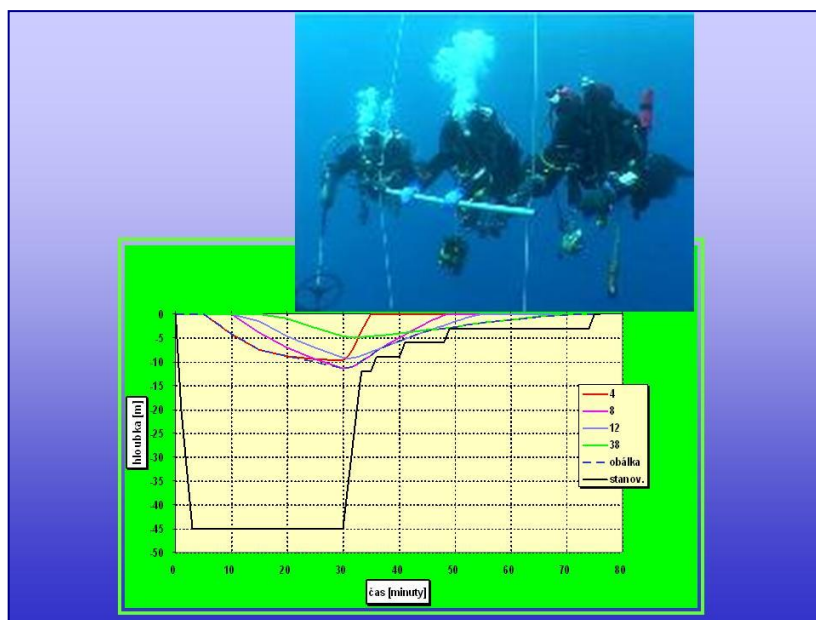


Podklady k výpočtům dekompresních tabulek Bühlmann/SUSV 1986

Jan Jahns



Hlučín, 2008, 2. vydání

Obsah

| | |
|--|----|
| I. Úvod..... | 1 |
| II. Saturace..... | 3 |
| III. Desaturace..... | 8 |
| III.1. <u>Téměř rovnovážná desaturace</u> | 8 |
| III.2. <u>Nerovnovážná desaturace</u> | 9 |
| III.3. <u>Přípustné přesycení</u> | 10 |
| III.4. <u>Dekompresní zastávky a řídicí tkáň</u> | 12 |
| III.5. <u>Stanovení doby zdržení na zastávkách</u> | 14 |
| III.6. <u>Modifikace výpočtu</u> | 16 |
| III.7. <u>Opakovací skupiny</u> | 19 |
| III.8. <u>Snižování tlaku po ponoru</u> | 22 |
| IV. Závěr..... | 23 |
| Doplnění: poznámky k tabulkám Bühlmann, model ZHL16B. | |
| D.1.Úvod..... | 26 |
| D.2. Rozšíření Bühlmannova modelu na směsi plynů..... | 27 |
| D.3. Další rozšíření modelu - hloubkové zastávky a gradientní faktory..... | 28 |

Podklady k výpočtům dekompresních tabulek Bühlmann / SUSV 1986.

I. Úvod.

Nejprve krátké upozornění: v původní práci profesora Bühlmanna i v materiálech švýcarského potápěčského svazu jsou veškeré údaje o tlacích uváděny v barech. Ty byly převedeny na kilopascal, přičemž byl převzat i číselný údaj pro normální atmosférický tlak u hladiny moře $p_{atm0} = 101,3 \text{ kPa}$ (1,013 baru).

V příslušném oddíle potápěčské fyziky je popsán proces rozpouštění plynů v kapalinách (saturace kapaliny plynem) a jejich vylučování (desaturace kapalin). Rovněž jsou zde vysvětleny základní pojmy spojené s těmito jevy a jsou uvedeny vztahy, které sycení a desaturaci kapalin modelují. Zde si však zopakujeme to základní:

V dýchaném vzduchu se nachází kolem 78 % dusíku a asi 1 % vzácných plynů (z těch převážně argon). Tuto směs tudíž normálně dýcháme pod parciálním tlakem 79 kPa (0,79 barů). V plicních sklípcích tyto plyny přestupují – spolu s kyslíkem – po tlakovém spádu do krve a rozpouštějí se v ní. Jelikož tělesnými tekutinami jsou přenášeny ke každé buňce látky potřebné k jejímu životu, dostávají se takto k buňkám i atomy dýchaných inertních plynů a pronikají do nitrobuňčných tekutin. Zde se nijak nepodílejí na metabolických procesech - jsou fyziologicky indiferentní (inertní). V průběhu pobytu v normálním tlaku se ustavil rovnovážný stav, kdy jsou parciální tlaky inertních plynů v celém těle i v alveolách shodné.

Při snížení okolního tlaku (výstup do hor, snížení tlaku v kabině letadla...) dochází k nerovnováze, jelikož dílčí tlak plynů v alveolách se snížil a po obráceném tlakovém spádu začnou plyny z krve přestupovat do alveol. Jelikož se tím snížil jejich parciální tlak v krvi, začnou do krve přestupovat i z buněk jednotlivých tkání a jsou odnášeny do plic a vydýchávány. Tento nerovnovážný stav se někdy nazývá stavem adaptace na snížený tlak. (Jde-li o připravovaný výkon ve větší nadmořské výšce, pak tato část adaptace trvá asi šestnásobek nejdelšího poločasu 600 minut, tedy asi 2,5 dne. Adaptací se však někdy rozumí i složitější část fyziologických procesů, která provází snížení nabídky kyslíku). V tomto stavu jsou tkáně inertním plynem přesyceny.

Při ponoru do hloubky se zvýší okolní tlak a tím i parciální tlaky dýchaných inertních plynů v dýchané směsi oproti normálu. Dochází pak k dalšímu sycení tkání. Stupeň nasycení, tedy parciální tlak plynu v dané tkáni, závisí především na době

pobytu v daném tlaku, na druhu tkáně i na stupni jejího prokrvení. Může však stoupnout až na hodnotu shodnou s parciálním tlakem plynů v alveolách.

V průběhu výstupu dochází v sycených tkáních k obrácenému tlakovému spádu a k difúzi plynů z tkání do krve. Ta pak rozpuštěné plyny dopraví k plicním sklípkům, kde znovu přestupují do alveol a jsou vydychávány. Toto by byl ideální způsob vyloučení rozpuštěných plynů, avšak při běžném potápění se vyskytuje spíše výjimečně.

Lidské tělo přesycení inertními plyny snese, avšak pouze do určité míry. I za termodynamické rovnováhy (při stálém tlaku) vznikají ve tkáních zárodky bublinek inertních plynů. Některá lokální seskupení jsou ke vzniku zárodků náchylnější, například dutiny s hůře smáčivým povrchem (příklad: ve sklenici s pivem, ve kterém je rozpuštěn oxid uhličitý, lze často najít jednotlivá místa, od nichž stoupá nahoru řada drobných bublinek). V zárodcích je parciální tlak plynů minimálně stejný jako okolní tlak v hloubce (k němu se pak přičítají například tlaky od povrchového napětí a případně od mechanického odporu relativně tuhé okolní tkáně proti růstu zárodku).

Je - li tlak plynu v jeho zárodku větší nežli parciální tlak plynu ve tkáni, která zárodek obklopuje, může dojít difúzí do okolní tkáně k jeho rozpuštění a k zániku.

Je - li však v zárodku jeho tlak menší než jeho parciální tlak v okolní tkáni, difunduje plyn z tkáně do zárodku a tím roste pravděpodobnost dalšího růstu zárodku a vzniku mikrobublinky. V krvi tuto pravděpodobnost - kromě snižování tlaku při výstupu - zvyšují například ta místa krevního řečiště, v nichž dochází ke snížení tlaku krve zvýšenou rychlostí proudění a turbulencí. Výstup navíc znamená i zvětšení průměru vzniknuvší mikrobubliny a tím současně i snížení tlaku od povrchového napětí.

Od sedmdesátých let minulého století je navíc známo, že mikrobublinky inertního plynu se skutečně vyskytují při téměř každé dekompresi (tzv. tiché bublinky), avšak teprve od určitého počtu nebo velikosti se začínají projevovat klinickými potížemi. Nalézt ještě "bezpečný", tj. maximální přípustný stupeň přesycení jednotlivých lidských tkání, který tkáně snesou bez tvorby již nebezpečných bublin, je pro vypracování tabulek, které mají zajistit bezpečný výstup na hladinu, tím nejpodstatnějším. Některé modely (tzv. bublinkové nebo dvoufázové) dokonce přítomnost mikrobublinek v organizmu předpokládají a hledají hranici, kdy jejich velikost či celkový objem může způsobit problémy.

Detaily procesů, probíhajících při saturaci lidského těla inertním plynem a hlavně při jeho denaturaci, lze ponechat odborníkům z oboru fyziologie a biofyziky. Je to velmi složitá problematika, která bývá řešena pomocí různých zjednodušujících modelů vystihujících obvykle jen její část. Jedním z nich je předkládaný tzv. neohaldaneovský model, beroucí v úvahu pouze rozpuštěné inertní plyny ve tkáních a výstup regulující tak, aby docházelo jen k přípustnému přesycení jednotlivých tkání a tím bylo zabráněno vzniku bublinek. V předkládaném modelu je použito výsledků, ke kterým profesor Bühlmann z univerzity v Zürichu dospěl na základě dlouholetých teoretických i empirických výzkumů.

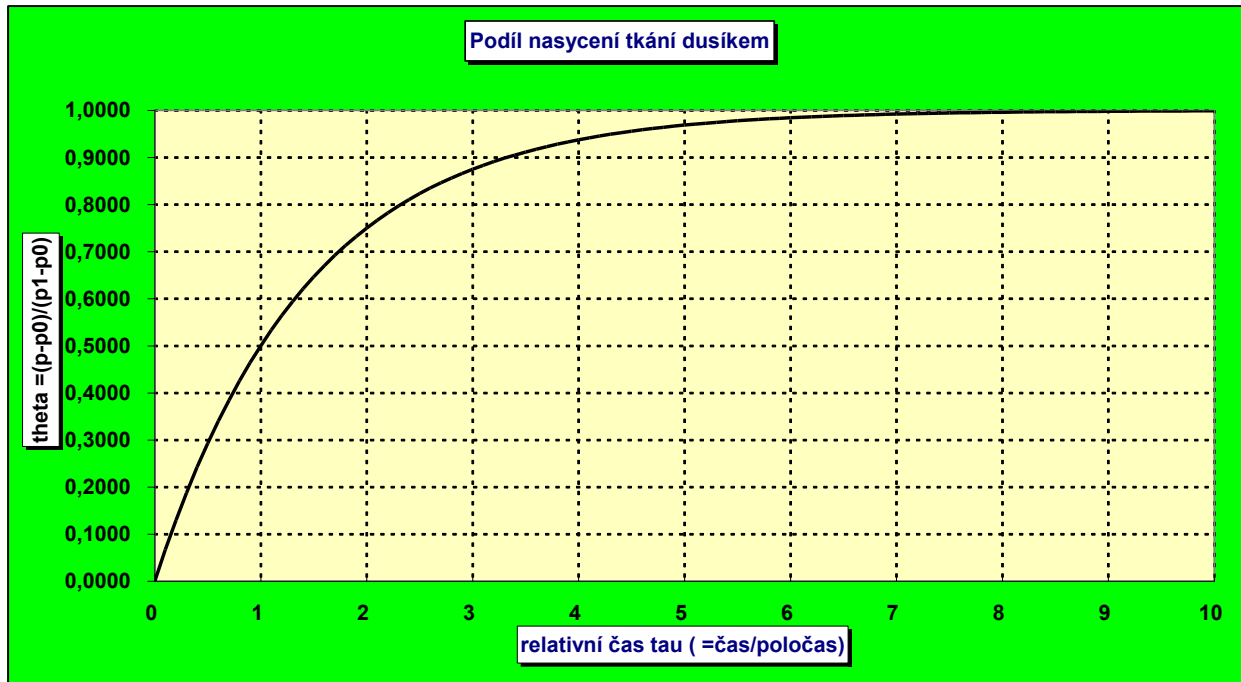
Poněvadž podobného modelu je využito rovněž v řadě dekompresních počítačů, budou zde občas učiněny poznámky, vztahující se k nim.

II. Saturace.

V přednáškách z potápěčské fyziky jsme již byli seznámeni s pojmem poločasu sycení $t_{1/2}$ jako s časem, za který se daná kapalina nasytí určitým plynem o polovinu rozdílu Δp mezi konečným parciálním tlakem, tj. parciálním tlakem plynu nad kapalinou p_1 , a počátečním tlakem plynu v kapalině p_0 . Zmíněný rozdíl vytváří "hnací sílu" pro rozpouštění, jejíž velikost klesá jak narůstá parciální tlak plynu v kapalině. Uvedme si zde znovu rovnici popisující průběh rozpouštění: v čase t od zahájení saturace je parciální tlak plynu v kapalině $p(t)$ určen vztahem

$$p(t) = (p_1 - p_0) \cdot [1 - \exp(- \ln(2) \cdot t / t_{1/2})] + p_0 ,$$

v němž $\exp(x) = e^x$, $e = 2,71828$ je základ přirozených logaritmů a $\ln(2) = 0,69314$. Relativní podíl $\mathcal{G} = \{p(t) - p_0\} / (p_1 - p_0)$, o který se kapalina nasytí za čas t a který se vlastně rovná $\mathcal{G} = [1 - \exp(- \ln(2) \cdot \tau)] = 1 - 2^{-\tau}$, kde $\tau = t / t_{1/2}$, lze stanovit odečtem z grafu (Obr.1) či lépe z tabulky relativního sycení (Tab. 1).



