Anzuggas

- Kein Trimix als Anzuggas. Helium im Tauchanzug kann zur Gegendiffusion über die Haut und einer Dekompressionserkrankung der Haut führen. Helium hat den weiteren Nachteil eines deutlich größeren Wärmeverlustes gegenüber Luft.
- Luft (N₂) oder noch besser Argon (Ar) vermeiden Gegendiffusion über die Haut und bieten eine bessere Wärmeisolierung.

Gaswechsel von Stickstoff (N₂) auf Helium (He)

- ... sind nur in der Abtauchphase erlaubt.

Gaswechsel von Helium (He) auf Stickstoff (N₂) in der Auftauchphase

- ... verkürzen die Deko- Zeiten.
- ... bieten die Gefahr eines Innenohr-Dekompressionsunfalls, auch bei korrekter Dekompression.
Ursache = lokale Übersättigung im Innenohr (Gleichgewichtsorgan) durch Gegendiffusion
- ... sollten relativ tief oder relativ flach erfolgen, um nicht in die Phase maximaler Übersättigung des Innenohrs zu liegen.
- Die Partialdrucksprünge von Helium (He) und Stickstoff (N₂) in der Auftauchphase sollten nicht zu groß werden.
- Partialdrucksprünge können minimiert werden durch die Wahl des maximal tolerierbaren O₂ Partialdrucks.

→ Welche Partialdrucksprünge sind tolerierbar?

Überlegungen zu erlaubten Partialdruckänderungen von Helium und Stickstoff

(1) Atmosphärischer Gaswechsel

Ein Gaswechsel von HeliOx (79 % He + 21 % O₂) auf Luft (79 % N₂ + 21 % O₂) macht keine Probleme.

→ unproblematische Partialdruckänderungen:

$$\begin{aligned}\Delta p(\text{He}) &= 0 \cdot 1 \text{ bar} - 0.79 \cdot 1 \text{ bar} &&= - 0.79 \text{ bar} \\ \Delta p(\text{N}_2) &= 0.79 \cdot 1 \text{ bar} - 0 \cdot 1 \text{ bar} &&= + 0.79 \text{ bar}\end{aligned}$$

Überlegungen zu erlaubten Partialdruckänderungen von Helium und Stickstoff

(1) Atmosphärischer Gaswechsel

Ein Gaswechsel von HeliOx (79 % He + 21 % O₂) auf Luft (79 % N₂ + 21 % O₂) macht keine Probleme.

→ unproblematische Partialdruckänderungen:

$$\Delta p(\text{He}) = 0 \cdot 1 \text{ bar} - 0.79 \cdot 1 \text{ bar} = - 0.79 \text{ bar}$$

$$\Delta p(\text{N}_2) = 0.79 \cdot 1 \text{ bar} - 0 \cdot 1 \text{ bar} = + 0.79 \text{ bar}$$

(2) Fallbeispiel

Der Gaswechsel von Trimix 8/60 auf Luft beim Auftauchen in 30 m Tiefe macht Probleme.

→ problematische Partialdruckänderungen:

$$\Delta p(\text{He}) = 0 \cdot 4 \text{ bar} - 0.60 \cdot 4 \text{ bar} = - 2.40 \text{ bar}$$

$$\Delta p(\text{N}_2) = 0.79 \cdot 4 \text{ bar} - 0.32 \cdot 4 \text{ bar} = + 1.88 \text{ bar}$$

Überlegungen zu erlaubten Partialdruckänderungen von Helium und Stickstoff

(1) Atmosphärischer Gaswechsel

Ein Gaswechsel von HeliOx (79 % He + 21 % O₂) auf Luft (79 % N₂ + 21 % O₂) macht keine Probleme.

→ unproblematische Partialdruckänderungen:

$$\begin{aligned}\Delta p(\text{He}) &= 0 \cdot 1 \text{ bar} - 0.79 \cdot 1 \text{ bar} &&= - 0.79 \text{ bar} \\ \Delta p(\text{N}_2) &= 0.79 \cdot 1 \text{ bar} - 0 \cdot 1 \text{ bar} &&= + 0.79 \text{ bar}\end{aligned}$$

(2) Fallbeispiel

Der Gaswechsel von Trimix 8/60 auf Luft beim Auftauchen in 30 m Tiefe macht Probleme.

