

Wyjaśnienie zamieszania wokół Deep Stopów.

By Erik C. Baker, P.E.

Tłumaczenie:

Maciek „Szczęściarz” Curzydło [*]

Stare przysłowie mówiące „lepiej zapobiegać niż leczyć”, ma oczywiście zastosowanie do różnych przypadków choroby dekompresyjnej. Najlepszym lekarstwem na te problemy jest po pierwsze wykonanie odpowiedniego profilu dekompresyjnego. Nurkowie techniczni zaobserwowali, że można uniknąć wielu dolegliwości poprzez wprowadzenie do swoich profili deepstopów. Dokładniejsze przeanalizowanie modelu dekompresyjnego ujawnia, że taka praktyka służy redukcji lub eliminacji nadmiernego nadciśnienia. Opierając się na tej wiedzy, model może być zmodyfikowany tak aby umożliwić precyzyjną kontrolę nadciśnień. Dzięki temu przystanki w strefie dekompresji mogą być wyliczane z uwzględnieniem „najgłębszego możliwego przystanku dekompresyjnego”.

UWAGA: Dodatkowych wyjaśnień problemów dekompresyjnych i używanej tu terminologii, szukaj we wcześniejszym artykule tego samego autora „Understanding M-values” – „Zrozumieć M-wartości” Immersed, Vol. 3. No. 3, Fall 1998.

Wielu nurków technicznych zaobserwowało, że są senni, zmęczeni, mają złe samopoczucie, po pewnych nurkowaniach dekompresyjnych. Takie właśnie symptomy często wywołują nurkowania typu „winda” czyli relatywnie głębokie nurkowanie z krótkim czasem dennym. Konwencjonalne implementacje modeli dekompresyjnych opartych na rozpuszczalności gazów, generują pierwszy przystanek dekompresyjny dużo płycej niż głębokość nurkowania. Wielu nurków opowiadało, że odczuwali silny spadek lub eliminację niekorzystnych objawów po nurkowaniu jeżeli dodawali do swoich profili „głębokie przystanki – deepstopy” (dodawane głębiej niż wymagały typowe wyliczenia). Nieporozumienia i spory pomiędzy nurkami technicznymi dotyczą jak głęboko i ile powinno się wykonywać deepstopów. Praktyczne doświadczenia nurków prowadzą do rozwijania arbitralnych metod wprowadzania deepstopów. Wiele tych metod opiera się raczej na prywatnych opiniach niż wyliczeniach modeli dekompresyjnych. Jednak analiza pełnych profili dekompresyjnych ujawnia pewne potencjalne

problemy, przy korzystaniu z arbitralnie przyjętych deepstopów. Obejmuje to wykonywanie deepstopów zbyt głęboko i niewystarczające przedłużenie czasu dekompresji na płytszych przystankach dla skompensowania dodatkowego nasycenia gazami podczas deepstopów.

Wyliczenia tradycyjne

W teorii dekompresji i jej zastosowaniach istnieje kompromis pomiędzy wystarczającą dekompresją (brak symptomów DCS) a ekonomią dekompresji (minimalna ilość czasu, gazów, ekspozycji, itp.). Tradycyjne algorytmy opierające się na rozpuszczalności gazów tak jak te stworzone przez Roberta D. Workmana i Alberta A. Bühlmana poszukują optymalizacji dekompresji poprzez umożliwienie nurkowi na wynurzenie się na najmniejszą głębokość „sufit dekompresyjny” opierając się na limitujących wynurzenie M-wartościach hipotetycznych tkanek. Daje to podwójny zysk: przyspiesza eliminację gazu obojętnego w szybszych kompartmentach kiedy jednocześnie minimalizuje podczas dekompresji nasycenie gazem kompartmentów wolnych. W praktyce nurkowie byli uczeni aby „uciekać z głębokości” i wynurzać się do pierwszego przystanku dokładnie według runtimu. Podczas typowej „windy” tradycyjne kalkulacje pozwolą na stosunkowo dużą odległość pomiędzy głębokością nurkowania a pierwszym przystankiem. Przy takim scenariuszu nasycenie gazami obojętnym najszybszych kompartmentów może być bliskie lub osiągnąć pełną saturację dla głębokości nurkowania podczas gdy wolniejsze kompartmenty są tylko częściowo nasycone. Oznacza to, że początek wynurzania kontrolują tkanki szybkie ponieważ ich nasycenie jest bliższe M-wartości w porównaniu do tkanek wolniejszych. Moment kiedy nasycenie kontrolnego kompartmentu stanie się równe lub bliskie M-wartości wyznacza głębokość pierwszego przystanku.