Obr.1. Relativní sycení tkání

$$g = (p - p_0) / (p_1 - p_0) = [1 - \exp(-\ln(2) \cdot \tau)] = [1 - 2^{-\tau}], \tau = t / t_{1/2}$$

| τ | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0.000 | 0.067 | 0.129 | 0.188 | 0.242 | 0.293 | 0.340 | 0.384 | 0.426 | 0.464 |
| 1 | 0.500 | 0.534 | 0.565 | 0.594 | 0.621 | 0.646 | 0.670 | 0.692 | 0.713 | 0.732 |
| 2 | 0.750 | 0.767 | 0.782 | 0.797 | 0.810 | 0.823 | 0.835 | 0.846 | 0.856 | 0.866 |
| 3 | 0.875 | 0.883 | 0.891 | 0.898 | 0.905 | 0.912 | 0.918 | 0.923 | 0.928 | 0.933 |
| 4 | 0.938 | 0.942 | 0.946 | 0.949 | 0.953 | 0.956 | 0.959 | 0.962 | 0.964 | 0.966 |
| 5 | 0.969 | 0.971 | 0.973 | 0.975 | 0.976 | 0.978 | 0.979 | 0.981 | 0.982 | 0.983 |
| 6 | 0.984 | 0.985 | 0.986 | 0.987 | 0.988 | 0.989 | 0.9897 | 0.990 | 0.991 | 0.9916 |
| 7 | 0.9922 | 0.9927 | 0.9932 | 0.9937 | 0.9941 | 0.9945 | 0.9948 | 0.9952 | 0.9955 | 0.9958 |
| 8 | 0.9961 | 0.9964 | 0.9966 | 0.9968 | 0.9970 | 0.9972 | 0.9974 | 0.9976 | 0.9978 | 0.9979 |
| 9 | 0.9980 | 0.9982 | 0.9983 | 0.9984 | 0.9985 | 0.9986 | 0.9987 | 0.9988 | 0.9989 | 0.9990 |
| 10 | 0.9990 | 0.9991 | 0.9991 | 0.9992 | 0.9993 | 0.9993 | 0.9994 | 0.9994 | 0.9994 | 0.9995 |

Tab. 1. Tabulka hodnot relativního sycení g

Příklad: Stanovte relativní podíl g nasycení tkáně o poločase sycení 27 minut po 40 minutách sycení.

Řešení: skutečný čas $t = 40$ minut, poločas $t_{1/2} = 27$ minut. $\tau = t / t_{1/2} = 40 / 27 = 1,48 = \text{cca } 1,5$ (hledáme v řádku 1 a ve sloupci 0.5). Pak $g = 0,646$ (přibližně 65 %).

Příklad: Za jakou dobu bude tkáň o poločase 8 minut nasycena o 90 % konečné hodnoty ?

Řešení: $\vartheta = 0,90$, nejbližší je hodnota 0,898. Pak $\tau =$ cca 3,3. Pro tkáň o poločase 8 minut je uvedené sycení splněno v čase $t = \tau \cdot t_{1/2} = 3,3 \cdot 8 = \underline{26,4}$ minut.

V našem případě rozumíme tlakem plynu nad kapalinou parciální tlak dusíku (a argonu) v alveolách, označený jako p_A . Zde je nutno nejprve od celkového tlaku v plicích (který se rovná tlaku v hloubce) odečíst napětí nasycených vodních par v plicích, které je rovné 6,3 kPa. Pak výpočet parciálního tlaku inertních plynů v alveolách u hladiny moře, kde $p_{atm0} = 101,3$ kPa, dává:

$$p_{A(0m)} = (p_{atm0} - 6,3) \cdot 0,79 = 75,05 \approx 75 \text{ kPa} = p_0.$$

p_0 je počáteční tlak dusíku ve tkáních a u hladiny moře je tedy roven 75 kPa. Pro základní dekompresní tabulku, platnou od hladiny moře (do 700 m n. m.), se bere v úvahu tento tlak. Ve výpočtech pro větší nadmořské výšky je pak samozřejmě menší.

V hloubce 30 metrů v moři dostáváme pro p_A :

$$p_{A(30m)} = (p_{30m} - 6,3) \cdot 0,79 = (400 - 6,3) \cdot 0,79 = 311 \text{ kPa}.$$

Ke zjednodušení situace při saturaci a desaturaci lidského těla inertním plynem nahlížíme fyziologové na lidské tělo jako na soubor modelových tkáňových skupin zvaných kompartmenty (compartments), o kterých jsme zvyklí hovořit jako o "tkáních". Těm je pak pro daný inertní plyn přiřazen určitý poločas sycení a další konstanty. Ve skutečnosti mohou tyto údaje opravdu odrážet vlastnosti fyzických tkání - a také jim bývají přiřazovány - avšak zcela nutné to není. Tak například sval, který momentálně nepracuje, bude méně prokrven a jeho poločas sycení bude asi poněkud delší než pro tentýž sval intenzivně pracující, a tudíž hodně prokrvený. V modelu ZHL-12 profesora Bühlmanna z roku 1986 je použito 16 kompartmentů ("tkání"), a tedy 16 poločasů sycení. V další tabulce (Tab. 2) jsou uvedeny i poločasy sycení pro hélium.

Vzájemný poměr poločasů pro hélium a pro dusík vychází z poměru jejich rychlostí difúze, který je úměrný druhé odmocnině z poměru jejich molárních hmotností μ . Z toho plyne: $t_{1/2}^{N_2} / t_{1/2}^{He} = \sqrt{\mu_{N_2}} / \sqrt{\mu_{He}} = \sqrt{28,013} / \sqrt{4,0026} = 2,6455$.

Poznámka: tabulky US Navy berou v úvahu kompartmenty s dusíkovými poločasy do 240 minut. Pro rekreační potápění se někdy berou v úvahu ještě kratší poločasy (do 120 minut). Obojí může přinést omezení obzvláště pro snižování tlaku po ponorech (např. odlet).

| Komp.č. | $t_{1/2}$ pro N ₂ (min) | $t_{1/2}$ pro He (min) | Přiřazená tkáň |
|---------|------------------------------------|------------------------|----------------|
| 1 | 4,0 | 1,51 | krev |
| 2 | 8,0 | 3,02 | mozek |
| 3 | 12,5 | 4,72 | mícha |
| 4 | 18,5 | 6,99 | |
| 5 | 27,0 | 10,21 | |
| 6 | 38,3 | 14,48 | pokožka |
| 7 | 54,3 | 20,53 | svalstvo |
| 8 | 77,0 | 28,11 | |
| 9 | 109,0 | 41,20 | |
| 10 | 146,0 | 55,19 | vnitřní ucho |
| 11 | 187,0 | 70,69 | |
| 12 | 239,0 | 90,34 | |
| 13 | 305,0 | 115,29 | klouby |
| 14 | 390,0 | 147,42 | kosti |
| 15 | 498,0 | 188,24 | chrupavky |
| 16 | 635,0 | 240,03 | |

Tab.2. Poločasy sycení pro jednotlivé kompartmenty.

Hranice mezi jednotlivými skutečnými tkáněmi není zcela pevná, jak již bylo naznačeno. V každém případě se o krvi a CNS hovoří jako o tkáních rychlých, o svalech jako o středně rychlých, kdežto kosti, klouby a chrupavky patří k pomalým tkáním. V dalším budeme považovat slova "tkáň" a "kompartment" za rovnocenná.

K výpočtu sycení dusíkem, obsaženým ve vzduchu (například pomocí kalkulačky) tedy můžeme pro každou tkáň postupovat následovně :

a) z hloubky a z počátečního tlaku p_0 ve tkáni stanovíme tlakový rozdíl (gradient) $(p_A - p_0)$.

Příklad: po rychlém sestupu z hladiny do hloubky 10 m by byl $p_A = (200 \text{ kPa} - 6,3 \text{ kPa}) \cdot 0,79 = 153 \text{ kPa}$ a tlakový rozdíl $(p_A - p_0) = (153 - 75) = 78 \text{ kPa}$.

b) z času v uvedené hloubce stanovíme podíl $\tau_i = t_i / t_{1/2}$ (pro danou i -tou tkáň).

Příklad: pro čas 15 minut bychom pro tkáň č. 1 obdrželi $\tau_1 = 15 / 4 = 3,75$, tj. přibližně 3,8 poločasu, kdežto pro tkáň č. 7 dostáváme hodnotu $\tau_7 = 15 / 54,3 = 0,276 \approx 0,3$ poločasu.

c) v tabulce relativního sycení (Tab. 1) vyhledáme pro uvedené údaje τ_i (levý sloupec a příslušný sloupec) hodnotu relativního sycení ϑ dané tkáně a číslem ϑ vynásobíme příslušný rozdíl tlaků.

Příklad: pro $\tau_1 = 3,8$ nalezneme v první kolonce 3 a pod hodnotou 0,8 v horním řádku číslo 0,928 a pro $\tau_7 = 0,3$ obdobně číslo 0,188. Znamená to, že tkáň č. 1 se po 15 minutách nasýtí o 92,8 % tlakového rozdílu, tedy o $0,928 \cdot 78 = 72,38$ kPa, kdežto tkáň č. 7 pouze o přírůstek $0,188 \cdot 78 = 14,66$ kPa.

d) konečný parciální tlak dusíku v jednotlivých tkáních stanovíme přičtením těchto přírůstků k původnímu tlaku p_0 ve tkáních.

Příklad: v našem případě by ve tkáni č. 1 činil parciální tlak dusíku $p_1 = 75,0 + 72,38 = 147,4$ kPa a ve tkáni č. 7 $p_7 = 89,7$ kPa.

Doplnění pro dekompresní počítač :

Při sestupu do další hloubky na další čas t_h bychom postupovali obdobně, avšak za hodnoty p_{0i} (nyní by byly odlišné pro každou tkáň) bychom vzali ty, které jsme stanovili v předchozím případě.

Příklad: Rychlý sestup z předchozích 10 m do 20 metrů dá alveolární tlak dusíku v hloubce $p_A = (300 \text{ kPa} - 6,3 \text{ kPa}) \cdot 0,79 = 232,0$ kPa a gradient pro tkáň č.1 je $(p_A - p_{01}) = (232,0 - 147,4) = 84,6$ kPa, kdežto pro tkáň č. 7 je roven $(p_A - p_{07}) = (232,0 - 89,7) = 142,3$ kPa.

Po 10 minutách pobytu v této hloubce bychom pro $\tau_1 = 10 / 4 = 2,5$ získali hodnotu relativního sycení 0,823 a pro $\tau_7 = 10 / 54,3 = 0,18 \approx 0,2$ údaj 0,129.

Vynásobením těchto čísel příslušnými rozdíly tlaků ($84,8 \cdot 0,823 = 69,8$ a $142,3 \cdot 0,129 = 18,4$) dostáváme hodnoty v kPa, které po přičtení k původním tlakům p_{01} a p_{07} dají konečné hodnoty parciálních tlaků dusíku v obou tkáních, tj. $p_1 = 147,2 + 69,8$

= **217,0 kPa** pro tkáň č. 1 a $p_7 = 88,7 + 18,4 =$ **107,1 kPa** pro tkáň č. 7. Uvedené hodnoty jsou **silně zvýrazněné**, jelikož je použijeme v dalších výpočtech.

Takto bychom mohli stanovit hodnoty parciálních tlaků dusíku ve všech 16 tkáních.

Dekompresní počítač skutečně v krátkých časových intervalech odebírá hodnoty tlaku, kterým přiřazuje hodnoty p_A a provádí výpočet okamžitého parciálního tlaku ve všech tkáních.

Dekompresní tabulky jsou však vypočítávány na základě obdélníkového profilu ponoru: předpokládají rychlé zanoření do maximální hloubky ponoru a pobyt v této hloubce. Proto je za čas na dně brána doba od zahájení ponoru, nikoliv od přibytí do hloubky. Tím se zvyšuje bezpečnost tabulek: nezáleží na různých zdrženích v průběhu sestupu. V uvedených tabulkách je jako další bezpečnostní prvek místo skutečné hloubky h vzata hloubka o 1 metr větší a je k ní připočtena dodatečná přírážka o velikosti 3 % ze skutečné hloubky ($0,03 \cdot h$). Velikost výpočetní hloubky h_{vyp} v metrech je potom rovna $h_{vyp} = (h + 1 + 0,03 \cdot h) = 1,03 \cdot h + 1$ (např. místo 30 m je 31,9 m).

III. Desaturace.

III.1. Téměř rovnovážná desaturace.

Desaturací rozumíme vysycování rozpuštěných inertních plynů ze tkání. Může k ní dojít tehdy, když alveolární parciální tlak inertního plynu (p_A) poklesne pod hodnotu tlaku ve tkáni (p_i). Pak se ve shora uvedené rovnici změní znaménko tlakového gradientu (bude záporný) a tlak ve tkáních se začne snižovat. Formálně bývá tento proces popsán identickým vztahem jako při saturaci. Tkáně se pak dusíku zbavují tak, že atomy dusíku difundují po jeho tlakovém spádu směrem k alveolám, tedy cestou tkáň - krev - plíce - okolí. Tato cesta je opačná k cestě, kterou dochází k saturaci tkání a k tomuto způsobu desaturace směřují bezpečné postupy.

K poklesu p_A může dojít více způsoby - například při přechodu na jinou dýchací směs s malou koncentrací dusíku. Pro výpočet dekomprese nás ovšem zajímá ten nejpodstatnější - snižování okolního tlaku a tím i parciálního tlaku inertního plynu v alveolách.