→ problematische Partialdruckänderungen:

$$\begin{aligned}\Delta p(\text{He}) &= 0 \cdot 4 \text{ bar} - 0.60 \cdot 4 \text{ bar} &&= - 2.40 \text{ bar} \\ \Delta p(\text{N}_2) &= 0.79 \cdot 4 \text{ bar} - 0.32 \cdot 4 \text{ bar} &&= + 1.88 \text{ bar}\end{aligned}$$

(3) Die "Ein Fünftel-Regel"

Steve Burton (2004) hat eine einfache Regel abgeleitet, die sich auf die Löslichkeitsfaktoren der Inertgase Stickstoff und Helium für Fettgewebe bezieht. Stickstoff löst sich fast 5 mal besser als Helium.

$$\begin{aligned}\text{Löslichkeit He} &= 0.015 \\ \text{Löslichkeit N}_2 &= 0.067\end{aligned}$$

→ Der Anstieg im Stickstoff-Partialdruck soll nicht mehr als 1/5 der Reduktion im He Partialdruck sein

$$\Delta p(\text{N}_2) < - 1/5 \cdot \Delta p(\text{He})$$

Überlegungen zu erlaubten Partialdruckänderungen von Helium und Stickstoff

(1) Atmosphärischer Gaswechsel

Ein Gaswechsel von HeliOx (79 % He + 21 % O₂) auf Luft (79 % N₂ + 21 % O₂) macht keine Probleme.

→ unproblematische Partialdruckänderungen:

$$\begin{aligned}\Delta p(\text{He}) &= 0 \cdot 1 \text{ bar} - 0.79 \cdot 1 \text{ bar} &= -0.79 \text{ bar} \\ \Delta p(\text{N}_2) &= 0.79 \cdot 1 \text{ bar} - 0 \cdot 1 \text{ bar} &= +0.79 \text{ bar}\end{aligned}$$

(2) Fallbeispiel

Der Gaswechsel von Trimix 8/60 auf Luft beim Auftauchen in 30 m Tiefe macht Probleme.

→ problematische Partialdruckänderungen:

$$\begin{aligned}\Delta p(\text{He}) &= 0 \cdot 4 \text{ bar} - 0.60 \cdot 4 \text{ bar} &= -2.40 \text{ bar} \\ \Delta p(\text{N}_2) &= 0.79 \cdot 4 \text{ bar} - 0.32 \cdot 4 \text{ bar} &= +1.88 \text{ bar}\end{aligned}$$

(3) Die "Ein Fünftel-Regel"

Steve Burton (2004) hat eine einfache Regel abgeleitet, die sich auf die Löslichkeitsfaktoren der Inertgase Stickstoff und Helium für Fettgewebe bezieht. Stickstoff löst sich fast 5 mal besser als Helium.

$$\text{Löslichkeit He} = 0.015$$

$$\text{Löslichkeit N}_2 = 0.067$$

→ Der Anstieg im Stickstoff-Partialdruck soll nicht mehr als 1/5 der Reduktion im He Partialdruck sein

$$\Delta p(\text{N}_2) < -1/5 \cdot \Delta p(\text{He})$$

Im obigen Fallbeispiel würde das bedeuten:

$$\Delta p(\text{N}_2) = -1/5 \cdot \Delta p(\text{He}) = 2.40 \text{ bar} / 5 = 0.48 \text{ bar}$$

$$p(\text{N}_2) = 0.32 \cdot 4 \text{ bar} + 0.48 \text{ bar} = 1.76 \text{ bar}$$

$$p(\text{O}_2) = 1.3 \text{ bar}$$

$$p(\text{He}) = 4 \text{ bar} - 1.3 \text{ bar} - 1.76 \text{ bar} = 0.94 \text{ bar}$$

