



TAUCHCOMPUTER VERSTEHEN

• TAUCHCOMPUTER VERSTEHEN

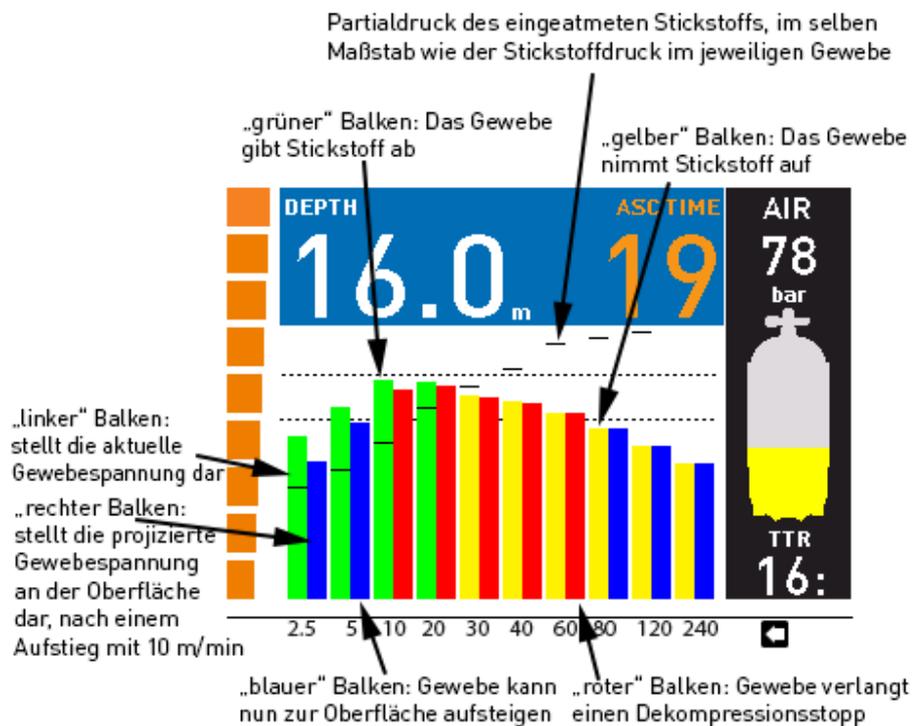
Der Dekompressions-Algorithmus in Tauchcomputern ist der Versuch, die Auswirkungen eines Tauchgangs auf den menschlichen Körper mit mathematischen Gleichungen darzustellen. Stickstoffaufnahme und -abgabe werden in einer bestimmten Anzahl sogenannter Kompartimente simuliert, von denen jedes eine bestimmte Gewebegruppe im Körper repräsentiert. So gibt es beispielsweise ein Kompartiment, das für die Muskeln steht, ein anderes für die Knochen, usw..

Die Gewebe werden durch ihre Gewebehalbzzeit¹ definiert. Dieser Parameter gibt an, mit welcher Geschwindigkeit das Gewebe Stickstoff aufnimmt. Der Mares Algorithmus verwendet 10 Gewebekompartimente mit folgenden Gewebehalbzzeiten in Minuten: 2,5, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 120 und 240. Gewebe mit kurzen Halbzzeiten nennt man „schnell“, Gewebe mit langen Halbzzeiten „langsam“.

Jedes Gewebe wird zusätzlich durch einen zweiten Parameter definiert, den sogenannten M-Wert². Er stellt dar, in welchem Verhältnis der maximale Druck (auch als Gewebespannung bezeichnet) zum Umgebungsdruck, den ein gegebenes Gewebe tolerieren kann, steht. Der Begriff „Übersättigung“ beschreibt den Überdruck in einem Gewebe in Bezug auf den Umgebungsdruck.

Im Wesentlichen überwacht ein Tauchcomputer das Auf- und Entsaugen von Stickstoff in den einzelnen Geweben, je nach Zeit-/Tiefe-Profil und Halbzzeit des jeweiligen Gewebes. **Das entscheidende Kontrollkriterium für einen sicheren Aufstieg ist, dass während des Tauchgangs und beim Austauschen in keinem Gewebe der M-Wert überschritten werden darf.** Wenn dieses Kriterium nicht erfüllt wird, muss der Aufstieg durch einen oder mehrere Dekompressionsstopps unterbrochen werden, bei denen Stickstoff entsättigt werden kann, während sich der Taucher auf einem Umgebungsdruck befindet, bei dem das Kriterium erfüllt ist.