Zahájení výstupu nemusí obvykle znamenat i zahájení desaturace všech tkání. Některé z tkání (ty pomalé) jsou nasyceny jen na malý zlomek konečného možného parciálního tlaku a ještě v průběhu výstupu může dojít k jejich dalšímu sycení. Známe-li parciální tlak p_i v dané tkáni, pak můžeme snadno stanovit okolní tlak, při němž by došlo v průběhu výstupu k zahájení desaturace. K rovnosti $p_A = p_i$ by totiž došlo v hloubce h , ve které pro tlak p_h platí vztah

$$p_A = (p_h - 6,3) \cdot 0,79 = p_i.$$

Pak

$$p_h = p_i / 0,79 + 6,3 \text{ (kPa)}$$

Příklad: dosazením předchozích vypočtených údajů za p_i (217,0 a 107,1 kPa) zjistíme, že pokud bychom vystupovali rychle (bez další saturace), došlo by k zahájení desaturace tkáně č. 1 již při okolním tlaku 281 kPa, tj. v 18 metrech, kdežto tkáň č. 7 by se začala vysycovat až ve 4 metrech (vypočtený tlak 141,2 kPa). Jelikož do hloubky 4 metrů by však výstup předepsanou rychlostí 10 m za minutu trval 1,6 minuty, v průběhu výstupu by se tkáň č. 7 dále sytila dusíkem a k zahájení desaturace by tedy došlo v poněkud větší hloubce.

III.2. Nerovnovážná desaturace.

V předchozím odstavci byly popsány okolnosti, za nichž dochází k běžné desaturaci. Dochází k ní totiž při každém snížení okolního tlaku - ať už při výstupu nebo jízdě do hor, při průjezdu horským průsmykem nebo při letu letadlem. Za nerovnovážnou pokládáme desaturaci, při které parciální tlak inertního plynu ve tkáni znatelně převyšuje okolní tlak. Hovoříme o celkovém okolním tlaku, nikoliv o alveolárním parciálním tlaku plynu. V zárodcích bublin inertního plynu v organismu je totiž jeho parciální tlak přibližně roven jeho okolnímu tlaku (je tam téměř čistý dusík). Je-li tento tlak menší než jeho parciální tlak v okolní tkáni, difunduje plyn do zárodku a ten se zvětšuje: zárodek roste, mění se v mikrobublinu a ty se pak mohou slučovat v bubliny větší, které následně ohrožují zdraví či život člověka.

S tímto jevem se může např. setkat i nepotápěč v důsledku explozivní dekomprese v dopravním letadle, letícím ve velkých výškách (okolo 10 km n.m). V

těchto výškách je okolní tlak asi pětkrát menší než u hladiny moře, tedy 20 kPa. Po vypnutí kyslíkových masek ze schránek cestujícího neohrožuje okamžitý nedostatek kyslíku - parciální tlak kyslíku 20 kPa bohatě stačí k zásobení organismu - nýbrž právě prudké snížení tlaku, vyvolávající tvorbu a růst bublin v organismu.

Potápěč, v jehož těle je rozpuštěno velké množství inertního plynu, může podobnou zkušenost zažít při příliš rychlém snižování okolního tlaku. Tkáně jsou ve značném stupni přesyceny oproti tlaku plynu v zárodkách bublinek. Dusík z nich pak difunduje do zárodků, které takto přerůstají v nebezpečné bublinky. Odzátkování láhve s limonádou je klasickou demonstrací snížení tlaku a překotné tvorby bublinek.

III.3. Přípustné přesycení.

Pokud by lidské tělo nesneslo žádný stupeň přesycení, museli bychom z hloubky vystupovat velmi pomalu na hranici rovnováhy mezi tlakem v tkáních a tlakem okolí. Tak to původně předpokládal ve 2. polovině 19. století i Paul Bert a bývá toho využíváno po tzv. saturačních ponorech. Naštěstí dr. Haldane svými pokusy z let 1905 -1907 dokázal, že nejen kozí, nýbrž i lidský organismus určitý stupeň přesycení snese bez klinických potíží. Po dlouhodobém pobytu v hloubce 10 m bylo možno vynořit se přímo na hladinu, aniž by se vyskytly problémy. Z větších hloubek již to nešlo a tak spatřil světlo světa první tzv. bublinkový faktor (v některých modelech též "M" - faktor): maximální přípustný poměr parciálního tlaku dusíku ve tkáních (156 kPa v hloubce 10 m) k okolnímu tlaku, do něhož je možno vystoupit (100 kPa na hladině), který byl tedy roven 1,56.

I v teorii dekomprese, vypracované profesorem Bühlmannem, se objevuje přípustný stupeň přesycení. Již na základě teorii předcházejících dlouhodobých experimentů bylo zjištěno, že musí být odlišný pro jednotlivé kompartmenty. Tzv. rychlé tkáně totiž snesou větší stupeň přesycení než tkáně pomalé. Ke stanovení zmíněného faktoru je navíc v jeho modelu zapotřebí dvou konstant. Mezi parciálním tlakem dusíku ve tkáních p_{iN_2} a tlakem okolí, který daná tkáň ještě "toleruje" p_{itol} je předpokládán vztah

$$p_{itol} = (p_{iN_2} - a_i) \cdot b_i,$$

ve kterém a_i a b_i jsou výpočetní koeficienty pro tkáň s indexem i (i -tou tkáň). První z nich je závislý na zvolených jednotkách tlaku. Koeficienty pro dusík jsou uvedeny v tabulce Tab. 3.

K výpočtům přípustného přesycení pro jednotlivé tkáně je použito 12 dvojic koeficientů a a b .

| Komp. | $t_{1/2}$ (min) | a (kPa) | b | Kritický tlak p_{iN2} při p_{tol} (kPa) | | | |
|--------------|---------------------------|---------------------|-------|--|------------------|------------------|------------------|
| | | | | 100 (0 m) | 130 (3 m) | 160 (6 m) | 190 (9 m) |
| 1 | 4,0 | 190,0 | 0,800 | 315,0 | 352,5 | 390,0 | 427,5 |
| 2 | 8,0 | 145,0 | 0,800 | 270,0 | 307,5 | 345,0 | 382,5 |
| 3 | 12,5 | 103,0 | 0,800 | 228,0 | 265,5 | 303,0 | 340,4 |
| 4 | 18,5 | 88,2 | 0,826 | 209,3 | 245,6 | 281,9 | 318,2 |
| 5 | 27,0 | 71,7 | 0,845 | 190,0 | 225,5 | 261,0 | 296,6 |
| 6 | 38,3 | 57,5 | 0,860 | 173,8 | 208,7 | 243,5 | 278,4 |
| 7 | 54,3 | 46,8 | 0,870 | 161,7 | 196,2 | 230,7 | 265,2 |
| 8 | 77,0 | 44,1 | 0,903 | 154,8 | 188,1 | 221,3 | 254,5 |
| 9 | 109,0 | 41,5 | 0,908 | 151,6 | 184,7 | 217,7 | 250,8 |
| 10 | 146,0 | 41,6 | 0,939 | 148,1 | 180,0 | 212,0 | 243,9 |
| 11 | 187,0 | 36,9 | 0,946 | 142,6 | 174,3 | 206,0 | 237,7 |
| 12 | 239,0 | 36,9 | 0,946 | 142,6 | 174,3 | 206,0 | 237,7 |
| 13 | 305,0 | 25,5 | 0,962 | 129,5 | 160,6 | 191,8 | 223,0 |
| 14 | 390,0 | 25,5 | 0,962 | 129,5 | 160,6 | 191,8 | 223,0 |
| 15 | 498,0 | 25,5 | 0,962 | 129,5 | 160,6 | 191,8 | 223,0 |
| 16 | 635,0 | 25,5 | 0,962 | 129,5 | 160,6 | 191,8 | 223,0 |

Tab.3. Koeficienty přípustného přesycení a hodnot maximálního přípustného přesycení tkání na dekompresních zastávkách.

Příklad: Pro tkáně č.1 a č. 7 z předchozích příkladů (tj. pro 217,0 a 107,1 kPa) by před zahájením výstupu byly tolerovány poklesy okolního tlaku na hodnoty

$$p_{1tol} = (217 - 190) \cdot 0,800 = \underline{64 \text{ kPa}} (< 100 \text{ kPa})$$

$$p_{7tol} = (107,1 - 46,8) \cdot 0,870 = \underline{52,5 \text{ kPa}} (< 100 \text{ kPa}) \text{ a byl by tedy možný}$$

přímý výstup na hladinu.

Příklad : Tkáň č. 5 ($t_{1/2} = 27,0$ min) byla v hloubce nasycena dusíkem na parciální tlak 332 kPa. Do jaké hloubky by mohl potápeč s ohledem na tuto tkáň bez obav vystoupit ?

Řešení: $p_{5tol} = (332 - 71,7) \cdot 0,845 = 220$ kPa, což je tlak v hloubce 12 metrů !

III.4. Dekompresní zastávky a řídicí tkáň.

V předchozím příkladě by bylo možno s ohledem na parciální tlak dusíku ve tkáni č. 5 vystoupit do hloubky 12 metrů a nikoliv výše. V této hloubce by bylo nutno setrvat po určitou dobu, po níž by tkáň dusík desaturovala až by umožnila výstup do menší hloubky. Z tradičních důvodů se za hloubky zastávek, určených k další desaturaci tkání, berou hloubky v násobcích 3 metrů (původně dle dr. Haldanea násobky 10 stop). To znamená hloubky 3 m, 6 m, 9 m, 12 m atd. Výjimku tvoří tabulky pro větší nadmořské výšky, v nichž jsou uvedeny jiné hloubky "mělčích" zastávek: 2 m, 4 m, 6 m, 9 m atd. Je ironií osudu, že právě tabulky britských potápěčů, sdružených v BSAC, byly již zpracovány pro zastávky v násobcích 5 metrů.

Při výpočtu dekomprese, tzn. způsobu výstupu, se tedy může postupovat tak, že v průběhu simulovaného výstupu předepsanou rychlostí se pro každou hloubku, v níž se potápeč nachází, **a pro každou tkáň** zjišťuje, zda je možno vystoupit výše. Tkáň, která výstup zastaví (v níž by došlo k překročení přípustného přesycení) se nazývá řídicí tkáň. V průběhu zdržení na zastávce klesá desaturací hodnota parciálního tlaku dusíku v ní i v ostatních tkáních. Zdržení na zastávce musí svojí délkou zajistit, že parciální tlak dusíku **v každé ze tkání** poklesne na hodnotu, umožňující výstup na další dekompresní zastávku. V průběhu desaturace se často stává řídicí tkání jiná, vždy pomalejší, tkáň.

Pro jednotlivé hloubky dekompresních zastávek je však možný i opačný postup: předem stanovit, jaké jsou maximální přípustné parciální tlaky dusíku pro výstup do dané hloubky, tzn. dosazením hodnot tlaků dýchaného vzduchu p_{hz} na zastávce za p_{itol} vypočítat hodnoty parciálních tlaků dusíku v jednotlivých tkáních p_{iN_2} , které ještě umožňují do hloubky zastávky vystoupit

$$p_{iN_2} = p_{hz} / b_i + a_i .$$

Tyto hodnoty jsou uvedeny ve druhé části tabulky Tab. 3. Jejich znalost je příčinou toho, že dekompresní počítač "ví" už v hloubce zda a jakou dekompresní zastávku bude nutno vykonat.

Časy pobytu v hloubce, při nichž není v žádné tkáni dosaženo parciálních tlaků dusíku uvedených v prvním sloupci (pro hladinu), se pak nazývají nulové časy, které vyžadují pouze bezpečnostní zastávku. V základních tabulkách jsou uvedeny pro příslušnou hloubku v prvním řádku, pokud jsou ovšem reálně využitelné.

Příklad: pro tkáň č. 7 a hloubku zastávky 6 metrů ($p_{hz} = 160$ kPa) obdržíme $p_{7N2} = 160 / 0,870 + 46,8 = 230,7$ kPa.

Je-li tedy dílčí tlak dusíku ve tkáni č. 7 větší než 230,7 kPa, avšak menší než 265,2 kPa (viz tabulku 3), je nutno se zdržet v hloubce 9 metrů a vyčkat na jeho pokles na 230,7 kPa. Potom je nutno zůstat na zastávce v hloubce 6 metrů po dobu, než tlak v této nebo pomalejší tkáni nedosáhne předepsaných hodnot pro výstup do 3 metrů (pro tkáň č. 7 196,2 kPa, pro tkáň č. 8 188,1 kPa a pro tkáň č. 9 184,7 kPa...).

Dobu, po kterou je nutno zůstat na zastávce z hlediska desaturace uvažované tkáně, je možno stanovit pomocí vztahu pro relativní podíl. Známe počáteční tlak $p_0 = p_{i6m}$ a známe i hodnotu p_{i3m} , na kterou musí tlak klesnout, abychom mohli vystoupit výše a víme rovněž jaký je alveolární parciální tlak dusíku p_A v hloubce zastávky, na které se nacházíme. Pak známe i hodnotu relativního podílu $(p_{i3m} - p_{i6m}) / (p_A - p_{i6m})$ desaturace, který se opět rovná hodnotě $\vartheta = (1 - 2^{-t/t_{1/2}})$ a tu lze odečíst v Tab.1 - nyní ovšem obráceným postupem. Přiřadíme jí zobecněný čas τ a odtud pomocí vztahu $t_i = \tau \cdot t_{i1/2}$ nalezneme hledanou dobu t_i .

Parciální tlaky dusíku v alveolárním vzduchu na jednotlivých dekompresních zastávkách v hloubce h (v metrech) nyní stanovíme pomocí vztahu

$$p_A [kPa] = (h \cdot 10 + p_{atm} - 6,3) \cdot 0,79,$$

ve kterém p_{atm} je atmosférický tlak v kPa. Pro základní dekompresní tabulku (tzn. pro 0 - 700 m n.m.) je to normální tlak u hladiny moře, kde $p_{atm} = p_{atm0} = 101,3$ kPa. Pak pro hloubky jednotlivých zastávek obdržíme

| | | | | | |
|-------------|------|------|-------|-------|-------|
| $h [m]$ | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 |
| $p_A [kPa]$ | 75,0 | 98,8 | 122,5 | 146,2 | 169,8 |

III.5. Stanovení doby zdržení na zastávkách.

