

# **Effetti della saturazione in immersione: il modello ZH-L16 - funzionamento dei computer da immersione.**

di [Kai Schröder](#) e [Steffen Reith](#)

traduzione italiana di

[Saro Ledda](#),

14 Dicembre 2000.

Le spiegazioni e gli esempi che seguono sono presentati, in coscienza degli autori e del traduttore, al meglio delle proprie conoscenze. Comunque non può essere garantita l'assoluta assenza di errori e saremmo quindi grati a chiunque volesse segnalarci le correzioni necessarie al perfezionamento di questo testo.

[Il testo che state leggendo è stato tradotto dalla [versione inglese](#) dell' [originale tedesco](#) NDT]

## **Indice**

- 1 Un paio di spiegazioni preliminari**
- 2 Saturazione e desaturazione dei tessuti**
- 3 Il modello ZH-L16**
- 4 Un breve commento alle tabelle da decompressione**
- 5 Volo dopo l'immersione**
- 6 I limiti del modello**
- 7 Respirare Nitrox invece dell'aria**
  - 7.1 Massima profondità operativa (MOD – maximum operative depth)**
  - 7.2 Quantità ottimale di ossigeno nella miscela di respirazione ("Best Mix")**
  - 7.3 Profondità aria-equivalente (EAD – Equivalent Air Depth)**
- 8 Funzionamento di un computer da immersione – Uno sguardo all'algorithm**
  - 8.1 Uno sguardo**
  - 8.2 Calcolo dell'assorbimento di gas inerte**
  - 8.3 Determinazione della sovrasaturazione massima tollerabile**
- 9 Breve nota sul calcolo del consumo d'aria**
- 10 Qualche commento finale**
- 11 Bibliografia, links**

# 1. Un paio di spiegazioni preliminari

L'aria è composta approssimativamente da 21% di ossigeno (O<sub>2</sub>) e 78% di azoto (N<sub>2</sub>), in percentuali volumetriche. Il rimanente 1% è formato da monossido di carbonio (CO), biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>), vari ossidi di azoto e gas nobili (Elio, Neon, Argon).

Tranne l'ossigeno, tutti questi componenti sono relativamente non reattivi – cioè non reagiscono praticamente con altre molecole – e sono per questo detti "gas inerti". Quando più avanti si parlerà di N<sub>2</sub>, bisognerebbe quindi a rigore menzionare tutti gli altri gas.

Comunque, poiché la proporzione dei rimanenti gas (CO, CO<sub>2</sub>, ossidi di azoto, gas nobili) in aria è molto bassa, questi non hanno una importanza pratica. Quindi il calcolo della saturazione sarà sempre semplificato usando un volume di 79% N<sub>2</sub>.

Nel caso di immersione con miscele come Trimix (ossigeno, azoto ed elio) o Heliox (ossigeno ed elio), a differenza del calcolo per l'aria compressa, l'Elio deve naturalmente essere preso in considerazione nel calcolo!

Il medico svizzero **Albert A. Bühlmann** ha sviluppato il modello **ZH-L16** per calcolare i processi di saturazione nel corpo umano, ed ha pubblicato il suo lavoro nel libro "*Tauchmedizin*", - *Barotrauma, Gasembolie, Dekompression, Dekompressionskrankheit, Dekompressionscomputer* -, pubblicato da [Springer Verlag](#), di cui esiste una edizione riveduta ed ampliata del 1995 e di cui è in preparazione una traduzione in inglese per la 4<sup>a</sup> edizione. In contrasto col vecchio modello che prendeva in considerazione il comportamento di 16 diversi tessuti, il nuovo modello **ZH-L8ADT** ne usa soltanto 8, ma prende in considerazione anche gli effetti della temperatura e dell'affaticamento (dedotto dalla frequenza respiratoria) sott'acqua, come anche della formazione di microbolle.

Tutti i computer per immersione Aladin attualmente prodotti dalla Uwatec utilizzano il modello **ZH-L8ADT**.

Purtroppo questo modello è descritto soltanto molto superficialmente nell'ultima edizione di "Tauchmedizin", e non sono resi noti i parametri quantitativi! :-)

Questo chiaro rifiuto di pubblicare in dettaglio i principi operativi del computer è allineato al comportamento delle altre case produttrici e si spiega con la tutela del segreto industriale, ma è un peccato perché costituisce un ostacolo per lo sviluppo della sicurezza nell'immersione e impedisce inoltre una ricerca indipendente e la verifica dell'efficacia degli algoritmi (e quindi dei computer stessi).

## 2. Saturazione e desaturazione dei tessuti

Immaginiamo di essere stati per alcuni giorni costantemente al livello del mare, per esempio in nord Italia. :-) I vari tessuti del nostro corpo si saranno saturati alla pressione di un'atmosfera ovvero di 1 bar (oscillazioni di pochi Millibar non rivestono qui un'importanza pratica).

Ciò significa che l'assorbimento ed il rilascio dell'azoto sono bilanciati. Quando ci immergiamo, la pressione ambiente cresce rapidamente – molto più che se scendessimo dall'alta montagna in una vallata – in ragione di un'atmosfera ogni 10 metri di profondità.

Non appena ci immergiamo, i nostri tessuti diventano quindi sottosaturati di azoto. Poiché respiriamo aria a pressione ambiente, si crea uno squilibrio fra la pressione parziale dell'azoto presente nell'aria dei nostri polmoni e quella dell'azoto presente nei nostri tessuti.

Quindi il sangue cede ai tessuti più azoto di quanto ne riceva da essi. Questo è il meccanismo della saturazione dei tessuti. La velocità di saturazione di un tessuto è proporzionato alla misura dell'apporto sanguigno.

*I gas inerti sono fisicamente disciolti nel sangue e nei tessuti. L'entità dell'assorbimento ad una data pressione varia con la temperatura (temperature basse favoriscono l'assorbimento). L'azoto è assorbito più facilmente dal grasso che dal sangue e dall'acqua.*

*La circolazione corporea può essere divisa in diversi sistemi paralleli. L'apporto sanguigno nei vari tessuti ed organi varia notevolmente in funzione del peso e dello stato di lavoro di questi. L'apporto sanguigno nel cervello, nella colonna vertebrale, nei reni e nel fegato è costante e tali organi non sono interessati da attività muscolare. Comunque, in presenza di un'attività muscolare, l'apporto sanguigno viene velocemente incrementato (insieme all'assorbimento dell'azoto) con l'espansione dei vasi sanguigni presenti. Contemporaneamente, la circolazione sanguigna nella pelle e nei tessuti adiposi sottostanti cresce per consentire una rapida dissipazione del calore prodotto. Quest'ultimo meccanismo, però, in un organismo immerso in acqua può non attivarsi dato che la dissipazione del calore in acqua è di per sé circa dieci volte più rapida che in aria. Così la circolazione nella pelle può risultare più lenta in acqua che a terra con aria tiepida.*

Se stiamo in profondità molto a lungo (come succede, ad esempio, agli operatori subacquei in saturazione), tutti i nostri tessuti potranno raggiungere la saturazione relativa alla pressione presente alla nostra quota di lavoro.

Dopo di che, in risalita, la situazione viene invertita: la pressione ambiente si riduce ed i nostri tessuti risultano pertanto sovrasaturi di azoto. Perciò (dato che la pressione parziale di N<sub>2</sub> nei polmoni risulta inferiore a quella dei tessuti) l'azoto presente nel sangue viene rilasciato nei polmoni. Se abbiamo seguito una procedura di risalita corretta, i nostri tessuti rilasceranno tutto l'azoto in eccesso dopo una permanenza in superficie di durata adeguata.