In diesem Text werden wir beschreiben, wie sich der Stickstoffdruck (auch als Gewebespannung bezeichnet) während eines Tauchgangs entwickelt und wie sich dies auf die Dekompressionsberechnung auswirkt. Zu diesem Zweck verwenden wir die neue grafische Darstellung der Gewebe im Icon HD Net Ready (Firmware 4.0), mit der wir die Entwicklung der Spannung in allen Geweben während eines Tauchgangs „live“ verfolgen können. Dieselbe Entwicklung der Gewebespannung kann auch später auf dem PC oder Mac (unter Verwendung von DiveOrganizer bzw. DiversDiary)



betrachtet werden, wenn die Daten von einem kompatiblen Mares Tauchcomputer heruntergeladen wurden.

Die zehn Gewebe werden auf einer horizontalen Achse aufgetragen, mit von links nach rechts zunehmenden Gewebehalbzzeiten. Jedes Gewebe wird mit zwei vertikalen Balken dargestellt. Die Höhe des linken Balkens gibt die zum jeweiligen Zeitpunkt aktuelle Stickstofflast wieder. Die Höhe des rechten Balkens gibt an, wie der Wert wäre, wenn aus der aktuellen Tiefe mit 10 m/min zur Oberfläche aufgestiegen würde. Das ist sehr wichtig, denn während des Aufstiegs wird immer noch Stickstoff ausgetauscht, der in die Berechnung einbezogen werden muss (das ist ziemlich offensichtlich, bedenkt man, dass ein Aufstieg aus 40 m Tiefe mindestens 4 Minuten dauert, was fast zweimal die Gewebehalbzzeit des schnellsten Gewebes und fast die ganze Halbzzeit des zweit-schnellsten Gewebes ist).

Je nach Status des Gewebes zu einem gegebenen Zeitpunkt kann der linke Balken ein wenig höher oder niedriger sein als der rechte Balken. Er ist höher, wenn das Gewebe ziemlich vollständig mit Stickstoff gesättigt ist und während des Aufstiegs durch den sinkenden Druck entsättigen wird. Er ist niedriger, wenn das Gewebe noch schwach gesättigt ist und trotz abnehmenden Drucks während des Aufstiegs mehr Stickstoff aufnehmen als abgeben wird (natürlich wird jedes Gewebe Stickstoff entsättigen, wenn es nahe genug an der Oberfläche ist). Beachten Sie, dass für die langsamen Gewebe

ganz rechts, wegen ihrer langen Halbzzeiten, die Differenz während des Aufstiegs nicht wahrnehmbar ist, und die beiden Balken, die für jeweils ein Gewebe stehen, gleich hoch sind.

Die vertikale Achse der Grafik wird normalisiert, das heißt, dass der M-Wert für jedes Gewebe gleich hoch aufgetragen wird. Dann wird bei diesem Wert eine horizontale Linie durch die Grafik gezogen. Wir nennen diese Linie die „Null“-Linie, wie in 0 m, also Oberfläche. So ist auf einen Blick erkennbar: Übersteigt einer der rechten Balken während des Tauchgangs diese Linie, bedeutet das, dass dieses Gewebe das Kontrollkriterium verletzen würde, wenn jetzt zur Oberfläche aufgetaucht würde (es würde den M-Wert überschreiten). Folglich befinden wir uns nun in einer dekompensationspflichtigen Situation, d.h., wir müssen uns für eine gewisse Zeit unter der Oberfläche aufhalten (auf einem höheren Umgebungsdruck als dem an der Oberfläche, bei dem das Kontrollkriterium noch erfüllt ist), wo wir etwas Stickstoff entsättigen können, bis die Balkenhöhe wieder unter die Nulllinie sinkt. Damit die Grafik unmittelbarer verstanden werden kann, wechselt der rechte Balken von BLAU auf ROT, wenn er die Nulllinie überschreitet. Ein ROTER Balken zeigt also Dekompensationspflicht an. Wenn genug Stickstoff entsättigt wurde, dass der Balken wieder unter die Nulllinie sinkt, wechselt die Farbe wieder auf blau.

Die zweite horizontale Linie in der Grafik, über der Nulllinie, nennen wir die „3 m“ Linie.

