

PROBLEMY WYBORU TABELI DEKOMPRESJI NURKOWANIA SATUROWANEGO DLA CELÓW KOMERCYJNYCH W POLSCE Cz. I

Stanisław Skrzyński, Piotr Siermontowski

Katedra Technologii Prac Podwodnych, Akademii Marynarki Wojennej

STRESZCZENIE

W artykule przeanalizowano zagadnienie potrzeb w zakresie nurkowań saturowanych w obrębie polskiego szelfu Bałtyckiego. Zgromadzono i porównano istniejące i sprawdzone systemy nurkowań saturowanych, które stosowane są w świecie, wskazano różnice i podobieństwa a także trendy rozwojowe. Omówiono warunki brzegowe którym wszystkie technologie nurkowań muszą sprostać a także kierunki i tendencje rozwoju. Wskazano wachlarz możliwości które ze stosowanych dotychczas do wykorzystania technologii najbardziej pasują do warunków południowego Bałtyku. Stwierdzono także, że opracowane w Polsce, między innymi przy udziale jednego ze współautorów artykułu pod koniec XX wieku warunki saturacji były zbliżone z uznawanymi obecnie za wiodące technologiami.

Słowa kluczowe: saturowane, metody i sposoby dekompresji plateau saturacji, prędkość dekompresji, strefa bezpiecznej pracy nurka, ciśnienie parcjalne, mieszaniny oddechowe, helioks.

ARTICLE INFO

PoiHypRes 2023 Vol. 85 Issue 4 pp. 7 – 42

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2023-0019

Strony: 36, rysunki: 11, tabele: 18

page **www of the periodical:** www.phr.net.pl

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 16.08.2023 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 27.09.2023 r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



WSTĘP

Mija 30 lat jak w naszym kraju po raz pierwszy zastosowano nurkowania saturowane na polskim ofshore, mimo że posiadaliśmy w tym okresie dwa badawcze systemy lądowe i opracowaną technologię, ale sprawdzoną tylko w warunkach prób zdawczych w stoczni. Dla zaspokojenia potrzeb wydobywczych ropy na polskim szelfie brakowało operacyjnego systemu nurkowego i stosownych krajowych dokumentów formalnych do prowadzenia nurkowań saturowanych. W związku z tym w początkowym okresie wynajęto włoską firmę RANA, która zabezpieczyła mobilny system nurkowy Af-2 oraz ekipę włoskich nurków, którą uzupełniła ekipa z Zakładu Sprzętu Nurkowego i Technologii Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej. Współpraca AMW i firmy Rana trwała do początku roku 2011 r. Fluktuacje cen ropy i krach na tym rynku spowodował, że system Af-2 pozostał w kraju 1999 jako baza do badań w/w Zakładu. W międzyczasie zmienił też właściciela, którym od roku 2004 jest przedsiębiorstwo wydobywania ropy i gazu LOTOS Petrobaltic, a od 2011 prace podwodne oparte są o wyłącznie polski zespół.

System nurkowy pracuje do dnia dzisiejszego i jest w swojej ponad czterdziestoletniej eksploatacji permanentnie modernizowany przez zespół Zakładu Technologii Prac Podwodnych (aktualnie Katedra Technologii Prac Podwodnych) Akademii Marynarki Wojennej pod nadzorem RINA (włoskie towarzystwo klasyfikacyjne) i Polskiego Rejestru Statków. Oprócz zmian technicznych i organizacyjnych zmieniały się także technologie nurkowania w tym szczególnie procedury dekompresji wskutek zmian związanych różnymi udoskonaleniami, własnymi badaniami i trendami wśród państw wiodących w stosowaniu w tej „high technology” nurkowania.

PROBLEM WYBORU TABEL DEKOMPRESJI NURKOWAŃ SATUROWANYCH

W nurkowaniach saturowanych mamy trzy podstawowe problemy dekompresyjne. Są to:

- dekompresja z plateau saturacji,
- dekompresja podczas nurkowania na głębokościach niższych lub wyższych w stosunku do plateau saturacji w tym określenie czasu i głębokości tzw. „bezdekompresyjnych”,
- oraz procedury awaryjne w tym związane przyśpieszeniem czasu dekompresji i ewakuacji nurków.

Tworzą one system powiązany z posiadaną techniką oraz bazą medyczną, określają procedury i technologie nurkowania i wykonywania prac podwodnych.

W artykule przedstawiono głównie informacje na temat stosowanych w wybranych krajach tabel dla dekompresji saturowanych w związku z pilną koniecznością wyboru nowej, lub udoskonalenia aktualnej stosowanej w Polsce technologii nurkowania saturowanego.

Stosowana obecnie technologia powstała w Zakładzie Sprzętu Nurkowego i Technologii Prac Podwodnych [1] w oparciu o posiadana bazę techniczną Marynarki Wojennej RP. Doświadczenia 30-tu lat operacyjnych oraz rutynowo już prowadzonych w AMW nurkowań saturowanych dla celów szkoleniowych wskazują, że istnieje pilna potrzeba dalszego rozwoju tej technologii. Nasz kraj, mimo że posiada oficjalne tabele dekompresyjne do nurkowań głębinyowych w formie dokumentu państwowego [2] nie posiada oficjalnych tabel nurkowań saturowanych. Umieszczenie tych konkretnych tabel w rozporządzeniu stało się czynnikiem hamującym rozwój nurkowania komercyjnego w Polsce, co jednak jest tematem na osobny artykuł.

Wiele firm nurkowych na świecie stosuje procedury saturacji US Navy Procedury te są stale modyfikowane, aby były zgodne z najnowszymi wymogami prewencji zagrożeń wynikających z narażenia na działanie środowisk hiperbarycznych. Ze względu na problemy z możliwościami badawczymi a szczególnie ograniczenia finansowe, wiele firm modyfikuje te tabele jedynie empirycznie. W rezultacie, analiza dokumentów na podstawie których firmy te prowadzą nurkowania saturowane pokazuje, że niektóre proponowane modyfikacje są nie do przyjęcia z technicznego i prawnego a nade wszystko medycznego punktu widzenia. W konsekwencji podręczniki te mogą zostać odrzucone przez rygorystycznych klientów lub mogą narazić przedsiębiorstwa wdrażające procedury opisane w tych dokumentach na konsekwencje w razie zaistnienia wypadku. [3] Powyższa wspólna konstatacja specjalistów francuskich i brytyjskich dotyczy głównie rynków, gdzie konkurują ze sobą państwa wiodące w opracowaniu tabel dekompresji nurkowań saturowanych

Podczas nurkowań saturowanych wykonywanych w naszym kraju stosowano od samego początku modyfikowane technologie oparte o tabele US Navy, mimo że w 1989 roku opracowano własne tabele dla produkowanych w kraju systemów. W nurkowaniach dla przedsiębiorstwa Petrobaltic od 1995 do 2011 ze zrozumiałych względów używano tabel włoskiej firmy RANA.

W przypadku polskiej technologii nurkowań saturowanych również uwzględniono najnowsze, aktualne tabele US Navy z modyfikacją dekompresji; np. na starcie dekompresji zastosowano dekompresję izobaryczną. Ponadto poprawki te nie były ograniczane li tylko do algorytmu dekompresji ale również do jej procedur uwzględniając posiadaną technikę i zabezpieczenie nurkowania. Przykładem może być pomiar ciśnienia parcjalnego tlenu i dwutlenku węgla dwoma niezależnymi metodami pomiarowymi. System kontroli i utrzymania składu atmosfery komory oparty był o pełną digitalizację pomiarów oraz prowadzone niezależnie pomiary analogowe. Dokładność pomiarów ciśnień były o wyższa o klasę dokładności niż wymagano to w przepisach i dokumentach normatywnych. Ta zasada wielokrotności zabezpieczeń stosowana jest w Katedrze Technologii Prac Podwodnych AMW do dzisiaj; podczas szkoleniowych nurkowań saturowanych ciśnienia parcjalne gazów monitorowane są automatycznie przez 3 niezależne systemy a dodatkowo próbki gazów badane są laboratoryjnie podczas trwania nurkowania.

Mimo trudnych warunków Morza Bałtyckiego stosując dwukrotnie modernizowany jedyny w Polsce, mobilny system nurkowy Af-2 (zbudowany jeszcze w latach 1977-1978) do 2023 roku podczas prac podwodnych nie zanotowano żadnego incydentu dekompresyjnego, mimo że w opiniach niektórych krajowych środowisk medycznych krajowych [4] sugerowano istnienie krytycznych przesyceń i ryzyko tego incydentu.

Obserwując w ostatnim trzydziestolecu kierunek modyfikacji tabel dekompresyjnych dla nurkowań saturowanych

stosowanych na offshore oraz śledząc badania i nowe dokumenty normatywne promowane przez organizacje i instytucje międzynarodowe przedstawiamy skróconą analizę stosowanych tabel dla zakresu strefy głębokości 40 - 100 m czy strefy zainteresowania obszarów polskiej strefy ekonomicznej na Morzu Bałtyckim.

Wybór oficjalnych tabel dla nurkowań saturovaniych w naszym kraju, które będą podstawą do dalszego opracowywania tabel dla przedsiębiorstw usług podwodnych z uwzględnieniem posiadanej techniki, zabezpieczenia medycznego i technicznego oraz możliwości organizacyjnych jest pilną potrzebą dla zapewnienia przyszłości tego strategicznego rodzaju działalności podwodnej. Problem ten jest też ważny dla obronności, szeroko pojętej ekologii oraz gospodarki energetycznej naszego kraju. Wiedza i technologia wywodząca się z nurkowania saturowanego jest wykorzystywana nie tylko na morzu, ale np. w budownictwie przy drążeniu tuneli, w górnictwie (wyprowadzenie górników z zatopionych sztolni) i szeroko pojętego przemysłu, szczególnie obronnego.

Wdrażając nowe technologie nurkowania saturowanego, należy uniknąć błędów, jaki popełniono wprowadzając na drodze rozporządzenia tabele dla nurkowań głębinowych, nie uwzględniające posiadanej w Polsce techniki nurkowej. Narzucono błędne przekonanie, że tabele mogą być wprowadzane tylko przez specjalistów medycznych, którzy, jak pokazuje praktyka, ocenę tabel opierają o stosowany model dekompresji, gdzie więcej jest matematyki niż zagadnień fizjologii podwodnej a nade wszystko nie uwzględniają posiadanej techniki. Narzucanie rozwiązań zamiast ich wypracowania w gronie specjalistów a szczególnie pomijanie głosu tych, którzy w dziedzinie nurkowań saturovaniych i głębinowych mieli w Polsce największe doświadczenie doprowadziło do obecnej sytuacji. Pilność rozwiązania problemu wynika z faktu, że wielu realizatorów tych nurkowań w naszym kraju, których doświadczenie i wiedza była niezbędna odeszło na „wieczną wachtę” lub się do niej niestety szykuje. Argument, że „sprowadzimy lub poprosimy z zagranicy specjalistów tej dziedziny”, oraz że nowy zespół krajowy, o ile powstanie, nie będzie obciążony dotychczasową praktyką są niedorzeczne, gdyż najważniejszym faktorem dla wdrożenia nowych tabel jest znajomość polskich uwarunkowań, które powinni uwzględniać polscy specjaliści.

Intencją tego artykułu jest chęć pokazania, jakie podstawowe informacje powinny być zawarte w dokumentach systemu tabel dla nurkowań saturovaniych niezbędnych do bezpiecznej pracy personelu nurkowego, medycznego oraz inżynierijno-technicznego celem wykonania i zabezpieczenia nurkowań. W artykule nie poruszamy problemu tabel dla nurkowań saturovaniych z użyciem powietrza i nitroksu, gdyż na dzień dzisiejszy w Polsce nie ma pilnej potrzeby ich stosowania dla celów komercyjnych; w strefie głębokości 20-40 metrów na rynku prac podwodnych stosuje się nurkowania krótkotrwałe. Potrzeba takich nurkowań pojawi się zapewne w chwili intensyfikacji prac na głębokościach średnich dla potrzeb morskiej energetyki wiatrowej, ewentualnie budowie tuneli.

Uważamy, że nurkowania saturowane, ze względu na panujące trendy ekologiczne, wydawać by się mogło nie będą w najbliższej przyszłości potrzebne, gdyż głównie zabezpieczają wydobycie płynnych i gazowych kopaliny oraz ze względu na szerokie zastosowanie technologii beznurkowych. Jednak w przyszłości światowa gospodarka będzie ich potrzebowała nie tylko w dziedzinach wydobycia podwodnego, ale w budownictwie podwodnym, obronności a nawet ekologii

OGÓLNE INFORMACJE O REALIZACJI DEKOMPRESJI W NURKOWANIACH SATUROVANICH

Jednym z technicznych i fizjologicznych problemów zapewnienia jakości dekompresji nurkowania saturowanego tj. odwzorowania tabel dekompresji jest utrzymanie ciśnienia parcjalnego tlenu podczas obniżania ciśnienia.

W modelowaniu dekompresji dla nurkowań saturovaniych dominują dwa modele rozsylenia tkanek organizmu nurka:

- eksponentalny – związany ze zmiennymi prędkościami obniżania ciśnienia, zwiększającymi się z malejącym ciśnieniem absolutnym. Prędkości obniżania ciśnienia w czasie odwzorowują eksponentę modelującą malejącą podstawy gradientu rozsylenia tkanek.
- liniowy – związany z liniowym obniżaniem ciśnienia; dwa lub więcej pochylenia prostej pokazujące obniżanie ciśnienia będącego podstawą gradientu rozsylenia tkanek.

Gdyby nie obostrzenia wynikające z możliwości przekroczenia bezpiecznej zawartości tlenu w komorze (25%) prędkość ta mogłaby być stała do powierzchni, a dekompresja krótsza. Przy standardowym ciśnieniu parcjalnemu tlenu stosowanym w dekompresji 0,4 ata dla utrzymania jego wartości przy powierzchni zawartość tlenu wynosiłaby blisko 40%. Jedną prędkość od początku do końca dekompresji nie jest możliwa ze względu na powyższe uwarunkowania i dotyczy to wszystkich stosowanych tabel dla nurkowań saturovaniych. Dlatego też tabele „zwalniają” w strefie głębokości 15 – 0 m na skutek obniżania ciśnienia parcjalnego tlenu, przy jego stałej zawartości utrzymywanej w granicach 21-21% w rytm zmian ciśnienia wewnątrz komory.