I problemi sorgono se la risalita è troppo rapida per un adeguato rilascio dell'azoto. Quindi, insieme alle microbolle (che sono praticamente inevitabili), potranno formarsi altre bolle più grandi, capaci di fermarsi nelle articolazioni, di ostruire arterie, o di "pizzicare" i tessuti nervosi del midollo spinale, meccanismi tipici dell'insorgere dei sintomi dell'MDD (malattia da decompressione).

### 3. Il modello ZH-L16

Il medico svizzero Albert A. Bühlmann stabilì, attraverso lo studio di valori medi rilevati su un ampio campione di esperimenti di camera iperbarica effettuati su volontari, quanta sovrasaturazione può essere tollerata dai diversi tessuti (compartimenti) senza produrre danno.

Egli espresse i risultati dei suoi studi attraverso le seguenti equazioni:

$$p_{amb.tol} = (p_{t.gi} - a) \cdot b \quad (1)$$

oppure

$$p_{t.tol.gi} = (p_{amb} / b) + a \quad (2)$$

$p_{amb.tol}$	pressione ambiente tollerata dal tessuto
$p_{t.gi}$	pressione del gas inerte presente nel tessuto
$p_{t.tol.gi}$	eccesso di pressione del gas inerte tollerato dai tessuti
$p_{amb}$	pressione ambiente corrente
$a, b$	parametri del modello ZH-L16 per ogni tessuto

$a$  ha la stessa unità di misura usata per la pressione e dipende da essa, mentre  $b$  (adimensionale) rappresenta il rapporto nella relazione tra la pressione ambiente  $p_{amb}$  e la pressione del gas inerte presente nel tessuto  $p_{t.gi}$ . La prima equazione mostra qual è la più bassa pressione ambiente tollerabile  $p_{amb.tol}$  con l'attuale pressione di gas inerte presente nei tessuti  $p_{t.gi}$ . La seconda equazione mostra invece quale livello di sovrasaturazione  $p_{t.tol.gi}$  può essere tollerato da un dato tessuto ad una data pressione ambiente  $p_{amb}$ .

La velocità di scambio (in saturazione come in desaturazione) dipende dal dislivello pressorio tra il gas inerte presente nei polmoni e quello presente nei tessuti. Secondo il modello di Bühlmann, la saturazione e la desaturazione dei vari compartimenti possono essere calcolate come segue:

$$p_{t.gi(Te)} = p_{t.gi(T0)} + [p_{R.gi} - p_{t.gi(T0)}] \cdot [1 - 2^{-Te / t_{1/2}}] \quad (3)$$

$p_{t.gi(T0)}$	pressione del gas inerte nel tessuto all'inizio dell'esposizione
$p_{t.gi(Te)}$	pressione del gas inerte nel tessuto alla fine dell'esposizione
$p_{R.gi}$	pressione del gas inerte nella miscela respirata
$Te$	durata dell'esposizione (in minuti)
$t_{1/2}$	emitempo del tessuto (in minuti)

L'equazione (3) è valida soltanto a pressione costante per cui non è applicabile direttamente ad una immersione reale, dato che in questa si verificano continuamente dei cambi di quota e, quindi, di pressione. Si può però suddividere l'intero profilo di una immersione in tante piccole porzioni, ognuna delle quali rappresenti una porzione di tempo trascorsa ad una profondità costante.

Una soluzione più elegante al problema viene dalla seguente equazione (4) dovuta a Schreiner. Essa presume che la discesa e la risalita vengano condotte con *velocità costante*:

$$p_{t.gi(Te)} = p_{R.gi} + r \cdot (Te - 1/k) - [p_{R.gi} - p_{t.gi(T0)} - r/k] \cdot e^{-k \cdot Te} \quad (4)$$

$p_{t,gi}(T0)$	pressione del gas inerte nel tessuto all'inizio dell'esposizione
$p_{t,gi}(Te)$	pressione del gas inerte nel tessuto alla fine dell'esposizione
$p_{R,gi}$	pressione del gas inerte nella miscela respirata
$Te$	durata dell'esposizione (in minuti)
$k$	costante, funzione dell'emitempo, pari a $\ln(2/et)$
$r$	Rapporto tra le pressioni del gas inspirato (ovvero delle pressioni ambientali) all'inizio ed alla fine dell'esposizione. Rappresenta il dislivello (in discesa o in salita).

Con  $r = 0$  l'equazione di Schreiner si riduce all'equazione (3), che è quindi un caso particolare della (4). L'equazione (3) può quindi essere trasformata per calcolare direttamente il tempo di non-decompressione (cioè il tempo che il subacqueo può ancora trascorrere ad un determinato momento di una immersione alla quota corrente prima di dovere iniziare una risalita diretta verso la superficie):

$$"no-stop time" = -t_{1/2} \cdot \log_2 \left[ \frac{p_{R,gi} - p_{t,tol,gi}(Te)}{p_{R,gi} - p_{t,gi}(T0)} \right] \quad (5)$$

$p_{t,tol,gi}(Te)$  massimo eccesso di pressione di gas inerte tollerabile dal tessuto guida in superficie

"no-stop time" è il tempo che il subacqueo può trascorrere ad una certa quota senza essere costretto a soste di decompressione quando riemerge. I tessuti possono essere saturati fino al punto che una risalita rapida alla superficie comporterà in essi un aumento della pressione inferiore ai valori massimi tollerabili del tessuto guida.

*tessuto guida*: è quel tessuto che al momento indica la più bassa pressione ambiente che l'organismo può tollerare senza manifestare sintomi di MDD. Gli altri tessuti (compartimenti) potrebbero tollerare una pressione ancora più bassa senza manifestare sintomi di MDD, ma il tessuto guida non può subire un ulteriore calo della pressione ambiente senza rischiare la comparsa dei sintomi.

La saturazione e la desaturazione di un tessuto procedono esponenzialmente. La velocità di tali scambi può essere misurata con il cosiddetto *tempo di emi-saturazione* (o *emitempo* o *periodo*) che rappresenta il tempo che un dato tessuto impiega a raddoppiare o a dimezzare il proprio grado di saturazione. Il modello ZH-L16 parte dal principio che la misura dell'apporto sanguigno ad un tessuto (compartimento) determina il suo emitempo. La quantità di azoto assorbito e l'entità della vascolarizzazione, quindi, determinano la pressione parziale di gas inerte che il compartimento può tollerare. I compartimenti che hanno gli emitempi più corti tollerano eccessi di pressione di gas inerte maggiori rispetto ai compartimenti con emitempi lunghi.

L'ordine dei compartimenti (tessuti) del modello è il seguente:

<b>Numero 1 – 4</b>	<b>tessuti veloci: sistema nervoso centrale, midollo spinale</b>
<b>Numero 5 – 11</b>	<b>pelle (<i>sovrapposizione</i>)</b>
<b>Numero 9 – 12</b>	<b>muscoli</b>
<b>Numero 13 – 16</b>	<b>Tessuti lenti: arti, con legamenti, cartilagini, e ossa</b>

("Sovrapposizione" sta ad indicare che i tessuti più lenti raccolti nel raggruppamento sono anche presenti, come tessuti più veloci, nel raggruppamento più lento adiacente.