$$\rightarrow f(\text{N}_2) = 1.76 / 4 = 0.440$$

$$\rightarrow f(\text{O}_2) = 1.3 / 4 = 0.325$$

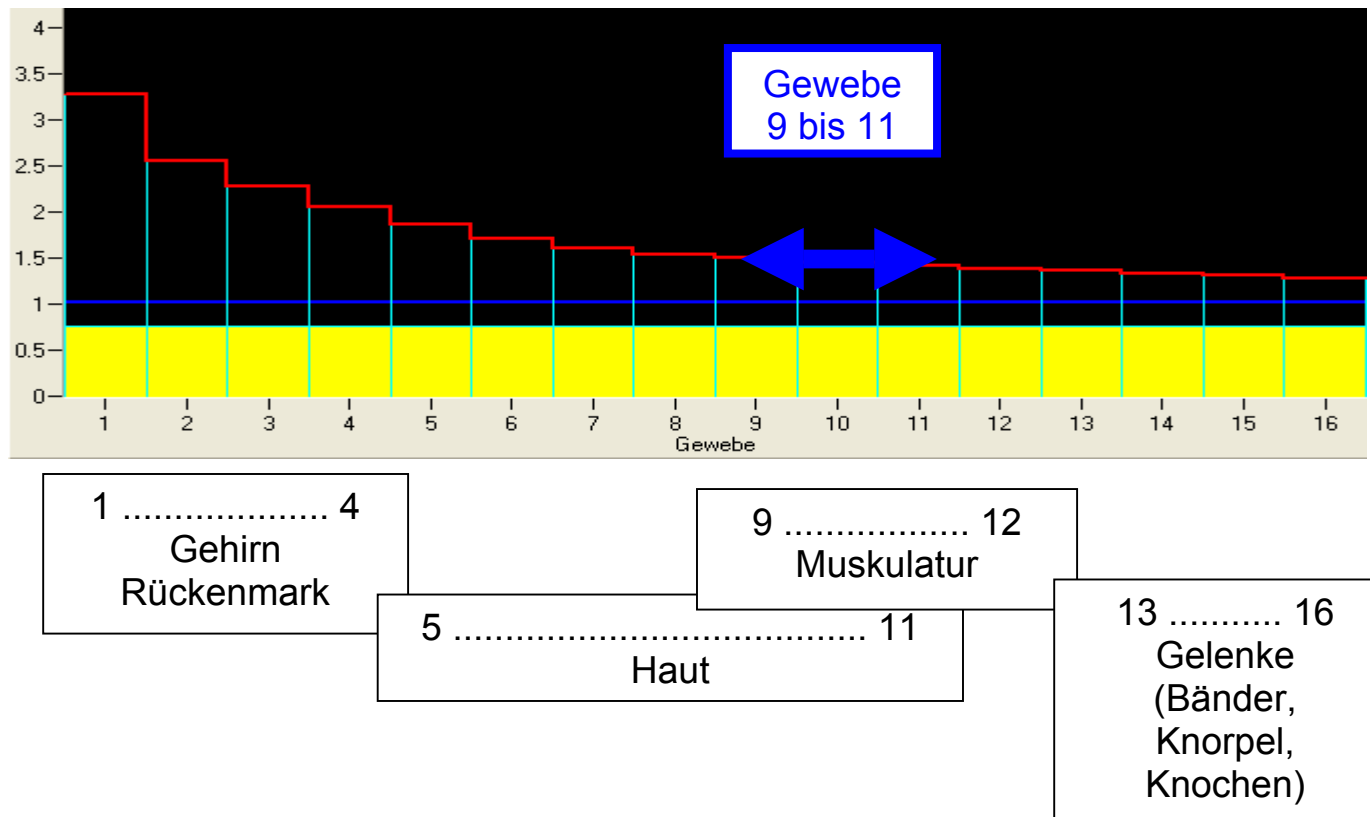
$$\rightarrow f(\text{He}) = 0.94 / 4 = 0.235$$

→ Trimix 33/24 mit 33 % O₂ und 24 % He

5. Quantifizierung der Gegendiffusion im Decotrainer

Das Dekompressionsprogramm "Decotrainer" (www.decotrainer.de) beruht auf der Sättigungs- und Entsättigungsberechnung mit den Algorithmen von Bühlmann (1982). Die Problematik von isolierten Innenohr-Dekompressionsunfällen kann mit den Bühlmann Formeln nicht vollständig erfasst werden (auch nicht mit der Ergänzung durch Gradientenfaktoren).