Gdyby w komorze pO_2 było utrzymywane na poziomie 50kPa aż do powierzchni, procent tlenu w komorze wzrósłby do 50 do czasu wynurzenia przy głębokości bliskiej 0. Zawartość tlenu maksymalnie 23% przyjęto z punktu widzenia zagrożenia pożarowego i utrzymuje się ją od głębokości 15 m aż do powierzchni. W związku z tym dla końcowej części dekompresji saturacyjnej wybiera się maksymalny dopuszczalny procent tlenu. Wartość ta może się wahać w granicach 20 - 23%. Dla $pO_2 = 50kPa$ (0,50 ata) 23 % osiągnęte jest na głębokości 11,7 m. Wybór maksymalnej zawartości procentowej tlenu dla końcowej części dekompresji opiera się na ocenie ryzyka pożaru i charakterystyce technicznej systemu nurkowego.

Podstawą modelu dekompresji jest tzw. tkanka wiodąca – tkanka tzw. „wolna”, która decyduje o długości dekompresji. Podczas nurkowania krótkotrwałego typu „bounce” pełnemu nasyceniu podlegają jedynie tkanki tzw. „szybkie” z czasem połowicznego nasycenia rzędu kilku lub kilkunastu minut.

Przyjmuje się, że zjawisko nasycania tkanek ma charakter przebiegu eksponentalnego w czasie. Czas połowicznego nasycenia wiodącej lub uwzględnianych tkanek w nurkowaniach saturovaniych są rzędu kilku a nawet kilkunastu godzin. (np. 240, 360 i więcej minut). Czas połowicznego nasycenia decyduje oczywiście o tym, jaki jest czas pełnego saturowania organizmu nurka. Przyjmuje się go jako 6 czasów połowicznego nasycenia tkanki wiodącej. [5,6]. Ze względu na wysokie koszty badań modele weryfikuje się jedynie dla wybranych plateau saturacji i to na bardzo ograniczonej liczbie nurków

doświadczalnych a pozostałe głębokości określa się na podstawie zweryfikowanego modelu.

Drugim ważnym czynnikiem dekompresji jest stosowane ciśnienie parcjale tlenu. W niewielu spośród aktualnie stosowanych tabel saturowanych na kilka godzin przed rozpoczęciem dekompresji podnosi się ciśnienie parcjale tlenu do wartości 50kPa (0,5 ba) i utrzymuje do momentu, gdy zawartość tlenu w atmosferze komory osiągnie 21-23%. Stałe utrzymanie wartości dotyczy również ciśnienia parcjalego dwutlenku węgla, wilgotności i temperatury w komorze. Utrzymanie dopuszczalnego ciśnienia dwutlenku węgla jest przy obniżeniu ciśnienia realizowane sposobami technicznymi i zwiększa skuteczność działania sorbentu. Dopuszczalna zawartość tego gazu rośnie wraz ze zmianą ciśnienia. (np. przy dopuszczalnym $pCO_2 = 0,5kPa$ na głębokości 80m dopuszczalna zawartość dwutlenku węgla to 0,056%, a przy głębokości 20m 0,17%).

Obniżanie ciśnienia celem realizacji dekompresji powoduje obniżenie pO_2 . W jego obniżeniu ma udział ubytek tlenu spowodowany przemianami metabolicznymi nurków, praktycznie stały w skali doby. Dla utrzymania stałego ciśnienia tlenu do atmosfery komory dozuje się tlen. Dawka tlenu (podczas dekompresji) zależy od jej szybkości i jest zmienna wraz ze zmniejszającym się ciśnieniem w funkcji logarytmu naturalnego. Techniczne rozwiązania tego problemu wynikają z metody czy stosujemy dekompresję skokową czy ciągłą oraz od możliwości ujednorodnienia (homogenizacji) atmosfery komory

W dozowaniu tlenu musimy również uwzględnić czynności naruszające płynność obniżania ciśnienia. Są to czynności obsługowe takie jak np. słuźowanie posiłków, materiałów, wymianę bielizny, zabiegi higieniczne, usuwanie fekalii i zużytej wody po kąpeli oraz dezynfekcje przedziałów komory. Czynności te nie mogą znacząco wpłynąć na zawartość tlenu w atmosferze komory, dlatego kompensujemy ubytki ciśnienia mieszaninami o zbliżonym składzie lub o wyższej zawartości tlenu w porównaniu z zawartością w komorze. Im większe jest ciśnienie w komorze to ten wpływ jest mniejszy i odwrotnie. Objętość komory na również wpływ na wykonywane w/w procedury. Procesy te są mniej odczuwalne, gdy mamy do czynienia z komorami o większej objętości.

W praktyce uzupełnienie tlenu odbywa się dwoma sposobami: dozowaniem ciągłym lub porcjami. Podczas dekompresji stosuje się je w zależności od potrzeb, uwzględniając zaangażowanie wysiłkowe nurków. Jest oczywiste, że przy dekompresji ciągłej preferuje się dozowanie tlenu ciągłe. Uzyskanie jednorodności atmosfery komory jest to proces wolno zmienny i zmieniający się w procesie obniżania ciśnienia. Ustalone ciśnienie parcjale tlenu w komorze podczas całego nurkowania waha się w nieznacznych przedziałach zależnych od dokładności i czułości przyrządów pomiarowych, które również są zależne od warunków panujących w komorze. Doświadczenie wymaga, by podtrzymania życia oprócz kontroli skuteczności dozowania tlenu w oparciu o przyrządy sprawdzali dozowanie tlenu na podstawie objętości wynikających z ubytku tlenu w zbiorniku (np. butli dozującej itp.) [7].

Każda dekompresja nurków w nurkowaniu saturowanym w przypadku użycia mieszanin helioksowych po dotarciu na powierzchnię powinna zakończyć się pobytem nurków w komorze przez conajmniej 15 minut z otwartym włazem, celem adaptacji organizmu do oddychania powietrzem przy jednoczesnej wymianie atmosfery komory.

Nie wszystkie tabele stosują przerwy podczas dekompresji. Natomiast tabele, gdzie te przerwy są stosowane na ogół nie wskazują zasady "gospodarowania" przerwami (odpoczynkiem) podczas dekompresji. Praktycznie tylko podają czas trwania przerw w skali doby „do 8 godzin” [7]. Przyjmując, że aktualnie standardem są dwie przerwy nocna 6 godz. i opcjonalnie dzienna 2 godz., czas każdej pełnej doby dekompresji będzie zwiększony o 6- 8 godzin. Całkowity czas dekompresji będzie również zależny od czasu jej startu. Wynika to z faktu czy ostaniamy niepełną dobę dekompresji obejmie noc oraz lub przerwę dzienną. Obowiązuje tu zasada, że przerwa w ostatniej fazie dekompresji powinna zakończyć na głębokości minimum 3 4m i w przypadku systemów mobilnych powinna odbywać się w dzień [1,8,9]. Zapewnia to pełną kontrolę procesu, gdyż przy niskich ciśnieniach praca podstawowych urządzeń musi być szczególnie kontrolowana. W systemach do nurkowań saturowanych wiele urządzeń pracuje wykorzystując różnicę ciśnień wnętrza komory z otoczeniem np. sygnały pomiarowe, toaleta. W praktyce spotykamy procedury dekompresyjne wykorzystujące przerwy dekompresyjne poniżej 3 m głębokości [9].

Obecnie stosowane tabele wydłużają czas dekompresji w porównaniu z tabelami lat 80 ubiegłego wieku i późniejszymi. Im dłuższa jest dekompresja tym bardziej nieefektywna dla zleceniodawców, ale bezpieczniejsza w tym także dla zdrowia i kieszeni nurków. Dlatego większość firm udoskonala stosowane tabele wprowadzając przerwy podczas dekompresji, mimo że w źródłowych tabelach one nie występowały. [3,10].

W ostatnim dziesięcioleciu pojawiły się opracowania dotyczące jakości dekompresji nurkowań saturowanych z punktu widzenia zdrowia i samopoczucia nurków, co skutkowało, jak w przypadku Norwegii, zmianami normatywów tych nurkowań [3,7,11,12,13].

Zasady dekompresji w nurkowaniach saturowanych są podobne we wszystkich tabelach stosowanych na świecie. Np. maksymalny czas przebywania pod ciśnieniem wynosi 28 dni, a minimalny odstęp między dwoma nasyceniami będzie taki sam jak czas nasycenia i nie może być krótszy niż 14 dni. Maksymalny czas, przez jaki można pozostawać w saturacji w okresie 12 kolejnych miesięcy nie może przekraczać 120 dni. Podobnie odbywanie lotu po zakończeniu dekompresji nurkowań saturowanych, minimum 24 godz od momentu zakończenia. Żaden dokument nie precyzuje czy zakończenie dekompresji to również okres przebywania nurków w pobliżu komory tzw. "bale time", czy dekompresja kończy się po wyjściu nurków komory. Wskazania medyczne sugerują dłuższy okres między zakończeniem dekompresji po nurkowaniu saturowanym a lotem; 48 godzin, podobnie jak po leczeniu wypadku nurkowego.

WYBÓR PLATEAU SATURACJI

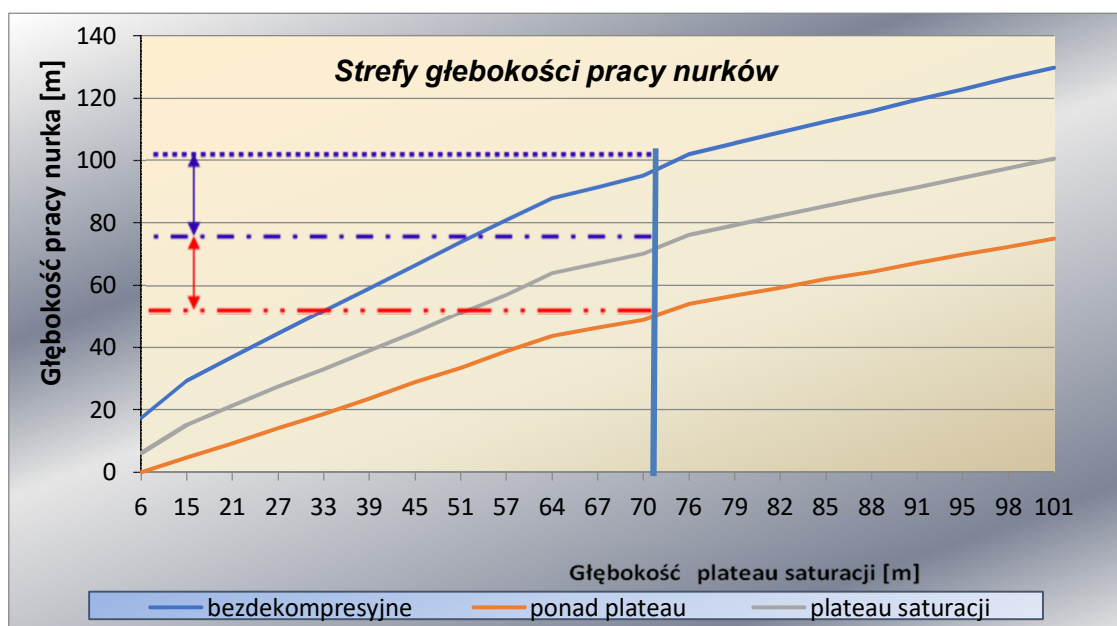
O długości czasu dekompresji nurkowania saturowanego decyduje ustalenie plateau zależne od głębokości pracy nurków. O tym również decydują tabele "wycieczek" tj. większych i mniejszych głębokości pracy w stosunku do głębokości plateau saturacji. Tabela ta podaje czasy i głębokości względem głębokości plateau. W przypadku wycieczki w "dół" podają one limity czasu oraz głębokości większych od głębokości plateau z których do powrotu na głębokość plateau nie jest wymagana dekompresja. (Unlimited Duration Downward Excursion Limits). W przypadku stosowania wycieczki w górę tj. nurkowania na głębokość mniejszą od plateau saturacji (Unlimited Duration Upward Excursion Limits) podają czasy

i głębokości dla zachowania bezpieczeństwa tj. uchronienia nurka przed incydem dekompresyjnym.

Przekraczając limity czasu dekompresji przy wycieczkach w dół muszą być stosowane właściwe tabele dekompresji. Najprostszym rozwiązaniem jest dobór tabel z danego systemu tabel nurkowań krótkotrwałych wstawiając w miejsce ciśnienia atmosferycznego ciśnienie plateau saturacji.

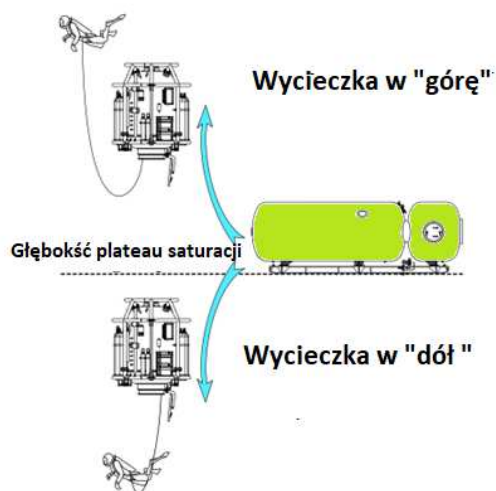
Należy pamiętać, że wiele danych w tabelach dekompresyjnych, szczególnie w nurkowaniach saturowanych stanowią wyniki obliczeń modelowych, gdyż fizycznie i czasowo nie istnieje możliwość ich sprawdzenia ze względu nie tylko wysokie nakłady finansowe i organizacyjne, ale także na przemożny wpływ komisji bioetycznych skutecznie ograniczających możliwość prowadzenia doświadczeń z udziałem ludzi. Tabele wycieczek mają również decydujący wpływ na wybór dekompresji awaryjnej w przypadku konieczności skrócenia dekompresji podstawowej np. w przypadku ewakuacji nurków. Dane badań z ostatniego dwudziestolecia sygnalizują nowe podejście do problemu toksyczności tlenowej, [14] co ma odbicie również w procedurach dekompresji, jeśli przyjmujemy za standard tabele saturacji US Navy [9].