¹ Der Name ergibt sich aus der Definition, die besagt, dass ein Gewebe innerhalb dieser Zeit die Differenz zwischen seinem ursprünglichen Zustand und seinem neuen Zustand um die Hälfte senken wird. Innerhalb zweier Gewebehalbzzeiten sinkt die Differenz um 75 % (50 % der verbliebenen 50 % in der zweiten Gewebehalbzzeit), um 87,5 % nach drei Gewebehalbzzeiten, 93,75 % nach 4, 96,875 % nach 5 und 98,44 % nach 6 Gewebehalbzzeiten.

² Im Mares RGBM Algorithmus sind die M-Werte dynamisch und passen sich an das Tauchgangsprofil an.

Sie stellt das Kontrollkriterium bezogen auf eine Tiefe von 3 m dar. Analog zu dem, was wir in Bezug auf die Nulllinie gesagt haben, bedeutet das Überschreiten dieser Linie durch einen Balken, dass wir bei einem Aufstieg eine Tiefe von 3 m verletzen würden. Anders gesagt, sobald einer der rechten Balken diese Linie überschreitet, besteht bereits auf 6 m Tiefe Dekompensationspflicht³. Diese Argumentation kann auch auf den 9-m-Stop und darüber hinaus erweitert werden, aber wir beschränken die Darstellung auf diese beiden Linien, um die Grafik übersichtlich zu halten.

Da die M-Werte nicht für jedes Gewebe gleich sind (schnelle Gewebe tolerieren mehr Übersättigung als langsame Gewebe), und da alle Gewebe den ersten Tauchgang mit einem Stickstoffpartialdruck von 0,79 bar beginnen (der Partialdruck im Gewebe entspricht dem der Luft bei Normaldruck auf Meereshöhe⁴), sind folglich am Anfang eines ersten Tauchgangs die Gewebe auf der linken Seite niedriger als die auf der rechten⁵. Wir sprechen hier von „erster Tauchgang“ weil es sich nicht um einen Wiederholungstauchgang handelt, also keine Restsättigung aus einem vorangegangenen Tauchgang vorhanden ist, die das Bild verändern würde. Alles im Folgenden Gesagte gilt natürlich auch für Wiederholungstauchgänge, mit dem einen Unterschied, dass der Ausgangspunkt nicht für alle Gewebe bei einem ppN_2 von 0,79 bar, sondern höher liegt, entsprechend der Restsättigung aus dem vorangegangenen Tauchgang und der zwischenzeitlichen Oberflächenpause. In der Grafik zeigt sich klar, warum ein Wiederholungstauchgang restriktiver ist als ein Nicht-Wiederholungstauchgang: Ist noch Reststickstoff vom vorangegangenen Tauchgang vorhanden, sind alle Balken zu Beginn des Tauchgangs näher an der Nulllinie, demzufolge steht auf jeder Tiefe weniger Zeit zur Verfügung, bis einer von ihnen diese Grenze überschreitet.

In der Grafik wird für jedes Gewebe über dem jeweils linken Balken ein kleines horizontales Segment angezeigt. Die Position dieses Segments auf der vertikalen Achse gibt den Stickstoffpartialdruck im eingeatmeten Gas an. Im Verlauf des Tauchgangs können Sie beobachten, wie sich dieses Segment mit zunehmender / abnehmender Tiefe nach oben bzw. unten verschiebt. Im Falle eines Gaswechsels, z.B. von Luft auf 80 % Nitrox, wird die Position einen deutlichen Sprung machen.

Die Position dieses Segments auf der vertikalen Achse spielt eine wichtige Rolle für das Verständnis der Dynamik im Gewebe: Der Abstand zwischen dem Segment und der Oberkante des Balkens zeigt die Stickstoff-Partialdruckdifferenz zwischen

Gewebe und Atemgas, d.h. die treibende Kraft des Gasaustauschs. Dies wird auch als Druckgradient bezeichnet. Liegen die beiden weit auseinander, wird viel Gas auf- bzw. entsättigt (innerhalb der Grenzen der Gewebehalbzzeit). Liegen die beiden nahe beisammen, ist das Gewebe nahe am Gleichgewichtszustand. Damit die Grafik leichter zu verstehen ist, wird der Balken GELB dargestellt, wenn das Segment ÜBER dem Balken liegt und das Gewebe somit Gas aufnimmt (der Partialdruck im Atemgas ist höher als der Partialdruck im Gewebe); der Balken wird GRÜN dargestellt, wenn das Segment INNERHALB des Balkens liegt und das Gewebe somit Gas abgibt (der Partialdruck im Atemgas ist niedriger als der Partialdruck im Gewebe).