Pomocí výše uvedeného návodu si v dalším předvedeme výpočet zdržení na jednotlivých dekompresních zastávkách. Zopakovat uvedené výpočty je možné pomocí kalkulačky a pokud kalkulačka samotná neumožňuje výpočet zobecněného času τ přímo, lze použít tabulky pro podíly ϱ . Úmyslně zde není uveden celý ponor, avšak výpočty by se blížily dekompresi po ponoru na 30 minut do 45 metrů. **Podrobný výklad lze nalézt na konci následujícího příkladu.**

Příklad: Ve 3. řádku následující tabulky jsou uvedeny skutečné parciální tlaky p_{iN2} ve tkáních č. 1 až 8 po předchozím ponoru, výstupu, dekompresi a po opuštění zastávky ve 12 metrech :

| Komp. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t_{i/2}$ (min) | 4,0 | 8,0 | 12,5 | 18,5 | 27,0 | 38,3 | 54,5 | 77,0 |
| p_{iN2} (kPa) | 333,2 | 357,3 | 340,0 | 305,7 | 264,3 | 225,8 | 191,2 | 162,4 |

výstup do 9 metrů

zastávka 9 metrů -----

podle tabulky 3 musí k výstupu do 6 m tlaky poklesnout na

| | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| p_{i6m} (kPa) | 390,0 | 345,0 | 303,0 | 281,9 | 261,0 | 243,5 | 230,7 | 221,3 |
| čas t_i (min) | 1 | 4 | <u>5</u> | 2 | | | | |

9 metrů / 5 minut, tlaky ve tkáních poklesly na hodnoty

| | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| p_{iN2} (kPa) | 224,8 | 283,1 | 293,1 | 278,4 | 250,1 | 218,9 | 188,4 | 161,7 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

výstup do 6 metrů

zastávka 6 metrů -----

podle tabulky 3 musí k výstupu do 3 m tlaky poklesnout na

| | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
| p_{i3m} (kPa) | 352,5 | 307,5 | 265,5 | 245,6 | 225,5 | 208,7 | 196,2 | 188,1 |
| čas t_i (min) | - | - | - | 7 | <u>9</u> | 6 | | |

6 metrů / 9 minut, tlaky ve tkáních poklesly na hodnoty

| | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| p_{iN2} (kPa) | 144,0 | 196,1 | 226,0 | 233,8 | 223,7 | 204,4 | 181,3 | 158,6 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

výstup do 3 metrů

zastávka 3 metry -----

podle tabulky 3 musí k výstupu na hladinu tlaky poklesnout na

| | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|
| p_{i0m} (kPa) | 315,0 | 270,0 | 228,0 | 209,3 | 190,0 | 173,8 | 161,7 | 154,8 |
| čas t_i (min) | - | - | - | 6 | 13 | 19 | 22 | 8 |

3 metry/ 22 minut, tlaky poklesly na hodnoty

| | | | | | | | | |
|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| p_{iN2} (kPa) | 99,7 | 136,3 | 133,2 | 158,0 | 169,8 | 169,7 | 161,1 | 147,9 |
|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

VÝSTUP NA HLADINU -----

Výklad

Dekomprese v 9 metrech :

Už na začátku parciální tlak ve tkáni č. 1 umožňuje přímý výstup až do 3 metrů.

Pro tkáň č. 2 platí, že do 6 metrů smíme vystoupit, klesne -li parciální tlak dusíku v ní na 345,0 kPa. Avšak v této tkáni je zmíněný tlak roven 357,3 kPa. Proto nejprve stanovíme podíl ϑ (při $p_{A9m} = 146,2$ kPa) jako $\vartheta = (345,0 - 357,3) / (146,2 - 357,3) = 12,3 / 211,2 = 0,058$ a v Tab. 1 provedeme interpolaci mezi hodnotami 0,000 ($\tau = 0$) a 0,067 ($\tau = 0,1$), (tedy $\tau = 0,1 \cdot 0,058 / 0,067 = 0,086$), která dá pro τ hodnotu $\tau = 0,086$. Pak čas k desaturaci t_2 obdržíme vynásobením poločasu $t_{21/2} = 8$ minut tímto číslem a máme $t_2 = 0,688$ minut a jelikož zaokrouhlujeme na celé minuty výše, obdržíme údaj 1 minuta.

Stejnou metodou získáme potřebné časy desaturace pro další tkáně, a sice 3,8 minut pro tkáň č. 3: $\vartheta = (303,0 - 340,0) / (146,2 - 340,0) = 0,191$. Potom stanovíme $\tau = (0,4 - 0,3) \cdot (0,191 - 0,188) / (0,242 - 0,181) + 0,3 = 0,3055$ a odtud $t_3 = \tau \cdot t_{31/2} = 3,8$.

Podobně $t_4 = 4,3$ minut pro tkáň č. 4 a $t_5 = 1,1$ min pro tkáň č. 5. Pro další tkáně není nutno výpočet provádět. Řídící pro dekompresní zastávku v 9 metrech je tkáň č. 4 s nejdelší potřebnou desaturací (4,3 \approx) 5 minut.

Dekomprese v 6 metrech:

Po pobytu 5 minut v 9 metrech poklesly tlaky dusíku v jednotlivých tkáních, je možno vystoupit do 6 metrů a znovu zjistit, která z tkání se bude vysycovat nejdéle pro další výstup do 3 metrů. Přímý výstup do 3 metrů by nyní umožňovaly 3 první tkáně. Původně řídicí tkáň č. 4 by musela desaturovat 7 minut. Výpočet pro tkáň č. 5 dává $\vartheta = (225,5 - 250,1) / (122,5 - 250,1) = 24,6 / 127,6 = 0,193$, z tabulky tedy máme $\tau = 0,310$ a součin $0,310 \cdot 27,0$ dá hodnotu 8,37, tedy $t_5 = 9$ minut. Jelikož stejný výpočet pro tkáň č. 6 dává 6 minut, přebírá tkáň č. 5 úlohu řídicí tkáně pro dekompresní zastávku v 6 m s dekompresní výdrží 9 minut.

Dekomprese ve 3 metrech:

Způsob výpočtu je shodný s předchozím. Tkáň č. 6, o které bylo možno předpokládat, že se stane řídicí, dává $\rho = 30,6 / 105,6 = 0,289$ a $\tau = 0,492$, odkud $t_6 = 18,8 \approx 19$ minut. Avšak pro tkáň č. 7 je $\rho = 19,6 / 82,6$, $\tau = 0,39$ a $t_7 = 21,3 \approx 22$ minut. Pro tkáň č. 8 dostáváme $t_8 = 8$ minut. Dekompresní zdržení ve 3 metrech je tedy určeno tkání č. 7 a obnáší 22 minut.

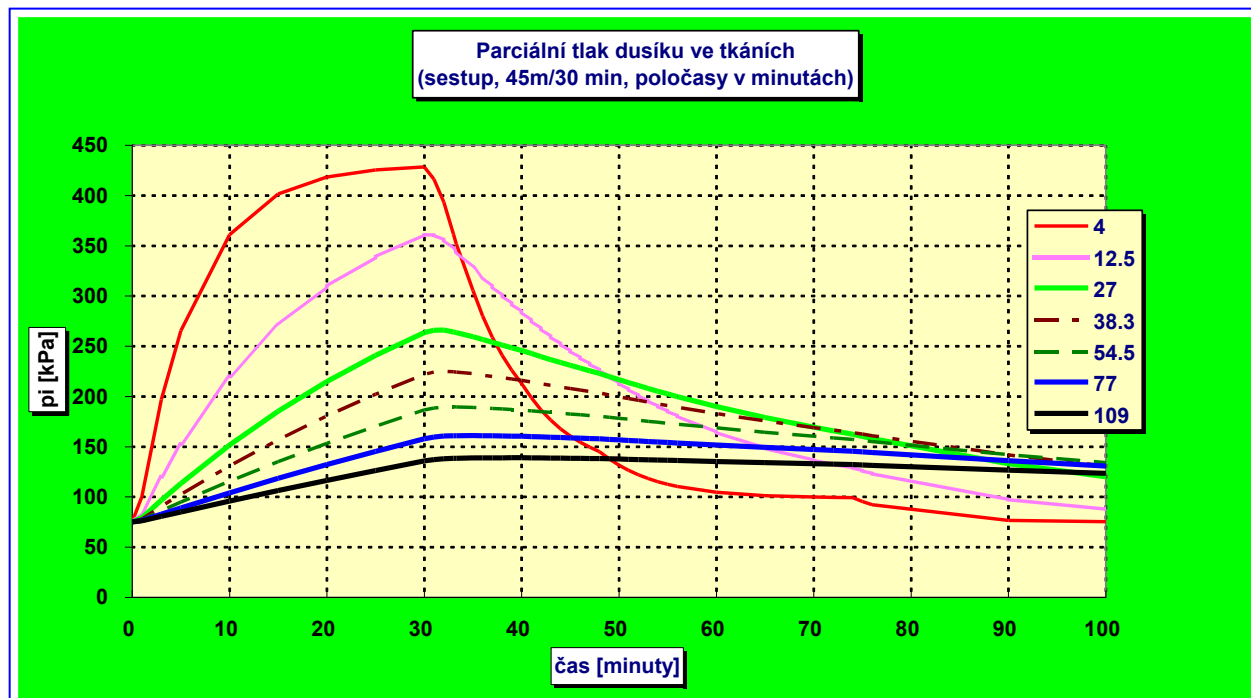
Poznámka: povšimněme si toho, že kdybychom místo vzduchu použili na zastávkách čistého kyslíku (případně nitroxu), byla by doba, potřebná k desaturaci, podstatně kratší. V případě zastávky v 6 metrech při použití kyslíku (kdy $p_A = 0$!) bychom pro tkáň č. 5 dostali $\rho = (225,5 - 250,1) / (0 - 250,1) = 24,6 / 250,1 = 0,098$, z tabulky tedy máme $\tau = 0,148$ a součin $0,148 \cdot 27,0$ dá hodnotu 3,996 tedy 4 minuty (oproti původním 9 minutám). To je v souladu s doporučením používat kyslík při dekompresi, je-li k dispozici!

III.6. Modifikace výpočtu.

Při vypracovávání tabulek byly do výpočtu zahrnuty dva bezpečnostní faktory. První z nich byl zmíněn již dříve, a sice fakt, že výpočetní hloubka je rovna skutečné (uvedené v tabulkách), avšak zvětšené o její 3 % a 1 metr. Tak např. hodnota 33 m v tabulkách znamená, že výpočet byl proveden pro $(1,03 \cdot 33 + 1) = 35$ metrů.

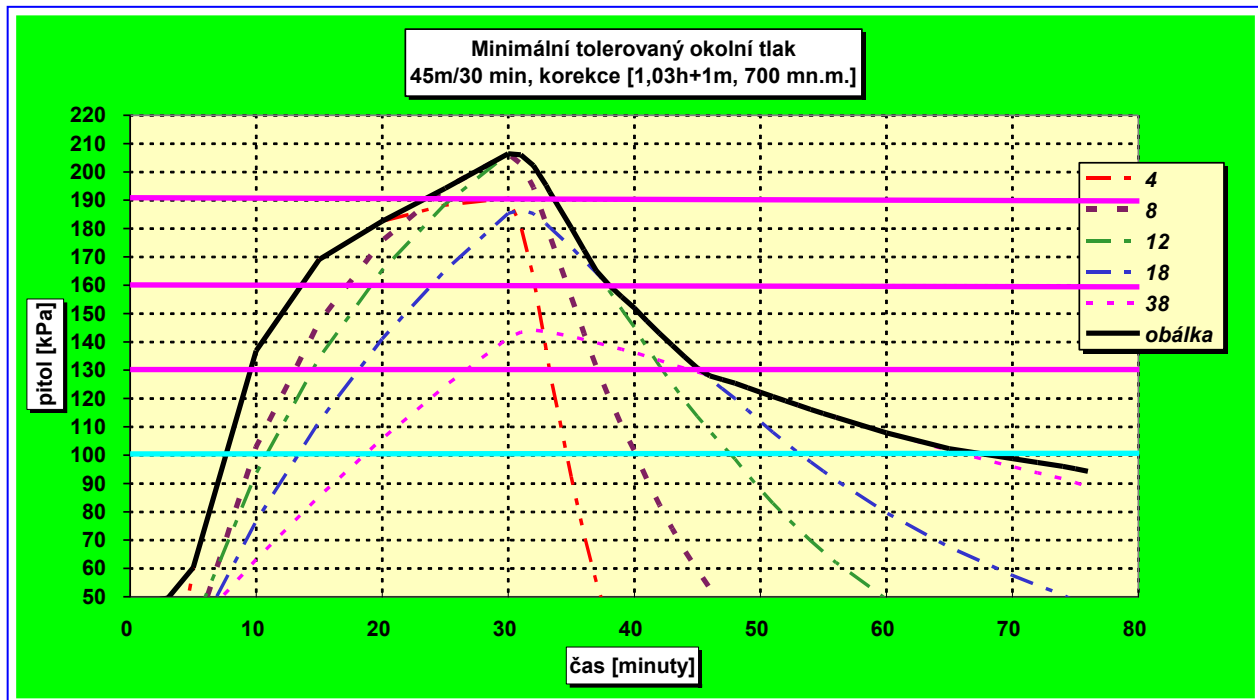
Tabulky současně platí až do nadmořské výšky 700 m, v níž je tlak menší, než u hladiny moře. Aby však platily v tak širokém rozmezí, musel být brán v úvahu tlak u hladiny moře (101,3 kPa) k výpočtům alveolárního tlaku p_A pro saturaci (ponor) a výstup, avšak v přípustném tlaku okolí p_{itol} je nutno brát v úvahu to, že tlak u hladiny odpovídá nadmořské výšce 700 m, tj. 93 ± 4 kPa. Dle literatury byl za základ vzat tlak 0,95 baru, tj. 95 kPa. Pak tlak v hloubce dekompresních zastávek musí být příslušně modifikován a například v 6 m je roven nikoliv 160 kPa (případně 161) nýbrž jen 155 kPa (tj. 95 + 60 kPa). Podobně je nutno modifikovat přípustné tlaky v hloubkách zastávek a například pro tkáň č. 4 místo původních hodnot musíme pro hladinu počítat s přípustným tlakem 203,2 kPa (původně 209,3), pro 3 m s 239,5 kPa (původně 245,6) atd. Tím se pochopitelně prodlouží i doba výdrží na dekompresních zastávkách.

