

"Głębokie przystanki" – próba wyjaśnienia

By Erik C. Baker, P.E.

*Wersja polska Tomasz Żabierek, Izabela Kapuściarek
Hogarthian Divers, lipiec 2005*

Stara zasada "szczypta zapobiegania warta jest tony lekarstwa" z całą pewnością stosuje się do rozmaitych objawów choroby dekompresyjnej (DCS). Najlepszym sposobem zapobiegania wystąpieniu tych dolegliwości jest przede wszystkim przeprowadzenie właściwej dekompresji. Nurkowie techniczni zauważyli, że wielu problemom można zapobiec, wprowadzając do profilu dekompresyjnego "głębokie przystanki". Szczegółowa analiza dowodzi, że praktyka ta służy redukcji lub eliminacji nadmiernych gradientów przesylenia. Wiedza ta pozwala na modyfikację modelu w taki sposób, by możliwe było skrupulatne kontrolowanie gradientów przesyceń. Przystanki generowane są w obrębie strefy dekompresji, poczynając od "najgłębszego możliwego przystanku dekompresyjnego".

Uwaga: Wyjaśnienie pojęć i terminów diskutowanych w niniejszym artykule czytelnik znajdzie w poprzednim artykule "Zrozumieć Wartości-M"

Wielu nurków technicznych zauważyło u siebie zmęczenie, złe samopoczucie lub senność po zakończeniu pewnego rodzaju nurkowań dekompresyjnych. Nurkowania typu "winda", odznaczające się stosunkowo dużą głębokością przy krótkim czasie dennym, często są źródłem takich symptomów. Tradycyjne modele dekompresyjne gazu rozpuszczonego wygenerują dla takiego rodzaju nurkowania pierwszy przystanek dekompresyjny relatywnie płytko w stosunku do głębokości nurkowania. Wielu nurków stwierdziło, że dodatnie głębokiego przystanku (*deep stop*) – tj. głębszego od zalecanego przez standardowe modele – dramatycznie redukuje lub wręcz eliminuje występujące po nurkowaniu objawy. Na jakiej głębokości głębokie przystanki powinny być wykonywane i ile należy ich wykonać jest jednak źródłem kontrowersji i nieporozumień.

Empiryczne obserwacje nurków doprowadziły do powstania arbitralnych metod wyliczania głębokich przystanków. Wiele z tych metod bazuje na indywidualnych przekonaniach i zdrowym rozsądku raczej niż jakiegokolwiek obliczeniach. Analiza profili wykorzystujących takie arbitralnie wprowadzone

głębokie przystanki wskazuje jednak na istnienie pewnych problemów, takich jak wykonywanie zbyt głębokich przystanków i niewłaściwy czas przeznaczony na dekompresję na przystankach płytszych, pozwalających skompensować dodatkowe nasycenie wynikłe z przebywania na głębokich przystankach.

ALGORYTMY TRADYCYJNE

W praktyce i teorii dekompresji pojawia się pojęcie kompromisu pomiędzy dekompresją wystarczającą (brakiem symptomów choroby dekompresyjnej), a dekompresją ekonomiczną (wymagającą możliwie krótkiego czasu, zapasu gazu, ekspozycji itd.). Tradycyjne algorytmy gazu rozpuszczonego, takie jak stworzone przez Roberta D. Workmana lub Alberta A. Bühlmanna, starają się optymalizować dekompresję poprzez wyliczenie najmniejszej osiągalnej głębokości, czyli "sufitu" (*ceiling*). Sufit ten ograniczony jest wartością dopuszczalnego przesylenia M (*M-value*) dla hipotetycznego przedziału tkankowego. Ekonomia takiego algorytmu polega z jednej strony na tym, że eliminacja gazu obojętnego z tkanek szybkich jest możliwie szybka, z drugiej zaś saturacja tkanek wolnych w czasie dekompresji – zminimalizowana. W praktyce nurek dostaje instrukcję opuszczenia dna i wynurzenia w odpowiednim tempie do pierwszego przystanku.