• ANWENDUNG DER GEWEBEGRAFIK AUF EINEN RECHTECKTAUCHGANG

Wir verwenden einen Rechtecktauchgang auf 30 m Tiefe, weil wir an dieser Art Tauchgangsprofil die oben beschriebenen Aspekte am einfachsten zeigen können. Wir analysieren den Sättigungsstatus aller Gewebe an neun bestimmten Punkten des Tauchgangs. Dazu nutzen wir die Grafik, wie sie vom Icon HD während des Tauchgangs angezeigt wird. Wir beginnen mit der Situation ganz am Anfang des Tauchgangs, dargestellt in Abbildung 1. Wir sehen, dass alle Gewebe deutlich unter der Nulllinie sind und wir sehen zudem, dass das kleine Segment, das den Partialdruck im Atemgas darstellt, auf derselben Höhe mit der Oberkante der einzelnen Balken liegt (ausgeglichener Zustand bei Oberflächendruck). Bei einem Nitroxtauchgang läge das Segment innerhalb des Balkens und würde damit anzeigen, dass das Atmen von Nitrox an der Oberfläche zunächst zu einer Entsättigung führen würde.

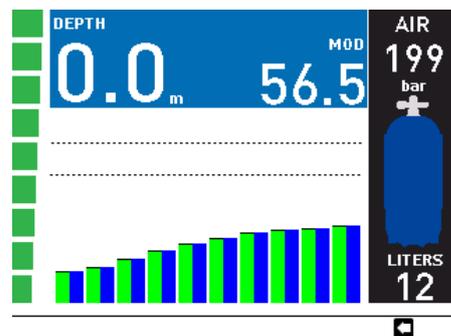
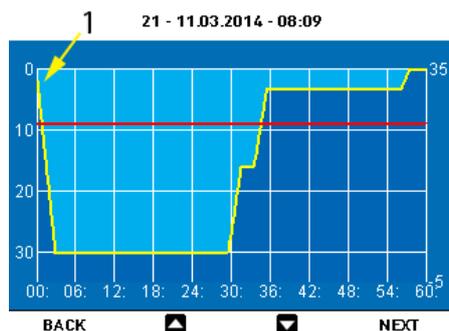


Abb. 1: Gewebespannung zu Beginn des Tauchgangs.

Abbildung 2 zeigt die Situation am Ende des Abstiegs: Die Balkenhöhe hat ein wenig zugenommen, da während des eineinhalb Minuten langen Abstiegs Stickstoff aufgenommen wurde. Außerdem sehen wir, dass die Segmente, die für den Stickstoffdruck im Atemgas stehen, nach oben gewandert sind, und damit anzeigen, dass Stickstoff in die Gewebe gezwungen wird, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die proportional ist zur Distanz zwischen dem Segment und der Oberkante des jeweiligen Balkens.

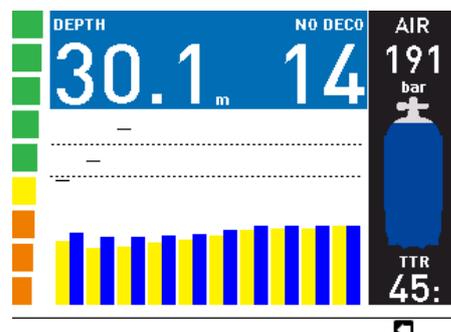
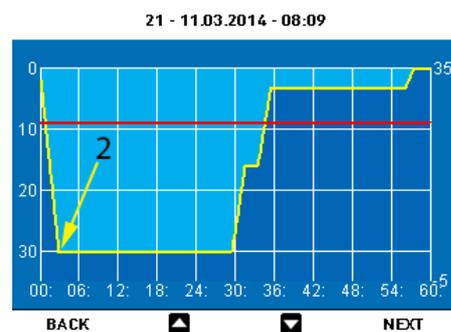


Abb. 2: Gewebespannung am Ende des Abstiegs.

Auf einer konstanten Tiefe nimmt die Geschwindigkeit, mit der ein Gewebe aufsättigt mit der Zeit ab, weil die Druckdifferenz zwischen Atemgas und sättigendem

³ Ein 6-m-Stopp bedeutet nicht, dass wir auf 6 m zwingend einen Dekompensationsstopp machen müssten, es bedeutet nur, dass wir nicht bis zu einer Tiefe von 3 m aufsteigen können, ebenso wie ein 3-m-Stopp nicht bedeutet, dass wir auf 3 m dekomprimieren müssen, sondern dass wir nicht direkt zur Oberfläche aufsteigen können.