Saturace v průběhu ponoru a desaturace při výstupu spolu s výsledným průběhem ponoru jsou schematicky znázorněny v obrázcích. Na obr. 2 je znázorněn časový průběh parciálních tlaků dusíku v některých tkáních při sestupu, pobytu v hloubce a při vynořování.

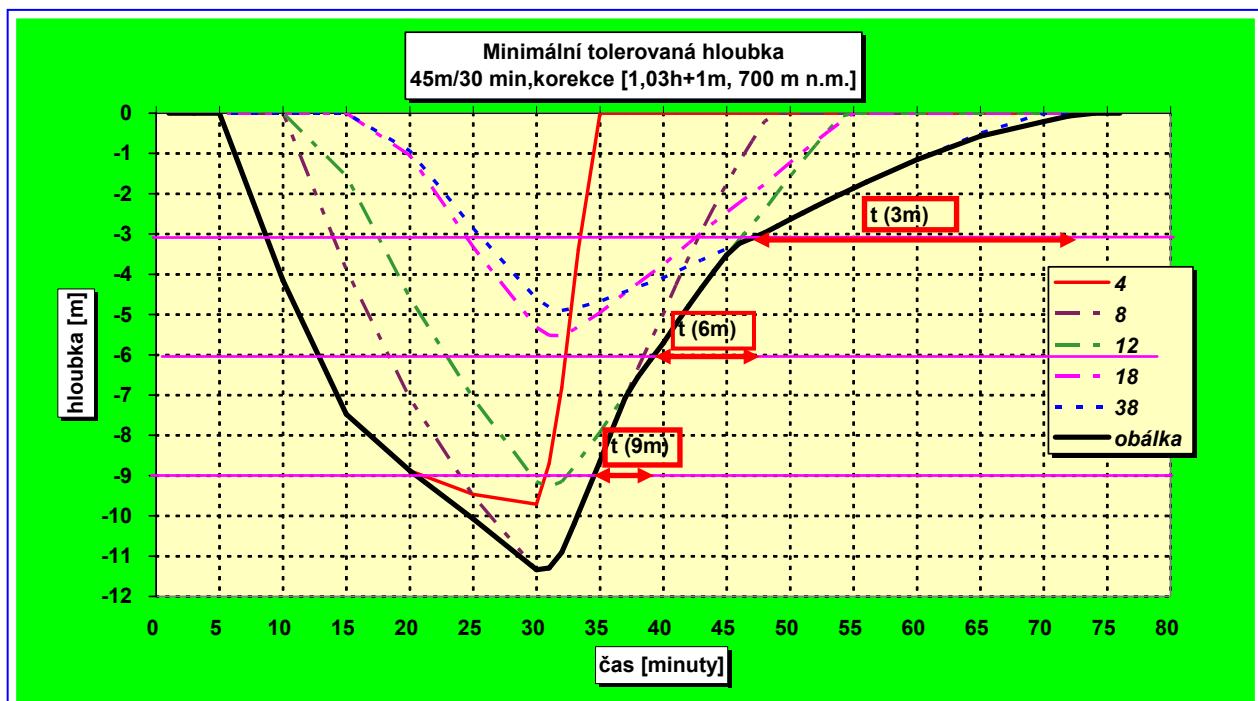


Obr. 2: Časový průběh parciálního tlaku dusíku v některých tkáních.

Na obr. 3 je schematicky znázorněn vliv tkání a přípustných tlaků v nich na způsob výstupu. Obálkou se rozumí hodnoty přípustného tlaku, do něhož lze vystoupit, když se bere v úvahu všech 16 tkání. V obrázku 4 je v podstatě totéž, avšak na ose Y jsou místo tlaků přímo vyneseny hloubky, do nichž je možno vystoupit.

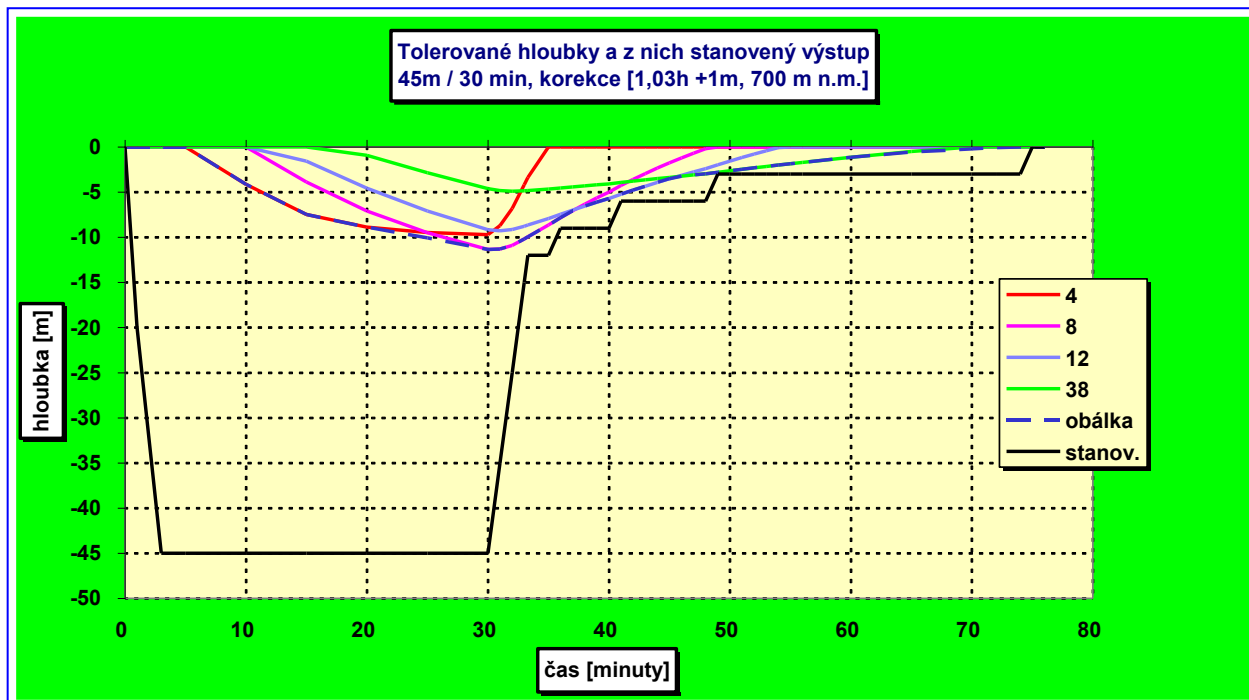


Obr. 3: Minimální přípustný okolní tlak, do kterého je možno vystoupit.



Obr. 4: Nejmenší přípustná hloubka, do níž je možno vystoupit a časy na ní

Na obrázku 5 je pak znázorněno schéma celého ponoru.



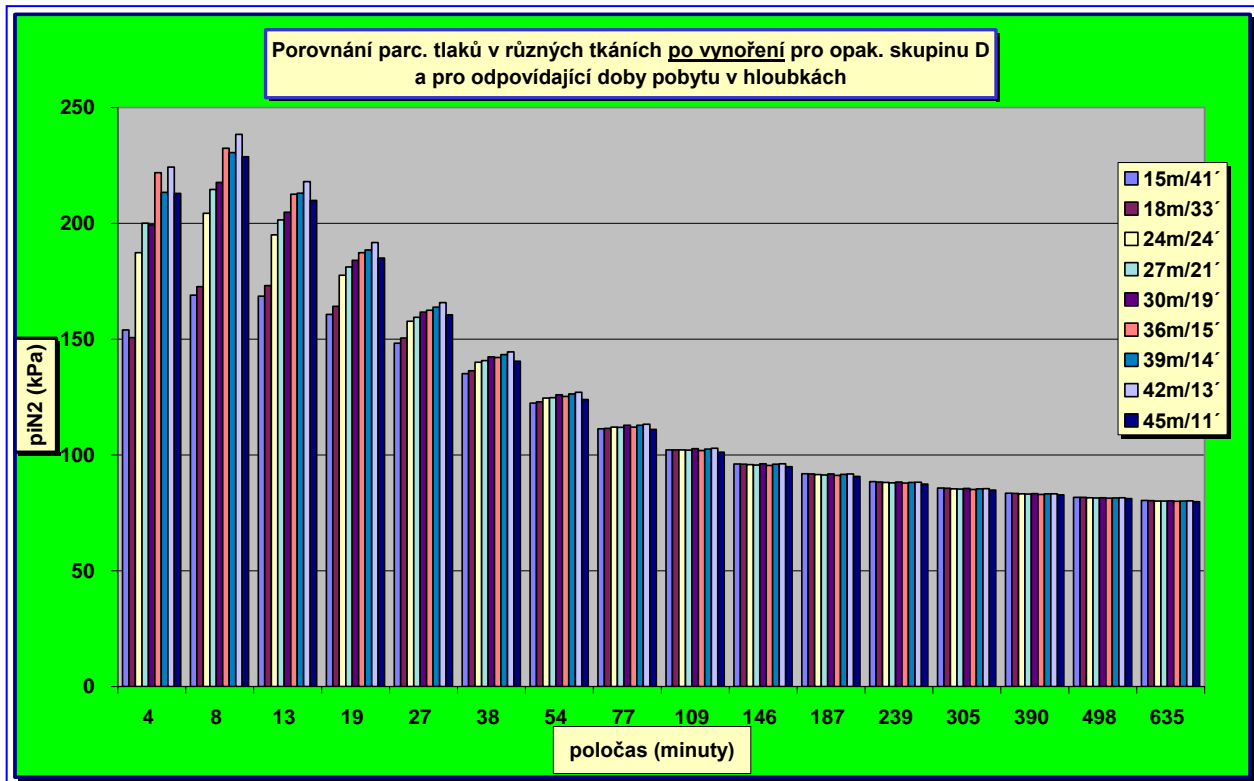
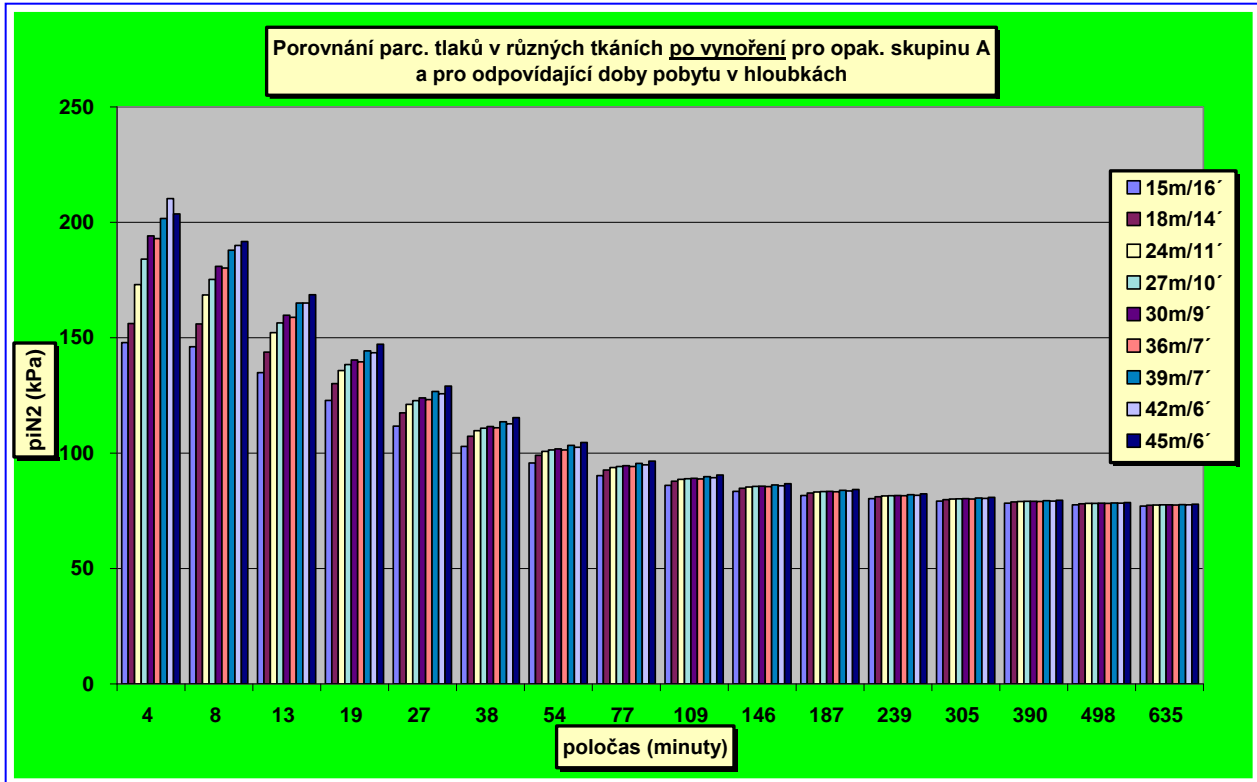
Obr. 5: Průběh ponoru s tolerovanými hloubkami pro některé tkáně a se stupňovitými zastávkami.