Pęcherzyki i nadciśnienia

Kiedy w 1965 roku koncepcja M-wartości była pierwszy raz prezentowana przez badacza Roberta D. Workmana, przyjęto założenie, że gaz obojętny nie może wytrącić się z roztworu w postaci pęcherzyków w tkankach nurka do momentu kiedy M-wartości nie zostaną przekroczone. Ta teoria budziła w swoim czasie pewne kontrowersje ale przyjęto, że przyszłe technologie umożliwią zdobycie lepszych informacji o obecności i zachowaniu się pęcherzyków w organizmie nurka. Workman wiedział, że „ultradźwiękowe metody badania pęcherzyków in vivo i in vitro pozwolą na precyzyjniejsze określenie

prawidłowości dekompresji, ale niestety były one w początkowych fazach rozwoju”.

Od tamtego czasu rozwinięto technologię ultrasonografii dopplerowskiej i jest ona powszechnie wykorzystywana do badań problemów dekompresji. Badania te pokazują, że pęcherzyki występują w układzie krążenia podczas i po wielu typach nurkowań. Również takich nurkowaniach gdzie nie pojawiły się symptomy DCS. Czyli inaczej mówiąc dla wygenerowania pęcherzyków nurek nie musi przekroczyć M-wartości. Ten fakt jest powszechnie uznawany w nauce o dekompresji ale sam mechanizm formowania się i wzrostu pęcherzyków w ludzkim organizmie nie jest ani poznany ani precyzyjnie zdefiniowany.

Prawa fizyki oraz liczne modele pęcherzykowe przewidują, że można się spodziewać większej liczby i rozmiarów pęcherzyków wraz ze wzrostem nadciśnienia. Oznacza to, że w modelach gazu rozpuszczonego można spodziewać się większej ilości pęcherzyków kiedy na wykresie linia nasycenia kompartmentu biegnie dużo powyżej linii ciśnienia otoczenia.

Przedstawienie problemu

Wykres ciśnienia na rysunku 1 pokazuje kompletny profil dekompresyjny wyliczony konwencjonalną metodą. W tym profilu, najszybsze kompartmenty mają największe nasycenia gazem podczas początkowej fazy wynurzenia i są kompartmentami kontrolnymi. M-wartości tych szybkich kompartmentów pozwalają na relatywnie duże nadciśnienia [**] w porównaniu do kompartmentów wolniejszych. W konsekwencji, tworzą się podczas wynurzenia do pierwszego przystanku wysokie i szybko powstające nadciśnienia. Są one nie proporcjonalnie wysokie do niższych nadciśnień w trakcie pozostałej części profilu dekompresji, kontrolowanych przez wolniejsze kompartmenty. Przepuszczalnie wiele pęcherzyków jest generowanych podczas początkowej fazy wynurzenia do pierwszego przystanku. W tym przykładzie wyliczone nadciśnienie wynosi 22.4 msw (metrów słupa wody) czyli 2.2 atm. Dla porównania kiedy otwieramy butelkę gazowanej wody mineralnej nadciśnienie pomiędzy rozpuszczonym dwutlenkiem węgla a otoczeniem wynosi pomiędzy 3.1 a 3.4 atm. Chociaż w profilu dekompresyjnym na rysunku 1 M-wartości nie są przekroczone, nurek może po takim nurkowaniu odczuwać objawy senności, zmęczenia i złego samopoczucia. Wyjaśnia to teoria migracji pęcherzyków w naszym organizmie oraz opóźnienia w odsycaniu spowodowane przez nagromadzenie się pęcherzyków w kapilarach płuc. W każdym razie istnieje prawdopodobny związek pomiędzy wysokim

nadciśnieniem podczas nurkowania a po nurkowymi symptomami. Łagodne i niejednoznaczne symptomy takie jak zmęczenie i złe samopoczucie które normalnie nie wymagają pomocy medycznej mogą być zaliczone do stresu dekompresyjnego, lżejszej odmiany DCSu.

Rozwiązanie problemu

Przypuszczalnie wysokie lub szybko powstające nadciśnienie w profilu dekompresyjnym powoduje powstawanie większej ilości pęcherzyków co prowadzi do stresu dekompresyjnego lub DCS. Oczywistym rozwiązaniem problemu jest ograniczenie wielkości nadciśnienia.

Można do tego wykorzystać informacje pochodzące z modelu dekompresyjnego gazów rozpuszczonych. Po pierwsze trzeba określić jak głęboko wykonywać deepstopy. Należy powiązać, nasycenie gazem obojętnym kompartmentu kontrolnego z głębokością przystanku dekompresyjnego tak aby nie był on poniżej strefy dekompresji. Na ogół, odpowiednie nadciśnienie jest wymagane dla efektywnego odsycania. Ważne jest również zminimalizowanie nasycania podczas dekompresji wolniejszych kompartmentów.

