

## Voorwoord

De auteur van dit artikel Matti Anttila is een ingenieur in technische fysica. Hij promoveerde in de ruimtevaart technologie. Hij kreeg een opleiding als mijnenjager in de Finse zeemacht in 1995. Daar gebruikte hij half gesloten (semi-closed) rebreathers. In de late jaren 90 begon hij technisch te duiken en momenteel is hij een trimix instructeur en trainer bij IANTD. Bovendien is hij ook lid van hun college van adviseurs.

## Gradient Factors

Herinner je je nog je eerste duikles, en daarin de proef met de fles spuitwater en het verband met te snelle opstijgingen? Ongeacht hoe groot je kennis intussen is van decompressie theorie, de spuitwater fles is nog steeds van toepassing! Maar het wordt nu tijd om wat dieper in te gaan op de meer fundamentele zaken. Laten we beginnen met wat geschiedenis

## Geschiedenis

Decompressie theorie is al een vrij oude wetenschap. Reeds in de late jaren 1800 ontdekte de Franse fysicus Paul Bert (1833-1886) decompressie ziekte en de noodzaak aan decompressie stops en langzaam stijgen. Bert bestudeerde ook de effecten van zuurstof op mensen, aangezien hij interesse had in bergbeklimmen en het vliegen met hete luchtballon. Hij breidde zijn studie uit tot omgevingen met hoge drukken, en vond het verband met zuurstof intoxicaties. Bert maakte de conclusie dat hoge partiële zuurstof druk de mens op een chemische manier, en dus niet op een mechanische manier, beïnvloedde. Hij beschreef de gevolgen van zuurstofvergiftiging op het Centraal Zenuw Stelsel (CZS - CNS). Bert bestudeerde zowel lucht, zuurstof als stikstof en kwam tot de correcte conclusie dat de oorzaak van decompressie ziekte veroorzaakt werd door stikstof bellen in het bloed en andere weefsels. Hij experimenteerde ook met recompressietherapie en het toedienen van zuurstof bij decompressie-ongevallen. Bert's bekendste boek is "La Pression Barometrique", gepubliceerd in 1878: wat handelde over de menselijke psychologie in hoge en lage luchtdruk.

En hoewel hij de basis legde voor de decompressie theorieën was het John Scott Haldane (1860-1936), een Schotse fysicus, die het probleem van de decompressie theorie op een meer wetenschappelijke manier aanpakte. In 1905 werd Haldane door de Royal Navy aangesteld om onderzoek te verrichten naar de duik operaties van de Navy. Zijn focus lag op het bestuderen van de decompressie ziekte en het voorkomen er van. Haldane voerde verschillende testen uit en bestudeerde de effecten van lucht onder hoge druk op verschillende dieptes, in 1908 publiceerde hij de resultaten van zijn testen in "The Journal of Medicine". Dit artikel bevatte ook zijn duik tabellen.

Haldane wordt dan ook beschouwd als de vader van de moderne decompressie theorie. In zijn onderzoek maakte hij de belangrijke conclusie dat een duiker altijd veilig kon opstijgen, zonder risico op decompressie ziekte, zolang zijn diepte beperkt bleef tot 10 meter, en dit ongeacht de duur van de duik.

Uit deze studie leidde hij eveneens af dat het menselijk lichaam een drukverschil van 2:1 kon verdragen (10m = 2bar, terwijl de druk aan de oppervlakte 1 bar is). Later werd deze verhouding verfijnd door Robert Workman. Workman was een dokter in de geneeskunde en deed onderzoek naar decompressie voor de US Navy in de jaren '60. Hij bestudeerde uitvoerig het decompressie model dat gebruikt werd door de US Navy en dat gebaseerd was op het model van Haldane.

Workman kwam tot de conclusie dat de verhouding varieerde van weefsel tot weefsel (vandaar de termen weefselcompartimenten, Tissue Compartments in het Engels of ook wel TC).

Dr. Albert A. Bühlmann (1923-1994) uit Zürich verfijnde deze theorieën verder. Gedurende zijn lange carrière breidde hij het aantal weefselcompartimenten uit tot 16, wat de basis werd voor zijn ZH-L16 decompressie model (ZH = Zürich - L = Lineair - 16 = aantal weefselcompartimenten). Zijn tabellen werden voor het eerst gepubliceerd in 1990. Vorige tabellen waren gebaseerd op minder weefselcompartimenten.

## De basis van Decompressie

Laten we starten bij het begin: een duiker daalt af en ademt samengeperste lucht uit zijn fles. Lucht bevat stikstof, een inert gas, wat onder druk oplost in de weefsels van de duiker. Wanneer de duiker terug stijgt, daalt de omgevingsdruk en stikstof dat opgenomen werd door de weefsels wordt terug naar het bloed getransfereerd. Daar verlaat het via de longen het lichaam iedere keer men uitademt. Klinkt eenvoudig, niet?