<b>Coefficienti del modello ZH-L16 per N<sub>2</sub></b>					
<b>Compartimento</b>	<b>t<sub>1/2</sub> N<sub>2</sub> [min]</b>	<b>b</b>	<b>a (teorico)</b>	<b>a (tabelle)</b>	<b>a (computer)</b>
1	4,0	0,5050	1,2599	1,2599	1,2599
2	8,0	0,6514	1,0000	1,0000	1,0000
3	12,5	0,7222	0,8618	0,8618	0,8618
4	18,5	0,7825	0,7562	0,7562	0,7562
5	27,0	0,8126	0,6667	0,6667	0,6200
6	38,3	0,8434	0,5933	0,5600	0,5043
7	54,3	0,8693	0,5282	0,4947	0,4410
8	77,0	0,8910	0,4710	0,4500	0,4000
9	109,0	0,9092	0,4187	0,4187	0,3750
10	146,0	0,9222	0,3798	0,3798	0,3500
11	187,0	0,9319	0,3497	0,3497	0,3295
12	239,0	0,9403	0,3223	0,3223	0,3065
13	305,0	0,9477	0,2971	0,2850	0,2835
14	390,0	0,9544	0,2737	0,2737	0,2610
15	498,0	0,9602	0,2523	0,2523	0,2480
16	635,0	0,9653	0,2327	0,2327	0,2327

**Nota:** il parametro *a* dipende dall'unità di misura usata per la pressione. I valori riportati nella presente tabella, come nella trattazione originale presentata nel libro di Bühlmann, sono validi ed applicabili per pressioni misurate in *bar*.

(Nell'uso delle tabelle da immersione si usa arrotondare in eccesso tempi, profondità, e pressione parziale iniziale di azoto, mentre i computer hanno a loro disposizione i valori reali di pressione ambiente e l'effettivo profilo d'immersione seguito dal subacqueo. Perciò Bühlmann ha apportato due diverse modifiche al parametro *a* rilevato in laboratorio ed applicabile al modello teorico)

Per le immersioni più lunghe con un alto grado di saturazione generale, il profilo di decompressione è sempre guidato dal compartimento con l'emitempo più lungo. In caso di saturazione parziale, la pressione parziale massima consentita si sposta dai tessuti più veloci verso quelli più lenti. Più tessuti sono presi in considerazione in un modello, con maggior precisione può essere determinata la decompressione richiesta (e quindi possono ridursi al minimo le richieste di tappe di

decompressione come anche la loro eventuale durata). Il tessuto che determina in un dato momento quale pressione parziale di gas inerte è ancora tollerabile è detto tessuto guida.

La situazione ideale sarebbe una decompressione continua. Invece di trascorrere un dato tempo ad una specifica quota (tipicamente 9, 6 o 3 metri), il subacqueo potrebbe risalire secondo la crescente tolleranza del suo tessuto guida. Ma questo è praticamente impossibile e quindi la decompressione deve essere determinata secondo tappe effettuate a quote scelte arbitrariamente. Il subacqueo deve rimanere ad una data profondità (o all'interno di una fascia di profondità), finché la risalita alla profondità (o fascia) successiva non è sicura. Spesso avviene che il tessuto guida cambi durante la risalita o nel corso di una sosta di decompressione. In questo caso un compartimento più lento diventa il tessuto guida. Per questo un computer da immersione può inizialmente indicare che non sono necessarie soste di decompressione e poi chiederne una dopo un po' o durante la risalita. Sebbene irritante, questo non è un segno di malfunzionamento del computer!

Bisogna prendere in considerazione un gran numero di compartimenti con emitempi assortiti per minimizzare i rischi in decompressione e/o i tempi richiesti nelle eventuali tappe di decompressione sia nei casi di immersione di pochi minuti sia in quelli di diversi giorni (come quelle effettuate da sommozzatori professionisti industriali).

## **4. Un breve commento alle tabelle da decompressione**

[Anche se nel testo originale, letteralmente tradotto, vengono qui appresso fatti espliciti riferimenti ad una specifica tabella da decompressione, il principio generale espresso resta valido ed applicabile ad ogni altra generica tabella da decompressione. NDT]

Le tabelle da immersione "Deco '92" comunemente usate in Germania (in Europa?) sono state sviluppate dal dottor Max Hahn. Tali tabelle ovviamente non possono tener conto dell'effettivo profilo d'immersione. Come Max Hahn ha sottolineato, le tabelle "Deco '92" sono riferite ad una discesa ed una risalita effettuate alla velocità di 10 metri al minuto e ad una permanenza ad un'unica profondità durante tutto il "tempo di fondo". Le eventuali soste di decompressione devono essere effettuate stazionariamente alla quota prescritta. Questa procedura è facile da seguire con il semplice ausilio di un orologio ed un profondimetro. Poiché nessuno passa l'intero "tempo di fondo" al fondo (ma piuttosto impiega parte del tempo a raggiungere il fondo e poi riemerge gradualmente nel corso dell'immersione, il profilo reale d'immersione risulta diverso ed interno al profilo "quadro" preso in considerazione dalle tabelle) i tessuti non sono mai saturati nella realtà tanto quanto risulterebbe dalla lettura delle tabelle. Per questa ragione c'è sempre un ulteriore margine di sicurezza nell'uso delle tabelle (sempre che queste siano state usate correttamente! :-)) !

Visto l'arrotondamento cui si è costretti nell'uso delle tabelle, un computer da immersione permette sempre tempi di non decompressione più lunghi ed eventuali soste di decompressione più brevi. Comunque questo non significa [dati statistici alla mano NDT] che la gestione dell'immersione con il computer comporti maggiori rischi.

Perché le tabelle "Deco '92" partono da una profondità di 9 metri? Per immersioni effettuate a 9 o 12 metri non sono mai richieste soste di decompressione. Solo trascorrendo più di 64 minuti a 15 metri è richiesta una sosta di tre minuti a tre metri (la tabella fornisce un tempo di non decompressione di 72 minuti). È improbabile che nel corso di un'immersione ricreativa si voglia (o possa) passare tanto tempo a questa profondità. Il computer subacqueo segnala un tempo di non

decompressione infinito a queste profondità. Ma a 3 metri il tempo di non decompressione è davvero infinito?

No, non proprio. L'equazione della saturazione ha il limite di non potere calcolare il tempo di non decompressione con valori di profondità inferiori a 7 metri in quanto l'argomento del logaritmo diventa negativo (ved. equazione (5)), il che non ammette risultati reali. Comunque tale limite dell'algoritmo non costituisce un problema in quanto l'evidenza sperimentale ha dimostrato che qualsiasi tessuto, per quanto saturo, può tollerare una repentina emersione da questa profondità.

In ogni caso, le tabelle sono scritte con incrementi di 3 metri, e la prima profondità per la quale si può calcolare con esse un tempo di non-decompressione è 9 metri.

## 5. Volo dopo l'immersione

Nel volo ci troviamo in una situazione in cui la pressione ambiente diminuisce repentinamente dopo il decollo. Se la pressione parziale ammissibile in qualche tessuto viene superata da tale calo è possibile l'insorgenza di sintomi di MDD.

Per evitare questa situazione, bisogna osservare il tempo di non volo ("do not fly") segnalato dopo l'immersione. La maggior parte dei computer subacquei calcola e visualizza questo periodo di attesa, che può coincidere con il tempo necessario ad una completa desaturazione. Comunque, c'è una notevole discrepanza tra i tempi di non volo segnalati da diversi computer subacquei per lo stesso profilo d'immersione. Ciò a causa del diverso modo in cui questo periodo di attesa viene calcolato, in ragione anche di differenti significati che i diversi computer attribuiscono a tale periodo.