Die Verwendung von 3-m-Schritten zur Festlegung von Dekompensationsstopps impliziert, dass wir uns, wenn unsere Stickstofflast nicht mit dem Umgebungsdruck auf 3 m Tiefe vereinbar ist, solange auf 6 m aufhalten müssen, bis wir genug Stickstoff entsättigt haben, dass die Stickstofflast im Gewebe mit dem Umgebungsdruck auf 3 m vereinbar ist.

⁴ Bei Tauchgängen in Bergseen ist der Luftdruck niedriger als auf Meereshöhe. Der Tauchcomputer passt sich daran automatisch an. Auch die M-Werte verändern sich bei solchen Tauchgängen. Um dies einzuberechnen, muss die korrekte Höhenlage von Hand in den Computer eingegeben werden.

⁵ Da die Position des M-Werts auf der vertikalen Achse für alle Gewebe auf dieselbe Höhe gesetzt ist, ist die anfängliche Höhe der Balken für die einzelnen Gewebe die Höhe der Nulllinie geteilt durch den M-Wert des jeweiligen Gewebes.

Gewebe sinkt. Das ist in der Grafik daran zu erkennen, dass sich das Segment, das für den Stickstoffdruck im Atemgas steht, nicht bewegt (weil die Tiefe konstant ist), während der Balken mit zunehmender Stickstoffaufnahme höher wird, sich die beiden also aufeinander zubewegen. Wenn man lange genug auf einer konstanten Tiefe bleibt, erreicht der Gewebebalken das Segment⁶ und es findet kein Gasaustausch mehr statt: Das Gewebe befindet sich im Gleichgewicht, es ist gesättigt. Weiter unten in Abbildung 5 können wir sehen, dass nach 30 Minuten auf 30 Metern tatsächlich die 2,5- und 5-Minuten-Gewebe gesättigt sind, während die langsameren Gewebe umso weiter vom Druckgleichgewicht entfernt sind je länger die Halbwertszeit des Gewebes ist.

Abbildung 3 zeigt die Situation in Minute 18, unmittelbar vor Ende der Nullzeit: Wir sehen, dass das schnellste Gewebe praktisch gesättigt ist (Segment und Oberkante des Balkens fallen zusammen), während sich die sehr langsamen Gewebe kaum verändert haben. Was in diesem Moment aber besonders hervorsteicht, ist die Tatsache, dass der rechte Balken des dritten Segments gleich die horizontale (Null-) Linie berühren wird. Im unmittelbar nächsten Zeitschritt, dargestellt in Abbildung 4, wird er diese Grenze tatsächlich überschreiten.

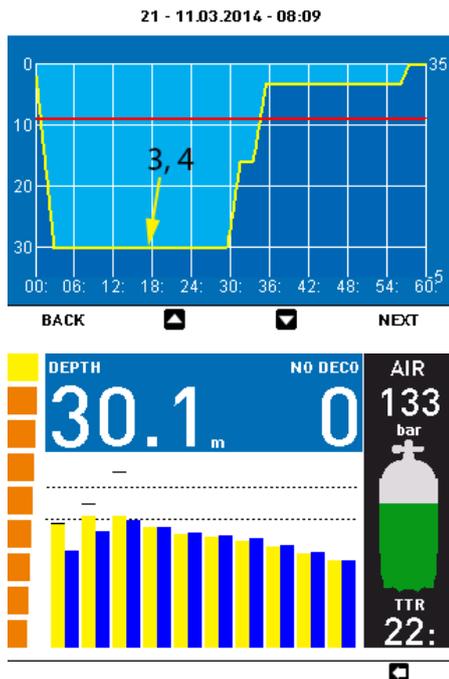


Abb. 3: Gewebespannung am Ende der Nullzeit.

In Abbildung 4 hat das dritte Gewebe die Nulllinie überschritten. Wie bereits gesagt,

zeigt das an, dass dieses Gewebe, wenn es nun mit 10 m/min zur Oberfläche gebracht würde, das Kontrollkriterium verletzen würde. Dies ist also **der Beginn der Dekompressionspflicht**. Damit dies auf einen Blick erkennbar ist, wird der blaue Balken nun rot. Was außerdem interessant ist, ist, dass der linke Balken des zweiten Gewebes zwar auch über dieser Grenze liegt, aber dieses Gewebe würde während eines normalen Aufstiegs genügend entsättigen, um das Kontrollkriterium nicht zu verletzen.