W kontekście modelu gazu rozpuszczonego „najgłębszy możliwy przystanek dekompresyjny” dla danego profilu można określić jako najbliższy standardowy przystanek powyżej punktu w którym linia nasycenia kompartmentu kontrolnego przetnie się z linią ciśnienia otoczenia (patrz rysunek 1 do 3). Najgłębszy możliwy przystanek jest łatwo wyliczyć w programie dekompresyjnym a jego parametry zależą od prędkości wynurzenia oraz użytej mieszanki. Pierwszy przystanek w profilu dekompresyjnym nie musi wypadać na poziomie najgłębszego możliwego przystanku. Najgłębszy możliwy przystanek reprezentuje po prostu punkt gdzie przynajmniej jeden kompartment będzie w strefie dekompresji. W wielu profilach dekompresyjnych przystanki zaczynające się kilka poziomów wyżej niż najgłębszy możliwy przystanek powinny być odpowiednie dla kontrolowania nadmiernego nadciśnienia.

Jednak dla nurka przydatna jest informacja o najgłębszym możliwym przystanku rozpoczynającym strefę dekompresji. Kiedy nurek osiąga ten punkt, powinien zwolnić wynurzenie w strefie dekompresji do 10 msw/min lub mniej. Taka praktyka pomaga zredukować nagłe zmiany nadciśnienia które przypuszczalnie odpowiadają za tworzenie pęcherzyków.

Pozostaje jeszcze kwestia wyznaczania deepstopów. Empirycznie stworzoną metodę wyznaczania deepstopów opublikował nurek i biolog morski Richard L. Pyle. Wykorzystuje się ją w połączeniu z programami dekompresyjnymi umożliwiającymi planowanie wielopoziomowe. Profil dekompresyjny wykorzystujący metodę Pyle'a wyznaczania deepstopów został przedstawiony w postaci wykresu ciśnień na rysunku 2. Wykres pokazuje, że metoda jest efektywna w redukowaniu lub eliminowaniu zbyt wysokiego nadciśnienia w porównaniu do metod konwencjonalnych. Jednak w tym podejściu pojawia się pewien potencjalny problem. W zależności od wykorzystanego programu dekompresyjnego i jego metody wprowadzania konserwatywnego nasycenia wolniejszych kompartmentów może być bliższe M-wartościom na płytszych przystankach z powodu dodatkowego nasycenia podczas deepstopów. Program kompensuje dodatkowe nasycenia na deepstopach ale bez wzrostu stopnia konserwatywności może nie zapewniać takiego samego marginesu bezpieczeństwa na płytkich przystankach jak podczas konwencjonalnego profilu. Dobrym sposobem oceny tego jest wyliczenie maksymalnego procentu M-wartości i procentu nadwyżki ciśnienia M-wartości wszystkich kompartmentów dla każdego przystanku. Wykres ciśnień na rysunku 3 pokazuje wykorzystanie Gradient Faktorów [***] (GF) (współczynników dopuszczalnej nadwyżki ciśnienia) do kontroli nadciśnienia w całym profilu dekompresyjnym. Gradient Faktory (GF) umożliwiają ustalenie stałego (wybranego) konserwatywności w obliczaniu dekompresji. Mogą być wykorzystywane do wyliczania deepstopów w strefie dekompresji, kontrolowania nadciśnienia i zagwarantowania, że założony margines bezpieczeństwa jest w całym profilu proporcjonalnie oddalony od linii M-wartości. Gradient Faktor jest po prostu ułamkiem dziesiętnym lub procentem nadwyżki ciśnienia M-wartości (patrz rysunek 4). Wprowadzenie deepstopów do profilu generalnie powoduje wydłużenie czasu płytkich przystanków i przedłużenie całej dekompresji. Jeśli jednak w rezultacie otrzymamy „wystarczającą dekompresję”, to idea „ekonomicznej dekompresji” nie jest wcale przekreślona. Dla nurków wykres ciśnień jest wspólnym narzędziem do oceny profili dekompresyjnych. Nawet szybki rzut oka na wykres pozwala na zidentyfikowanie potencjalnych problemów takich jak wysokie nadciśnienia. Programiści i twórcy modeli dekompresyjnych powinni wprowadzać takie możliwości do swoich programów. Na koniec: przykłady profili dekompresyjnych przedstawione na wykresach w tym artykule były liczone z minimalnym konserwatywnością i powinny być wykorzystywane tylko do celów porównawczych.

Eric C. Baker jest inżynierem elektrykiem w inżynierskiej firmie doradczej na Florydzie. Opracowywał programy komputerowe których celem była poprawa bezpieczeństwa nurków jaskiniowych i trimiksowych.