Secondo Bühlmann, il periodo di non volo è il lasso di tempo dopo il quale anche il tessuto più lento si è sufficientemente desaturato da poter sopportare un repentino calo della pressione ambiente fino ad un certo livello senza sforare i propri limiti di tolleranza. Il "certo livello" in questione è la pressione ordinaria presente nelle cabine di un normale volo commerciale, corrispondente alla pressione atmosferica all'altezza di 2000 metri. Comunque, in una situazione di emergenza, la pressione della cabina può essere abbassata fino a quella ambiente, e quindi dev'essere rispettata un'altitudine di 4200 metri per assicurare sicurezza al volo. I computer subacquei Aladin vanno oltre ed usano un'altitudine di 4800 metri. Ma...

Per confonderti ulteriormente (o per farti pensare!) ecco un piccolo esempio: dopo una certa immersione il mio Aladin Air X visualizzava un tempo di non volo di 9 ore, mentre lo Scubapro DC12 del mio compagno segnalava 24 ore. Tausim, con lo stesso profilo d'immersione, calcolava un tempo di non volo di 17 ore (ma quando è stata inserita nel profilo una cabina di 2000 metri, il tempo è sceso a soli 13 minuti!) Qual è la risposta esatta? Inoltre bisogna notare che le 17 ore calcolate da Tausim non sono un valore esatto, nonostante l'uso del modello **ZH-L16**! Questo a causa del fatto che, nella simulazione di immersioni particolarmente lunghe e/o profonde, per i tessuti più lenti l'argomento del logaritmo assume valori negativi a causa di un limite matematico presente nel modello di Bühlmann. Poiché un logaritmo con argomento negativo non ammette risultato, i tessuti in questione non possono essere adoperati per il calcolo del tempo di non volo, e quindi questo verrà determinato usando il tessuto più lento fra quelli che ancora forniscono un valore positivo per l'argomento del logaritmo. Ciò significa che il vero tempo di non volo è più lungo di quello calcolabile e mostrato da Tausim.

Perciò va tenuto presente nelle immersioni più lunghe che il reale tempo di non volo è più lungo di quello visualizzato (perché i tessuti più lenti si sono saturati ulteriormente in una simile immersione). Ecco perché Tausim indica inoltre, quando segnala un tempo di non volo, quali tessuti sono stati presi in considerazione nel suo calcolo. Quando meno di 16 tessuti forniscono un argomento positivo per l'algoritmo, il reale tempo di non volo è significativamente superiore a quello visualizzato.

Prima si è detto che il computer Aladin prende in considerazione, per sicurezza, l'ipotesi di una cabina pressurizzata alla quota equivalente di 4800 metri. Come mai allora il suo tempo di non volo è di sole 9 ore quando ci si aspetterebbe un tempo più lungo di quello calcolato per una cabina con pressione di 4200 metri? Ciò avviene perché l'Aladin in questo calcolo usa un tessuto medio anziché il più lento. L'esperienza ha infatti dimostrato che i sintomi di MDD dovuta al volo sono localizzati (prevalentemente o soltanto???) nei tessuti con velocità di saturazione media.

Allora l'Uwatec si presenta apparentemente più sicura, dichiarando di calcolare il tempo di non volo in funzione di una cabina a 4800 metri, ma in realtà fornisce poi tempi alquanto corti. Dato che il modello **ZH-L8ADT** è più sicuro (più conservativo, specialmente per immersioni ripetitive) del modello **ZH-L16**, cosa confermata dalla Uwatec, sembra lecito sospettare che il tempo di non volo calcolato dall'Aladin sia un po' stretto! Purtroppo il manuale dell'utente dell'Aladin non rivela quale compartimento viene considerato in questo calcolo :-)

Come si comporta lo Scubapro DC12 in questa situazione? Semplicemente prescrive un tempo di non volo pari al tempo necessario alla completa desaturazione. Visto che, usando il modello **ZH-L16**, praticamente in ogni profilo d'immersione i 4 tessuti più lenti risultano inutilizzabili, il tempo di non volo è sempre più lungo di quello calcolato da Tausim. Semplicemente usare il tempo di totale desaturazione come tempo di non volo assicura sempre sicurezza! Ciò significa anche che il tempo di non volo calcolato in seguita a due, tre (o, talvolta, più!) immersioni giornaliere in un periodo di alcuni giorni può significare più di 24 ore di non volo. Ma quanti subacquei sceglierebbero di rinunciare alle immersioni degli ultimi due giorni di una settimana di vacanza subacquea?

Come viene affrontato questo problema dai computer subacquei delle altre marche? Su questo argomento si barricano un po' tutti dietro un "segreto industriale" o danno indicazioni inutili come "algoritmo di Haldane modificato", senza chiarire quali "modifiche" apportino (in termini generali anche il modello di Bühlmann può definirsi un derivato haldaniano. Forse allora usano tutti un Bühlmann??? :-). È questo il lato oscuro dei computer subacquei, che costituisce un rischio potenziale per i subacquei. :- (Max Hahn ha affermato che il tempo di non volo segnalato da alcuni computer subacquei deriva più dall'influenza di richieste obbligate dal mercato americano, basate sulla posizione dell'*Undersea and Hyperbaric Medical Society* (UHMS), che non da dati sperimentali. Sempre secondo Hahn, i primi tempi di non volo di Bühlmann sono troppo brevi. Un tempo di non volo realistico sarebbe approssimativamente pari al 60% di quello segnalato dal DC12/TRAC.

Secondo Hahn, il tempo di desaturazione totale (cioè il tempo dopo il quale tutti i tessuti sono completamente liberi da N<sub>2</sub> in eccesso) calcolato da vari computer subacquei è altrettanto poco significativo, perché questo dipende in realtà dal numero di bit usati dal computer stesso, cioè dalla sua precisione [Bisogna infatti ricordare che la curva di desaturazione si avvicina asintoticamente verso lo zero. Perciò anche piccole tolleranze nella misura dello "zero" provocano grandi oscillazioni nel calcolo del tempo necessario al raggiungimento di tale valore NDT]. Uno sguardo accurato ai dati sperimentali in suo possesso ha portato Max Hahn a formulare la regola: per volare devi essere "pulito" dall'azoto.

## 6. I limiti del modello

All'inizio di questo articolo abbiamo assunto di essere al livello del mare in nord Italia. Dato che i pescatori hanno completamente svuotato il Mare Mediterraneo dalle specie esistenti, decidiamo di fare la prossima immersione in un limpido ed incontaminato lago alpino :-). Nessun problema: il nostro computer ha al suo interno un programma per le immersioni in quota!

Il nostro corpo è saturato di azoto secondo la pressione presente al livello del mare, quando cominciamo la nostra gita verso il lago montano. Mentre ora saliamo in macchina guidando la macchina, ci troviamo in una situazione assimilabile alla risalita alla fine di una immersione: la pressione ambiente, cioè, scende più velocemente di quanto i tessuti corporei siano capaci di rilasciare il gas inerte che contengono. Consideriamo inoltre che il lago si trovi alla quota di 1500 metri e che impieghiamo 8 ore per raggiungerlo. L'uso del modello ZH-L16 mostra un interessante effetto: siamo ancora sulla spiaggia del lago senza neanche averne toccato l'acqua (e tutti i 16 compartimenti possono essere usati per il calcolo della decompressione, il che significa che anche il tessuto più lento può contribuire!) e ci troviamo in presenza di un tempo di non volo calcolato pari a 5 ore e 10 minuti, con un tempo di desaturazione che supera le 33 ore! Così, il programma calcola che dobbiamo aspettare 5 ore prima di volare (ma senza avere fatto nessuna immersione, solo per avere guidato la macchina in montagna!!! :-). Nessuno direbbe che un tale tempo di non volo sia realistico e credibile!