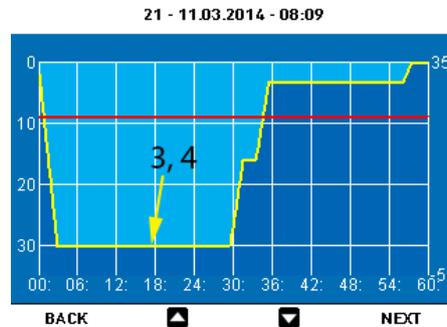


Abb. 4: Gewebespannung zu Beginn der Dekompressionspflicht.

Sehen wir uns nun das Ende des 30-m-Abschnitts in Abbildung 5 an: Wir sehen, dass das Kontrollkriterium von 5 Segmenten verletzt wird. Interessanterweise werden die ersten beiden Gewebe, die bei 4 bar Druck nun beide gesättigt sind, während des Aufstiegs genug entsättigen, um das Kontrollkriterium zu keinem Zeitpunkt zu verletzen. Mit anderen Worten, bei Tauchgängen bis 30 m Tiefe werden die ersten beiden Gewebe nie zum limitierenden Faktor. Außerdem sehen wir, dass eine um 0,5 m geringere Tiefe ausreicht, damit die ersten beiden Gewebe zu entsättigen beginnen - das macht Sinn, denn sie waren auf 30 m gesättigt, sodass jede Druckabsenkung das kleine Segment unter die Oberkante des Balkens absinken lässt.

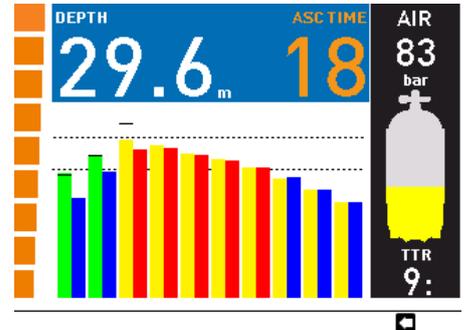
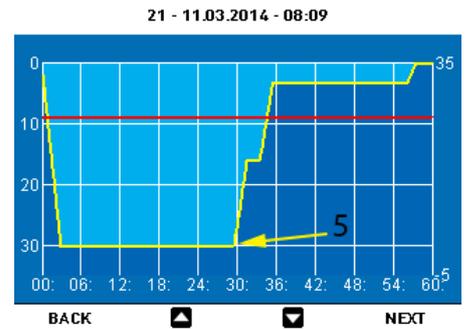
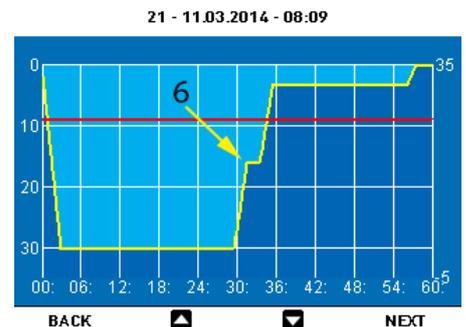


Abb. 5: Gewebespannung zu Beginn des Aufstiegs.

Steigen wir nun zur Deepstop-Tiefe auf, Abbildung 6: Wir sehen, dass die ersten vier Gewebe mit einem beträchtlichen Gradienten (Abstand zwischen Oberkante des Balkens und horizontalem Segment) entsättigen. Der fünfte Balken zeigt immer noch ein Aufsättigen des Gewebes an, aber mit einem sehr geringen Gradienten. Erst ab dem sechsten Gewebe gibt es noch einen nennenswerten Gradienten zum Aufsättigen der Gewebe. Dies ist das 40-Minuten-Gewebe, d.h., ein zweiminütiger Deepstop wird sich kaum auf seine Sättigung auswirken. Dagegen können die schnellen (und empfindlichen) Gewebe in diesen zwei Minuten eine gute Menge Gas abgeben, und zwar unter relativ hohem Umgebungsdruck, wodurch das Wachstum von Mikroblasen verringert wird.



⁶ Das Druckgleichgewicht wird asymptotisch erreicht, in der Praxis können wir das aber so betrachten, dass das innerhalb 6 Halbwertszeiten geschieht.