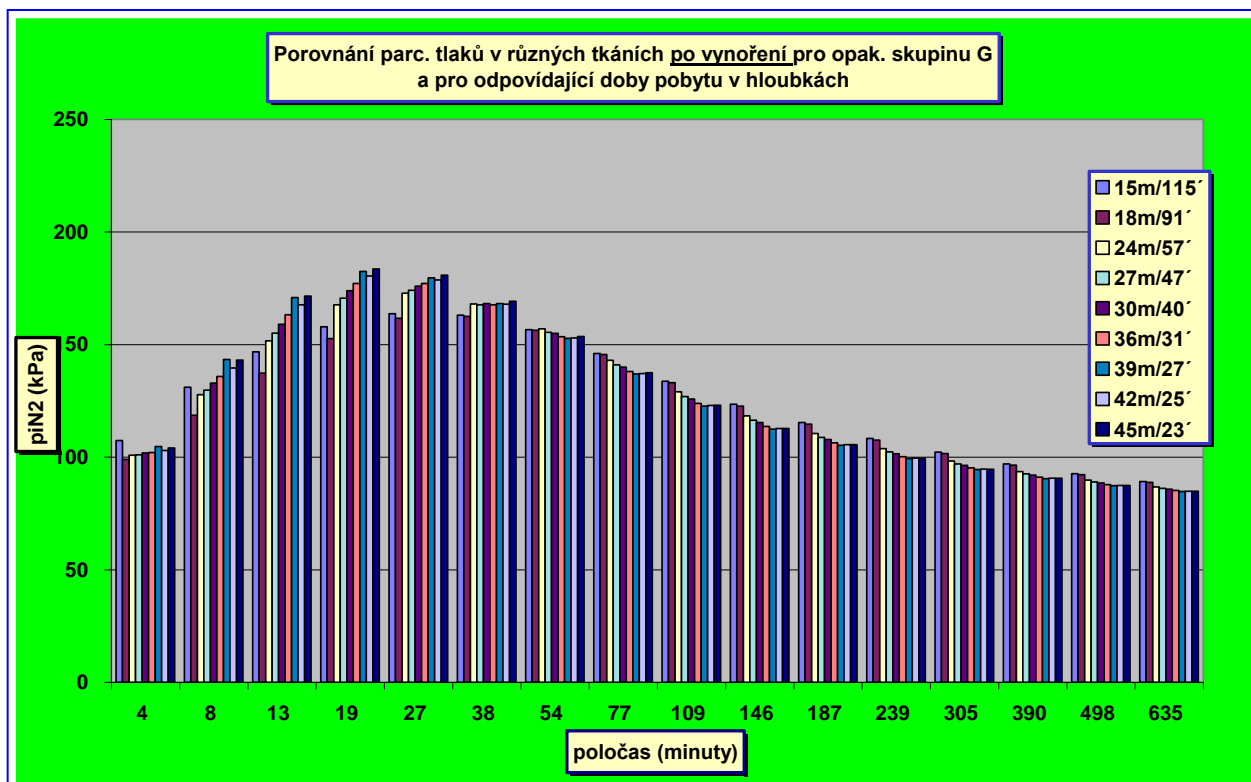
III.7. Opakovací skupiny.

Již z obr. 2 je vidět, že i po výstupu obsahují obzvláště pomalé tkáně značný přetlak dusíku vůči jeho alveolárnímu tlaku a jejich desaturace pokračuje dále. Opakovací skupina v tabulkách respektuje právě tuto okolnost: říká vlastně symbolem, kolik máme ve tkáních rozpuštěného dusíku. Skutečně, v tabulce časových přírážek jsou uvedeny k **jednotlivým opakovacím skupinám a hloubkám takové doby pobytu, po nichž by bylo v jednotlivých tkáních rozpuštěno stejné množství dusíku.** Porovnání pro skupiny A, D a G lze nalézt v obrázcích 6, 7 a 8.

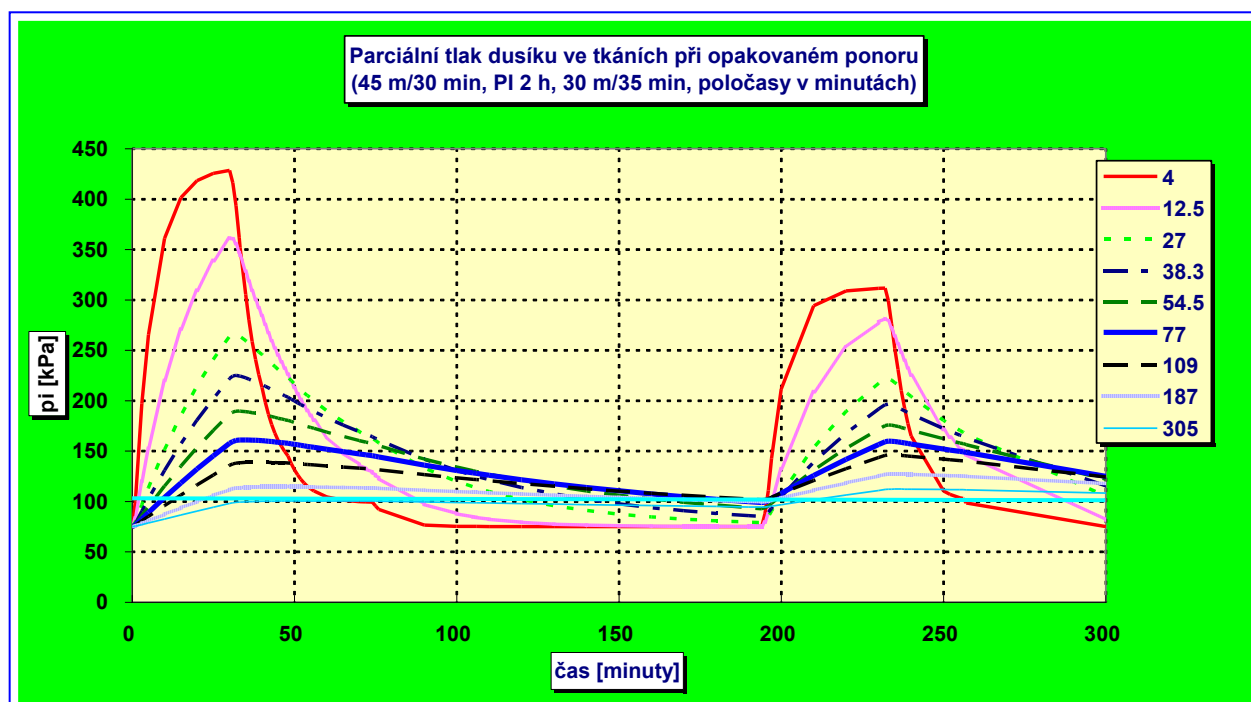
Při pobytu na hladině – v normálním tlaku – se toto množství postupně snižuje. V tabulce povrchových intervalů je tedy vlastně uvedeno toto snižování v závislosti na čase. Pro případný další ponor je zapotřebí brát zbytkový dusík ve tkáních v úvahu, jak je to schematicky znázorněno na obr. 9, kdy k dalšímu ponoru dochází po povrchovém

intervalu 2 hodiny. Jen v menším počtu (rychlejších) tkání se parciální tlak dusíku po této době vyrovná s alveolárním (tj. poklesne na 75 kPa).





Obrázky 6 - 8. Porovnání parciálních tlaků dusíku v jednotlivých tkáních po pobytu v hloubce na daný čas na dně, dekompresi a po vynoření pro opakovací skupiny „A“, „D“ a „G“ z tabulky časových přírážek.

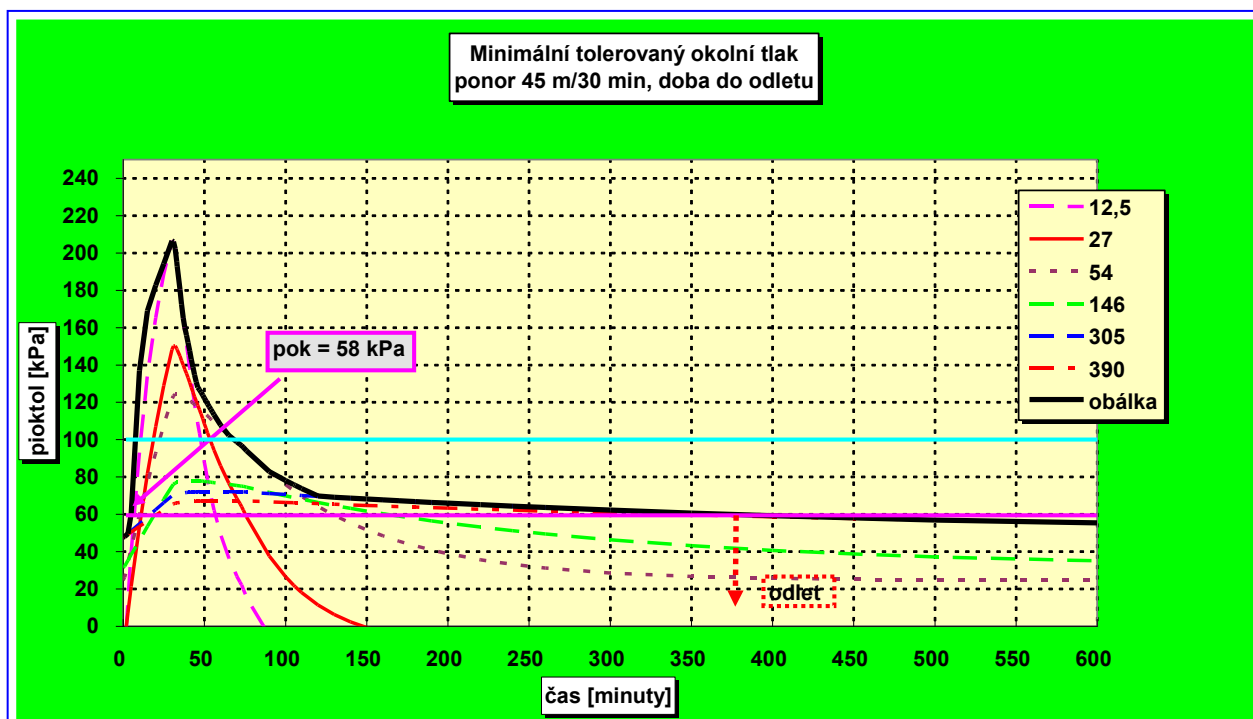


Obr. 9.: Parciální tlaky dusíku ve vybraných tkáních v průběhu ponorů i povrchového intervalu.

III.8. Snižování tlaku po ponoru.

Podobně je nutno vzít v úvahu skutečnost, že při snížení okolního tlaku po předchozím ponoru může dojít k tomu, že některá z tkání dosáhne kritického přesycení. Ke snížení okolního tlaku dochází při letech letadly a při průjezdech horskými průsmyky.

V přetlakové kabině větších dopravních letadel, letících ve výškách okolo 10 km se snižuje z bezpečnostních důvodů tlak vzduchu na minimální hodnotu asi 73 kPa. Hodnota 62 kPa je již považována za havarijní (ze schránek vypadávají kyslíkové masky). V tabulkách uváděný údaj o intervalu do odletu je vlastně maximální z desaturačních časů, po kterém parciální tlak dusíku ve všech uvažovaných tkáních poklesne pod kritickou hodnotu přiřazenou zde použitému tlaku 58 kPa, jak je znázorněno na obr.10.



Obr.10: Minimální tolerovaný tlak při ponoru a po vynoření, omezující odlet (ten se smí uskutečnit až po poklesu všemi tkáněmi tolerovaných okolních tlaků pod 58 kPa).

Podobným způsobem byly stanovovány i intervaly do průjezdů horskými průsmyky nebo pro lety bez přetlakové kabiny. Dané nadmořské výšce je přiřazen určitý tlak a doba do jeho dosažení je současně dobou desaturace na přípustnou kritickou hodnotu, odpovídající tomuto tlaku.

Výpočty pro ponory ve větších nadmořských výškách, uvedené ve druhé základní tabulce (pro ponory ve výškách 701 - 2500 m n.m.), jsou prováděny obdobně jako pro výšky do 700 m n.m. Jediné, co se změnilo, je atmosférický tlak. Proto je zapotřebí - stejně jako v předchozím - pro údaje pro alveolární tlak brát nejvyšší tlak (ve výšce 700 m n.m.) a pro výpočet kritického přípustného tlaku ve tkáních na zastávkách používat tlaku v největší nadmořské výšce (2500 m n.m.). Pro jemnější odstupňování desaturace (uvědomme si, že rychlost desaturace je tím větší, čím větší je rozdíl tlaků mezi dusíkem ve tkáních a vdechovaným) jsou využity dekompresní zastávky ve 4 a 2 metrech, které navíc z hlediska podílu tlaků na zastávkách k tlaku na hladině odpovídají původním stupňům.

IV. Závěr.

K dekompresním postupům patří i upozornění na vhodnost využívání nulových časů, a to obzvláště při opakovaných ponorech a rovněž na to, aby se potápěči vyvarovali častého střídání hloubek ve smyslu „yo-yo diving“. Aniž bychom zabíhali do detailů, které znají lépe specialisté, je vhodné na tomto místě upozornit na to, že tiché bubliny, na kterých se mohou uchycovat jemné krevní sraženiny, se při dalším ponoru nemusí zcela eliminovat. Naopak, stávají se vhodným místem pro tvorbu a růst dalších bublin při opětovném výstupu. Některé modely, využívané v dekompresních počítačích, tento faktor zohledňují. Jiné modely zase používají pro desaturaci pro stejnou tkáň prodloužený poločas desaturace oproti původnímu poločasu sycení, z čehož pak rovněž vycházejí delší dekompresní časy.

Modelů simulujících procesy sycení a desaturace lidského organismu je celá řada. Využívají jich konstruktéři jednotlivých dekompresních tabulek i dekompresních počítačů, avšak základní otázkou vždy je

- za jakých podmínek mají sloužit, tj. komu, v jakém rozmezí hloubek a časů atd.
- nakolik jsou podloženy empirií (simulovanými nebo skutečnými ponory).