Ora facciamo la nostra immersione di circa 20 minuti a 10 metri di profondità e riemergiamo lentamente. Tutti i compartimenti contribuiscono ancora al calcolo della decompressione, ma ora il tempo di desaturazione è più di 4 volte più lungo del tempo di non volo determinato applicando una pressione in cabina corrispondente a 4200 metri! Assumere il tempo di desaturazione come tempo di non volo è ancora peggio! Il suddetto esempio del lago montano è stato calcolato sulla base del presupposto che la saturazione e la desaturazione avvengano con la medesima velocità, cioè adattando il diagramma di desaturazione per essere simmetrico a quello della saturazione, il che non è realistico. Inoltre se si considera una desaturazione più lenta della saturazione (criterio più conservativo) il tempo di non volo risulterà ulteriormente accresciuto. Qui i limiti del modello risultano evidenti. Ma sarebbe sbagliato pensare che un così rudimentale modello potesse riflettere appieno i fenomeni di de/saturazione presenti nel corpo umano. Normalmente il modello di Bühlmann funziona bene!

**Risultato:** Non abbandonare mai l'uso della tua testa credendo ciecamente a tutto ciò che ti dice il tuo computer subacqueo! Specialmente in caso di tempi di non volo brevi, anche se questi potrebbero essere graditi al subacqueo. Sarà la nostra interpretazione cosciente e volontaria ad allungarli per la nostra stessa sicurezza. È buona norma non effettuare immersioni nel giorno precedente al ritorno (in aereo) da una vacanza di immersioni. Meglio perdere un'immersione che passare il giorno successivo in camera iperbarica!

## 7. Respirare Nitrox invece dell'aria

Si chiama "Nitrox" una miscela respiratoria in cui la percentuale di ossigeno ( $O_2$ ) è maggiore e quella di azoto ( $N_2$ ) è minore di quelle presenti nell'aria (l'aria stessa può essere considerata come un particolare Nitrox, con 21%  $O_2$  e 79%  $N_2$ ). L'azoto è il primo responsabile dell'MDD (come anche dell'"ebbrezza di profondità"). Se il tasso di azoto della miscela respiratoria viene abbassato si hanno i seguenti vantaggi:

- "tempo di non decompressione" più lungo
- soste di decompressione più brevi
- se si usa un computer non dedicato al Nitrox, maggiore margine di sicurezza
- intervallo di superficie più breve
- meno stanchezza dopo l'immersione

Per contro si ha lo svantaggio di una massima profondità operativa minore a quella consentita respirando aria. Questo poiché la porzione di O<sub>2</sub> è superiore, come anche la sua pressione parziale, e pertanto la pressione parziale di O<sub>2</sub> raggiunge prima il livello di tossicità. Riempire una bombola di Nitrox è inoltre più costoso che riempirla con aria. Infine è necessario prima di ogni immersione determinare l'esatta parziale di O<sub>2</sub> presente nella miscela contenuta nella bombola e inserire tale dato nel computer (se questo è predisposto per l'uso del Nitrox).

Le miscele nitrox più comunemente usate sono il [NOAA](#) Nitrox I (32% O<sub>2</sub>, 68% N<sub>2</sub>) ed il [NOAA](#) Nitrox II (36% O<sub>2</sub>, 64% N<sub>2</sub>), sebbene possano esistere altre miscele "standard". Sebbene l'aria possa essere considerata una particolare forma di Nitrox, è opportuno qui richiamare l'attenzione su alcuni particolari che abbiamo tralasciato parlando della respirazione di aria compressa.

## 7.1 Massima profondità operativa (MOD – Maximum Operative Depth)

Anche se l'ossigeno è di vitale importanza, esso diviene tossico se respirato in concentrazione troppo alta. La massima profondità operativa (MOD – Maximum Operative Depth) è quella alla quale la pressione parziale di O<sub>2</sub> raggiunge il suddetto limite. Questa pressione critica è di 1,6 bar in acqua calda e senza sforzi, mentre scende fino al valore di 1,4 bar in acqua fredda e/o sotto sforzo. Quindi, in dipendenza dal Nitrox usato, la MOD varia ed è per questo di *fondamentale importanza* la verifica, prima dell'immersione, del tasso di ossigeno in esso presente. La legge fisica fondamentale in questo campo è la *legge di Dalton*: *La pressione totale in una miscela di gas è la somma delle pressioni parziali di ognuno dei gas costituenti la miscela*. Che nel nostro caso significa: *La pressione parziale di uno dei gas componenti è pari alla pressione totale moltiplicata per la frazione presente del gas stesso nella miscela*.

Cioè:

$$p_{O_2} = p \cdot f_{O_2} \quad (6)$$

in cui:

**$p_{O_2}$**  pressione parziale di O<sub>2</sub> nella miscela respirata

**$p$**  pressione totale

**$f_{O_2}$**  frazione di O<sub>2</sub> nella miscela respirata (ad esempio, per l'aria, 0,21)

che può essere scritta nella forma inversa:

$$p = \frac{p_{O_2}}{f_{O_2}} \quad (7)$$

$$f_{O_2}$$

con la quale, se si inserisce per  $p_{O_2}$  la pressione parziale di ossigeno massima tollerabile (cioè da 1,4 bar a 1,6 bar) e per  $f_{O_2}$  la frazione di ossigeno rilevata nella miscela in uso (ad esempio 0,36 per il Nitrox II), si calcola la massima pressione operativa della miscela (MOP – Maximum Operative Pressure), che può poi essere semplicemente convertita in profondità grazie alla relazione:

$$MOD = (MOP - 1bar) \cdot 10mt/bar \quad (8)$$

Con l'aria la MOD assume un valore di circa 66 metri, per il Nitrox I si riduce a circa 40 metri, mentre per il Nitrox II è di circa 34 metri, profondità calcolate assumendo una pressione parziale critica di  $O_2$  pari a 1,6 bar.

## 7.2 Quantità ottimale di ossigeno nella miscela di respirazione ("Best Mix")

Per avere il più lungo tempo di non decompressione bisogna che il tasso di azoto sia il più basso possibile [il caso estremo è rappresentato dalle immersioni con A.R.O. che non necessitano di alcuna decompressione NDT], il che corrisponde ad un più alto tasso di ossigeno. In funzione della MOD desiderata, bisogna che la pressione parziale di  $O_2$  non superi i valori critici. La cosiddetta "Best Mix" quindi è determinata dal massimo tasso di ossigeno consentito dalla MOD. Per calcolare la composizione della "Best Mix", dobbiamo usare ancora una forma inversa della (6):

$$f_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{p} \quad (9)$$

in cui, al posto della variabile  $p$ , va inserito in questo caso il valore della pressione ambientale alla MOD.

## 7.3 Profondità aria-equivalente (EAD – Equivalent Air Depth)

Respirando aria ad una data profondità, la pressione parziale dell'azoto è maggiore che non respirando Nitrox (che contiene una frazione inferiore di  $N_2$ ). Se prendiamo come dato una certa pressione parziale di  $N_2$ , possiamo calcolare che essa viene raggiunta ad una profondità minore respirando aria piuttosto che Nitrox.

Ciò è importante se vogliamo fare una immersione con Nitrox usando tabelle da decompressione per aria – che dovrebbe essere il caso normale (diversamente bisognerebbe calcolare una tabella

dedicata per ogni possibile miscela Nitrox). Dopo aver calcolato la profondità aria-equivalente (EAD – Equivalent Air Depth) è possibile pianificare una immersione con Nitrox con una normale tabella di decompressione per aria. La formula da usare per determinare la pressione aria-equivalente è:

$$EAP = \frac{f_{N2(nitrox)}}{f_{N2(aria)}} \cdot p \quad (10)$$

che è facile da convertire in profondità aria-equivalente, tenuto conto che:

$$EAD = (EAP - 1 \text{ bar}) \cdot 10 \text{ mt/bar} \quad (11)$$

Dato che il tasso di N<sub>2</sub> presente nell'aria è sempre maggiore di quello di una miscela Nitrox, il rapporto  $f_{N2(nitrox)} / f_{N2(aria)}$  è sempre minore di 1. Quindi l'EAD è sempre minore della profondità reale.