Przestrzega się w procedurach by nie rozpoczynać dekompresji przez tzw. "dopuszczalną wycieczkę do góry" nawet z zastosowaniem tzw. dekompresji izobarycznej poprzez zwiększenie ciśnienia parcjalego tlenu i określonego czasu jego ekspozycji na plateau saturacji. Niesie to ze sobą ryzyko i może być stosowane tylko w warunkach sytuacji awaryjnej związanej z koniecznością skrócenia dekompresji.



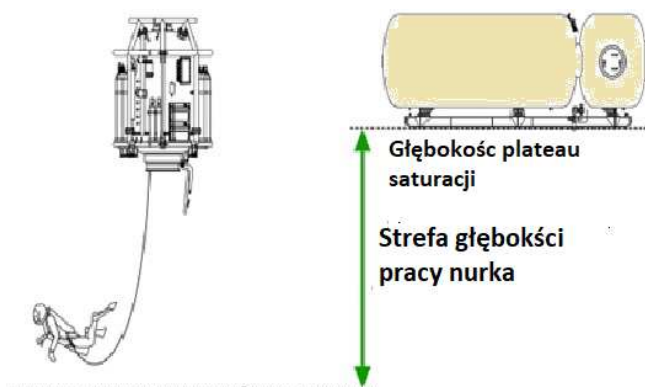
Rys. 1. Poglądowe strefy głębokości pracy nurka w toni wodnej podczas nurkowań saturowanych.

Na rys. 1 pokazano dobór strefy głębokości pracy nurka. Pionowa linia odcina głębokości bezdekompresyjne z wybranego plateau, przecięcie z liniami głębokości wyznacza strefy pracy i ograniczeń pobytu nurka w toni wodnej. Planowana praca nurków powinna się odbywać w strefie głębokości pomiędzy liniami fioletową i niebieską. Praca nurka pomiędzy głębokościami ograniczonymi liniami niebieską i czerwoną należy stosować w ograniczonym zakresie a najbezpieczniej unikać.



Rys. 2. Głębokości pracy nurka w odniesieniu do głębokości plateau saturacji. Możliwości położenia dzwonu nurkowego i położenie nurka w strefie głębokości wycieczek – [rys. za poz. [3]].

Z zasady jest to strefa ograniczona przyjętymi tabel wycieczek dla powrotu nurków do dzwonu nie wymagających dekompresji.



Rys 3 Najbardziej typowe położenie w pracach na Morzu Bałtyckim [rys. za poz. [3]].

Wycieczki, czyli nurkowanie z plateau saturacji można realizować trzema sposobami. Pierwszy to manewrowanie dzwonem do głębokości zbliżonej do głębokości pracy, tak by ciśnienie parcjale tlenu nie przekroczyło wartości założonej dla wycieczki. Drugi to ustawienie dzwonu na głębokości plateau saturacji i zanurzenie nurka do pracy. Trzeci to łączenie poprzednich sposobów. Wybór zależy od dwóch głównych parametrów; długości wiązki kablowo-wężowej nurka podłączonej do instalacji dzwonu (zalecane 30m) i odległości miejsca pracy nurka.

Na podstawie praktyki i doświadczeń z Morza Bałtyckiego w planowaniu należy uwzględnić, to z zasady unika się wycieczek powyżej plateau saturacji a także wycieczek z realizacją dekompresji [1,8].

W związku z tym, że prace podwodne na bałtyckim szelfie należą do tzw. nurkowań saturowanych płytkich (do 100m), krótkie interwencyjne prace prowadzone są metodą "bounce" czyli nurkowań krótkotrwałych. Nurkowania robocze uzupełniają się również w części stosowanych mieszanin oddechowych i mogą być realizowane mieszaninami awaryjnymi dla nurkowań saturowanych w przypadku. przerwania kompresji lub dekompresji awaryjnej. Natomiast nurkowanie saturowane jest procedurą awaryjną w przypadku "wymuszonego przedłużenia" dopuszczalnych czasów pobytu dla tabel nurkowań głębokich.

PRZEGLĄD WYBRANYCH TABEL DEKOMPRESJI NURKOWAŃ SATUROWANYCH

ZASADY PRZYJĘTE W CHARAKTERYSTYCE TABEL DEKOMPRESJI NURKOWAŃ SATUROWANYCH

Nasz kraj stoi przed problemem jakie kryteria przyjąć dla wyboru tabel dekompresji nurkowań saturowanych. Dekompresja z punktu widzenia zleceniodawcy i organizatora prac podwodnych jest "nieużyteczna"; obniża efektywność prac nurka, mimo że jest konieczna dla bezpieczeństwa nurków. Z tego punktu widzenia powinna być jak najkrótsza.

Natomiast ze strony ekipy nurkowej wręcz przeciwnie; powinna ona być jak najdłuższa ze względów bezpośrednich i odległych zdrowotnych skutków nurkowania. Jest to również korzystne ze względów finansowych, gdyż gratyfikacje nurków saturowanych są wysokie i rozliczne w skali doby przebywania pod ciśnieniem.

Przedłużenie dekompresji może nieść za sobą ryzyko uszczerbku na zdrowiu wynikające z długiego oddychania podwyższonym ciśnieniem parcjalnemu tlenu, oddychania mieszaninami lżejszymi w przypadku helu i cięższymi w przypadku nitroksu, stresu zmęczenia i psychicznego oraz zagrożeń mikrobiologicznych, wynikających z zamkniętej przestrzeni, utrzymywanego komfortu cieplnego, okresowo podwyższonej wilgotności i specyfiki mieszaniny oddechowej. Szczególnie wrażliwa na infekcje jest skóra nurka, gdyż wielogodzinna maceracja naskórka wodą morską podczas pracy w toni powoduje istotne zaburzenie ochronnych funkcji skóry.

Należy zaznaczyć, że realizując dekompresję nurków saturowanych w przeciwieństwie do innych nurków możemy ją zmieniać. Jednak tylko dla poprawy bezpieczeństwa nurków poprzez zwolnienie tempa obniżenia ciśnienia, wydłużyć przerwy, zmienić ciśnienie parcjalne tlenu, oraz prowadzić rekompresję leczniczą w trakcie odbywania dekompresji. Ponadto stosować można kilka plateau saturacji stosując dekompresję podczas przejścia z jednego do drugiego.

Jak napisano wcześniej, współczesne tabele dają możliwości wyboru realizacji dekompresji metodą dekompresji ciągłej opartej o liniowe zmniejszanie ciśnienia i dekompresji skokowej realizowanej poprzez "schodkowe obniżanie ciśnienia". Obie te metody są równoważne, chociaż mają swoją specyfikę. Dekompresja skokowa rozpoczyna się większym "skokiem" spadku ciśnienia przy zastosowaniu dekompresji izobarycznej (np. 1 lub 2 godz. przed obniżaniem ciśnienia ciśnienie parcjalne tlenu zwiększa się do 0,6 ata, by po skoku obniżenia ciśnienia uzyskać wymagane ciśnienie parcjalne tlenu [9]).

Stosowanie dekompresji izobarycznej w nurkowaniach saturowanych zastosowano już w opracowywanych w 1989 roku tabelach polskich [15].

We współczesnych trendach skrócenia dekompresji nurków saturowanych i wymaganiach fizjologii podwodnej, pożądane było by, aby prędkość była stała aż do powierzchni. Zmiana ta jest wymuszona utrzymaniem zawartości tlenu w atmosferze komory dla zapewnienia bezpieczeństwa przeciwpożarowego, co z kolei wymusza zwiększenie czasu dekompresji. Obostrzenie to implikuje zmniejszenie prędkości obniżania ciśnienia. Dlatego też dekompresja z plateau saturacji na aktualnym etapie rozwoju i przy obecnym stanie wiedzy będzie zawsze minimum dwustopniowa; ze zmniejszeniem prędkości na w strefach głębokości od 20 - 15m do powierzchni.

Zwiększenie szybkości obniżania ciśnienia stosuje się jedynie w tabelach awaryjnych akceleracji dekompresji, a obniżenie tej prędkości w procesach rekompresji leczniczych i przypadkach incydentów związanych z dekompresją podstawową.

TABELA DEKOMPRESJI NURKOWAŃ SATUROWANYCH US NAVY

W wielu opracowaniach dotyczących dekompresji nurków saturowanych tabele US Navy są tabelami, które służą jako tabele porównawcze. Tworzą one pełen system, w tym tabele awaryjne, tabele przerwania, tabele rekompresji leczniczej a także podają wymagania organizacyjne, techniczne i medyczne do ich realizacji. Tabele te stosują helioks w całym zakresie głębokości dla plateau saturacji od 30m do 488m. Wydawałoby się, że w tabelach nie podano dokładności określenia parametrów składu atmosfery. Te wymagania są jednak w dokumentach towarzyszących systemowi nurkowania we flocie USA. Także, żeby nie powtarzać się przy opisywaniu innych tabel, przedstawiamy szerszą charakterystykę tabel US Navy, bo problemy realizacji wszystkich tabel są podobne lub zbieżne.

Mimo, że w opisie tabel zawartych w US Navy Diving Manual jasno ostrzega się przed skutkami ich stosowania, wiele firm je adoptuje lub adoptowało do swoich potrzeb. Tak było i przypadku włoskiej firmy RANA, która w oparciu o tabele US Navy tworzyła swoje tabele, zmieniając parametry atmosfery oraz tabele wycieczek. W oparciu o te tabele prowadzone były pierwsze operacyjne nurkowania saturowane na polskim szelfie.

Kontrola atmosfery w dzwonie i komorze powinna spełniać wymagania zawarte w tabeli 1.

Tab. 1

Parametry tlenu i limity czasowe [według 9 [1999].		
Faza nurkowania	Ciśnienie parcjalne tlenu	Czas ekspozycji
Plateau saturacji	0,44-0,48 ata	Nieograniczony
Wycieczki	0,40-0,60ata	4 godz (godz 6 godz)***
Wycieczki z dekompresją	0,42-0,48* ata	Nieograniczony
Dekompresja awaryjna	0,60**ata	24 godz

Uwagi: * Ten poziom może zostać przekroczony w wycieczce „do góry” w celu dekompresji.

** Jeśli ciśnienie pO₂ przekroczy limit, należy przełączyć się na mieszaniny awaryjne.

*** Zdolność do działania nurka spada wykładniczo między 4 a 6 godzinami przebywania w wodzie.

Określone parametry, w szczególności tlenu, są konieczne do bezpiecznej dekompresji i korzystania z tabel wycieczkowych o nieograniczonym czasie trwania. Wzrost ciśnienia parcjalego tlenu powyżej 0,6 ata przez dłuższy czas (dłużej niż 24 godziny) grozi uszkodzeniem płuc i powinien być stosowany tylko w sytuacjach awaryjnych. Ciśnienie



pO₂ poniżej 0,42 ata może skutkować incydem dekompresyjnym a pO₂ poniżej 0,16 ata powoduje niedotlenienie. Gdy ciśnienie pCO₂ osiągnie 0,005 ata; 0,5 % ekwiwalentu powierzchniowego (3,8 milimetra słupa rtęci) przez 1 godzinę, należy temu przeciwdziałać. Poziom pCO₂ = 0,02 ata (2% % ekwiwalentu powierzchniowego SEV; 15,2 milimetra słupa rtęci) może być tolerowany przez okresy do 4 godzin na głębokości w celu dekompresji. [9; 1999]. Przed rozpoczęciem dekompresji wymaga się, by atmosfera utrzymała założone parametry, to samo dotyczy mieszaniny, którą oddychał nurek podczas wycieczki.

Dekompresja wedle tabel saturacji US Navy może być realizowana metodą skokową lub ciągłą. Daje również możliwość rozpoczęcia skokiem a potem przejście na dekompresję ciągłą.

Tab. 2

Szybkość obniżania ciśnienia dekompresji nurkowania saturowanego US Navy [9].	
Strefa głębokości	Szybkość obniżania ciśnienia
1,600 – 200 fsw (488-61m) H ₂ O	6 stóp/godz. (1,83m/godz.)
200 – 100 fsw (61-30,5m) H ₂ O	5 stóp/godz. (1,53m/godz.)
100 – 50 fsw (30,5-15,25m) H ₂ O	4 stopy/godz. (1,22m/godz.)
50 – 0 fsw (15,25-0m) H ₂ O	3 stopy/godz. (0,92,3m/godz.)

Dekompresja może się rozpocząć minimum 2 godz po wycieczce nurka. Przerwy w obniżeniu ciśnienia na odpoczynek; łącznie 8 godzin z każdych 24. Obniżanie ciśnienia trwa 16 godzin w ciągu cyklu 24 godzin i można je kontynuować podczas snu nurków.

Przerwa 8 godzinna powinno być podziela na minimum dwie przerwy. To, w jakich godzinach odbywają się te postoje na odpoczynek, zależy od codziennej rutyny i planu nurkowania.

Dekompresja skokowa w saturacji jest wykonywana co 1 stopę, nie przekraczając szybkości 1 fsw/min. Na przykład użycie prędkości 6 stóp na godzinę spowoduje dekompresję komory o 1 stopę co 10 minut.

Ostatnia przerwa w dekompresji przed wynurzeniem może być wykonany przy głębokości 4 fsw, aby upewnić się, że nie dojdzie do przedwczesnego wynurzenia i że gaz będzie przepływał do przyrządów monitorujących atmosferę. Ten ostatni przystanek trwałby 80 minut, po czym następowaloby bezpośrednie wynurzenie się na powierzchnię z prędkością 1 fsw/min.