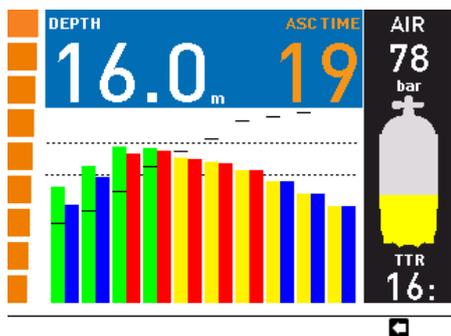


Abb. 6: Gewebespannung zu Beginn des Deepstops.

Aus Sicht des Algorithmus ist bei diesem Profil ein Deepstop während des Aufstiegs also vorteilhaft. Das lässt sich aus Abbildung 7 ableiten, in der die Gewebesättigung am Ende des Deepstops zu sehen ist: Die grünen Balken sind deutlich kürzer, während sich die gelben Balken kaum verändert haben.

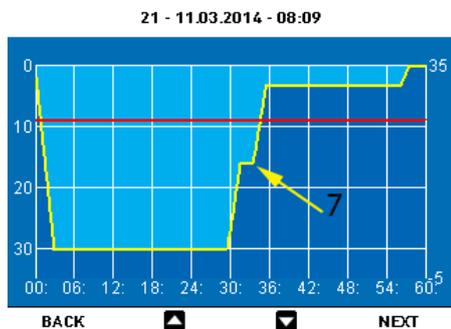


Abb. 7: Gewebespannung am Ende des Deepstops.

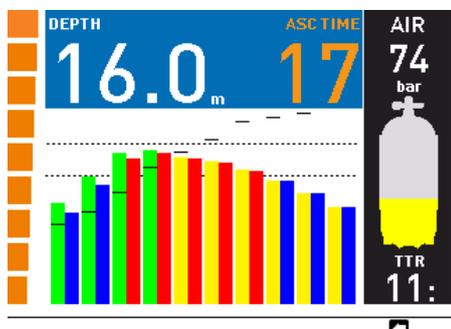


Abb. 8: Gewebespannung zu Beginn des Dekompressionsstopps.

Wir tauchen nun weiter auf bis zur Dekotiefe. In Abbildung 8 sehen wir, dass alle bis auf das langsamste Gewebe entsättigen, und fünf davon das Kontrollkriterium immer noch verletzen.

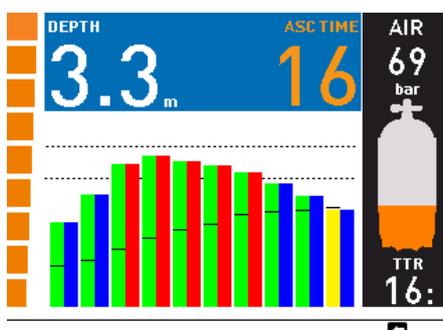


Abb. 9: Gewebespannung am Ende des Dekompressionsstopps.

Abbildung 9 zeigt die Situation am Ende der Dekompressionspflicht: Alle blauen Balken liegen nun unter der Nulllinie. Es besteht jedoch keinerlei Sicherheitspielraum, die Balken erreichen gerade das Kriterium für einen sicheren Aufstieg. Aus diesem Grund ist es immer sinnvoll, einen 3 - 5 Minuten dauernden Sicherheitsstopp auf 3 - 5 m Tiefe durchzuführen, auch nach Beendigung eines dekompensationspflichtigen Tauchgangs.

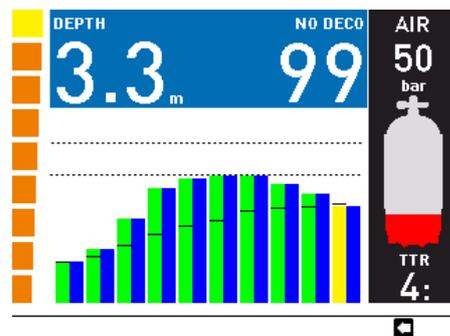
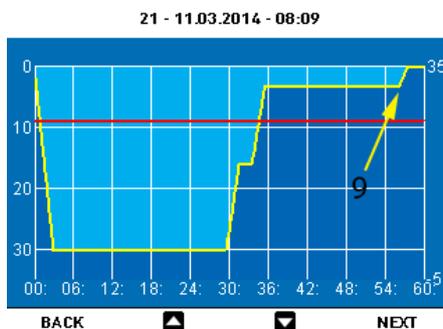


Abb. 10: Gewebespannung zu Beginn des Dekompressionsstopps.