In diverse pubblicazioni la (10) è riportata nella forma:

$$EAP = \frac{f_{N2(nitrox)}}{0,79} \cdot p \quad (12)$$

che è certamente corretta, visto che il tasso di azoto nell'aria è un valore costante, pari al 79% (comprensivo dell'1% di vari altri gas diversi dall'ossigeno), ma questa forma si presta a possibili refusi tipografici: può capitare, ad esempio, che le cifre di 0,79 vengano invertite in 0,97 (come è avvenuto nella rivista tedesca "Divemaster", n. 1/98, pp. 37 e 38!). Quindi, per una migliore comprensione della formula e per maggiore scientificità dovrebbe sempre usarsi la forma della (10).

Il modello **ZH-L16** è applicabile senza limiti per il Nitrox come per l'aria.

## 8. Funzionamento di un computer da immersione – Uno sguardo all'algoritmo

In questa sezione è esaminato l'algoritmo **ZH-L16**. Una descrizione più dettagliata di questo modello può essere trovata nel libro di Bühlmann. Ulteriori informazioni sugli usatissimi modelli di simulazione *haldaniani* si trovano ad esempio in *The Physiology and Medicine of Diving*. All'inizio di ogni sezione è riportata una breve descrizione delle operazioni in essa effettuate. Gli

algoritmi usati sono presentati in uno pseudo-codice di tipo PASCAL, che ci è sembrata la forma più adatta.

## 8.1 Uno sguardo

Il modello **ZH-L16** può dividersi sommariamente in due sezioni:

1. Calcolo (nel senso di simulazione/approssimazione) del gas inerte assorbito dai tessuti.
2. Determinazione del massimo eccesso di pressione di gas inerte tollerato dai tessuti.

## 8.2 Calcolo dell'assorbimento di gas inerte

Se esiste un dislivello tra la pressione del gas inerte presente nei polmoni e quella del gas inerte presente nei tessuti, ciò darà luogo ad uno scambio gassoso tendente al riequilibrio pressorio.

Si presume che per ogni diverso tessuto (compartimento) esiste una caratteristica velocità di saturazione e desaturazione con gas inerte. (in questo senso si parla spesso di tessuti "veloci" e "lenti"). Inoltre si assume che *non* avvengano scambi gassosi di riequilibrio pressorio tra i tessuti benché aventi diversa pressione di gas inerte.

Il fenomeno di questo riequilibrio pressorio è facilmente descritto da una equazione differenziale lineare la cui soluzione è la già vista funzione esponenziale:

$$P_{t,gi}(Te) = P_{t,gi}(T0) + [P_{R,gi} - P_{t,gi}(T0)] \cdot [1 - 2^{-Te/t_{1/2}}] \quad (3)$$

**$P_{t,gi}(T0)$**  pressione del gas inerte nel tessuto all'inizio dell'esposizione

**$P_{t,gi}(Te)$**  pressione del gas inerte nel tessuto alla fine dell'esposizione

**$P_{R,gi}$**  pressione del gas inerte nella miscela respirata

**$Te$**  durata dell'esposizione (in minuti)

**$t_{1/2}$**  emitempo del tessuto (in minuti)

Come già accennato, sebbene l'equazione sopra riportata sia valida soltanto per un eccesso di pressione costante (e quindi per una profondità costante), essa può essere usata per simulare un qualsivoglia profilo d'immersione. Il metodo, tipico di analoghe applicazioni matematiche, è semplice da comprendere. Se siamo in grado di effettuare misure di pressione molto precise e molto frequenti, otterremo un profilo discontinuo a "gradini" molto vicino a quello continuo "curvo" reale [avremo cioè eseguito la discretizzazione della curva in porzioni molto piccole NDT]. Maggiore sarà la frequenza delle misurazioni effettuate migliore sarà il grado di approssimazione del profilo "discreto" a quello reale. Ciò significa esattamente che il profilo d'immersione viene approssimato ad un certo numero di passi, ad ognuno dei quali corrisponde una rilevazione ambiente ed un calcolo della pressione del gas inerte effettuato con l'equazione (3) (ved. figura).

Dopo questa sintetica descrizione delle basi teoriche su cui si fonda il calcolo dell'assorbimento di gas inerte possiamo vedere più nel dettaglio la struttura dell'algoritmo. Si presume che il subacqueo sia completamente saturo di gas inerte all'inizio dell'immersione.

### Completa simulazione dell'immersione:

```
FORALL (tessuto Ti) DO
  FORALL (gas inerte Ij) DO
    /* Se ad esempio Ij = N2, allora la pressione parziale di N2 = 0,79
    bar (se si respira aria) */
    assegna alla pressione Ij in Ti la pressione parziale del gas inerte
    Ij nella miscela respirata;
    Calcola i coefficienti di tolleranza 'a' e 'b' per il tessuto Ti
    dall'emitempo del gas inerte Ij;
  END FORALL;
END FORALL;

WHILE (la simulazione ha inizio) DO
  Misura la pressione presente nell'ambiente;
  Valuta la velocità di risalita in funzione della variazione della
  pressione ambiente;
  FORALL (tessuto Ti) DO
    Calcola il nuovo stato di assorbimento di ogni gas inerte nel
    tessuto Ti;
    IF (il tessuto non necessita nessuna sosta di decompressione) THEN
      Calcola il "no-stop time" per il tessuto Ti;
    ELSE
      Calcola la quota della prossima sosta di decompressione;
    END IF
  END FORALL;
  IF (tutti i tessuti sono in "no-stop time") THEN
    Calcola il minimo "no-stop time" (che sarà quello rilevante per il
    subacqueo);
  ELSE
    Calcola la profondità e la durata della prima (la più profonda)
    sosta di decompressione;
  END IF;
  Attendi il completamento dell'intervallo Δ t;
END WHILE.
```

Il valore dei parametri di tolleranza  $a$  e  $b$  per ogni emitempo (o per ogni tessuto) per l'assorbimento di ogni gas inerte, può essere calcolato per via algoritmica o prelevato da tabelle archiviate per essere usate dal programma. Nel libro di **Bühlmann** sono descritte entrambe le possibilità. Le formule per ottenere i parametri  $a$  e  $b$  per i gas inerti N<sub>2</sub> e He sono semplici. Inoltre i parametri sono già calcolati e forniti in tabelle per un ampio spettro di emitempi per azoto e per elio. La forma di tali tavole è adatta all'uso diretto nei computer subacquei. (Per l'azoto ci sono tre diversi set di valori del parametro  $a$  mentre per l'elio non c'è nessuna differenziazione)

### Calcolo dei parametri $a$ e $b$ per $t_{1/2}(N_2)$ :

$$a = 2,0 \text{ bar} \cdot [t_{1/2}(N_2)]^{-1/3},$$

$$b = 1,005 - [t_{1/2}(N_2)]^{-1/2};$$

Resta da stabilire quando l'algoritmo deve terminare. Quando il subacqueo riemerge, i tessuti sono ancora parzialmente saturi del gas inerte respirato. Questa saturazione parziale è quella che viene espressa, in via approssimata, dai "gruppi di appartenenza" indicati (con lettere dalla A alla Z) nelle

tabelle per il calcolo delle immersioni ripetitive. Quindi il calcolo non deve finire con la riemersione. Al contrario si considera che il subacqueo continui l'immersione in superficie, il che permette di continuare il calcolo della desaturazione dopo l'emersione. La simulazione può terminare quando si calcola che ogni tessuto è completamente desaturato ed il tempo di non volo è sceso a zero. Come già detto, diversi computer adottano criteri diversi per il calcolo del tempo di non volo.