Žádné tabulky nemohou zaručit zcela stoprocentní úspěšnost, tj. absolutní jistotu, že jejich dodržení nebude mít za následek dekompresní problémy. Procesy probíhající v tak složitém systému, jakým je lidské tělo, a to obzvláště ty, které probíhají po vzniku bublinky, nelze beze zbytku jednoduchými modely postihnout. Některé faktory, např. cévní zkratky v plicích či průchozí foramen ovale (PFO), vyskytující se údajně až u třetiny lidské populace a umožňující prostup bublin z žilní krve do tepenné, jsou zcela nepostižitelné. Avšak skutečnost, že tabulky vyvedou bezpečně na hladinu každodenně tisíce potápěčích se jedinců, nás opravňuje k opatrnému optimismu.

Každý model má však rovněž své hranice, na nichž se pravděpodobnost výskytu problémů blíží k jistotě. Proto je vhodné držet se od těchto mezí co nejdále.

Uvedme ještě několik pravidel, jimiž by se měl rozumný potápěč řídit:

- při jednoduchém ponoru by mělo být největší hloubky dosaženo na začátku ponoru a hloubka by se měla postupně snižovat (rychlejší tkáně se tedy postupně desaturují).

- podobné pravidlo platí i při opakovaných ponorech: nejhlubší by měl být první ponor.

- prochlazení a fyzická práce zvyšují množství rozpuštěných plynů ve tkáních, ať už jejich zvýšenou rozpustností nebo větším prokrvením, a proto je nutno dekompresní postup modifikovat.

- při provádění dekomprese a především po výstupu z vody by měl potápěč omezit svoji fyzickou aktivitu. Zrychlení oběhu krve sice zrychlí desaturaci, avšak zvětší i výskyt bublinek v krvi a rovněž zvětší pravděpodobnost jejich tvorby v místech zrychleného proudění krve.

- zpětné zanoření po určité době strávené na hladině (větší než cca 5 minut) může způsobit zmenšení a protlačení již vzniklé bublinky z plicní "záchytné sítě" do okysličené krve a dále do velkého krevního oběhu (dle obecně platného zákona schválnosti se taková bublinka vždy dostane do těch míst, kde způsobí největší možné poškození). Pravděpodobnost tohoto prostupu se zvětšuje při plicních cévních zkratech a navíc při pravolevém zkratu v srdci (PFO) rovněž použitím Valsalvova manévru, zvyšujícím tlak v pravé srdeční síni.

- opětovné střídání hloubek nebo dokonce opětovné vynořování a zanořování do větších hloubek (jojo potápění) je předchozímu způsobu blízké.

- jakékoliv škrcení cév vnějším stlačením výstrojí zvětšuje pravděpodobnost lokálního výskytu bublin (otoky).

- před ponorem je vhodné dostatečně zavodnit organismus pitím nápojů bez rozpuštěných přísad (ani slazenými nebo sycenými CO₂), nejlépe tzv. izotonickým nápojem nebo čistou vodou (zlepšíme kapacitu oběhového systému pro přenos dusíku).

- alkohol a cigarety nepůsobí příznivě ani před ponorem ani po něm (přínejmenším svým protichůdným vlivem na krevní oběh).

- dýchání směsi se sníženým podílem inertního plynu (dusíku) na dekompresní zastávce usnadňuje vylučování rozpuštěného plynu z organismu zvýšeným tlakovým spádem. Je-li možno použít čistý kyslík, je to ještě výhodnější.

Literární odkazy.

A.A.Bühlmann: Dekompresion und Dekompresionskrankheit , Springer, 1984

(v anglické verzi Decompression and Decompression Sicknes, Springer, 1984, ISBN 0387133089)

Dekompresní tabulky Schweizer Unterwasser-Sport-Verband

<http://www.deepdiving.net/tools/deco.html>

Doplnění: poznámky k tabulkám Bühlmann, model ZHL16B.

D.1. Úvod.

Původní model ZHL 12 byl po několika letech dalších výzkumů zpřesněn a rozšířen, mj. i proto, aby mohl být aplikován na potápění se směsmi plynů, hlavně s trimixem. Model byl nazván ZHL16 a byl vypracován ve třech modifikacích (ZHL16A, B, C). K výpočtu dekompresních tabulek je vhodný model ZHL16B. Novější koeficienty přípustného přesycení modelu jsou pak uvedeny v následující tabulce (Tab. D.1.):

| <i>Komp.</i> | N₂ | | | He | | |
|--------------|-------------------------------|----------------|----------|-------------------------------|----------------|----------|
| | <i>t</i> _{1/2} (min) | <i>a</i> (bar) | <i>b</i> | <i>t</i> _{1/2} (min) | <i>a</i> (bar) | <i>b</i> |
| 1 | 5,0 | 1,1672 | 0,5577 | 1,88 | 1,6236 | 0,4770 |
| 2 | 8,0 | 1,0048 | 0,6514 | 3,02 | 1,38 | 0,5747 |
| 3 | 12,5 | 0,8653 | 0,7222 | 4,72 | 1,1879 | 0,6527 |
| 4 | 18,5 | 0,7562 | 0,7825 | 6,99 | 1,046 | 0,7225 |
| 5 | 27,0 | 0,6694 | 0,8126 | 10,21 | 0,9211 | 0,7582 |
| 6 | 38,3 | 0,5643 | 0,8434 | 14,48 | 0,8232 | 0,7957 |
| 7 | 54,3 | 0,4996 | 0,8693 | 20,53 | 0,7321 | 0,8279 |
| 8 | 77,0 | 0,4477 | 0,8910 | 29,11 | 0,6508 | 0,8553 |
| 9 | 109,0 | 0,4201 | 0,9092 | 41,2 | 0,5981 | 0,8757 |
| 10 | 146,0 | 0,3756 | 0,9222 | 55,19 | 0,5568 | 0,8903 |
| 11 | 187,0 | 0,3469 | 0,9319 | 70,69 | 0,5285 | 0,8997 |
| 12 | 239,0 | 0,3265 | 0,9403 | 90,34 | 0,5178 | 0,9073 |
| 13 | 305,0 | 0,2848 | 0,9477 | 115,29 | 0,5137 | 0,9122 |
| 14 | 390,0 | 0,2722 | 0,9544 | 147,42 | 0,5196 | 0,9171 |
| 15 | 498,0 | 0,2486 | 0,9602 | 188,24 | 0,515 | 0,9217 |
| 16 | 635,0 | 0,2341 | 0,9653 | 240,03 | 0,5109 | 0,9267 |

Tab. D1. Koeficienty přípustného přesycení. K přepočtu na kPa je třeba hodnoty *a* vynásobit číslem 100 !

Příklad : Tkáň č. 5 ($t_{1/2} = 27,0$ min) byla v hloubce nasycena dusíkem na parciální tlak 332 kPa. Do jaké hloubky by směl potápeč s ohledem na tuto tkáň bez obav vystoupit ?

Řešení : $p_{5tol} = (332 - 66,9) \cdot 0,813 = 215,5$ kPa, což odpovídá hloubce $11,6 \approx 12$ metrů.

Hodnoty koeficientů a a b lze rovněž přibližně stanovit pomocí vztahů

$$a = 2 \cdot t_{1/2}^{-1/3} \text{ barů}, \quad b = 1,005 - t_{1/2}^{-1/2}.$$

D.2. Rozšíření Bühlmannova modelu na směsi plynů.

Pokud jde o směs více plynů, pak se jednotlivé inertní plyny v ní chovají podle Daltonova zákona a jejich celkový tlak v ní se počítá ze součtu jejich parciálních tlaků:

$$p_i(t) = \sum_j p_i^j(t),$$

v němž index i označuje tkáň a index j druh plynu. V případě trimixu tedy platí vztah:

$$p_i(t) = p_i^{N_2}(t) + p_i^{He}(t).$$

Pro tolerovaný přetlak inertních plynů ve tkáni platí rovněž vztah

$$p_{itol} = (p_i(t) - a_i) \cdot b_i,$$

kde ovšem koeficienty a_i a b_i je nutno stanovit, což se děje obvykle pomocí vztahů:

$$a_i = \sum_j \frac{p_i^j}{p} \cdot a_j, \quad b_i = \sum_j \frac{p_i^j}{p} \cdot b_j,$$

ve kterých p je součet parciálních tlaků všech fyziologicky inertních plynů ve tkáni. Zde p_i^j jsou aktuální parciální tlaky jednotlivých plynů ve tkáni - mění se tudíž s časem, jak je ostatně naznačeno výše. (Vztah někdy bývá používán tak, že p_i^j , tedy spíše p^j , jsou parciální tlaky plynů ve vdechované směsi a p jejich součet. Pak jsou ve stálém poměru a vztah lze přepsat do tvaru, ve kterém tlaky plynů nahradíme jejich stálými podíly f_j ve směsi).

Při použití směsi se 2 inertními plyny jako trimix (pak přejdeme k označení indexy N_2 a He) obdržíme

$$a_i = \frac{p_i^{N_2}}{p_i^{N_2} + p_i^{He}} \cdot a_i^{N_2} + \frac{p_i^{He}}{p_i^{N_2} + p_i^{He}} \cdot a_i^{He}, \quad b_i = \frac{p_i^{N_2}}{p_i^{N_2} + p_i^{He}} \cdot b_i^{N_2} + \frac{p_i^{He}}{p_i^{N_2} + p_i^{He}} \cdot b_i^{He}$$

a po úpravě přehledněji

$$a_i = \frac{p_i^{N_2} \cdot a_i^{N_2} + p_i^{He} \cdot a_i^{He}}{p_i^{N_2} + p_i^{He}}, \quad b_i = \frac{p_i^{N_2} \cdot b_i^{N_2} + p_i^{He} \cdot b_i^{He}}{p_i^{N_2} + p_i^{He}}.$$

Pro směs TMX 18/45 je $f_{He} = 0,45$ a $f_{N_2} = (1 - 0,18 - 0,45) = 0,37$. Předpokládejme rychlý sestup do 70 metrů. Dojde k sycení tkání každým z plynů dle rovnice

$$p_i^j = (p_A - p_0) \cdot (1 - 2^{-t/t_{1/2}}) + p_0.$$

Pro dusík lze v 70 metrech stanovit $p_A = (8 - 0,063) \cdot 0,37 = 2,937$ barů a $p_0 = 0,75$ barů a pro hélium: $p_A = (8 - 0,063) \cdot 0,45 = 3,572$ barů a $p_0 = 0$. Pro tkáň č. 5 je poločas sycení dusíku $t_{5/2}^{N_2} = 27$ minut a pro hélium $t_{5/2}^{He} = 10,21$ minut. Parciální tlak dusíku v této tkáni po 20 minutách by byl 1,6283 barů a hélia 2,5351 barů. Jejich celkový tlak by tedy byl součtem obou, tedy 4,1634 barů. Dále pro tkáň č. 5 máme $a_5^{N_2} = 0,6694$, $b_5^{N_2} = 0,8126$, $a_5^{He} = 0,9211$ a $b_5^{He} = 0,7582$. Dle předchozího vztahu tedy je $a_5 = (1,6283 \cdot 0,6694 + 2,5351 \cdot 0,9211) / 4,1634 = \underline{0,82266}$ barů a $b_5 = (1,6283 \cdot 0,8126 + 2,5351 \cdot 0,7582) / 4,1634 = \underline{0,7795}$.

(Pokud bychom se přiklonili k použití objemových podílů f_j , obdržíme pro trimix

$$a_i = \frac{f_{N_2}}{f_{N_2} + f_{He}} \cdot a_i^{N_2} + \frac{f_{He}}{f_{N_2} + f_{He}} \cdot a_i^{He}, \quad b_i = \frac{f_{N_2}}{f_{N_2} + f_{He}} \cdot b_i^{N_2} + \frac{f_{He}}{f_{N_2} + f_{He}} \cdot b_i^{He}$$

a po úpravě přehledněji

$$\boxed{a_i = \frac{f_{N_2} \cdot a_i^{N_2} + f_{He} \cdot a_i^{He}}{f_{N_2} + f_{He}}}, \quad \boxed{b_i = \frac{f_{N_2} \cdot b_i^{N_2} + f_{He} \cdot b_i^{He}}{f_{N_2} + f_{He}}}.$$

Potom pro směs TMX 18/45 je $f_{He} = 0,45$ a $f_{N_2} = (1 - 0,18 - 0,45) = 0,37$ a součet $f_{He} + f_{N_2}$ dává 0,82. Pro tkáň č. 5 máme $a_5^{N_2} = 0,6694$, $b_5^{N_2} = 0,8126$, $a_5^{He} = 0,9211$ a $b_5^{He} = 0,7582$ a dosazením do předchozích vztahů dostáváme: $a_5 = (0,37 \cdot 0,6694 + 0,45 \cdot 0,9211) / 0,82 = \underline{0,8075}$ barů a pro $b_5 = (0,37 \cdot 0,8126 + 0,45 \cdot 0,7582) / 0,82 = \underline{0,7827}$. Vidíme, že výsledky se v tomto případě liší jen velmi málo.)

D.3. Další rozšíření modelu - hloubkové zastávky a gradientní faktory.

Při výstupech z větších hloubek za použití hélia bylo zjištěno, že slabší symptomy dekompresního syndromu se mohou vytratit, pokud se potápeč zastaví na nějakou dobu ve větší hloubce. Klasický případ a jeho řešení bylo prezentováno R. Pylem, který tento postup dodržoval původně kvůli nutnosti propíchnout vzduchový měchýř ryb, vynášených z velkých hloubek na hladinu.