Bibliografia:

Baker EC. 1998. Understanding M-values. Immersed. Vol. 3, No. 3.

Bennett PB, Elliott DH, eds. 1993. The Physiology and Medicine of Diving. London: WB Saunders.

Bühlmann, AA. 1984. Decompression-Decompression Sickness. Berlin: Springer-Verlag.

Bühlmann, AA. 1995. Tauchmedizin. Berlin: Springer-Verlag.

Hamilton RW, Rogers RE, Powell MR, Vann RD. 1994. Development and validation of no-stop decompression procedures for recreational diving: The DSAT Recreational Dive Planner. Santa Ana, CA: Diving Science and Technology Corp.

Pyle RL. 1996. The importance of deep safety stops: Rethinking ascent patterns from decompression dives. DeepTech. 5:64; Cave Diving Group Newsletter. 121:2-5.

Schreiner HR. 1968. Safe ascent after deep dives. Rev. Subaquat. Physiol. Hyperbar. Med. 1:28-37.

Schreiner HR, Kelley PL. 1971. A pragmatic view of decompression. In: Lambertsen CJ, ed. Underwater Physiology IV. New York: Academic Press.

Wienke BR. 1991. Basic decompression theory and application. Flagstaff, AZ: Best.

Wienke BR. 1994. Basic diving physics and applications. Flagstaff, AZ: Best.

Workman RD. 1965. Calculation of decompression schedules for nitrogen-oxygen and helium-oxygen dives. Research Report 6-65. Washington: Navy Experimental Diving Unit.

[*] Tłumaczenie było mocno dyskutowane i poprawiane przez:

Kingę Sorkowską – instruktora i autorkę napisanego przez nią w ramach pracy magisterskiej w roku 2002 opartego na Buhlmannie planera wielogazowego
Karolinę Zawadę – astronoma ☺. To ona narzuciła termin „nadwyżka”.

Michał Zawada – fizyka. Negacja określenia gradienty itp.

Olaf Bar – fizyka. Negacja określenia gradienty itp.

Cabernet Czarnogórski rocznik 2004 - wyśmienity. Muza.

[**] W oryginale w tym jak i wielu innych miejscach używane jest określenie „gradient” tłumaczone bardzo często na język polski jako „gradient”. Jednak jest to podobno nieścisłe ☺. Gradient dotyczy ciągłych zmian ciśnienia – takie zachodzą w prawdziwych tkankach. W modelu teoretycznym w kompartmentach analizujemy tylko różnice ciśnień, które można określić jako nadwyżkę ciśnienia lub nadciśnienie.

Ze względu na to, że jest to tłumaczenie wypadało by zostawić określenie gradient. Jednak określenie to zaburza zrozumienie wprowadzonych potem określeń. Trzeba by konsekwentnie używać określenia „procent gradientu M-wartości” które absolutnie już nic nie oznacza. Wprowadzenie określenia nadciśnienie i nadwyżka ciśnienia pozwala wykorzystywać określanie „procent nadwyżki ciśnienia M-wartości”.

Proszę mi wybaczyć pewne nieścisłości powyższego wytłumaczenia ale fachowcy wytłumaczyli mi tak, że nic z tego nie rozumiałem. Cytuję:

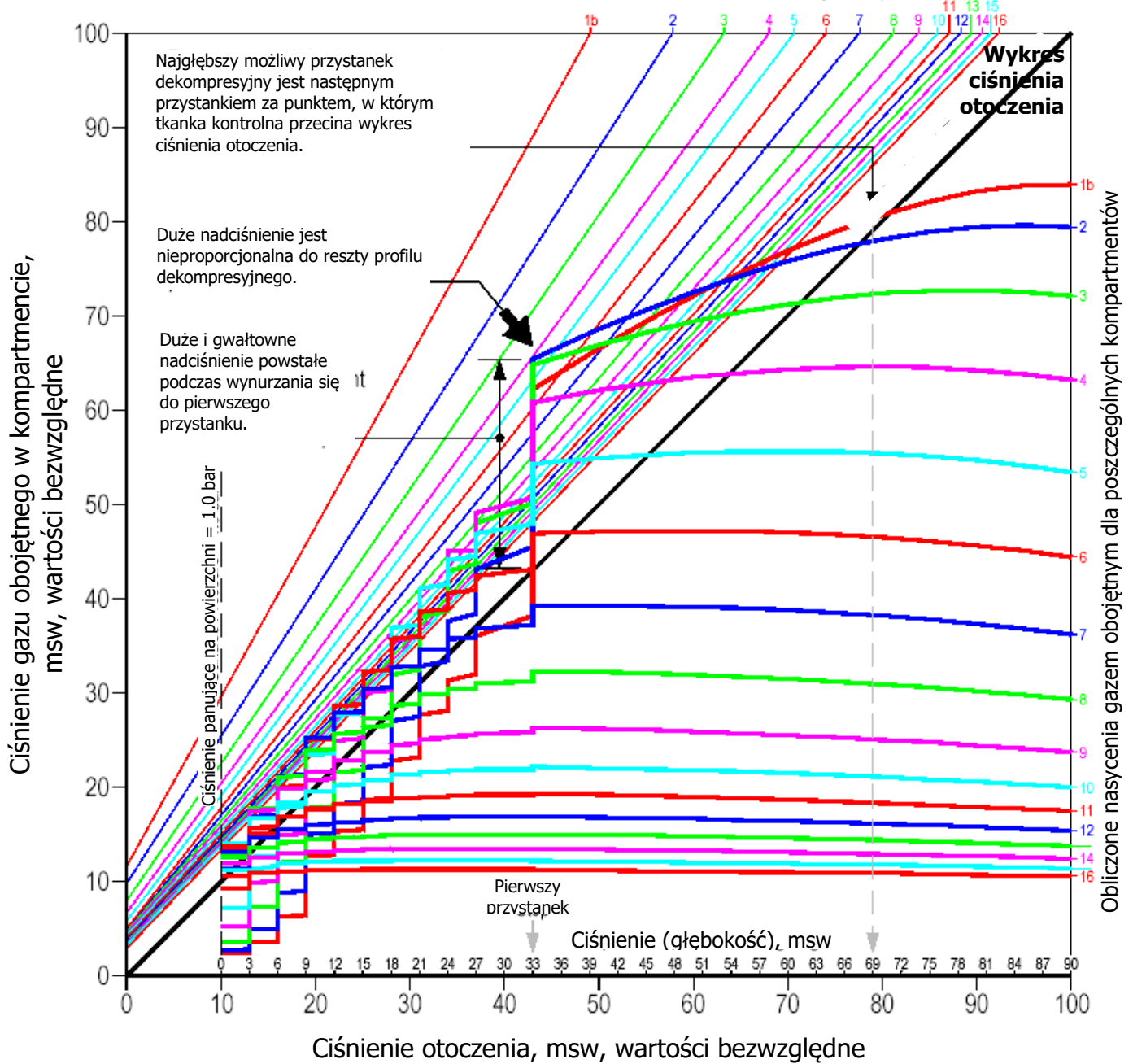
„Pamiętać należy, że gradient z pola skalarnego jest wektorem. O polach w których rotacja z gradientu znika mówimy, że są potencjalne.

Gradient jest operatorem różniczkowym działającym na pola skalarne.”

[***] Nazwa Gradient Faktor jest ogólnie przyjęta i pomimo zmiany w tłumaczeniu określenia „gradient” na „nadwyżka ciśnienia” lub „nadciśnienie” postanowiliśmy ją pozostawić.

Wykres ciśnień: całkowity profil dekompresyjny przy zastosowaniu tradycyjnych metod obliczeniowych

M-wartości w modelu Buhlmana ZHL-16 dla kolejnych kompartmentów



Uwagi:

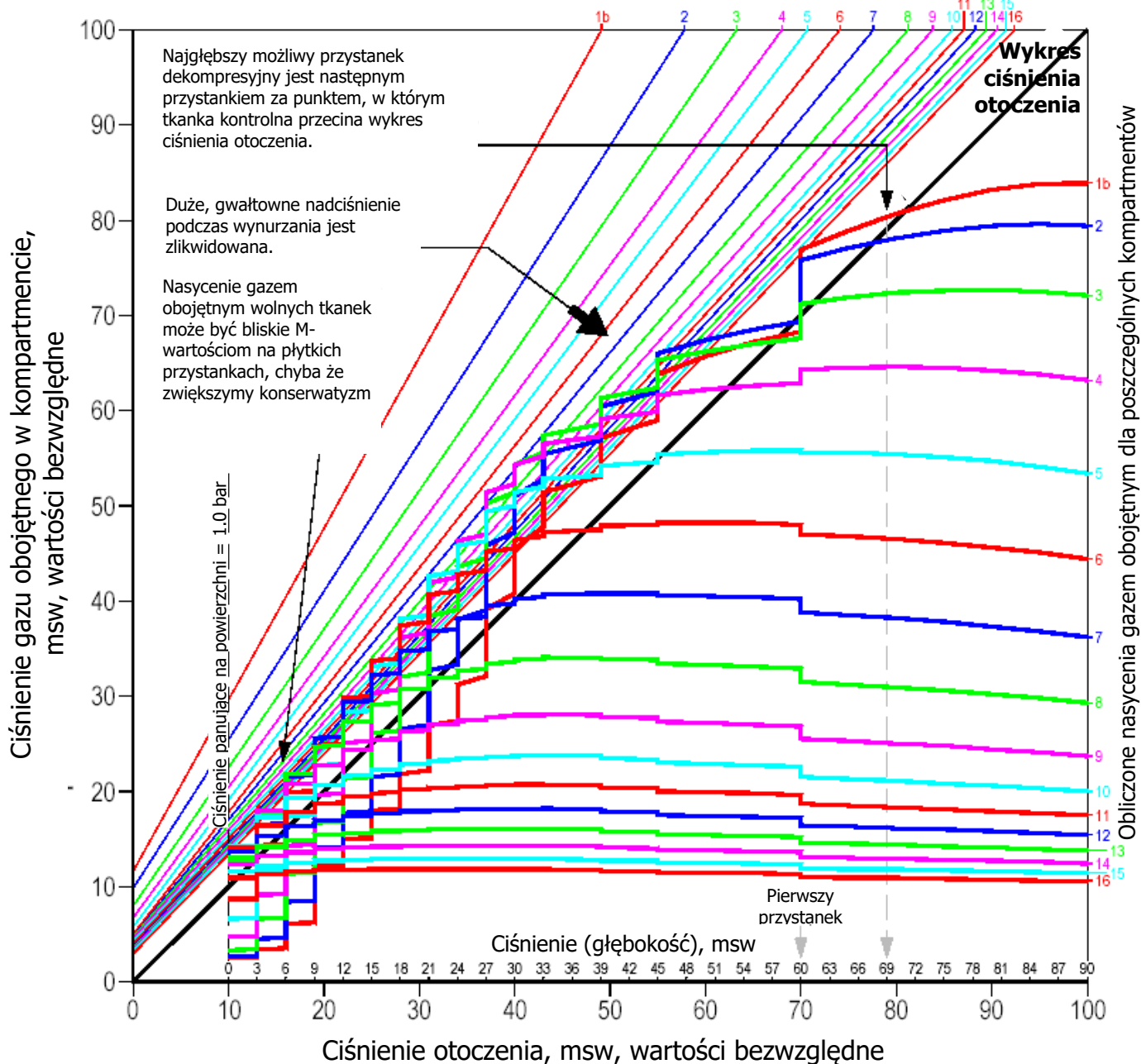
1. Nurkowanie trimixowe 13/50, 90 mśw, czas dennej 20 min.
2. Mieszanki dekompresyjne: Nitrox 36% na 33 mśw, Nitrox 50% na 21 mśw, Nitrox 80% na 9 mśw.
3. Minimalny konserwatyzm (15%).
4. Tempo wynurzania wynosi 10 mśw/min.
5. Nasycenie gazem obojętnym przedstawione jest po wyjściu z fazy dennej w 20 minucie nurkowania.
6. Czasy podawane po wyjściu z przystanku.
7. Profil dekompresyjny głębokiego nurkowania typu winda.

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

Rys. 1

Wykres ciśnień: całkowity profil dekompresyjny przy wykorzystaniu deep stopów Pyle'a.

M-wartości w modelu Buhlmana ZHL-16 dla kolejnych kompartментów



Uwagi:

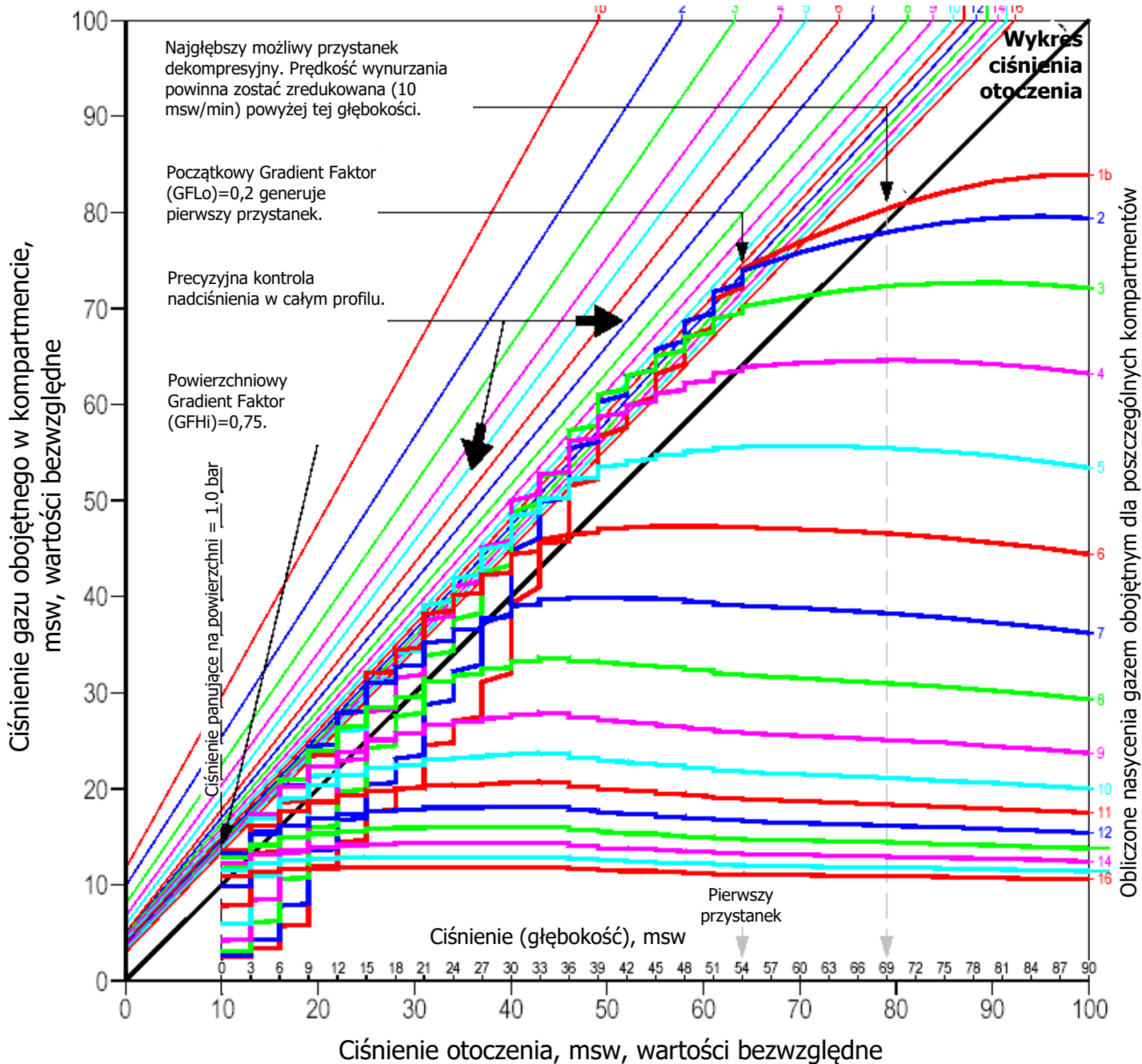
1. Nurkowanie trimixowe 13/50, 90 mśw, czas dennej 20 min.
2. Mieszanki dekompresyjne: Nitrox 36% na 33 mśw, Nitrox 50% na 21 mśw, Nitrox 80% na 9 mśw.
3. Minimalny konserwatyzm (15%).
4. Tempo wynurzenia wynosi 10 mśw/min.
5. Nasycenie gazem obojętnym przedstawione jest po wyjściu z fazy dennej w 20 minucie nurkowania.
6. Czasy podawane po wyjściu z przystanku.
7. Deep stopy powodują większe nasycenie wolniejszych tkanek na płytszych przystankach.

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

Rys. 2

Wykres ciśnień: całkowity profil dekompresyjny wykorzystujący Gradient Faktory (GF).