I computer subacquei misurano la pressione ambiente con grande precisione. In un programma di simulazione come Tausim la pressione viene dedotta dalle profondità inserite come dati del profilo. La pressione atmosferica in superficie è calcolata in funzione dell'altezza di questa sul livello del mare. Ogni volta che trascorre il tempo  $\Delta t$  viene calcolato, con la formula (3) il nuovo assorbimento di gas inerte in ogni tessuto. Se il  $\Delta t$  è abbastanza piccolo l'approssimazione è buona per riflettere l'andamento della realtà. In pratica il modello approssimato a base del calcolo descrive un'immersione in cui il subacqueo compie una immersione multilivello nella quale la quota può variare ogni volta che trascorre il tempo  $\Delta t$ , brevissimo periodo durante il quale la profondità (e quindi la pressione ambiente) resta costante. Per ottenere una simulazione esatta, bisogna infine prendere in considerazione una piccola emissione di gas inerte in forma di microbolle nei polmoni. Questo fenomeno, conosciuto col nome di *shunt intrapolmonare destro-sinistro*, non è simulato nell'algoritmo **ZH-L16**. Solo il nuovo modello **ZH-L8ADT** considera tale fenomeno. Purtroppo il modello matematico di simulazione non è del tutto descritto nel libro di Bühlmann.

Secondo il modello ZH-L16 viene ora calcolato il nuovo assorbimento di gas inerte nei tessuti corporei. Per fare questo viene usata la formula (3) come sopra descritto.

### Calcolo del nuovo assorbimento di ogni gas inerte per ogni tessuto $T_i$ :

```
FORALL (gas inerte  $I_j$ ) DO
    calcola la pressione corrente di gas inerte  $p_{I_j}$  nella miscela respirata;
    calcola con la formula 3 il nuovo livello di assorbimento di gas inerte
     $I_j$  nel tessuto  $T_i$  con emitempo  $t_{j1/2}^I$ 
END FORALL;
```

### 8.3 determinazione della sovrasaturazione massima tollerabile

È possibile calcolare per ogni tessuto e per ogni gas inerte la pressione ambiente ancora tollerata, al di sotto della quale non è possibile scendere. Bühlmann descrive questa correlazione semplicemente come segue:

$$p_{amb.tol} = (p_{t,gi} - a) \cdot b \quad (1)$$

oppure

$$p_{t.tol,gi} = (p_{amb} / b) + a \quad (2)$$

**$p_{amb.tol}$  pressione ambiente tollerata dal tessuto**

$p_{t.gi}$	pressione del gas inerte presente nel tessuto
$p_{t.tol.gi}$	eccesso di pressione del gas inerte tollerato dai tessuti
$p_{amb}$	pressione ambiente corrente
$a, b$	parametri del modello ZH-L16 per ogni tessuto

Ora il cosiddetto "no-stop time" è quel tempo che il subacqueo (o lo specifico tessuto) può trascorrere alla pressione attuale fino ad una saturazione tale che la pressione ancora tollerata di gas inerte viene raggiunta nel caso di una riemersione immediata (cioè se si abbassa repentinamente la pressione alla pressione di superficie). Permanendo ancora a questa profondità i tessuti si satureranno ulteriormente per cui un eventuale riemersione immediata provocherebbe il raggiungimento di una pressione parziale di gas inerte nei tessuti non più tollerabile e si avrebbero, cioè, possibili sintomi di MDD.

In tali casi si rende necessario il calcolo delle necessarie soste di decompressione. Se almeno un tessuto ha sfornato il "no-stop time", la profondità a cui effettuare la prossima sosta di decompressione è data dalla (più bassa) pressione a cui si può risalire senza scendere al di sotto della pressione parziale tollerata dai vari tessuti. Quindi la sosta di decompressione è determinata dalla più alta fra le pressioni ancora tollerabili dai vari tessuti. Un'ulteriore risalita farebbe sovrasaturare almeno un tessuto il che lo esporrebbe ad un troppo alto rischio di insorgenza di sintomi di MDD. Nella pratica le profondità corrispondenti a cui effettuare le soste di decompressione vengono arrotondate a multipli di 3 mt. Con ciò si ottiene un ulteriore livello di sicurezza e d'altra parte sarebbe oltremodo difficile mantenere una quota con la precisione di pochi decimetri.

Il calcolo della decompressione può anche essere effettuato senza fare riferimento ad esplicite soste. In questo caso il subacqueo deve stare esattamente a quella pressione ambiente che è appena tollerabile. Questa decompressione continua sarebbe estremamente difficile da eseguire, soprattutto in prossimità della superficie e praticamente impossibile in presenza di onde.

Una semplice conversione della formula (3) ci fornisce la:

$$"no-stop time" = -t_{1/2} \cdot \log_2 \left[ \frac{p_{R.gi} - p_{t.tol.gi(Te)}}{p_{R.gi} - p_{t.gi(T0)}} \right] \quad (5)$$

$p_{t.tol.gi(Te)}$  massimo eccesso di pressione di gas inerte tollerabile dal tessuto guida in superficie

Chi possiede qualche nozione di matematica vede subito che ci sono casi in cui l'equazione (5) non ammette soluzioni reali, in particolare se la frazione assume valore nullo o negativo il logaritmo non può essere calcolato. Riportiamo qui di seguito alcuni casi particolari.

Può verificarsi che, in un'immersione poco profonda, la pressione ambiente dei gas inerti, anche a tessuti saturi, resti inferiore alla massima pressione tollerata in superficie. Ciò significa che se un tessuto sta indefinitamente a tale profondità e si satura conseguentemente, questo può comunque effettuare una riemersione immediata senza danneggiarsi. Il tempo di non decompressione in tale

caso è indefinito. Ciò è valido almeno per il modello **ZH-L16**. Né conosciamo altri fenomeni che richiedano decompressione in tali casi.

Altro caso a cui pensare è quello del subacqueo che deve effettuare qualche sosta di decompressione e rimane ad una profondità in cui si verifica ulteriore saturazione (ovvero la pressione parziale di gas inerte nei tessuti è inferiore a quella del gas inerte nella miscela di respirazione): in tale caso il subacqueo non può tornare ad un valore positivo di "no-stop time". In altre parole non solo il subacqueo dovrà effettuare soste di decompressione, ma queste soste diventeranno più lunghe e/o profonde.

### **Calcolo del "no-stop time" per il tessuto $T_i$ :**

```
BEGIN
    /* ved. formula (1) */
    calcola la pressione parziale di gas inerte tollerata dal tessuto in
questione:
    calcola la pressione parziale di gas inerte presente nella miscela
respirata;
    calcola il "no-stop time" per il tessuto in questione, usando la formula
(4);
END;
```

L'algoritmo per Calcolare la prossima tappa di decompressione può essere ottenuto facilmente con quello citato sopra da un calcolo generale del tempo di non-decompressione. In pratica è buona norma sviluppare un calcolo generale e trattare il calcolo del "no-stop time" come un caso particolare (emersione).