Dekompresja przewiduje dwa "zwiększone skoki obniżenia ciśnienia". Pierwszy po starcie dekompresji, a drugi w końcówce przed wyjściem na powierzchnię. Na około 1 godzinę przed rozpoczęciem skoku pO₂ w komorze można zwiększyć maksymalnie do 0,6 ata, aby skompensować jego spadek tak, aby pO₂ po obniżeniu ciśnienia nie przekraczało 0,48 ata. Obniżenie ciśnienia w trakcie pierwszego skoku z głębokości 200 fsw (61 m H₂O) lub płytszej, z wartości pO₂ wynoszącej 0,6 ata spowoduje, że ciśnienie to będzie mniejsze niż 0,44 ata. W takich przypadkach pO₂ należy zwiększyć tak szybko, jak to możliwe. Wraz ze spadkiem głębokości wzrasta ułamkowa zawartość tlenu niezbędna do utrzymania danego ciśnienia parcjalnego. Gdyby pO₂ w komorze było utrzymywane na poziomie 0,44 - 0,48 ata aż do powierzchni, % tlenu w komorze wzrosłoby do 44 - 48%. W związku z tym dla końcowej części dekompresji od 15 m utrzymujemy stały dopuszczalny % tlenu wynoszący 19 - 23%. Maksymalny % tlenu dla końcowej części dekompresji nie może przekraczać 23, ze względu na ryzyko pożaru. W przypadku stosowania dekompresji ciągłej dekompresję rozpoczynamy od ustawienia pO₂ na wartość 0,48 ata.

W warunkach polskich zastosowano dekompresję ciągłą i wprowadzono dekompresję izobaryczną na 4 godz. przed dekompresją właściwą podnosząc pO₂ do wartości 0,5 ata.

AWARYJNE PRZERWANIE NURKOWANIA SATUROWANEGO

Tabele US Navy dopuszczają w wyjątkowych przypadkach nieprzestrzeganie formalnych procedur dekompresji nurkowania saturowanego. Procedury w nagłych wypadkach powinny być zastosowane tylko w nieprzewidzianych okolicznościach, które wymagają zmiany lub nieprzestrzegania procedur dekompresyjnych.

Są to:

- awaria kluczowego sprzętu podstawowego i związanej z nim techniki niemożliwa do usunięcia i skompensowania w ramach struktury nadmiarowej funkcjonalnej i strukturalnej systemu nurkowego,
- awarie i uszkodzenia techniki zabezpieczenia lub urządzeń wspomagającego nurkowanie,
- zagrażający życiu lub zdrowiu nagły przypadek medyczny, w którym ryzyko niedostarczenia pacjenta do bardziej wyspecjalizowanej placówki opieki medycznej przewyższa zwiększone ryzyko toksyczności płucnej tlenu i zwiększone ryzyko choroby dekompresyjnej związanych z nieprzestrzeganiem standardowych procedur dekompresji saturacji [9].

Procedura przerwania nurkowania w nagłych wypadkach, która została sprawdzona w ograniczonym zakresie. Umożliwia ona nurkom wynurzenie się wcześniej niż byłoby to normalnie dozwolone. Oczywiście wykonanie procedury przerwania nurkowania w nagłych wypadkach zwiększa istotnie ryzyko choroby dekompresyjnej i powikłań związanych z toksycznością tlenową. Postawą przerwania nurkowania i zastosowania dekompresji awaryjnej jest ustalenie, czy zaoszczędzony czas wpłynie korzystnie na życie nurka pomimo zwiększonego ryzyka oraz czy procedura przerwania w nagłych wypadkach ma wsparcie logistyczne.

System do nurkowań saturowanych posiada wszystkie wielokrotne nadmiarowości techniczne i organizacyjne dla wysokiego bezpieczeństwa ochrony życia nurka. Ale mogą wystąpić sytuacje awaryjne, których charakter lub obniżona wrażliwość czasowa nie pozwolą na odejście od standardowych procedur dekompresji.

Tab. 3.

Awaryjne czasy dekompresji przerwania i ciśnienia parcjale tlenu. [9]

Głębokość	pO ₂ (ata)	Czas zatrzymania jednej stopy (min)	
		1000–200 fsw	200–0 fsw
0–203	0,8	11	0–203
204–272	0,7	11	204–272
273–1000	0,6	12	273–1000

Dekompresję awaryjną rozpoczyna się od wykonania maksymalnego skoku w górę dozwolonego w tabeli wycieczek. Szybkość obniżenia ciśnienia nie powinna przekroczyć 2 fsw/min. Po obniżeniu następuje 2-godzinny postój na granicy wychylenia w górę. Czas osiągnięcia tej głębokości jest wliczony w 2-godzinny czas postoju. Po tej wycieczce w górę ciśnienie parcjale tlenu w komorze podnosi się do wartości pokazanej w tabeli 3, zależnie od głębokości.

Dekompresję kontynuuje się w odstępach co 1 stopę, zgodnie z czasami wskazanymi w tabeli. Prędkość zmiany ciśnienia między przystankami nie może przekraczać 1 fsw/min. Czas ten jest wliczony w czas następnego przystanku.

Ciśnienie parcjale tlenu jest kontrolowane do wskazanej wartości, aż osiągnie 23%. Następnie w zakresie od 19 do 23 % przez pozostałą część dekompresji. Jak w dekompresji skokowej przy głębokości 4 fsw zatrzymujemy się do osiągnięcia całkowitego czasu dekompresji, a następnie do powierzchni z prędkością 1 fsw/min.

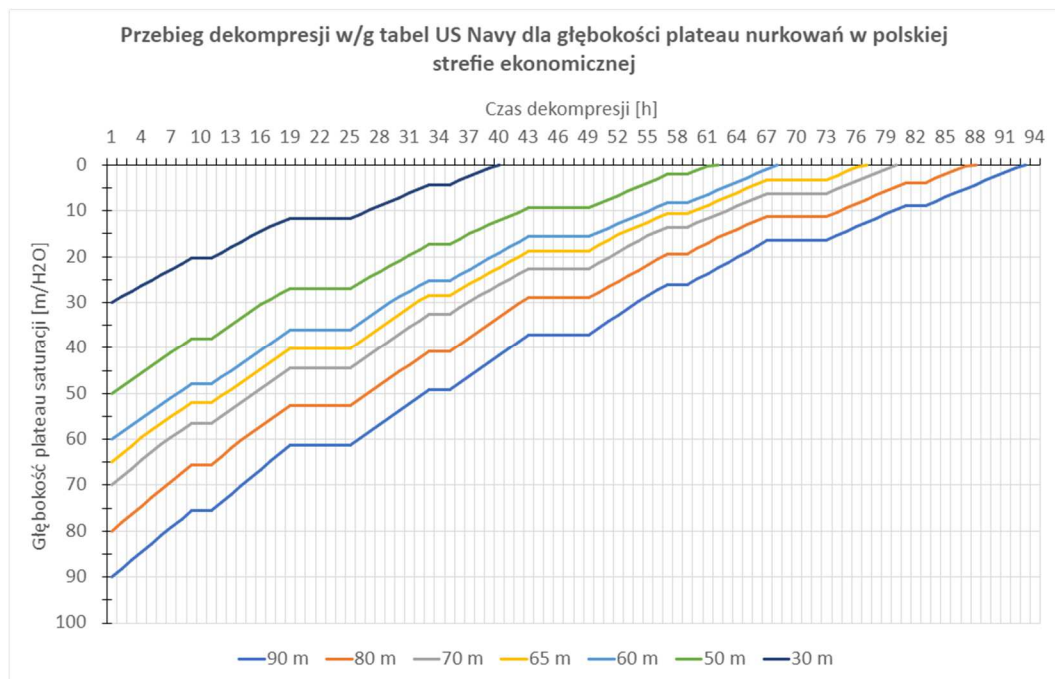
W trakcie i po nurkowaniu nurkowie powinni być ściśle monitorowani pod kątem objawów choroby dekompresyjnej oraz objawów tlenowej toksyczności płucnej. Nurkowie powinni być pod ścisłą obserwacją przez co najmniej 24 godziny po nurkowaniu. Jeśli sytuacja awaryjna przestanie istnieć podczas dekompresji, należy ją wstrzymać na co najmniej 2 godziny, a następnie powrócić do standardowych szybkości dekompresji i pozwolić, aby ciśnienie parcjale tlenu spadło do normalnych wartości kontrolnych, na drodze zużyci tlenu przez nurków.

WNIOSKI WYNIKAJĄCE Z SYSTEMU NURKOWAŃ US NAVY DLA NASZEGO KRAJU

Jak widać z powyższego, dostarczenie lub przyjęcie "suchych" tabel nurkowania szczególnie dla nurkowania saturowanego jest wielkim zubożeniem, a raczej nie dostrzeżeniem problemu. Tabele muszą być dostarczone w całym systemie obejmujących tabele robocze, tabele awaryjne (przerwania kompresji, pobytu na plateau - dekompresji awaryjnej), tabele wycieczek roboczych, oraz systeme tabel rekompresji leczniczych. Tabele nie mogą być oderwane od posiadanej techniki zabezpieczenia technicznego i logistycznego oraz organizacji systemu nurkowania i organizacji ewakuacji nurka w danym kraju.

W Polsce rolę zabezpieczenia nurkowania saturowanego w pełnym zakresie pełniła w pierwszym okresie Marynarka Wojenna, a pierwszym dwudziestolecie XXI Akademia Marynarki Wojennej, jedynym przedsiębiorstwem posiadającym technikę do realizacji nurkowań saturowanych jest LOTOS Petrobaltic. Natomiast zasobami z zakresu zabezpieczenia medycznego dysponowała Wojskowa Akademia Medyczna, Katedra Medycyny Morskiej i Tropikalnej.

W utrzymywaniu potencjału nurkowań saturowanych naszego kraju powinny wspólnie uczestniczyć Marynarka Wojenna, przedsiębiorstwa eksploatujące złoża podwodne, energetykę oraz ewentualnie także badań podwodnych związanych z ekologią. Pozwoli to utrzymać potencjał do nurkowań saturowanych w stosownej gotowości do potrzeb polityki gospodarze i obronnej Polski oraz obniży koszty utrzymania tego działu działalności podwodnej, co należy podkreślić, jedynej w rejonie Bałtyku.



Rys. 4. Przebieg dekompresji według tabel US Navy dla wybranych plateau saturacji dla prac podwodnych proponowany do zastosowania w Polskiej strefie ekonomicznej na Morzu Bałtyckim.

Przyjmując tylko zastosowanie wycieczek w dół, mamy możliwość "manewrowania" ustawienia plateau saturacji w nurkowaniu tak, by zastosować bez dekompresyjny powrót nurków na plateau.

TABELE WŁOSKIEJ FIRMY RANA WYKORZYSTYWANE PODCZAS NURKOWAŃ SATUROWANYCH W NASZYM KRAJU

DANE TABEL STOSOWANYCH W LATACH 90-TYCH UBIEGŁEGO WIEKU

Firma RANA stosowała system tabel dekompresji wzorując się na tabelach US Navy z 1980 r. w którym podczas kompresji i dekompresji można było stosować powietrze lub mieszaninę helioksovą o zawartości 20% tlenu w strefie głębokości 0 - 6 m. Włosi stosowali powietrze od 6,5m i odwrotnie, które na tej głębokości posiadało założone ciśnienie parcjale tlenu $pO_2=0,34$ ata.

Atmosferę komory uzyskiwano przez sprężanie powietrzem do głębokości 6,5 metra, a następnie zwiększano ciśnienie czystym heliem do założonej głębokości. Jednorodność mieszaniny uzyskiwano poprzez intensywną wentylację dmuchawami systemów podtrzymania życia i wewnętrznych pochłaniaczy dwutlenku węgla. Działanie zarówno wentylatorów wewnętrznych, jak i zewnętrznego obwodu podtrzymującego życie zapewniało, że nurkowie tylko w początkowej fazie kompresji oddychali z inhalatorów. Niezależnie od tego, czy chodziło o okres saturacji, czy dekompresji, atmosfera w komorze była utrzymywana w następujących granicach (oryginalny zapis z procedury):

Azot - $pN_2=1330$ mbar. (odpowiadało głębokości dla powietrza 6,5 H₂O).

Tlen - $pO_2=332$ wartość średnia (zakres od 265 do 465 mbar)

Dwutlenek węgla - pCO_2 nie wyższe niż 2,6 mbar równoważny 0,25% (na poziomie morza).

Hel - pHe: ciśnienie bilansujące ciśnienie plateau saturacji

Atmosfera dzwonu (oryginalny zapis z procedury):

Azot - pN_2 nie wyższe niż 1330 mbar

Tlen - pO_2 w granicach pomiędzy 400 a 600 mbar.

Dwutlenek węgla pCO_2 : nie wyższe niż 5,2 mbar (0,5% równoważnego)

Hel - pHe: ciśnienie parcjale bilansujące ciśnienie zanurzenia.

Dekompresja

W stosowaniu wycieczek w systemie firmy RANA nie stosowano systemu US Navy, a własny, oparty o cztery zakresy głębokości zwiększające się o 7,5 m do plateau saturacji w przedziale pomiędzy 45 a 90 m z podaniem czasu dla wykonania nurkowania bez konieczności dekompresji, określano tylko powrót z określoną szybkością wynurzenia 10m/min na plateau. Po przekroczeniu tych czasów dla nurka wracającego do dzwonu opracowano system tabel dekompresji.

Tabela wycieczek opracowana była z wymaganiami: dzwon zawsze zanurzano na głębokość saturacji, co różniło się od systemu US Navy, oraz nie przewidziano wycieczek do góry; traktowano je jako krótkie wyjątki pobytu w granicach 7,5m ponad plateau saturacji. (kierownicy włoscy uważali, że trzeba tak planować plateau saturacji by unikać zadań powyżej plateau. We współpracy z ekipą włoską były dwa momenty w którym nurkowie wykonywali krótkie, nieplanowane zadania powyżej plateau trwające bardzo krótko, bo tylko do 2min)

DEKOMPRESJA Z PLATEAU SATURACJI

W dekompresji zastosowano wymagania systemu US Navy z jedną przerwą nocną trwająca 6 godzin i prędkościami obniżania ciśnienia jak w tabeli nr 2.

Jako dekompresje awaryjną firma RANA przywołała dokument oficjalny narodowy: Annex 6.