• DIE GEWEBEGRAFIK EINES ECHTEN TAUCHGANGSPROFILS, EINSCHLIESSLICH WECHSEL AUF EIN DEKOGAS MIT HOHEM SAUERSTOFFANTEIL.

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Situation bei einem echten Tauchgang, bei dem von Luft auf 80 % Nitrox gewechselt wurde. Insbesondere zeigen sie die Gewebespannung unmittelbar vor und nach dem Gaswechsel. Hier wird offensichtlich, warum ein Dekogas mit hohem Sauerstoffanteil so vorteilhaft ist. Der Stickstoffpartialdruck sinkt erheblich, und es ist nicht nur so, dass zwei zusätzliche Gewebe entsättigen statt aufsättigen, sondern vor allem haben sich die Druckgradienten für das Entsättigen in jenen Geweben erheblich vergrößert, die bereits angefangen hatten, zu entsättigen.



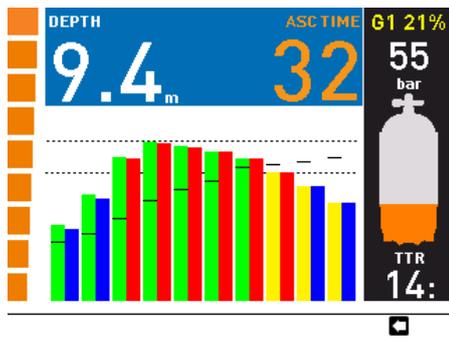


Abb. 10: Gewebespannung unmittelbar vor dem Gaswechsel.

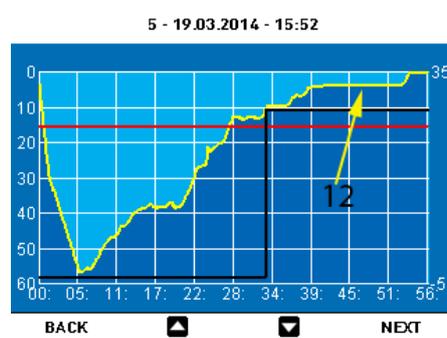


Abb. 12: Gewebesättigung am Ende der Dekompressionspflicht.

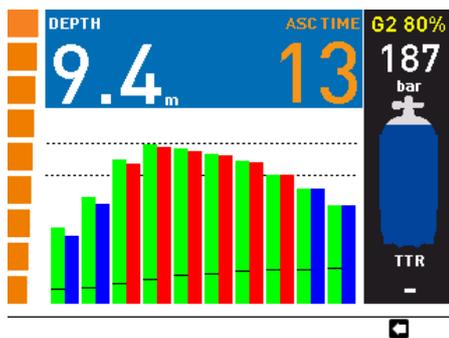
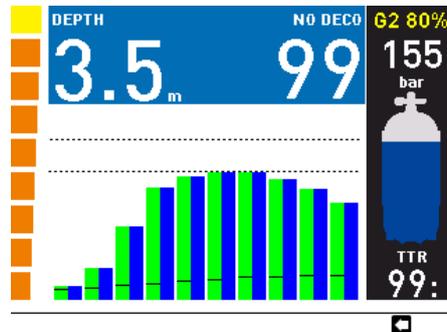


Abb. 11: Gewebespannung unmittelbar nach dem Gaswechsel.

Für denselben Tauchgang zeigt Abbildung 12 die Gewebesättigung am Ende des Pflichtdekos und Abbildung 13 die Gewebesättigung 5 Minuten später. Die Balken sinken weiter, und je weiter sie unter die horizontale Linie sinken, desto sicherer ist der Tauchgang.

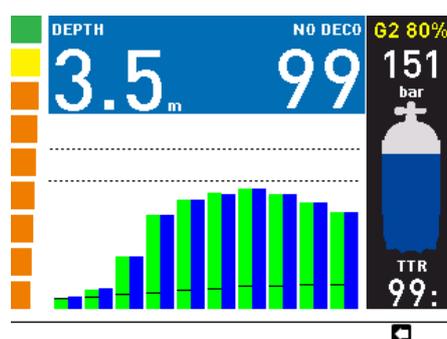


Abb. 13: Gewebesättigung 5 Minuten nach Ende der Dekompressionspflicht.