Dla typowej "windy" tradycyjny algorytm pozwoli na stosunkowo długie wynurzenie od dna do pierwszego przystanku. Zgodnie z tym scenariuszem najszybsze tkanki mogą na dnie osiągnąć stan pełnej lub prawie

pełnej saturacji, podczas gdy tkanki wolne są nasycone tylko częściowo. Oznacza to, że początkowe wynurzenie kontrolowane będzie przez tkanki szybkie, ponieważ ich nasycenie osiągnie wartości bliskie M na długo przedtem, niż osiągną je tkanki wolne. Głębokość pierwszego przystanku jest określona przez moment, gdy tkanka kontrolująca osiągnie przesylenie równe lub bliskie odpowiadającej jej Wartości-M.

PĘCHERZYKI I GRADIENTY

Kiedy koncepcja Wartości-M została przedstawiona po raz pierwszy w 1965 roku przez badacza dekompresji, Roberta D. Workmana, przyjęto założenie, że gaz obojętny nie wysyci się z tkanki nurka w postaci pęcherzyków, o ile Wartość-M nie zostanie przekroczona. Teoria ta budziła pewne kontrowersje, ale wierzone, że przyszłe technologie będą w stanie dostarczyć pełniejszej informacji na temat obecności i zachowania pęcherzyków w organizmie nurka. Workman przyznawał, że "testowane są ultrasonograficzne metody wykrywania pęcherzyków in vivo i in vitro, które mogą pozwolić na lepsze zdefiniowanie efektywności dekompresji, ale pozostają one wciąż na wczesnym etapie rozwoju".

Od tego czasu stworzony został ultrasonograf dopplerowski, który znalazł zastosowanie w badaniach nad dekompresją na całym świecie. Badania te dowiodły, że pęcherzyki obecne są w układzie krążenia nurka w czasie i po wielu typach nurkowań, również takich, po których nie występują objawy DCS. Innymi słowami nurek nie musi przekroczyć Wartości-M, by w jego organizmie pojawiły się pęcherzyki. Ten fakt jest powszechnie uznawany w nauce na temat dekompresji, choć mechanizmy powstawania i wzrostu pęcherzyków w ludzkim ciele są wciąż nie do końca zrozumiane i zdefiniowane. Prawa fizyki i wiele modeli pęcherzykowych przewiduje, że wraz ze wzrostem gradientu przesylenia powstanie większa liczba i rozmiar pęcherzyków. W modelu gazu rozpuszczonego (*dissolved gas model*) oznacza to, że pęcherzyki powstawać będą tym intensywniej, im bardziej krzywa desaturacji gazu obojętnego jest oddalona od krzywej ciśnienia zewnętrznego (*ambient pressure line*).

PRZEDSTAWIENIE PROBLEMU

Wykres na rys. 1 przedstawia pełen profil dekompresyjny wyliczony na podstawie metody tradycyjnej. W tym profilu tkanki szybkie są nasycone w największym stopniu i to one kontrolują wynurzenie. Wartości-M dla tych przedziałów tkankowych dopuszczają większy gradient przesylenia w porównaniu do tkanek wolnych. W efekcie w początkowej fazie wynurzenia dochodzi do powstania znacznego przesylenia – nieproporcjonalnie wysokiego w stosunku do

przesylenia dopuszczalnych płycej, kiedy wynurzenie kontrolowane jest przez tkanki wolne. Można podejrzewać, że w trakcie początkowej fazy w organizmie powstaną liczne pęcherzyki. W rozważanym przypadku wyliczony gradient wynosi 22.4 msw \approx 73 fsw \approx 2.2 atmosfery. Dla porównania, przy otwieraniu butelki wody sodowej gradient ciśnienia pomiędzy rozpuszczonym dwutlenkiem węgla a powietrzem waha się od 3.1 do 3.4 atmosfery.

Choć Wartość-M w profilu dekompresyjnym przedstawionym na rys. 1 nie została przekroczona, nurek po tym nurkowaniu może odczuwać zmęczenie, złe samopoczucie lub sennaść. Wyjaśnienia tego zjawiska odwołują się do teorii migracji pęcherzyków w systemie krążenia i opóźnionej desaturacji wywołanej kumulacją pęcherzyków w kapilarach płucnych. Tak czy inaczej, możliwe jest znalezienie zależności przyczynowo-skutkowej pomiędzy wysokim gradientem przesylenia podczas nurkowania a symptomami pojawiającymi się po nim. Słabe i łagodne objawy, takie jak zmęczenie lub złe samopoczucie, które normalnie nie podlegają leczeniu, mogą zostać uznane za symptom stresu dekompresyjnego, łagodnego wariantu DCS.