System tabel stosowany w siedmiu nurkowaniach saturowanych dla celów komercyjnych w naszym kraju różni się od oryginalnych tabel US Navy warunkami podczas dekompresji dla ($pO_2 = 0,33$ ata, $pN_2 1,32$ ata) oraz niestosowaniem przerw 2 godzinnych w każdym okresie 24 godzinnej dekompresji. Te trzy odstępstwa znacznie zwiększały narażenie dekompresowanych w systemie "RANA" w porównaniu z systemem US Navy 1973, w którym procent przypadków choroby ciśnieniowej wynosił 11 [4]. Ta opinia krajowych specjalistów z dziedziny medycyny podwodnej posiadała wątpliwości co do współpracy z firmą RANA. Wyjaśnili je specjaliści włoscy twierdząc, że w zakresie płytkich saturacji problem ten praktycznie nie występuje. Incydentów dekompresyjnych na szczęście nie zaobserwowano, tak u nurków włoskich jak i polskich.

TABELE DEKOMPRESJI STOSOWANE PRZEZ FIRMĘ RANA W XXI WIEKU

Włosi pracując w Polsce w latach 2001-2011 zmienili system dekompresji wykorzystując system US Navy 1991. Co było podstawą tej zmiany, czy wysokie ryzyko realizacji dekompresji w systemie US Navy 1973, czy ocena NEDU (Navy Experimental Diving Unit), które udoskonalilo proces dekompresji [4], nie wiadomo. Należy też uwzględnić postęp w wyposażeniu technicznym systemów nurkowych w którym wprowadzono układy odzysku helu i zamknięty obieg w sprężeniu oddechowym który wymagał czystej mieszaniny dwuskładnikowej podczas odzysku mieszanin helowych.

W/g oceny specjalistów krajowych system US Navy 1991 sposób dekompresowania nurków heloksem w przeciwieństwie do systemu "Rana" jest bezpieczny, ale charakteryzuje się bardzo długim czasem dekompresji.

Warto zwrócić uwagę, że omawiany system dekompresji saturowanej Marynarki Stanów Zjednoczonych z 1991 roku (po ograniczeniu szybkości dekompresji w strefie do 60 metrów oraz wyeliminowaniu 6-cio i 2-u godzinnych stacji przewidzianych na sen nurków) był zaskakująco zbliżony parametrami do krajowego systemu dekompresji saturowanych weryfikowanego jeszcze w latach 1982 - 1989 w habitacie ZSNiTPP Akademii Marynarki Wojennej [4,10,16].

Wykorzystując system dekompresji US Navy 1991 włosi nie uwzględnili 8 godzinnej przerwy, a pozostawili jak poprzednio 6 godzinną w okresie 24 godzin realizacji dekompresji. Przed rozpoczęciem dekompresji ciśnienie parcjalne tlenu w komorze podnoszono do 0,48 bar. Wartość ta musi być utrzymywana na poziomie 50 fsw. Od 50 fsw do powierzchniowego zawartość tlenu należy utrzymywać na poziomie 21%. Mieszaniny helioksose są stosowane przez cały czas trwania dekompresji. Podczas dekompresji nie można używać powietrza do żadnych celów.

W przypadku awaryjnym przyjęto główne zasady Marynarki Wojennej Stanów Zjednoczonych. W przypadku ekstremalnej sytuacji awaryjnej osoba nadzorująca podtrzymywanie życia musi wdrożyć następujące kroki: [17]. jeśli sytuacja awaryjna obejmuje tylko część zespołu w stanie saturacji, a system składa się z co najmniej 2 niezależnych komór hiperbarycznych, jedynie taka nurków których sytuacja dotyczy powinna wykonać przyspieszoną dekompresję;

- jeśli w sytuacji awaryjnej bierze udział pojedynczy nurek, należy przesłuzować zewnętrznego operatora do komory, która będzie używana do przyspieszonej dekompresji, aby nigdy nie mieć w komorze pojedynczego nurka;
- obniżyć ciśnienie w komorze z prędkością 0,75 m/min;
- zwiększyć i utrzymać do 18 m ciśnienie parcjalne tlenu w komorze do 650 mbar; (0,85 ata);
- rozpocząć dekompresję przyjmując następującą prędkość w zależności od głębokości rozpoczęcia dekompresji:
 - ✓ od 180 do 90 m prędkość 3 m/h,
 - ✓ od 90 do 30 m prędkość 2,4 m/h,
 - ✓ od 30 do 18 m prędkość 1,2 m/h,
 - ✓ od 18 do 0 m prędkość 0,6 m/h,
 - ✓ od 18 m wentylowanie komory powietrzem;
- nigdy nie przekraczać zawartości tlenu 23,5% w komorze.

Bardzo ważną w procedurze dekompresji przyspieszonej jest ocena rzeczywistej korzyści w postaci przyspieszonego czasu dekompresji w porównaniu z normalnym przed rozpoczęciem jej realizacji.

TABELE DEKOMPRESJI NURKOWAŃ SATUROWANYCH FRANCUSKIEJ FIRMY COMEX

Tabele nurkowań saturowanych COMEX zawierają wiele rekomendacji nie podawanych w innych tabelach, które powinno się uwzględnić przy ewentualnym wyborze tych tabel. Są one naturalnym rozwinięciem tabel helioksowych dla nurkowań głębinowych, krótkotrwałych, będącymi niestety obecnie „oficjalnymi państwowymi tabelami” zawartymi w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 17 września 2007 r.w sprawie warunków zdrowotnych wykonywania prac podwodnych [2].

Są to tabele stosujące z helioks w strefie stosowanych głębokości plateau saturacji od 10 do 180 m. co pozwala zabezpieczyć prace podwodne nurków w strefie pomiędzy 10 a 195 m ze standardowymi wycieczkami i od 10 do 210 m z wycieczkami wyjątkowymi.

Francuskie dokumenty formalne (art. 6 dekretu z dnia 28 marca 1990 r) – nakładają normy dla mieszanin helioksowych, które powinny być stosowane: np do kompresji zalecają mieszaninę o zawartości 2% tlenu (polecana w zaleceniach DMAC). Określają szybkość sprężania; 3 m/min do głębokości plateau saturacji 100 metrów, podają dokładność określenia głębokości - +/- 0,5 metra. Pozwalają one bezzwłocznie rozpocząć nurkowanie po osiągnięciu plateau saturacji.

PROCEDURY DEKOMPRESJI

Tabele wycieczek w dół ograniczone są do głębokości 30 metrów poniżej plateau saturacji. Czas zanurzenia na głębokość roboczą "wycieczki" jest ograniczony do maksymalnie 2, 4, 6 i 8 godzin, w zależności od głębokości tej wycieczki i jest ściśle określony w dodatkowych tabelach. Ponadto dla wycieczek powinny być przygotowane mieszaniny robocze, podobnie jak w polskiej technologii. Tabele podają minimalną i maksymalną dopuszczalną zawartość procentową tlenu dla wycieczki „w dół” Skład mieszaniny powinien zapewnić pO_2 = od 500 do 800 milibarów.(0,5 do 0,8 ata). Szybkość dekompresji dzwonu z głębokości roboczej do głębokości przechowywania odbywa się z prędkością 5 metrów na minutę. Zanurzanie nurka z głębokości roboczej do dzwonu powinno być zredukowane do minimum (maksymalnie jedno lub dwa zanurzenia) i wykonywane z prędkością 5 metrów na minutę. Dla przykładu z plateau saturacji 70m głębokość dla dwóch godzin pobytu wynosi: 100m - 4 godziny, 90m - 6 godzin, 85m - 8 godzin. Dla plateau saturacji każdej głębokości jest przypisana mieszanina helioksova robocza. Dla 70m dla 2 godzin helioks o zawartości tlenu 8-12% a dla 8-miu godzin maksymalnie 11%. Tabele nie przewidują wycieczek w górę co przy tak szerokiej strefie głębokości w dół pozwala na wybór stosownego plateau saturacji.

Ustawianie mieszanin odbywa na bieżąco tylko wtedy gdy stosuje się sprzęt pracujący w obiegu zamkniętym w pętli systemu odzysku helu. W aktualnych polskich warunkach nie jest to możliwe przy sprzęcie nurkowym pracującym w obiegu otwartym. W tym przypadku przygotowuje się mieszaninę roboczą na głębokość maksymalną pracy nurka.

Po powrocie z wycieczek wymagane jest 12 godzin przerwy do rozpoczęcia dekompresji z plateau saturacji. Rozpoczyna się wynurzeniem o jeden metr w ciągu 10 minut. Po tej operacji realizowana jest dekompresja ciągła. Obowiązuje zasada: "jeśli dekompresja opóźnia się, nigdy nie należy jej przyspieszać, aby nadrobić stracony czas".

Tabele dekompresji COMEX stosują dwa rodzaje dekompresji dla różnych ciśnień parcjalnych tlenu :

- $pO_2 = 600$ hPa (nie spotykane w innych tabelach) w przypadku dekompresji z plateau saturacji nieprzekraczających głębokości 155 m. Stosuje się tylko w przypadku, gdy czas dekompresji jest krótszy niż 5 dób,
- $pO_2 = 500$ hPa w przypadku dekompresji z plateau saturacji głębszej niż 155 m. Stosuje się tylko w przypadku gdy czas dekompresji jest dłuższy niż 5 dób.

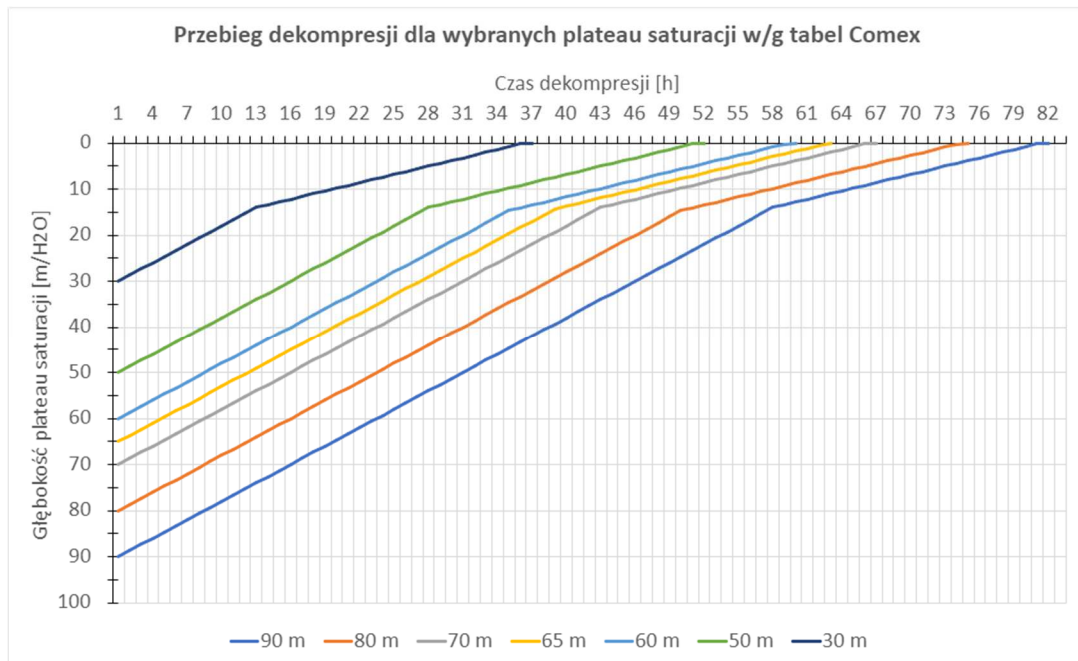
Tab. 4

Dane dekompresji firm COMEX.

Lp.	Parametr	Plateau saturacji	
		Plateau saturacji od 10 do 155m	powyżej 155m
1	Ciśnienie parcjalne tlenu	$pO_2 = 600$ hPa	$pO_2 = 500$ hPa
2	Przedział utrzymania ciśnienia parcjального tlenu	$pO_2 = 600$ hPa - 25 hPa).	$pO_2 = 500$ hPa do 525 hPa
3	Prędkości obniżania ciśnienia od plateau saturacji do 15m	45 min/m (1,33m/godz)	45 min/m (1,33m/godz)
4	Prędkości obniżania ciśnienia od 15m do 0 m	60 min/m. (1,00m/godz)	60 min/m. (1,00m/godz)
5	Zawartość tlenu w strefie głębokości 15 - 0m	21-24%	21-24%
6	Czas dekompresji	krótszy niż 5 dób	dłuższy niż 5 dób.

Tabele określają także zakaz latania samolotami przez nurków po odbyciu dekompresji na minimum 24 godz. Zalecane tabele rekompresji leczniczych w nasyceniu są dwójakiego rodzaju; helioksove i powietrzne te same jak w przypadkach nurkowań krótkotrwałych powietrznych i helioksowych.

Skład mieszanin stosowanych różni się od podejścia systemu US Navy. Na głębokości większej niż 18 metrów tlen nie może być używany ze względu na jego toksyczność. Na głębokościach wyższych stosuje się mieszaniny, których szereg zaczyna się od 50/50% tlenu/helu, a następnie 35/65% tlenu/helu. Stosuje się także mieszaniny helioksove mające zastosowanie operacyjne, np. mieszaniny które stosuje się do nurkowań głębinowych w strefie polskiego szelfu czyli 20/80% tlenu/helu i 15/85% tlenu/helu. Jest to seria gazów, które zabezpieczają ciśnienie parcjalne tlenu od 0,5 do 2,5 bar na założonych głębokościach. Zaleca się by helioks leczniczy podawany był w cyklach od 20 do 30 minut. Po uzyskaniu pełnej ulgi leczenie można kontynuować przez 1 do 3 cykli. Następnie często stosuje się przerwy przed ponownym rozpoczęciem dekompresji.



Rys. 5. Przebieg dekompresji dla wybranych plateau saturacji według tabel COMEX dla prac podwodnych proponowany do zastosowania w Polskiej strefie ekonomicznej na Morzu Bałtyckim.