Bereits Bühlmann hat das Auftreten von Innenohr- Dekompressionsunfällen beschrieben und "kritische" Gewebe abgeleitet. Aus der Analyse der Symptome nach Dekompressionsunfällen ergibt sich lt. Bühlmann:

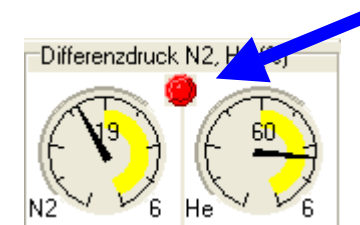


Gegendiffusion im Decotrainer

Die Gegendiffusion wird berechnet und dient als Grundlage für neu eingeführte Grenzwerte (Rauen, 2011). Decotrainer gibt eine Gegendiffusionswarnung aus, wenn diese 4 Kriterien erfüllt sind:

(1) Gegendiffusion > Grenzwert

- beide Inertgase N_2 und He sind beteiligt
- entscheidend sind die Differenzen der Partialdrücke der beiden Inertgase N_2 und He zwischen Atemgas und im Gewebe gelöstem Gas

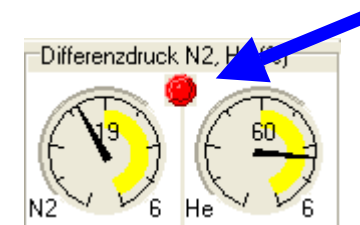


Gegendiffusion im Decotrainer

Die Gegendiffusion wird berechnet und dient als Grundlage für neu eingeführte Grenzwerte (Rauen, 2011). Decotrainer gibt eine Gegendiffusionswarnung aus, wenn diese 4 Kriterien erfüllt sind:

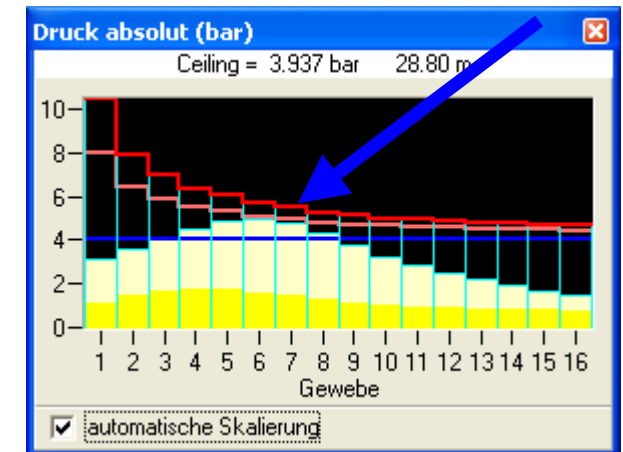
(1) Gegendiffusion > Grenzwert

- beide Inertgase N_2 und He sind beteiligt
- entscheidend sind die Differenzen der Partialdrücke der beiden Inertgase N_2 und He zwischen Atemgas und im Gewebe gelöstem Gas



(2) Gewebesättigung > Umgebungsdruck

- keine Warnung in der Abtauchphase
- theoretisch könnte eine Warnung in der Grundphase entstehen ("isobare Gegendiffusion")



(3) Gesamte Gewebesättigung > Grenzwert

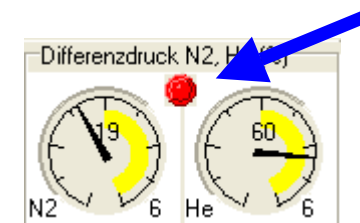
- Warnung nur bei deutlicher Gewebesättigung
- Warnung entsteht früher bei Anwendung von Gradientenfaktoren

Gegendiffusion im Decotrainer

Die Gegendiffusion wird berechnet und dient als Grundlage für neu eingeführte Grenzwerte (Rauen, 2011). Decotrainer gibt eine Gegendiffusionswarnung aus, wenn diese 4 Kriterien erfüllt sind:

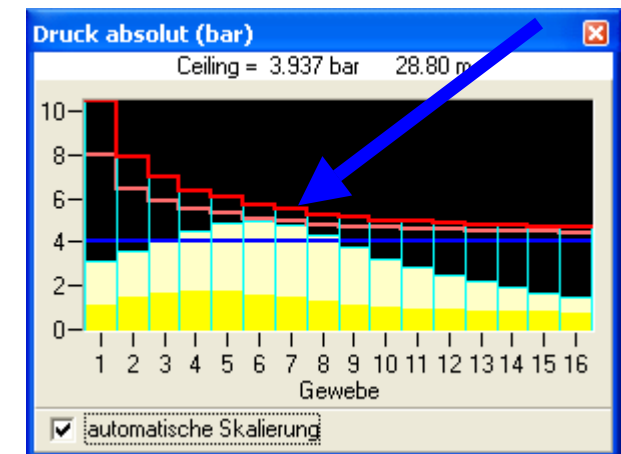
(1) Gegendiffusion > Grenzwert

- beide Inertgase N_2 und He sind beteiligt
- entscheidend sind die Differenzen der Partialdrücke der beiden Inertgase N_2 und He zwischen Atemgas und im Gewebe gelöstem Gas