Z hlediska haldaneovského (tedy i Bühlmannova) modelu to však zní protismyslně, jelikož každé zdržení v hloubce jen zvětší saturaci tkání. Z tohoto důvodu tento model preferuje poměrně rychlý výstup do nejmenší přípustné hloubky a tím i

žádoucí zvětšení gradientu (rozdílu tlaku inertních plynů ve tkáních a v alveolách) pro desaturaci.

Přitom však procedury se zdržením v hloubce a zkrácenou dekompresí u hladiny byly dokonce v důsledku způsobů činností pod vodou a dlouholetých zkušeností intuitivně vyvinuty na více místech zeměkoule, např. v Tichomoří i ve Středomoří.

Pravděpodobné vysvětlení příznivého vlivu hloubkových zastávek je v tom, že zárodky mikrobublinek, ať už vznikající nebo předem existující a po zahájení výstupu rostoucí hlavně v rychlých tkáních (v krvi) - a nezapomeňme, že hélium navíc difunduje 2,6krát rychleji - tedy tyto zárodky mají na hloubkových zastávkách možnost znovu se rozpustit. Takovou eventualitu připouštějí některé modely, pracující s kritickým objemem bublin.

Bühlmannův model, pracující s kritickým přesycením (tj. s inertními plyny v rozpuštěném stavu, nikoliv v plynném), však rovněž určitou možnost nabízí (i když to nebyl samotný pan Bühlmann, kdo toho využil, nýbrž Eric C. Baker). Ve stavu značného přesycení se po zahájení výstupu nacházejí rychlé tkáně. Proto je vhodné využít po zahájení výstupu jen určitou část tlakového rozdílu, který nám model pro desaturaci nabízí.

Příklad: Mějme znovu směs TMX 18/45, kdy $f_{He} = 0,45$ a $f_{N_2} = (1 - 0,18 - 0,45) = 0,37$ a součet $f_{He} + f_{N_2}$ dává 0,82. Po ponoru do 70 metrů (8 barů) na 20 minut budou ve tkáni č.1 (poločasy 5 a 1,88 minut) parciální tlaky inertních plynů $p_{N_2} = 2,87$ baru a $p_{He} = 3,57$ baru. Jejich součet dává celkový parciální tlak 6,44 baru. Výpočet koeficientů a_1 a b_1 pak dává $a_1 = 1,420$ baru a $b_1 = 0,513$. Pak tolerovaný okolní tlak pro tuto tkáň by byl 2,57 barů a směli bychom tudíž vystoupit do 16 metrů. Řídicí tkání je však tkáň č. 2, v níž je celkový parciální tlak 6,10 baru a ta v tomto okamžiku toleruje okolní tlak 2,96 baru, tudíž hloubku 20 metrů. Při třímetrovém odstupňování dekompresních zastávek by tedy bylo nutno první zastávku vykonat v hloubce 21 metrů. Pokud bychom však z důvodu bezpečnosti využili pouze 30 % gradientu (rozdíl mezi tlakem inertních složek ve tkáni a okolním tolerovaným tlakem), uvedená tkáň by nás zastavila již v hloubce o tlaku $2,96 + (6,10 - 2,96) \cdot (1 - 0,3) = 5,16$ baru, tj. ve 42 metrech. Nicméně v

průběhu výstupu rychlé tkáně současně rychle desaturují a detailnější výpočet by vedl k hloubkové zastávce v asi 36 metrech.

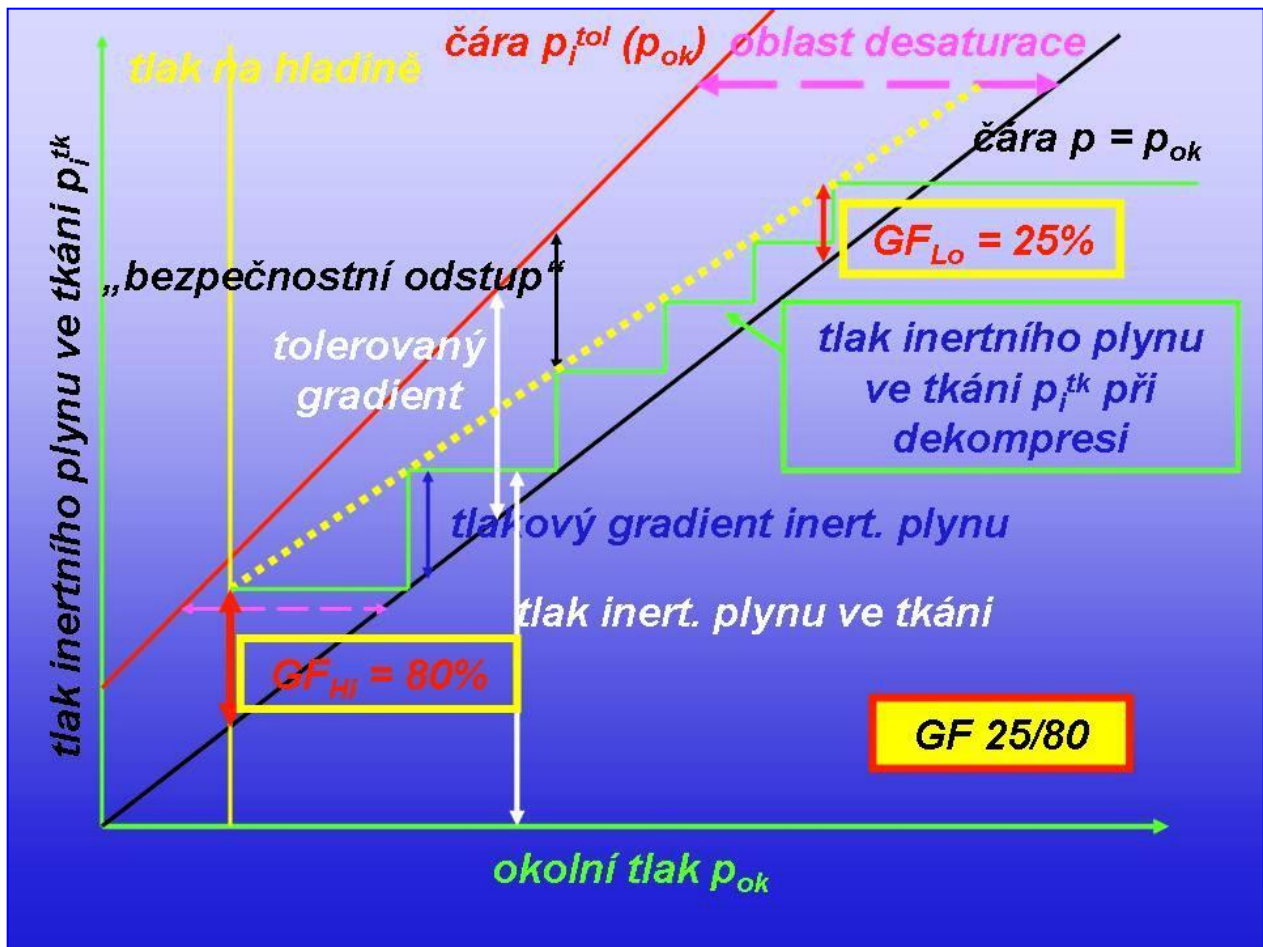
Gradientním faktorem (GF) se tedy rozumí procentuální podíl využitého přípustného rozdílu tlaku: při GF = 100 % (příp. gf = 1,0) se nacházíme přímo na Buhlmannově hodnotě přípustného přesycení, při GF = 80 % (= 0,8) využíváme pouze 80 % přípustného tlakového gradientu a při GF = 30 % (= 0,3) jen jeho 30 %. V některých dekompresních algoritmech bývá např. GF = 80 % využito ke zvýšení bezpečnosti modelu.

Jestliže bychom použili např. GF = 5%, nacházeli bychom se v dekompresním režimu velmi blízkém rovnovážnému stavu (GF = 0) – desaturace by probíhala velice pomalu. Podobná situace nastává při dekompresi po saturačních ponorech.

Při postupném výstupu, kdy se řídicími tkáněmi stávají tkáně s většími poločasů sycení, je možno postupně uvedené gradientní faktory zvyšovat například z původních 30 % až k 80 % na hladině. Pak se gradientní faktor označuje dvojčiferně jako GF30/80, případně GFLo = 30 %, GFHi = 80 %. Znamená to, že při postupném výstupu se mění hodnota gradientního faktoru s hloubkou rovnoměrně od 30 % na první zastávce až k 80 % na hladině.

Zmenšení hodnot GF každopádně prodlouží doby dekomprese. GFLo (např. GFLo = 15 %) generuje hloubkovou zastávku dříve (ve větší hloubce, odpovídající 15 % přípustného gradientu) a pobyt na ní vede k další saturaci pomalých tkání, zmenšení GFHi (např. GFHi = 70 %) prodlouží pobyty v menších hloubkách.

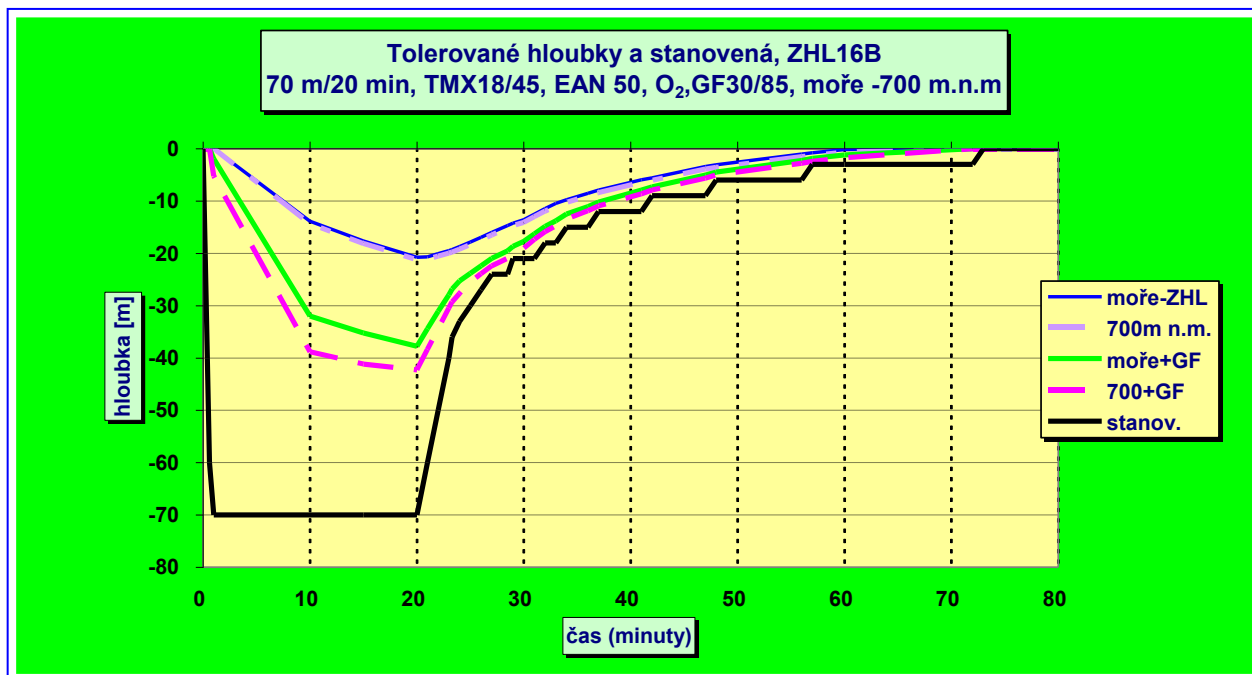
Hloubkové zastávky jsou tedy generovány výpočtem zcela přirozeným způsobem (viz obr. 11.).



Obr.11. K odvození hloubkových zastávek z aplikace gradientních faktorů na jednu tkáň.

Obrázek 12 graficky znázorňuje průběh trimixového ponoru do 70 metrů na 20 minut a stanoveného výstupu s použitím směsi Nitrox 50/50 od 21 metrů a čistého kyslíku od 6 metrů. Jsou zde vyneseny grafy tolerovaných hloubek za několika podmínek.

"Hloubkové" zastávky a vliv rychlosti výstupu na výskyt mikrobublin měřených dopplerovskou sonografií po ponorech se vzduchem do 25 metrů byly tématy práce (Maronni a spol.: *Undersea Hyperb. Medic. 2004,31(2),pp.23-243*), již se účastnilo 22 potápěčů na 181 ponorech. Byly prováděny 2 ponory, a sice na 25 minut a 20 minut s povrchovým intervalem 3,5 hodiny s rychlostmi výstupu 3, 10 a 18 m/min zkombinovanými s výstupy a) bez zastávek, b) s "mělkou" zastávkou v 6 metrech a c) s "hloubkovou" zastávkou v 15 metrech na 5 minut. Výsledky ukázaly, že nejvíce bublin bylo zaregistrováno po nejpomalejší rychlosti výstupu 3 m/min. Naopak nejméně bublin se naměřilo při rychlosti výstupu 10 m/min a při dodržení "hloubkové" zastávky v 15 metrech a "mělké" v 6 metrech, a sice vždy na dobu 5 minut. Tyto výsledky také ukázaly na značně odlišné dekompresní zatížení rychlých tkání (s poločasy 5 a 10 minut), přiřazovaných míše. Využití uvedených výsledků, tedy použití nejpříznivější kombinace při výstupu, by tudíž mohlo značně snížit počet výskytu nervové formy dekompresní nemoci.



Obr. 11. Znáornění tolerovaných hloubek dle základního Bühlmannova modelu a modelu modifikovaného pomocí gradientního faktoru po ponoru s trimixem a s dekompresí s nitroxem a čistým kyslíkem.

Další odkazy (i na „bublínkové“ modely):

<ftp://ftp.decompression.org/pub/Baker/Deep%20Stops.pdf>

http://www.decompression.org/maiken/Bubble_Decompression_Strategies.htm

<http://www.deepdiving.net/tools/deco.html>

<http://www.scuba-doc.com/rgbm.pdf>