TABELE NURKOWAŃ SATUROWANYCH WIELKIEJ BRYTANII

TABELA RN (TABELE ZE STOPNIOWYM OBNIŻANIEM CIŚNIENIA (SYSTEM CIRIA – 1978). CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMACION ASSOCIATION

Opisujemy te tabele z historycznego względu, jako jedną z dróg rozwiązań tabel dekompresji saturoanych. W systemie tym podczas pobytu na plateau oraz podczas dekompresji stosuje się mieszaninę helioksowa o śladowej zawartości azotu na poziomie oznaczalności poniżej ciśnienia parcjalnego w powietrzu na poziomie morza). Z tych względów system CIRIA jako nieekonomiczny i z nieuzasadnioną fizjologicznie narażającą dekompresją (stacje co 5 metrów) pozostaje dla rozpatrywanego celu poza zainteresowaniem. [4]

Tabela przewiduje stopniowe obniżanie ciśnienia w krokach co 5 metrów lub 3 metry, a pO₂ jest utrzymywany między 0,49 a 0,51 podczas całej dekompresji.

Tab. 5

Tabela skokowych zmian ciśnień podczas dekompresji systemu CIRIA.

Zakres głębokości plateau	Skokowy spadek zmiany ciśnienia	Czas postoju na danym przeskoku ciśnienia
305 - 180 msw	co 5 msw	3 godziny
180 - 33 msw	co 3 msw	3 godziny
30 - 18 msw	co 3 msw	4 godziny
15 - 3 msw	co 3 msw	5 godzin

TABELA NURKOWAŃ SATUROWANYCH STOSOWANYCH PRZEZ FIRMĘ BRYTYJSKĄ ŚWIADCZĄCĄ USŁUGI NA MORZU PÓŁNOCNYM [18,11

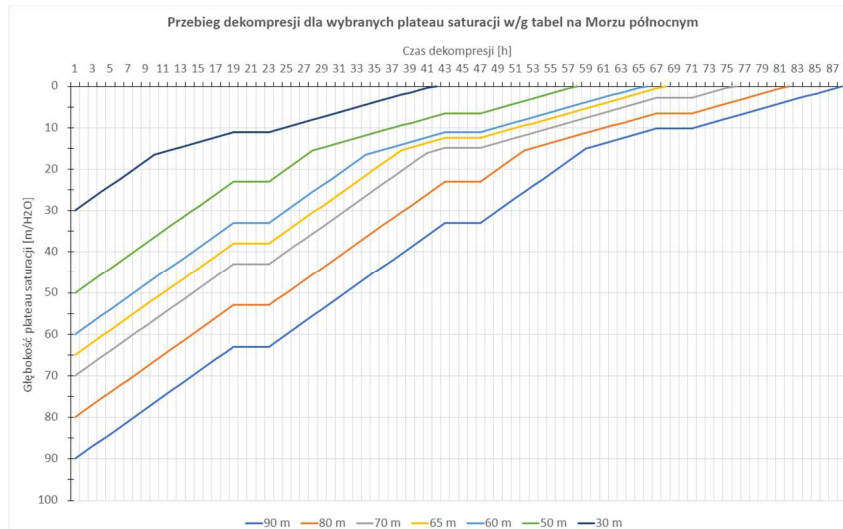
]

W Wielkiej Brytanii do badań HSE wybrano procedury firm, w których stosowano najniższe dopuszczalne poziomy tlenu na głębokości plateau saturacji i podczas dekompresji. Różnice między procedurami stosowanymi przez różne firmy są nieznaczne pod względem ryzyka incydentu dekompresyjnego. Połączenie najszybszej dekompresji i najniższego poziomu tlenu oznaczało, że symulowano najgorszy przypadek. Dane obniżania ciśnienia podano w tabeli 6.

System ten stosuje ciągły profil dekompresyjny oparty, podobnie jak francuski jest o dwie prędkości, 1,5m/godz. a następnie 0,6 m/godz z 4-godzinną przerwą w każdych 24 godzinach. Na plateau utrzymuje się pO₂ 0,35 ata i podczas dekompresji 0,5 ata z odpowiednim dopasowaniem w strefie 15 - 0 m dotyczącym zawartości tlenu w zakresie 21- 23%.

Tabela dekompresji nurkowania saturowanego firmy na Morzu Północnym.

Zakres stref głębokości zmian podczas dekompresji	Szybkość zmian ciśnienia
350 do 20 m	1.5 m/ godz.
20 m do 0 m	0.5 m / 50 minu (0,6m/godz)



Rys. 6 Przebieg dekompresji dla wybranych plateau saturacji według tabel Morza Północnego dla prac podwodnych, proponowany do zastosowania w Polskiej strefie ekonomicznej na Morzu Bałtyckim.

DEKOMPRESJA NURKOWANIA SATUROWANEGO US NAVY STANDARD

Dekompresja może być stosowana jako dekompresja ciągła lub dekompresja skokowa. Start dekompresji może być rozpoczęty od wycieczki w górę, jeśli przepisy na to pozwalają. Niezależnie od powyższego ogólnie uważa się, że dobrą praktyką jest zezwolenie na 4-godzinny okres wstrzymania po zakończeniu ostatniego zanurzenia dzwonu i przed startem końcowej dekompresji. Dekompresję przeprowadza się bez przerw, 24 godziny na dobę, bez ograniczeń snu i aktywności nurka. Tabele te pozwalają na wykonanie dekompresji z plateau saturacji w sposób ciągły liniowy lub skokowy ze skokami 1,2m/godz., 0,76m/godz i 0,60m/godz. [19]

Tab. 7

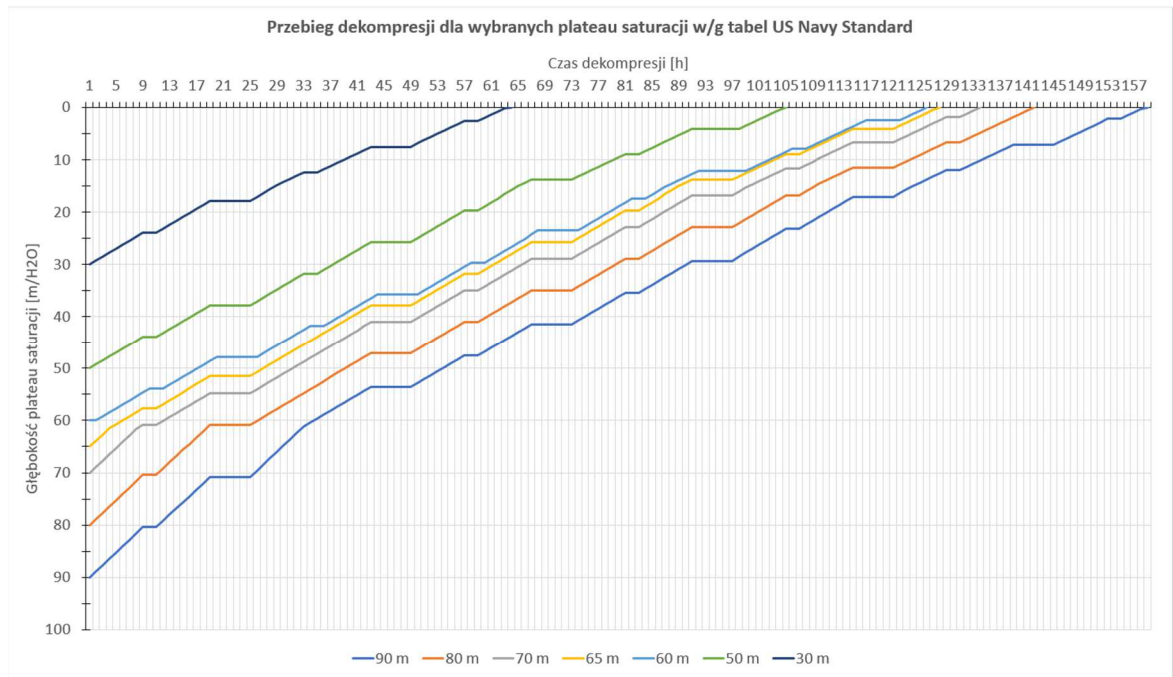
Tabela obniżania ciśnienia podczas dekompresji nurkowania saturowanego na Morzu Północnym (z trzema prędkościami obniżania ciśnienia).

Zakres stref głębokości zmian podczas dekompresji	Szybkość zmian ciśnienia
1000 - 200 fsw (305 - 61m)	4 fsw/godz (1,2m/godz.)
200 - 50 fsw (61 - 15,25)	2.5 fsw/godz (0,76m/godz)
50 fsw - 0 (15,25 - 0)	2 fsw/godz.(0,61m/godz.)

Tabele nie przewidywały przerw (odpoczynku nurków), ale od kilkudziesięciu lat większość firm wykonuje przerwy między północą 00.00 a 06.00 i 14.00 a 16.00, tj. 8 godzin w ciągu doby dekompresji.

Na plateau saturacji pO₂ jest utrzymywane na poziomie 0,48 bara - 0,49 bara, a po osiągnięciu 23% atmosfera komory jest stabilizowana bez dalszego wzrostu pO₂ do powierzchni. W razie konieczności dekompresję można przeprowadzić z mniejszą szybkością 1 fsw/godz. (0,61m/godz.). Konieczność była sprecyzowana, przypuszczamy, że chodziło o dekompresję awaryjną podczas incydentu dekompresyjnego. Ciekawostką jest to, że dopuszczono zawartości tlenu 30%. 30% jest uważany za maksymalny z punktu widzenia ochrony przeciwpożarowej. W związku z tym dla końcowej części dekompresji saturacyjnej wybierano oczywiście maksymalny dopuszczalny procent tlenu. Ta maksymalna wartość procentowa była obniżana do od 19% do 23%.

Takie elementy jak wycieczki, tabele przerwania i awaryjne, oparte są o tabele US Navy z 1992 roku [9].



Rys. 7. Przebieg dekompresji dla wybranych plateau saturacji według tabel US Navy Standard dla prac podwodnych proponowany do zastosowania w Polskiej strefie ekonomicznej na Morzu Bałtyckim.

NORWESKA TABELA - NORSOK STANDARD U-100

Realizacja dekompresji posiada tu cztery prędkości obniżania ciśnienia. Podczas dekompresji z plateau saturacji pO₂ utrzymuje się w zakresie 40 - 50 kPa (400 - 500 mbar). Podczas dekompresji co 24 godziny odbywa się 6-godzinna przerwa. W końcowej fazie dekompresji ten postój powinien znajdować się między godziną 24:00 a 06:00 a ostatni przystanek winien zakończyć się na głębokości większej niż 3 m. [7]

Minimalna głębokość plateau saturacji wynosi 14 msw. Technologia nie wskazuje czy jest to z użyciem powietrza czy nitroksu. Helioks z zasady stosuje się od głębokości 30m.

Tab. 8

Dekompresja saturacji według NORSOK 101 [7].

Depth msw	Minut/msw	msw/godz	msw/dzień
180 - 60	40	1,5	27
60 - 30	50	1,2	21,6
30 - 15	60	1	18
15 - 0	80	0,75	13,5

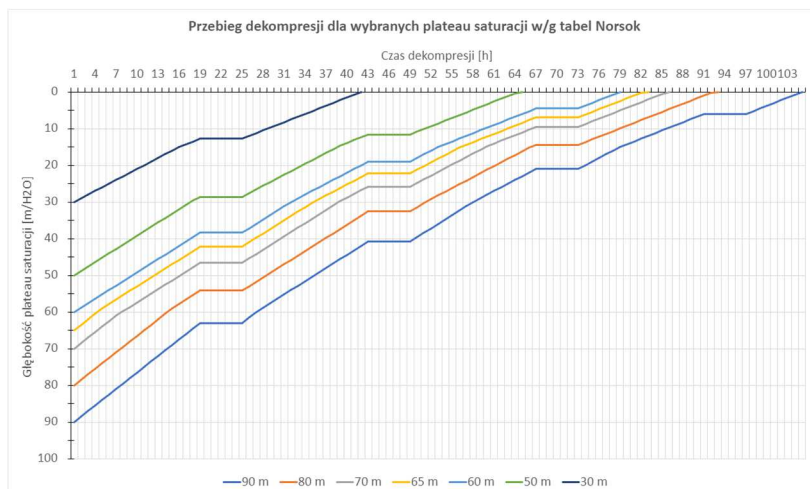
Rewolucja w tych tabelach w porównaniu z innymi jest tabela wycieczek, która została ściśle ograniczona, a opis tabel nie wskazuje na możliwość stosowania wycieczek z dekompresją. Jeśli są one dłuższe, przewiduje się specjalne procedury dłuższego pobytu na głębokości plateau przed rozpoczęciem właściwej dekompresji. Rozpoczęcie dekompresji możliwe jest po minimum 8 godzinach postoju na plateau po wycieczce.

Tab. 9

Tabela wycieczek z dekompresją zerową (bezdekompresyjnie) [7].

Głębokość saturacji [msw]	plateau	Wycieczka [m]	
		w górę	downward
14		0	14
15		1	15
16		2	16
17		3	17

18 do 22	4	18 do 22
od 23 do 29	5	od 23 do 29
30	6	30
31 do 39	7	31 do 39
40 do 59	8	40 do 59
60 do 79	9	60 do 79
80 do 99	10	80 do 99
100 do 119	11	100 do 119
120 do 139	12	120 do 139
140 do 180	13	140 do 180



Rys. 8 Przebieg dekompresji dla wybranych plateau saturacji według tabel NORSOK dla prac podwodnych, proponowany do zastosowania w Polskiej strefie ekonomicznej na Morzu Bałtyckim.

TABELE DEKOMPRESJI NURKOWAŃ SATUROWANYCH NORMAM-15/DPC

System nurkowania saturowanego NORMAM-15/DPC jest wynikiem badań i doświadczenia specjalistów firmy COMEX. System i procedury opracowano dla brazylijskiego przemysłu offshore i można je uznać za ulepszenie tabeli Comex MT 92, które są nadal promowane przez francuskie Ministerstwo Pracy, oraz tych stosowanych na początku wieku przez Stolt Offshore. Procedury NORMAM-15/DPC pozwalają na bezpieczne ekspozycje hiperbaryczne do 350 m i zostały przyjęte przez Dyрекcję Portów i Wybrzeży Marynarki Wojennej Brazylii. Są wydane jako oficjalny dokument „Normy działalności podwodnej” w 2011 roku. Autor tego opracowania i współpracujący z nim byli specjaliści firmy Comex uważają, że nurkowania saturowane z powodzeniem wykonywane w Brazylii i innych krajach przy użyciu tych procedur, są znacznie bezpieczniejsze niż procedury US Navy [3,12].