## **9. Breve nota sul calcolo del consumo d'aria**

Esistono sul mercato computer subacquei che tengono conto nei loro calcoli del consumo d'aria e visualizzano sul display il tempo residuo di fondo (RBT – remaining bottom time). Ciò è comodo soprattutto nel caso che siano necessarie più soste di decompressione a diverse quote. Dato che il computer conosce il reale consumo d'aria (il consumo volumetrico d'aria (ACV – air consumption volume) non è costante durante l'immersione!), esso è in grado di calcolare il tempo residuo di fondo (RBT) con discreta precisione. Questo valore è sempre più preciso di quello che si potrebbe ottenere con un calcolo "a mano" basato sul consumo volumetrico d'aria medio. Si direbbe che per potere calcolare l'RBT il computer dovrebbe conoscere il volume iniziale dell'aria ed essere in grado di misurare con grande precisione il calo di pressione al primo stadio.

Invece nessun computer richiede l'inserimento della misura della bombola. Se fosse necessario inserire tale dato ciò potrebbe essere pericoloso: immaginate cosa succederebbe, infatti, se un subacqueo usasse un giorno una bombola di misura più piccola della solita e dimenticasse di cambiare la misura nel computer (cosa destinata a capitare sicuramente, prima o poi)! Ma come fa allora il computer a calcolare correttamente l'RBT se non conosce neanche il volume della bombola?

Non è difficile come sembra, ma semplicemente richiede un'elevata precisione nella misurazione della pressione al primo stadio, il che non è oggi un problema tecnico. Il calcolo non viene effettuato in base alla quantità d'aria presente (che, come già visto, non è nota) ma sulla base di un consumo d'aria espresso in termini differenziali (calo di pressione nel tempo). I primi valori

calcolati di RBT vengono resi noti solo dopo alcuni minuti dall'inizio dell'immersione. Durante i primi minuti, infatti, il calo di pressione, rispetto alla pressione iniziale della bombola, è lieve ed è possibile fare soltanto stime molto approssimate dell'RBT. Ciò non è un problema dato che la bombola è ancora piena. Più si abbassa la pressione nella bombola durante l'immersione, minore diventa l'errore nella differenza tra la pressione iniziale e quella attuale e quindi il calcolo dell'RBT diventa sempre più preciso.

Resta il problema che ad alta pressione l'aria non può però essere trattata come un gas ideale (priva, cioè, di interazione tra le sue particelle). Perciò non si può più applicare la legge di Boyle e Mariotte ma diventa necessario l'uso di un'equazione di stato esatta. Purtroppo neanche su questo argomento i produttori rivelano utili dettagli! Quando io (Kai) ho chiesto all'Uwatec informazioni all'inizio del 1997, sono subito stato sospettato di essere una spia industriale! :-). Un uomo gentile affermò di avermi già detto troppo spiegandomi la tecnica dell'approssimazione dell'RBT. E aggiunse che non poteva dirmi quale equazione di stato era usata dai computer della Uwatec! "Che ne pensate, quante spie industriali stanno frugando fra queste pagine!?"

Da qualche tempo al [sito ufficiale della Uwatec](#), sezione "tecnica", si può leggere che loro usano l'equazione di stato di *van der Waals*. Rispetto alla legge sui gas ideali, questa costituisce un miglioramento. Qui le particelle vengono trattate come sferette rigide che si attraggono reciprocamente quando vengono raggruppate chiuse insieme. Questa equazione di stato consente almeno una descrizione *qualitativa* di un gas reale. Gli ingegneri usano spesso delle cosiddette equazioni di stato *empiriche*. Queste, prive di un fondamento fisico di supporto, descrivono comunque molto bene un dato gas o una miscela di fluidi grazie all'uso di parametri estrapolati da dati sperimentali.

## 10. Qualche commento finale

Come chiunque può vedere, alcune prestazioni vendute come preziosi optional sui computer subacquei, come la capacità di gestire immersioni in quota o con la respirazione di nitrox, sono semplicissime da implementare nel modello ZH-L16. Per gestire una immersione in quota, ad esempio, il computer deve solo misurare la pressione ambiente a brevi intervalli e ricalcolare in funzione di ciò la saturazione dei tessuti. Salire ad un lago montano non significa altro che esporsi ad una riduzione di pressione ambiente (come quando si emerge alla fine di una immersione, ma con una diminuzione di pressione molto inferiore, tale da non richiedere agli alpinisti di effettuare soste di decompressione o di verificare il "no-stop time"! ). Per gestire immersioni effettuate col nitrox basta soltanto che al posto della costante (0,79) per l'azoto venga inserita una variabile! Resta da adeguare le eventuali parti del computer (in particolare il trasduttore montato nel primo stadio) ad un uso compatibile con l'esposizione all'ossigeno (puro o concentrato).

A maggior ragione sono artefatte le differenze di prezzo tra i modelli "non-decompressione" e quelli "deco", dato che anche un computer "non-decompressione" (per esempio l'Aladin Sport) deve necessariamente calcolare la decompressione (altrimenti non sarebbe in grado di avvertire in caso di violazione di una sosta di decompressione richiesta!), ma semplicemente non visualizza tutte le informazioni in suo possesso.

Siamo interessati a tutto ciò che si può sapere sui computer da immersione. Quindi chiediamo: per favore, informateci se conoscete ulteriori dettagli (bibliografia, URLs, etc.) riguardo i modelli di

calcolo adoperati dai vari computer. Un altro argomento che ci interessa molto: Qualcuno conosce il formato interno usato dai diversi computer (Suunto, Mares, etc.)?

Siamo sempre aperti a suggerimenti, critiche e correzioni degli errori certamente presenti. Ovviamente si accettano anche approvazioni. ;-) Nel caso che questo testo sia usato da qualche parte apprezzeremo una breve comunicazione da parte vostra.

## 11. Bibliografia, links

- **Albert A. Bühlmann** - Ernst B. Völlm, **Tauchmedizin: Barotrauma, Gasembolie, Dekompression, Dekompressionskrankheit**, 4. Auflage, [Springer Verlag](#) 1995.
- **Peter Bennett** - **David Elliot**, **The Physiology and Medicine of Diving**, 4. Ed., W.B. Saunders Company Ltd. 1998.
- **Schreiner, H.R.** - **Kelley, P.L.**, **A Pragmatic View of Decompression**, Underwater Physiology: Atti del Quarto Symposium di Fisiologia Subacquea, editi da C.J. Lambertsen, Academic Press, New York 1971, pp. 205-219.
- [Haralds Tekkis-Seiten](#) – informazioni interessanti e di semplice lettura sulla fisica dell'immersione (in tedesco, purtroppo).
- [Bubble Decompression Strategies - Part I : Background and Theory](#) – articolo raccomandato di Eric Maiken sui modelli basati sulle bolle.
- [Karl Kramers Tec-Page](#) – informazioni sui rebreather e sull'uso del nitrox.
- [Jim Cobb's Trimix Pages](#) – ciò che bisogna sapere sul Trimix.
- [Haralds Sauerstoff-Seite](#) – informazioni sull'immersione con ossigeno puro (in tedesco).
- [Varying-Permeability Model](#) - indice degli articoli di D.E. Yount e D.C. Hoffman redatto da Kai Schröder (in tedesco).
- [Implications of the Varying Permeability Model for Reverse Dive Profiles](#) – articolo di D.E. Yount, E.B. Maiken e E.C. Baker, Manuskript eines Vortrags gehalten beim - Profili di immersione inversi. Workshop del 29 e 30 Ottobre 1999 a Washington, D.C.
- [UDCF - Universal Dive Computer Format](#) – Documentazione sul Formato Universale dei Computer Subacquei, di Steffen Reith e Kai Schröder.

### Links alle maggiori case produttrici di computer da immersione

- [Cochran](#)
- [Mares](#)
- [Scubapro](#)
- [Seemann Sub GmbH](#)
- [Suunto](#)
- [Uwatec](#)