ROZWIĄZANIE PROBLEMU

Pojawiające się w profilu wysokie lub szybko wzrastające gradienty przesylenia prowadzą do intensywniejszej produkcji pęcherzyków, a w efekcie – do stresu dekompresyjnego lub DCS. Oczwistym rozwiązaniem problemu jest więc ograniczenie gradientu przesylenia. Takie rozwiązanie można zastosować operując wciąż w ramach zasad modelu gazu rozpuszczonego. Po pierwsze, istnieje granica określająca, jak głęboki może być głęboki przystanek. Ciśnienie gazu obojętnego w tkance determinującej pierwszy przystanek nie powinno być niższe od dolnej granicy "strefy dekompresji" (*decompression zone*). Zasadniczo efektywna dekompresja wymaga istnienia pewnego poziomu przesylenia. Istotna jest również minimalizacja procesu dalszego nasycania w trakcie dekompresji wolniejszych przedziałów tkankowych.

W ramach modelu gazu rozpuszczonego "najgłębszy możliwy" można zdefiniować jako przystanek na pierwszej standardowej głębokości powyżej punktu, w którym ciśnienie gazu obojętnego rozpuszczonego w tkance kontrolującej przekracza linię ciśnienia zewnętrznego (patrz rys. 1 - 3). Głębokość tego przystanku może być z łatwością wyliczona przez program dekompresyjny i zależy od tempa wynurzenia oraz wykorzystanego gazu dennego.

Profil dekompresyjny niekoniecznie musi narzucać pierwszy przystanek na największej możliwej głębokości – głębokość ta wyznacza jedynie moment, kiedy przynajmniej jeden przedział tkankowy znajdzie się z strefie dekompresji. Dla wielu profili przystanki, które zaczynają się kilka kwantów głębokości powyżej

najgłębszego możliwego wystarczają na wystarczającą kontrolę nadmiernego przesylenia tkanki. Jednak znajomość głębokości najgłębszego możliwego przystanku jest cenną informacją dla nurka, jako że wyznacza moment wejścia w strefę dekompresji. Po przekroczeniu tego punktu w procesie wynurzania nurek powinien zwolnić tempo do co najwyżej 10 msw/min (30 fsw/min). Zastosowanie tej zasady pozwoli ograniczyć szybkie zmiany przesylenia, sprzyjające powstawaniu pęcherzyków.

Pozostaje jeszcze do określenia metoda wyznaczania głębokich przystanków. Jedną z nich, wyprowadzoną doświadczalnie, została opublikowana przez nurka i hydrobiologa Richarda L. Pyle'a. Stosuje się ją w połączeniu z programem dekompresyjnym z możliwością planowania wielopoziomowego. Pełen profil dekompresyjny wykorzystujący metodę Richarda Pyle'a przedstawiony jest na wykresie na rys. 2. Wykres pokazuje, że metoda skutecznie redukuje lub eliminuje znaczące gradienty przesylenia w porównaniu z profilem wyliczonym tradycyjnie. Z podejściem tym wiążą się jednak pewne problemy. W zależności od wykorzystanego programu dekompresyjnego i stosowanego przezeń poziomu konserwatywności, wysycenie wolnych tkanek może na płytkich przystankach zbliżać się do Wartości-M, w związku z ciągłym nasycaniem się tych tkanek na głębokich przystankach. Program bierze dodatkowe nasycenie pod uwagę, ale o ile wskaźnik konserwatywności (*conservatism factor*) nie zostanie podwyższony, margines bezpieczeństwa na przystankach płytkich będzie mniejszy, niż przy profilu wyliczonym tradycyjnie. Można przekonać się o tym wyliczając maksymalny procent Wartości-M i procent wykorzystanego gradientu Wartości-M dla każdego przedziału tkankowego na każdym przystanku.