(2) Gewebesättigung > Umgebungsdruck

- keine Warnung in der Abtauchphase
- theoretisch könnte eine Warnung in der Grundphase entstehen ("isobare Gegendiffusion")

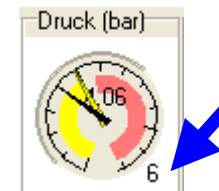


(3) Gesamte Gewebesättigung > Grenzwert

- Warnung nur bei deutlicher Gewebesättigung
- Warnung entsteht früher bei Anwendung von Gradientenfaktoren

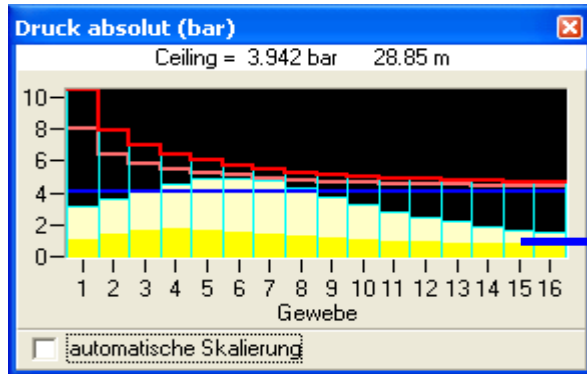
(4) Gewebe mit maximaler Sättigung = "kritisches" Gewebe

- kritisch lt. Bühlmann sind die Gewebe 9 - 11
- kritisch lt. Decotrainer sind die Gewebe 5 - 11, weil das die "Haut"- Gewebe sind

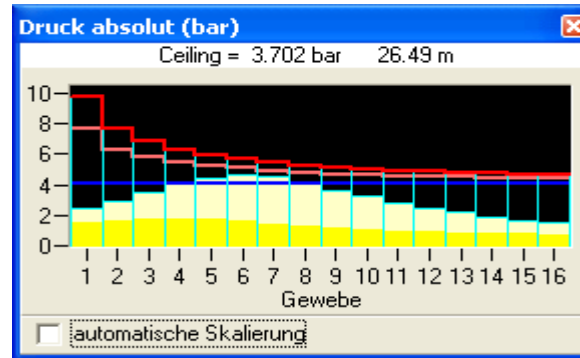


Fallbeispiel: Decotrainer- Analyse mit / ohne Gaswechsel

Beginn 30 m Stop
TMX 8/60

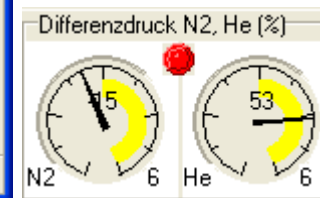


Ende 30 m Stop
Luft (nach Gaswechsel)