Ciśnienie parcjalne tlenu na plateau saturacji w/w nurkowania saturowanego utrzymywane jest w przedziale 0,38 - 0,45 bar (380 - 450 mb). Pozostałe parametry składu atmosfery jak w innych systemach nurkowań saturowanych.

Przyjmuje się, że wartość końcowa pO₂ może przekraczać 0,450 bara i osiągać do 0,570 pod koniec wstępnego zwiększania ciśnienia. Nie są wymagane żadne działania naprawcze, ponieważ nadmiar tlenu w komorze zostanie wyczerpany fizjologicznie przez nurka.

System ten posiada dwie tabele wycieczek w górę i w dół: standardowe i wyjątkowe. Prędkość zanurzenia i wynurzenia podczas wycieczek nie powinna przekraczać 10m/min. Wspomnieć, że inne systemy nurkowań używają tych samych lub zbliżonych prędkości. (francuski dekret z 15 maja 1992 r.) Wycieczki wyjątkowe pozwalają na większe głębokości pracy nurka niż standardowe i są ograniczone czasem pobytu. Powinny być stosowane tylko w sytuacjach nadzwyczajnych konieczności lub awaryjnych.

W nurkowaniach saturowanych obowiązują także „zasady dobrego nurkowania” dotyczące wycieczek co podkreśla się w opracowaniach [1,3,12]:

- Planować wycieczki w dół, a nie w górę. Zaleca się, by dzwon nurkowy znajdował się na poziomie plateau saturacji, nad pracującym nurkiem.
- Planować wycieczki nurków z tabel standardowych, a nie wyjątkowe.
- Planowanie pracy należy zaplanować tak, aby uniknąć wielokrotnego wynurzenia i zanurzenia typu „jojo”, tj. ograniczyć amplitudy zmian głębokości nurka podczas pracy, szczególnie zanurzenie w dół i górę przekraczające głębokości plateau saturacji.
- Planować by plateau saturacji było się jak najbliższej głębokości roboczej.
- Operować głębokością dzwonu, jeśli to jest konieczne, w granicach wycieczek standardowych.

Głębokości wycieczek standardowych i wyjątkowych NORMAM-15/DPC [12].

Plateau saturacji [m]	Standardowa wycieczka w dół [m]	Standardowa wycieczka w górę [m]	Wyjątkowa wycieczka w dół [m]	Wyjątkowa wycieczka w górę [m]
Do 10	Nie stosuje się	Nie stosuje się	Nie stosuje się	Nie stosuje się
10 do 17	3	2	Nie stosuje się	Nie stosuje się
18 do 22	4	4	Nie stosuje się	Nie stosuje się
23 do 29	5	5	10	Nie stosuje się
30	6	6	12	Nie stosuje się
31 do 39	7	7	14	14
40 do 59	8	8	16	16
60 do 79	9	9	18	18
80 do 99	10	10	20	20
100 do 119	11	11	22	22
120 do 139	12	12	24	24
140 do 179	13	13	26	26
180 do 270	15	15	30	30
270 do 285	15	15	30*	30*

Od 270 m głębokość wycieczek należy zmniejszać tak, by nie przekroczyć głębokości 300 m

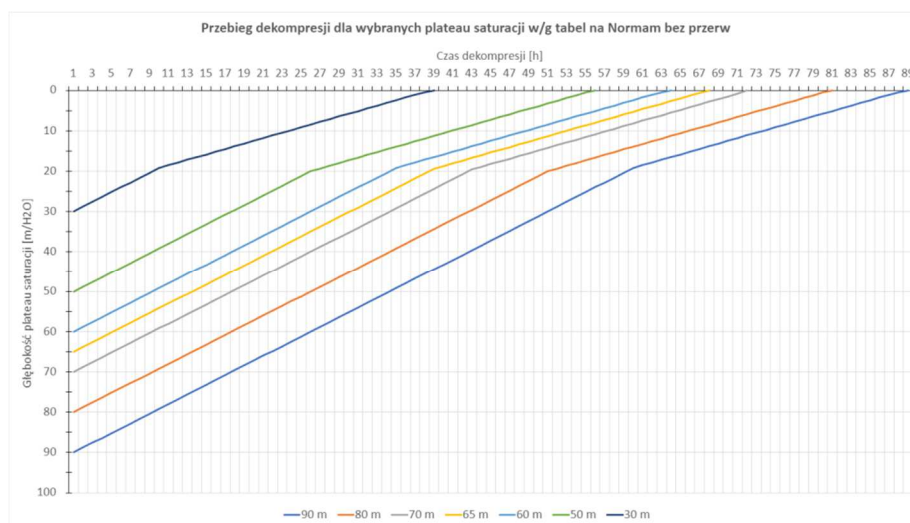
Prędkości obniżania ciśnienia podane są podane w tabeli 11.

Procedura dekompresji z plateau saturacji jest taka sama po wycieczkach standardowych i wyjątkowych, rozpoczyna się po czasie 12 godz. od zakończenia wycieczki. Od początku dekompresji do głębokości, na której % zawartości tlenu w komorze osiąga 25%, należy utrzymywać ciśnienie parcjalne tlenu 0,48 - 0,5 bara. Od tej głębokości, procent tlenu w atmosferze komory utrzymuje się między 21 a 25% ze względu na ryzyko pożaru.

Start dekompresji z plateau saturacji skokowej wykonuje się z przestrzeganiem okresów stabilizacji zadanego składu atmosfery, natomiast dekompresje ciągłą rozpoczynamy płynnie z prędkościami podanymi w tabeli.

Parametry zamian ciśnienia podczas dekompresji zawartej w NORMAM-15/DPC.

Zakres głębokości	Dekompresja ciągła	Dekompresja skokowa
350 do 20 m	50 minut/ 1m (1,2 msw/godz.)	Obniżanie ciśnienia o 1 m co 50 minut
20 m do powierzchni	90 minut/1m (0,67 msw/godz.)	Obniżanie ciśnienia o 1 m co 90 minut



Rys. 9. Przebieg dekompresji dla wybranych plateau saturacji według tabel NORMAM 15/DPC, proponowany do zastosowania w Polskiej strefie ekonomicznej na Morzu Bałtyckim.



Przebieg dekompresji modyfikowano poprzez wprowadzenie przerw 8 godzinnych w przedziale 24 godzinnym tabel NORMAM, które pierwotnie nie stosują przerw w dekompresji. Porównując przebiegi saturacji z wykorzystaniem tabel NORMAM dla dekompresji stosującej przerwę i bez przerw widzimy, że dekompresja wydłuża się praktycznie o dobę przy każdym zwiększeniu głębokości plateau saturacji o 20 m.

TABELE ROSYJSKIE MARYNARKI WOJENNEJ ROSJI (A TAK NAPRAWDĘ ZWIĄZKU SOWIECKIEGO)

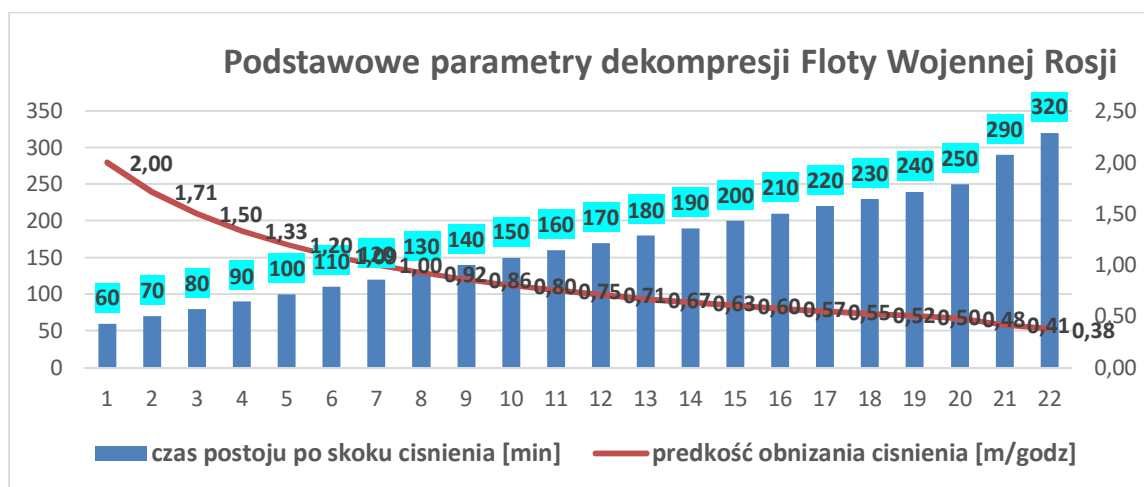
Z historycznego obowiązku podajemy krótką charakterystykę tych tabel, tym bardziej że w ubiegłym 50-leciu uwzględniano je w planowaniu wdrożenia nurkowań saturowanych także w Polsce. Są to tabele oryginalne ze względu na zastosowanie mieszaniny trimiksowej z dekompresją skokową o stałym skoku obniżania ciśnienia 2 m od plateau saturacji do powierzchni i z wzrastającym czasem przetrzymywania na głębokości przedstawionym na rys. 10. Z dokonanej przez specjalistów medycyny podwodnej oceny wynika, że również ten sposób przeprowadzania dekompresji jest bezpieczniejszy od systemu "Rana", aczkolwiek duża początkowa szybkość dekompresji oraz stosowanie stopniowanego obniżania ciśnienia (stacje) budzą uzasadnione wątpliwości [4]. Te szybkie skoki występują tylko na większych głębokościach dla plateau w przedziale 150 - 300m. Prędkości obniżania ciśnienia zmniejszają się wraz z głębokościami i są mniejsze niż prędkości dla tabel awaryjnych w przypadku mieszanin helioksydowych. Powoduje to wydłużenie dekompresji, mimo że nie przewiduje ona przerw. Jednak czasy postojów od 60 do 320 minut można traktować jak ciąg przerw ze skokami 2m.

TABELE ROSYJSKIE MARYNARKI WOJENNEJ ROSJI (A TA NAPRAWDĘ ZWIĄZKU SOWIECKIEGO)

Procedury uwzględniają plateau saturacji od głębokości 10 - 300 m w warunkach morskich dla mieszanin trimiksowych i 6 - 40 m dla mieszanin nitroksowych. Podczas pobytu na plateau i dekompresji ciśnienie parcjale tlenu dla stosowanych przedziałów głębokości to 0,35, 0,40 i 0,50 ata.

Czas przejścia z jednego przystanku na drugi wynosi co najmniej 20 minut i jest wliczony jako czas spędzony na następnym przystanku. Tabele nie posiadają tabeli wycieczek.

Stosowane są mieszaniny trimiksowych których wytworzenie oparte jest o zmieszanie 1 objętości powietrza i jednej objętości helu dla nurkowań w zakresie 40 - 100m, jednej objętości powietrza i dwóch objętości helu dla głębokości 100 - 160m i 1objętości powietrza a 3 objętościami helu, czego wynikiem są trimiksy 10%O₂, 40%N₂ 50%He, 7%O₂, 26%N₂ 67%He, oraz 5%O₂, 20%N₂ 75%He.



Rys. 10. Czasy postoju po 2m skoku ciśnienia i prędkości zmian ciśnienia pomiędzy przerwami.

Tab. 11

Parametry atmosfery na plateau saturacji.

Ciśnienia parcjale	Głębokości plateau saturacji	
	[ata]	[m]
Tlen pO ₂	0,35	300-250m
Tlen pO ₂	0,40	250-150m
Tlen pO ₂	0,50	150-0m
Dwutlenek węgla pCO ₂	0,0025	W całym zakresie
Azot pN ₂	1,60	W całym zakresie

Skład procentowy atmosfery komory na plateau saturacji dla głębokości polskiego szelfu.

Plateau saturacji	% O ₂	% N ₂	%He	Ilości typowych czasów postoju	Całkowity czas dekompresji [godz. :min]
60m	7,1	23	69,90	11	54:30
70m	6,3	20	74,75	8	66:36
80m	5,6	18	76,40	7	77:32

ZAWARTOŚCI DOMIESZEK SZKODLIWYCH

Niezależnie od ciśnienia zawartość tlenu węgla w komorze nie powinna przekraczać 5 mg/m³, a całkowita zawartość węglowodorów w przeliczeniu na węgiel nie powinna przekraczać 50 mg/m³, wilgotność względna powinna wynosić 40-60% podobnie jak we wszystkich innych tabelach.

POLSKI SYSTEM NURKOWAŃ SATUROWANYCH

Polski system nurkowań saturowanych jest wynikiem badań i wdrożenia prób zdawczych kompleksów nurkowych GWK -200 w latach 1986 - 1991 a następnie w 1995 przygotowano modernizację tabel dla potrzeb Marynarki Wojennej realizującej nurkowania przedsiębiorstwa Petrobaltic [7,10,16,20].

Polski system przeznaczony dla plateau saturacji od 30 do 100m przewidywał na plateau utrzymywanie atmosfery trimiksowej o poniższych parametrach:

Ciśnienie parcjale tlenu pO₂ = 40 kPa ± 2;

Ciśnienie parcjale azotu pN₂ ≤ 80 kPa ± 4;

Ciśnienie parcjale helu pHe ≈ wartość dopełniająca do ciśnienia panującego na plateau saturacji

Ciśnienie parcjale dwutlenku węgla pCO₂ ≤ 0.3 % równoważnego;

Temperatura 28-30°C ± 1 ;zależna od ciśnienia plateau saturacji;

Wilgotność względna 40-60%, ruch mieszaniny ≤ 15 cm/sek;

hałas ≤ 70 dB/A/, krótkotrwałe 100 dB/A/;

drobnoustroje xx/ do 350 kol/m³ przy braku flory patogennej.