M-wartości w modelu Buhlmana ZHL-16 dla kolejnych kompartментów

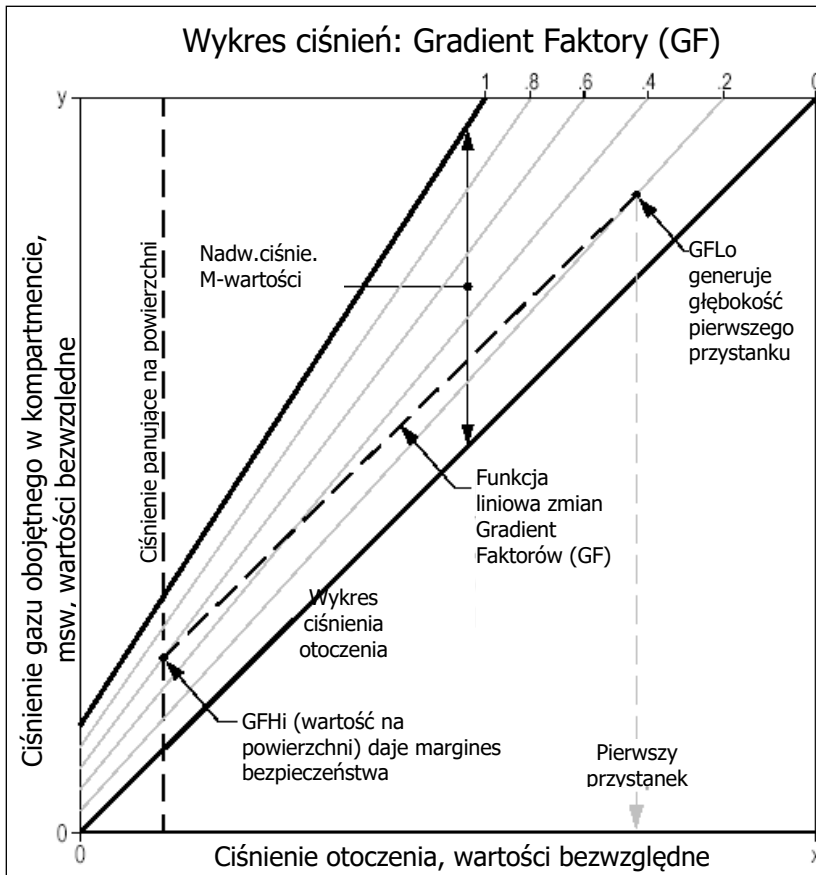


Uwagi:

1. Nurkowanie trimixowe 13/50, 90 msw, czas dennej 20 min.
2. Mieszanki dekompresyjne: Nitrox 36% na 33 msw, Nitrox 50% na 21 msw, Nitrox 80% na 9 msw.
3. Konserwatywizm w postaci Gradient Faktora.
4. Tempo wynurzenia wynosi 10 msw/min.
5. Nasycenie gazem obojętnym przedstawione jest po wyjściu z fazy dennej w 20 minucie nurkowania.
6. Czasy podawane po wyjściu z przystanku.
7. Margines między wykresem nasycenia a M-wartości jest kontrolowany Gradient Faktorami.

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

Rys. 3



Gradient Faktor (GF) jest częścią dziesiątą (lub procentem) nadwyżki ciśnienia M-wartości.

Gradient Faktory (GF) przyjmują wartości między zero a jeden $0 \leq GF \leq 1$.

Gradient Faktor równy zero pokrywa się na wykresie z linią ciśnienia otoczenia.

Gradient Faktor równy jeden pokrywa się na wykresie z linią M-wartości.

Gradient Faktory modyfikują oryginalny wykres M-wartości konserwatywnie w strefie dekompresji.

Gradient Faktor Lo (GFLo) wyznacza głębokość pierwszego przystanku. Można go wykorzystać do wygenerowania deep stopu na głębokości „najgłębszego możliwego

Wykres M-wartości zmodyfikowany Gradient Faktorami

Równanie Workmana:

$$M = \text{Depth} \cdot (\Delta M \cdot GF - GF + 1) + (P_{sb} + GF \cdot (M_o - P_{sb}))$$

$$\text{Tol. Depth} = [P - (P_{sb} + GF \cdot (M_o - P_{sb}))] / (\Delta M \cdot GF - GF + 1)$$

Równanie Buhlmana:

$$P_{t.tol.i.g.} = P_{amb.} \cdot (GF/b - GF + 1) + GF \cdot a$$

$$P_{amb.tol.} = (P_{t.i.g.} - GF \cdot a) / (GF/b - GF + 1)$$

Gradient Faktory mogą być zastosowane ręcznie dla każdego przystanku lub mogą być zastosowane automatycznie. Prosta funkcja liniowa przedstawia zmianę wartości Gradient Faktorów od wartości GFLo do GFHi:

$$GF \text{ slope} = \frac{GF \text{ Hi} - GF \text{ Lo}}{\text{Final Stop Depth} - \text{First Stop Depth}}$$

$$GF = GF \text{ slope} \cdot \text{Current Stop Depth} + GF \text{ Hi}$$

gdzie GF slope - nachylenie prostej, Current Stop Depth – głębokość aktualnego przystanku, Final Stop Depth – głębokość ostatniego przystanku, First Stop Depth – głębokość pierwszego przystanku

Zalety Gradient Faktorów:

- Mogą być wykorzystane do generowania deep stopów na głębokości „najgłębszego możliwego przystanku”.
- Przystanki dekompresyjne, łącznie z deepstopami, będą zawsze znajdować się w strefie dekompresji.
- Pozwalają na precyzyjną kontrolę nadciśnienia, począwszy od pierwszego przystanku aż do powierzchni.
- Niewielka modyfikacja znanego modelu Haldana – łatwa do zrozumienia i zastosowania
- Elastyczne, Gradient Faktory mogą być stosowane indywidualnie, jak i przy różnych profilach nurkowania.