55.0 min

► schnellere Entsättigung



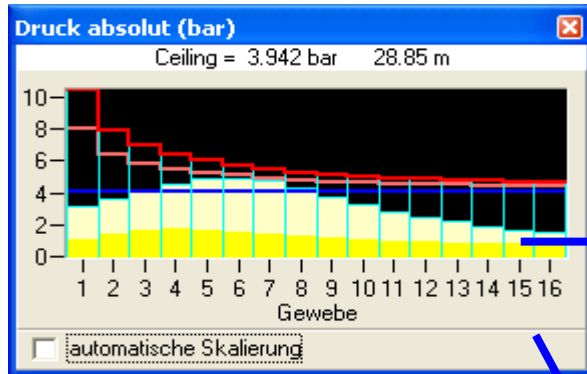
gesamte
Tauchzeit

199.1 min

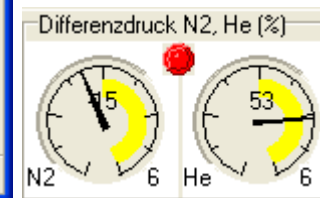
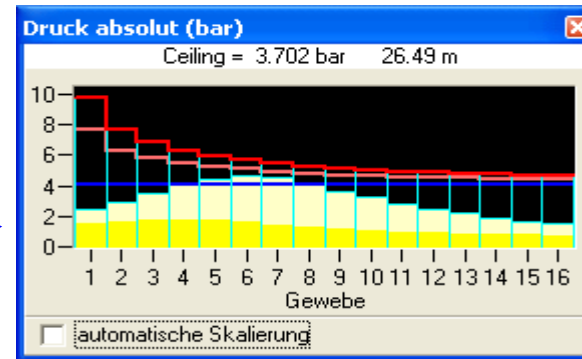
► Gegendiffusion

Fallbeispiel: Decotrainer- Analyse mit / ohne Gaswechsel

Beginn 30 m Stop
TMX 8/60



Ende 30 m Stop
Luft (nach Gaswechsel)



gesamte
Tauchzeit

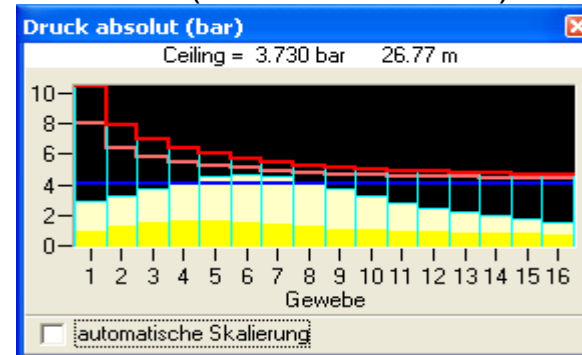
55.0 min

► schnellere Entsättigung

► Gegendiffusion

199.1 min

TMX 8/60 (ohne Gaswechsel)



56.0 min

► langsamere Entsättigung

► keine Gegendiffusion

226.1 min

= + 27 min

6. Zusammenfassung

- (Isobare) **Gegendiffusion** tritt beim technischen Tauchen immer dann auf, wenn 2 oder mehr Inertgase verwendet werden, also immer beim Trimix-Tauchen.
- Gegendiffusion **muss nicht isobar** sein.
- Es gibt 2 Typen der Gegendiffusion:
 - **Oberflächen-Gegendiffusion**: Gasaustausch über die Haut und über die Lunge.
 - **Gegendiffusion der Tiefengewebe**: Verschiedene Inertgase im Atemgas in zeitlicher Abfolge (Gaswechsel).
- Gegendiffusion im Innenohr während der Dekompressionsphase kann eine isolierte **Dekompressionserkrankung des Innenohrs** auslösen.
- Empfehlung für das **Gas im Trockentauchanzug**: Luft oder Argon, kein Trimix (wegen Gegendiffusion über die Haut).
- **Gaswechsel in der Abtauchphase** sind kein Problem.
- **Gaswechsel in der Auftauchphase**:
 - Nur Wechsel von He- reichen Gemischen auf N₂- reiche Gemische, nicht umgekehrt.
 - Inertgas- Partialdruckänderungen bei Gaswechseln möglichst klein halten.
Faustformel Fünftel- Regel: $\Delta p(\text{N}_2) < 1/5 * \Delta p(\text{He})$.
 - Sauerstoff- Partialdruck möglichst groß halten
 - Gaswechsel nicht bei maximaler Übersättigung des Innenohrs, also eher tief oder eher flach.
- Empfehlung: **kein Gaswechsel → keine Gegendiffusion → kein Problem**.
Nur bei CCR praktisch möglich.
- Das Computerprogramm **Decotrainer** berechnet die Gegendiffusion. In eine evtl. Gegendiffusionswarnung gehen diese Kriterien ein: Partialdruckdifferenzen der Inertgase (zwischen Atemgas und Gewebe), Umgebungsdruck, Höhe der Sättigung, kritisches Gewebe.