Lotne związki chemiczne poniżej DNS (wartości dopuszczalnych czynników szkodliwych).

Te dane wskazują, że warunki we wszystkich rozpatrywanych systemach nurkowań były bardzo zbliżone lub identyczne. Ponadto definiując tabele jako trimiksowe w którym pN₂ ≤ 80 kPa ± 4 jest takie jakie w powietrzu atmosferycznym, to jest kwestia semantyki Praktycznie wszystkie kompresje w nurkowaniach saturowanych rozpoczynają się od komory i dzwonu wypełnionej powietrzem, a w późniejszych operacjach utrzymania ciśnienia i składu atmosfery i dzwonu przy stosowaniu mieszanin helioksoowych zawartość azotu spada, mimo że przy ślizowaniu śluza również jest wypełniona powietrzem.

Realizacja dekompresji odbywa się metodą ciągłą ze zmiennymi prędkościami obniżania ciśnienia. Trzy godziny przed jej rozpoczęciem, ciśnienie parcjale tlenu w mieszaninie oddechowej podwyższa się z 40 kPa do 50 kPa. Jest to start obniżania ciśnienia z dużymi prędkościami; wytworzeniem gradientu "impulsem ssania". Pierwsze 5m odbywa się z prędkościami od 12, 10, 6,7 i 5 m/godz z czasie 50-60 min.

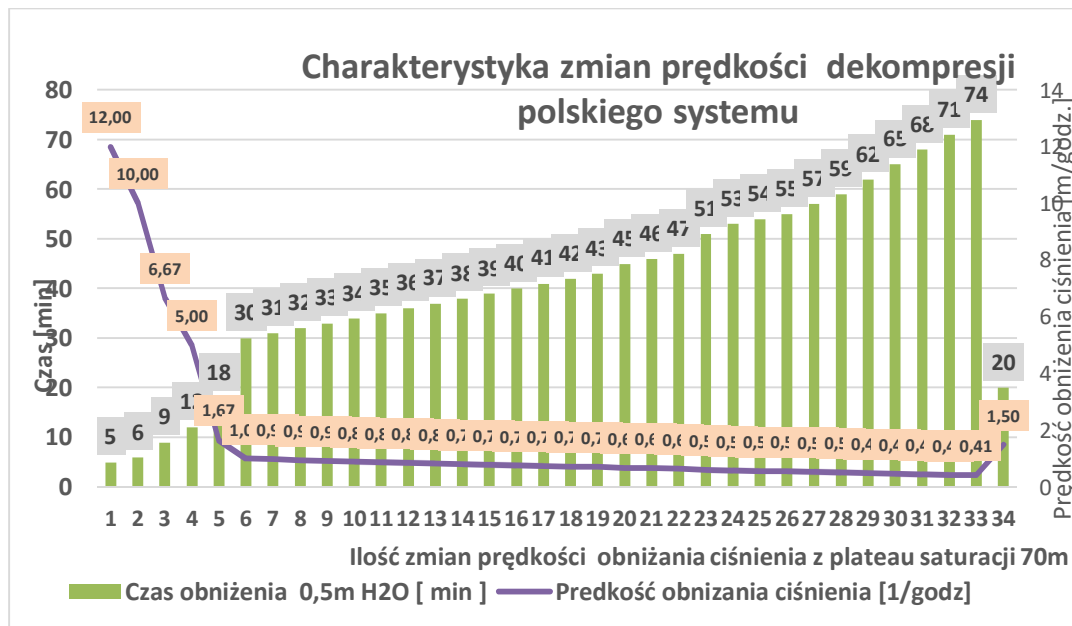
Wybrane parametry dekompresji polskiego systemu nurkowań saturowanych.

Strefa głębokości	Tlen	Dwutlenek węgla	Azot
Plateau saturacji 3 godz	40 kPa do 50 kPa	≤ 0,3 kPa	≤ 80 kPa
Dekompresja 100 - 14 m	50kPa	≤ 0,3 kPa	≤ 80 kPa
Dekompresja 14 - 0mm	22 % ± 0.8	≤ 0,3 kPa	≤ 80 kPa

Skład procentowy atmosfery komory utrzymywanej na plateau saturacji dla głębokości polskiego szelfu.

Plateau saturacji	% O ₂	% N ₂	%He	Ilości typowych czasów postoju	Całkowity czas dekompresji [godz. :min]
60m	7,1	11,5	81,6	34	68:41
70m	6,3	10,1	83,6	34	78:13
80m	5,6	8,8	85,6	36	86:27

Jako mieszaniny awaryjne do rekompresji leczniczej przyjęto od głębokości 100 m do głębokości 50 m mieszaninę helioksovą o zawartości 6% O₂ od 50 m do powierzchni mieszaninę helioksovą o zawartości 20% O₂. Od 18 m do powierzchni powinna być również możliwość oddychania czystym tlenem.



Rys. 11 Czasy ciągłych obniżenia ciśnienia w w skokach 0,5m polskiego systemu tabel dekompresyjnych.

W 1995 system trimiksowej dekompresji saturowanej DSK 95 do systemu zabezpieczenia medycznego nurkowania z platformy wiertniczej Petrobaltic został zmodyfikowany w zakresie składu mieszaniny oddechowej:

- dla plateau saturacji 70m: O₂ - 5% - N₂ 41% - He 54,0%,
- dla plateau saturacji 80m O₂ - 4.4%, N₂ - 40.6%, He - 55.0%.

Powyższe parametry wskazują, że tabele dotyczą nurkowań z użyciem trimiksu a ciśnienie parcjale azotu podczas nurkowania wynosi 3,6 ata co jest rozwiązaniem oryginalnym. W tabelach zastosowano jedną prędkość obniżania ciśnienia; od głębokości plateau do 9m prędkość wynosi 0,72 m/godz. Niestety tabele te nie zostały zwalidowane, przede wszystkim ze względów finansowych, ale także operacyjnych i formalnych.

Tab. 16

Prędkości obniżania ciśnienia dekompresji w jej początkowej i końcowej fazie.

GŁĘBOKOŚĆ [m]	CZAS min	ŁĄCZNY CZAS		
70		0 min	=	0 h 0 min
69.5	2	2 min	=	0 h 2 min
69	3	5 min	=	0 h 5 min
68.5	3	8 min	=	0 h 8 min
68	4	12 min	=	0 h 12 min
67.5	4	16 min	=	0 h 16 min
67	4	20 min	=	0 h 20 min
66.5	10	30 min	=	0 h 30 min
66	15	45 min	=	0 h 45 min
65.5	25	70 min	=	1 h 10 min
65	42	112 min	=	1 h 52 min
64.5	42	154 min	=	2 h 34 min
64	42	196 min	=	3 h 16 min
63.5	42	238 min	=	3 h 58 min
63	42	280 min	=	4 h 40 min
62.5	42	322 min	=	5 h 22 min
62	42	364 min	=	6 h 4 min
61.5	42	406 min	=	6 h 46 min
61	42	448 min	=	7 h 28 min
60.5	42	490 min	=	8 h 10 min
60	42	532 min	=	8 h 52 min
9.5	42	4774 min	=	79 h 34 min
9	43	4817 min	=	80 h 17 min

8.5	44	4861 min	=	81 h	1 min
8	45	4906 min	=	81 h	46 min
7.5	47	4953 min	=	82 h	33 min
7	48	5001 min	=	83 h	21 min
6.5	50	5051 min	=	84 h	11 min
6	51	5102 min	=	85 h	2 min
5.5	53	5155 min	=	85 h	55 min
5	54	5209 min	=	86 h	49 min
4.5	56	5265 min	=	87 h	45 min
4	58	5323 min	=	88 h	43 min
3.5	60	5383 min	=	89 h	43 min
3	63	5446 min	=	90 h	46 min
2.5	65	5511 min	=	91 h	51 min
2	68	5579 min	=	92 h	59 min
1.5	71	5650 min	=	94 h	10 min
1	74	5724 min	=	95 h	24 min
0.5	20	5744 min	=	95 h	44 min
0		5744 min	=	95 h	44 min

Według DSK 95 do prac nurkowych z platformy na głębokości 80 metrów przy zastosowaniu dzwonu nurkowego i komory hiperbarycznej (wg US Navy DDC-PTC) niezbędne są następujące mieszaniny oddechowe:

1. w komorze: mieszaniny trimiksowe, tlen,
2. dzwonowa: trimiks (do zasilania aparatów nurkowych),
3. do indywidualnych układów oddychania dzwonowa z 25% O₂, dzwonowa, tlen.

Tab. 17

Dane mieszanin komory hiperbarycznej.

Plateau saturacji	pO ₂	%O ₂	pN ₂	%N ₂	pHe	%He
70 m (8 ata)	0.46	5.75	3.26	40.75	4.27	53.40
80 m (9 ata)	0.5	5.55	3.61	40.11	4.88	54.22
70 m (8 ata)	0.4	5.0	3.29	41.1	4.3	53.8
80 m (9 ata)	0.4	4.5	3.65	40.5	4.94	54.9

Tab. 18

Dane mieszanin dzwonowych i mieszaniny roboczej nurka.

Głębokość dzwonu	robocza	pO ₂	%O ₂	pN ₂	%N ₂	pHe	%He
70 m (8 ata)		0.8	10.0	3.2	40.0	4.0	50.0
80 m (9 ata)		0.9	10.0	3.2	40.0	4.5	50.0

W drugiej części artykułu przedstawimy kryteria wyboru table dla operacyjnych nurków saturowanych dostosowane do współczesnego poziomu wiedzy technicznej i medycznej.

BIBLIOGRAFIA

1. Skrzyński S., Pawlak J., Wiśniewski S. "Technologia Nurkowania Saturowanego w Kompleksie Nurkowym Af-2 Część II Realizacja Nurkowania Saturowanego "AMW 2011;
2. Rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 17 września 2007 r. w sprawie warunków zdrowotnych wykonywania prac podwodnych;
3. Ch. Cadieux - "Implement NORMAM-15/DMC saturation diving procedures CCO Ltd" 25 December 2022 <https://www.diving-rov-specialists.com/index.htm>;
4. Doboszyński T., Sićko Z. Kot J.: System Nurków Saturowanych z użyciem Trimiksu w Strefie Głębokości 80 metrów dla Platformy Wiertniczej Petrobaltic DSK 95 Akademia Marynarki Wojennej Gdynia 1995;
5. Doboszyński T., Łokucijewski B., Wybór optymalnego w warunkach krajowych systemu nurkowania saturowanego do głębokości 120m`` Zakład Medycyny Podwodnej Katedry Medycyny Morskiej WAM Gdynia 1986;
6. Dokumentacja i wyniki pracy NURSAT "Wdrożenie nurków saturowanych" Akademia Marynarki Wojennej z lat 2000- 2020;
7. Norsok Standard U-100.Manned Underwater Operations Edition 2, July 2008;
8. Technologia Nurkowania Saturowanego Vol.II Rana Diving & Marine Contractor sri, Saturation Diving DOM-02 Rev 04 Grudzień 2007,
9. U.S. Navy Diving Manual revision 1 July 1981, revision 4, 20 January 1999., revision 5, 15;
10. Doboszyński T., Łokucijewski B., Wybór optymalnego w warunkach krajowych systemu nurkowania saturowanego do głębokości 120m`` Zakład Medycyny Podwodnej Katedry Medycyny Morskiej WAM Gdynia 1986;
11. Flook V. Sprawozdanie z Badań 244 "Tabele wycieczkowe w nurkowaniu nasycenia – skutki dekompresji obecna praktyka w Wielkiej Brytanii UNIMED SCIENTIFIC LIMITED 123 Ashgrove Road West Aberdeen AB16 5FA Wielka Brytania 2004;
12. Brazilian Navy Directorate of Ports And Coasts Maritime Authority Norms for Subaquatic Activities NORMAM-15/DP NORMAM-15/DPC 1 st Review 2011;
13. Imbert J. P., Balestra C., Fatima Zohra Kiboub F.,Z.: Commercial Divers' Subjective Evaluation of Saturation <https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2018.02774>;
14. Skrzyński S. "Techniczne Zabezpieczenie Dekompresji Nurków" rozprawa doktorska Akademia Marynarki Wojennej 2003;



15. Bevan J. The professional Diver's Handbook". Sumbex Limited. London 2005 ISBN0950824232;
16. Doboszyński T., Łokuciejewski B: "Tabele dekompresyjne dla trimiksowych nurkowań saturovaniych do 120 m. wraz z zasadami rekompresji leczniczej", CPBR-9.5. "Techniczne, medyczne i prawne problemy długotrwałego przebywania człowieka pod wodą", Katedra Medycyny Morskiej WAM, Gdynia 1990;
17. Załącznik 6. Wyciąg z rozporządzenia UNI 11366 "Bezpieczeństwo i zdrowie w nurkowaniu hiperbarycznym i komercyjnym" "7.3.12 Decompressione di emergenza";
18. Cadieux Ch. "Reinforce US Navy saturation procedures" - CCO Ltd 10 Jan 2019 ://www.diving-rov-specialists.com/index.htm;
19. Procedura nurkowania saturowanego [ang.] Mc Dermont Wielka Brytania Aberdeen 1993;
20. Skrzyński S., Grzeczka G.: Polskie badania nurkowań saturovaniych i ich wdrożenie Cz. II PHR 2022; 2[79]: 27-44, 3[80]: 7-22, 4[81]: 69-92 Studies on Saturation Diving in Poland and Practical Application of Their Findings. Developing a Polish System of Saturation Diving in the 1980s and 1990s DOI: 10.2478/phr-2022-0020;
21. <https://www.cmkp.edu.pl/wp-content/uploads/2023/03/0701-program-1-.pdf>;
22. <https://www.cmkp.edu.pl/wp-content/uploads/2023/03/0794-program-1-.pdf>;
23. (<https://www.ptil.no/en/technical-competence/ explore-technical-subjects>).

dr inż. Stanisław Skrzyński

Katedra Technologii Prac Podwodnych
Akademii Marynarki Wojennej
s.skrzynski@amw.gdynia.pl