Wykres na rys. 3 przedstawia pełen profil dekompresyjny wyliczony z wykorzystaniem Współczynników Gradientowych (*Gradient Factors*) do kontroli gradientu przesylenia dla całego profilu. Współczynniki Gradientowe pozwalają na przyjęcie spójnego podejścia w liczeniu dekompresji i zastosowanego konserwatywności. Można je wykorzystywać do generowania przystanków w strefie dekompresji, kontrolowania gradientów przesylenia i zapewnienia z góry określonego marginesu bezpieczeństwa w odniesieniu do Wartości-M dla całego profilu dekompresyjnego. Współczynniki Gradientowe są po prostu ułamkiem lub pewnym procentem gradientu wartości M (patrz rys. 4). Dodanie głębokich przystanków generalnie prowadzi do wydłużenia czasu płytkich przystanków, jak również całego czasu dekompresji. Jednak jeśli w rezultacie otrzymamy skuteczną dekompresję, można uznać, że zachowana została również jej "ekonomia". Wykres zmienności ciśnień (*pressure graph*) jest

doskonałym narzędziem pozwalającym nurkowi ocenić profil dekompresyjny. Twórcy modeli i programów dekompresyjnych powinni zapewnić możliwość jego generowania przez ich programy.

Przykładowe profile dekompresyjne wykorzystane na wykresach zamieszczonych w tym artykule zostały wyliczone przy założeniu minimalnego konserwatywności i służyć mają jedynie ilustracji różnic pomiędzy nimi.

O Autorze:

Erik C. Baker jest inżynierem elektrykiem, pracującym w firmie doradztwa inżynierskiego na Florydzie. Jego hobby to badania nad dekompresją i fizjologią nurkowania. Napisał w FORTRANIE kilka programów do liczenia i analizy dekompresji. Erik jest certyfikowanym nurkiem jaskiniowym i trimiksowem.

O tłumaczach:

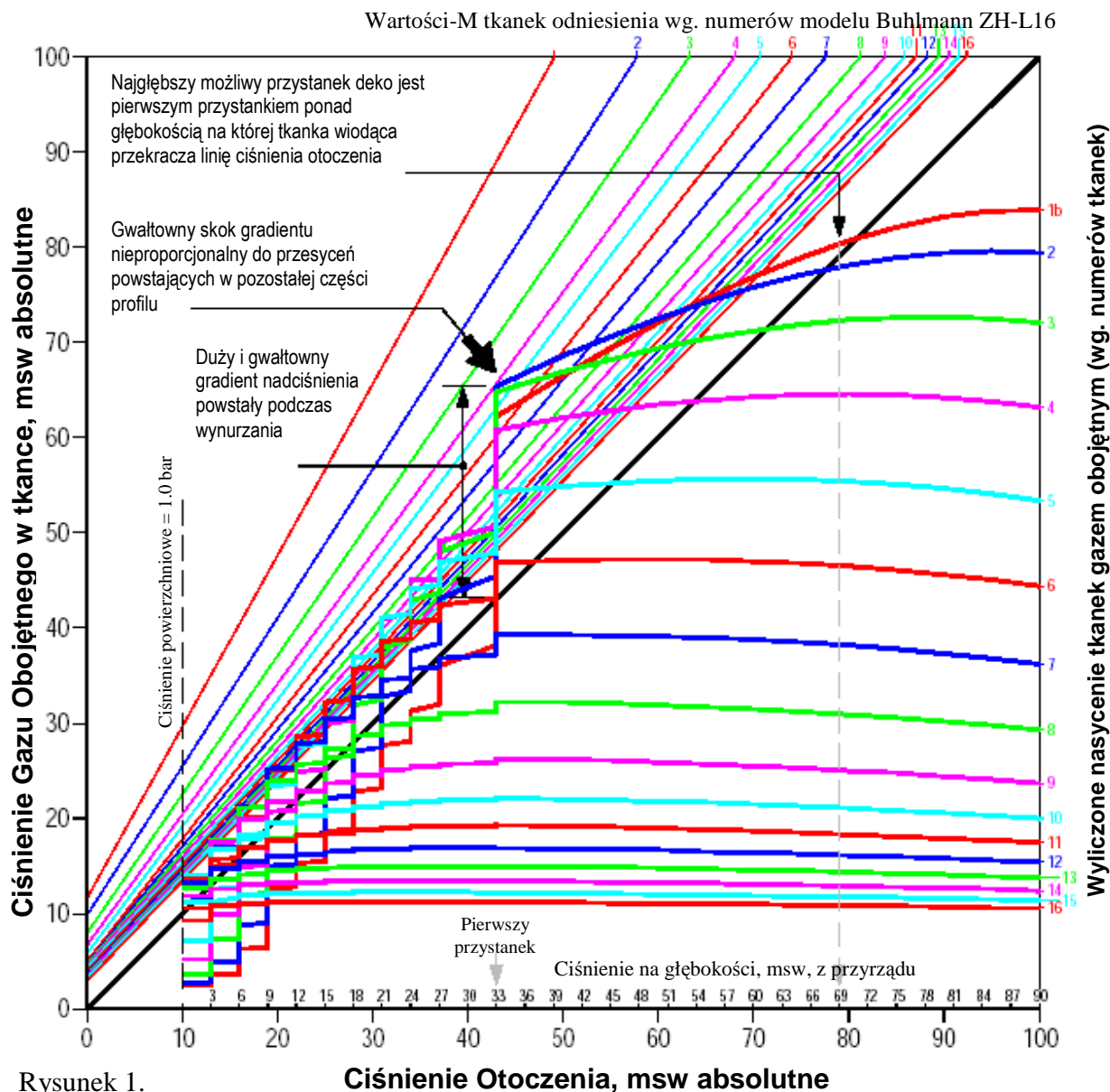
Tomasz Żabierek jest inżynierem robotykiem, kierownikiem pracowni projektowej w warszawskiej firmie inżynierskiej PRO-CONTROL. Jego hobby to nurkowanie techniczne, posiada stopień Instruktor Trainera Normoxic Trimix IANTD oraz wszystkie stopnie instruktorskie tejże organizacji. Od wielu lat zajmuje się analizą algorytmów dekompresyjnych oraz technikami dekompresyjnymi stosowanymi w nurkowaniach technicznych. Założyciel grupy Hogarthian Divers.