[\[Index\]](#)

[\[Eigenschaften\]](#) [\[Ausbaustufen + Preise\]](#) [\[Screenshots\]](#) [\[Bestellung\]](#) [\[Version\]](#) [\[Downloads\]](#) [\[FAQ\]](#) [\[Links\]](#) [\[Kontakt + Impressum\]](#)

Decotrainer - FAQ - Frequently Asked Questions (neudeutsch für: Was ich immer schon wissen wollte)

Rund um die Installation und Freigabe

- **Frage:** Läuft der Decotrainer auf meinem Palm? [Antwort ...](#)
- **Frage:** Ich kann keine Tauchgangsdaten eingeben. Warum? [Antwort ...](#)
- **Frage:** Wie funktioniert die Registrierung bzw. die Freigabe des Programms? [Antwort ...](#)
- **Frage:** Ich habe einen neuen Rechner. Wie übertrage ich meine Lizenz? [Antwort ...](#)
- **Frage:** Auf meinem Rechner läuft alles total langsam. Wie kann ich das Programm schneller machen? [Antwort ...](#)

Sicherheitszuschläge

- **Frage:** Was bedeutet der Sicherheitszuschlag nach Jübling? [Antwort ...](#)
- **Frage:** Was bedeuten die Gradienten Faktoren? [Antwort ...](#)
- **Frage:** Was ist ein Deco-Stoß? [Antwort ...](#)

Tauchgangsberechnung

- **Frage:** Wieso ist in der Ausbaustufe "Sporttaucher" die Tiefe auf 63 m begrenzt? Warum gerade dieser Wert? [Antwort ...](#)
- **Frage:** Ich will einen Tauchgang auf 24 m bei 12 min Grundzeit eingeben. Der Decotrainer macht mir aus den 24 m jedesmal 25 m. Hat der Decotrainer eine Allergie auf die Zahl 24? [Antwort ...](#)
- **Frage:** Ich habe einen Trimix Tauchgang gerechnet. Nach dem Tauchgangsende erscheint im Fenster "Gewebesättigung", in der 2. Spalte, ein rotes Feld, also eine kritische Übersättigung. Rechnet mir der Decotrainer einen Dekounfall aus? [Antwort ...](#)
- **Frage:** Wenn ich einen Tauchgang für den Walchensee rechne, und dann den gleichen Tauchgang für das Mittelmeer, dann wird die Flugverbotszeit viel länger. Warum? [Antwort ...](#)
- **Frage:** Was ist eigentlich ein "Bail-Out"? [Antwort ...](#)
- **Frage:** Ich will einen CCR Tauchgang mit Tmx15/60 auf 70 m rechnen. Nach 10 min Grundzeit habe ich ein Problem und will auf OC (Offenes System) umsteigen und austauschen. Welche Parameter muss ich wie einstellen? [Antwort ...](#)

[\[\(c\) www.Decotrainer.de - Dr. Armin Rauen\]](#)

7. Quellen

Bühlmann A. A., Völlm E. B. & Nussberger P. (2002): Tauchmedizin. 5. Auflage, Springer-Verlag.

Burton Steve (2004): How to avoid a isobaric counterdiffusion hit - or a simple visualization for determining the tolerable increase in inspired nitrogen percentage during the decompression phase of trimix dives. http://www.scubaengineer.com/isobaric_counter_diffusion.htm

D'Aoust & Lambertsen (1983): Isobaric gas exchange and supersaturation by counterdiffusion, 383-403. In: Peter Bennett & David Elliott: Physiology and medicine of diving, 3rd ed.

Doolette David J. & Mitchell Simon J. (2003): Biophysical basis for inner ear decompression sickness. J Appl Physiol 94: 2145-2150, 2003, 1st published 31 january 2003.

Gerthsen, Kneser, Vogel (1977): Physik. Springer, 13. Auflage.

Lambertsen C.J. (1989): Relations of isobaric counterdiffusion and decompression gas lesion diseases. From: The physical basis of decompression. Proceedings of the 38th Undersea and Hyperbaric Medical Society Workshop. Ed. by Richard D. Vann. UHMS publication number 75(Phys)6/1/89, june 1989. <http://archive.rubicon-foundation.org>

Lettnin Heinz K. J. (2001): International Textbook of Mixed Gas Diving. Theory, Technique, Application. Best Publishing Company, 2nd printing.

Rauen (2011): Decotrainer-Handbuch - Handbuch zum Dekompressionsprogramm "Decotrainer". www.decotrainer.de

Wikipedia (deutsch) > Innenohr

Wikipedia (english) > Decompression (diving)

Wikipedia (english) > Isobaric counterdiffusion