Izabela Kapuściarek jest psychologiem ewolucyjnym i społecznym, zajmującym się badaniami rynku w globalnym marketingu firmy Shell, a dla przyjemności nurkowaniem. Posiada stopień IANTD Advanced Nitrox i PADI Divemaster, obecnie przygotowuje się do nurkowań technicznych i jaskiniowych. Członek grupy Hogarthian Divers.

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.

Wykres ciśnienia: Profil dekompresyjny wykorzystujący metody standardowe



Rysunek 1.

Uwagi:

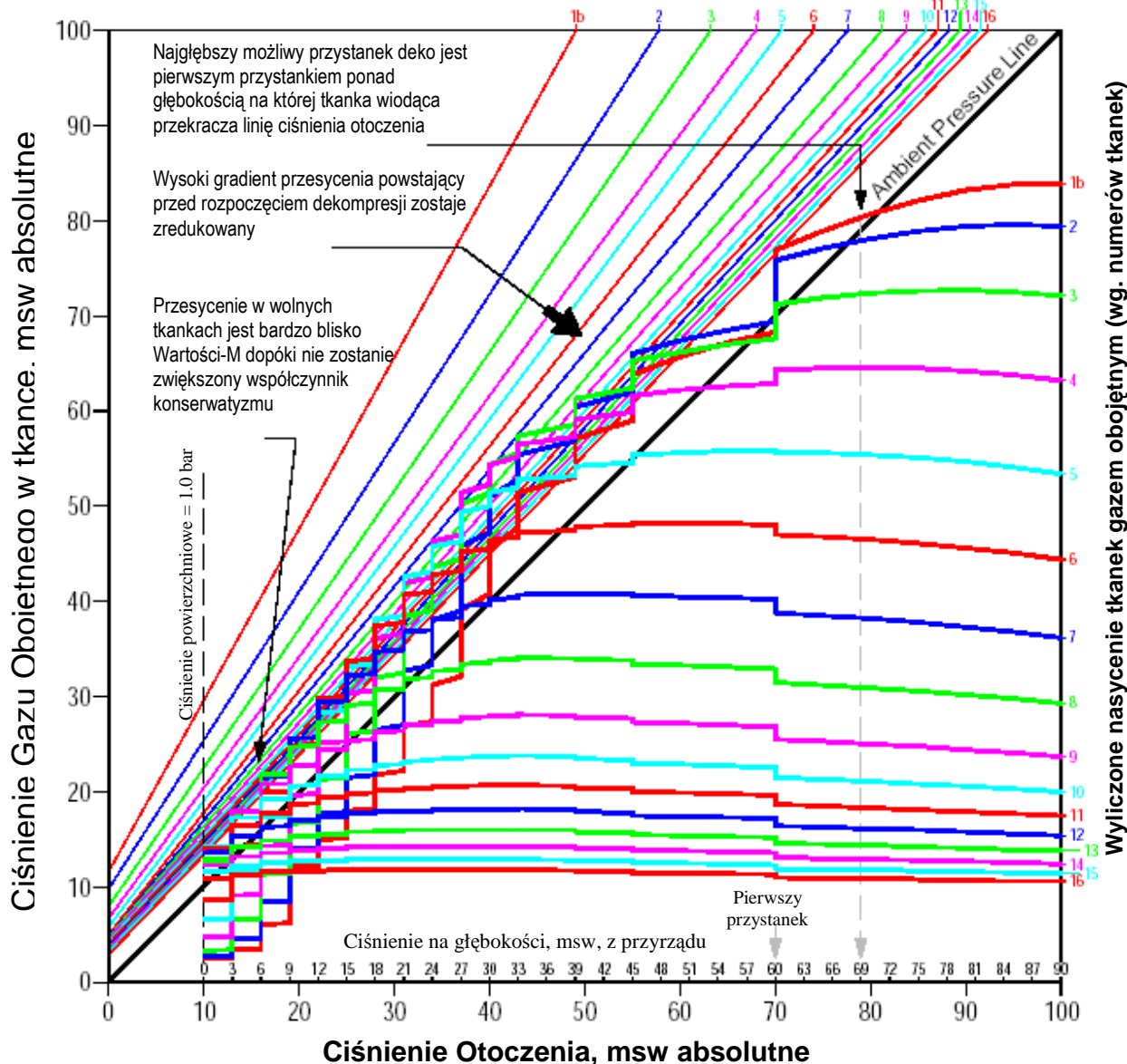
1. Nurkowanie trimixowe na 13/50 do głębokości 90msw z czasem dennym 20 minut;
2. Gazy dekompresyjne: Nx36 od 33msw, Nx50 od 21msw oraz Nx80 od 9msw;
3. Minimalny konserwatyzm (15%)
4. Prędkość wynurzenia 10msw/min;
5. Podane obliczone nasycenie tkanek dotyczy momentu opuszczania dna w 20 minucie nurkowania;
6. Run-time to czasy opuszczania głębokości
7. Ten profil jest dobrym odzwierciedleniem typowych głębokich „wind”

Tabela dekompresyjna

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

Wykres ciśnienia: Profil dekompresyjny z wykorzystaniem Deep Stopów Richarda Pyle'a

Wartości-M tkanek odniesienia wg. numerów modelu Buhlmann ZH-L16



Rysunek 2.

Uwagi:

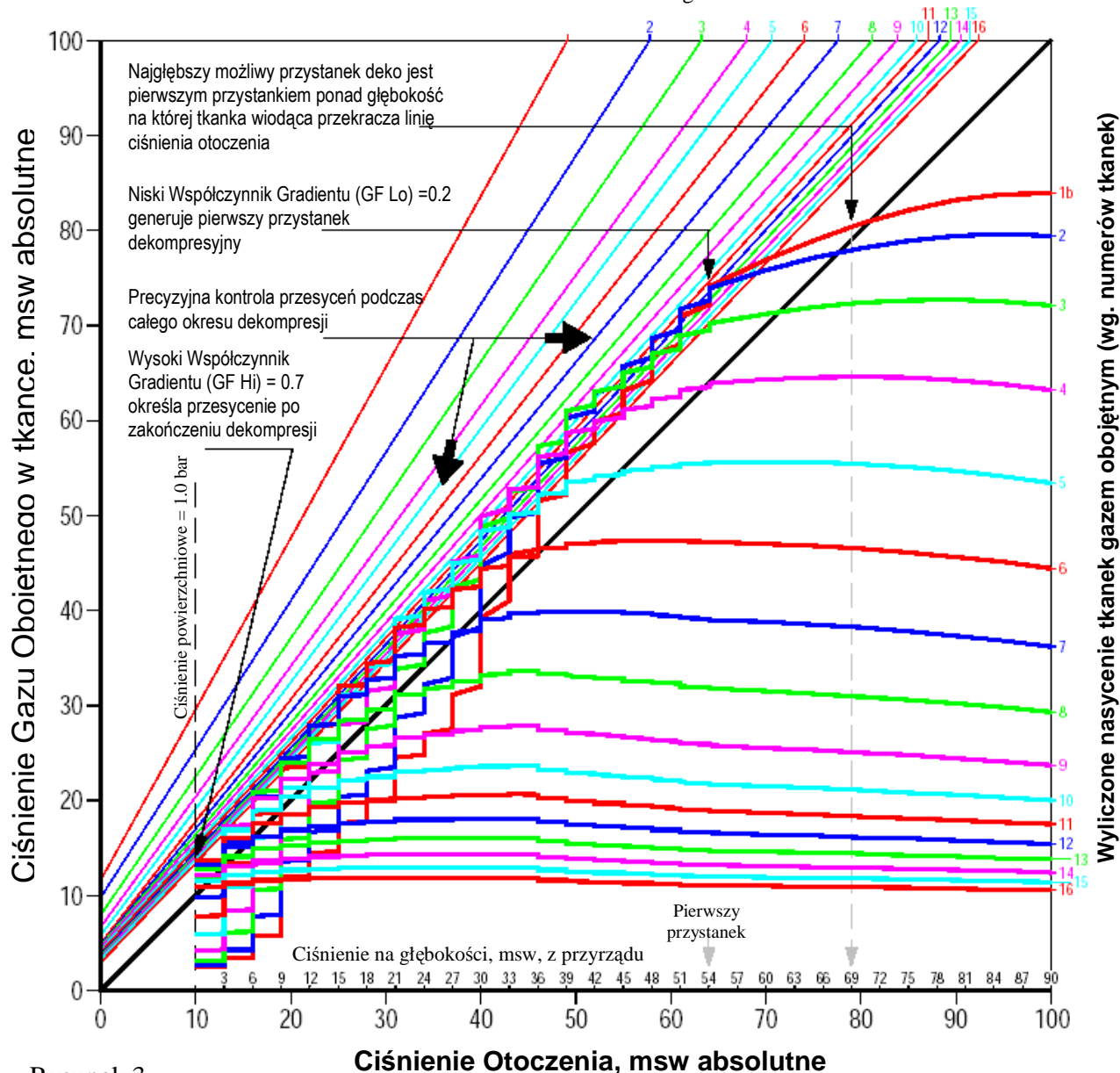
1. Nurkowanie trimixowe na 13/50 do głębokości 90mśw z czasem dennym 20 minut;
2. Gazy dekompresyjne: Nx36 od 33mśw, Nx50 od 21mśw oraz Nx80 od 9mśw;
3. Minimalny konserwatywnizm (15%);
4. Prędkość wynurzania 10mśw/min;
5. Podane obliczone nasycenie tkanek dotyczy momentu opuszczania dna w 20 minucie nurkowania;
6. Run-time to czasy opuszczania głębokości;
7. Głębokie przystanki skutkują większym nasyceniem wolnych tkanek na płytszych przystankach

Tabela dekompresyjna

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		

Wykres ciśnienia: Profil dekompresyjny z wykorzystaniem metody Współczynników Gradientu (GF)

Wartości-M tkanek odniesienia wg. numerów modelu Buhlmann ZH-L16



Rysunek 3.

Uwagi:

1. Nurkowanie trimixowe na 13/50 do głębokości 90mśw z czasem dennym 20 minut;
2. Gazy dekompresyjne: Nx36 od 33mśw, Nx50 od 21mśw oraz Nx80 od 9mśw;
3. Konserwatyzm określa wartość Współczynników Gradientu
4. Prędkość wynurzania 10mśw/min;
5. Podane obliczone nasycenie tkanek dotyczy momentu opuszczania dna w 20 minucie nurkowania;
6. Run-time to czasy opuszczania głębokości
7. Odległość poziomu nasycenia tkanek od M-Value jest kontrolowana przez wartości gradientów

Tabela dekompresyjna

Stop (mśw)	Run (min)	Stop (mśw)	Run (min)	Stop (mśw)	Run (min)	Stop (mśw)	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		