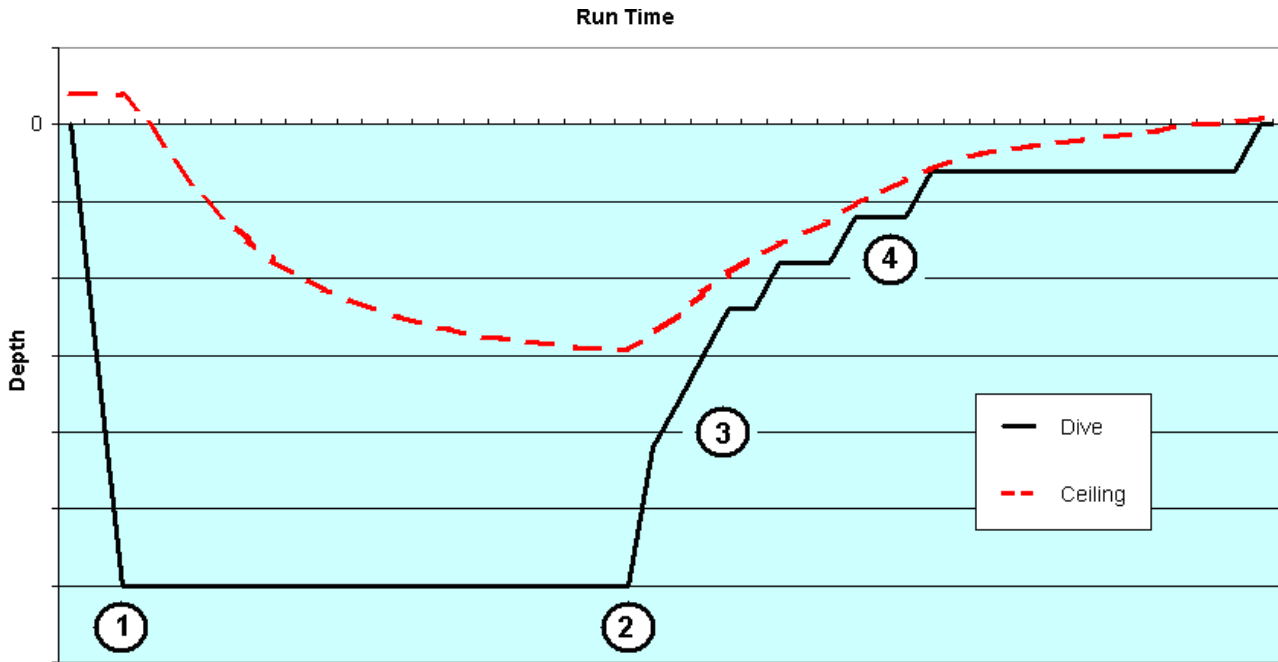
Recreatieve duikers zorgen er voor om geen decompressie duiken uit te voeren. Duikers krijgen tijdens hun opleiding mee om binnen de nultijd (no-decompression limit = NDL) te blijven. Deze NDL is te zien in de duiktabellen. Bovendien moeten de duikers zich aan een maximum stijgsnelheid houden. Deze informatie is meestal genoeg voor de meeste duikers, maar wat als men buiten deze nultijd gaat en decompressie verplichtingen oploopt?

## Verzadiging van weefsel en het “Stijgplafond”

Wanneer we duiken bevindt er zich altijd een onzichtbaar (virtueel) plafond boven ons. Dit plafond is de maximale diepte tot dewelke wij kunnen stijgen zonder symptomen te krijgen van decompressie ziekte. Dit plafond is gebaseerd op de hoeveelheid opgelost gas in onze weefsels.

Afbeelding 1 toont een typisch decompressie profiel van een duik met meerdere decompressie stops. Vóór de duik is het plafond als het ware een negatieve diepte (aan de oppervlakte), wat betekent dat jouw weefsels een bepaalde overdruk gradiënt kunnen weerstaan. Terwijl de duiktijd oploopt en de duiker tijd spendeert op de bodem, gaat het plafond naar beneden. Het gevolg is dat de opstijgmogelijkheden beperkt zijn, en er de nood ontstaat aan decompressie verplichtingen. Duik computers geven als plafond aan, de plaats waar de eerste (diepste) decompressie verplichting zich bevindt.

## AFBEELDING 1



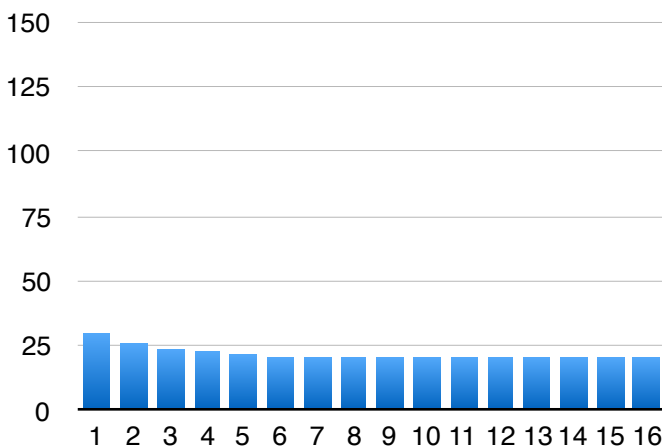
Wanneer de duiker begint te stijgen, kan hij niet boven het plafond gaan zonder risico op decompressie ziekte. De decompressiestops zijn duidelijk zichtbaar in het duikprofiel van afbeelding 1.

Hoe dichterbij het plafond men gaat, hoe minder veiligheidsmarge er is.

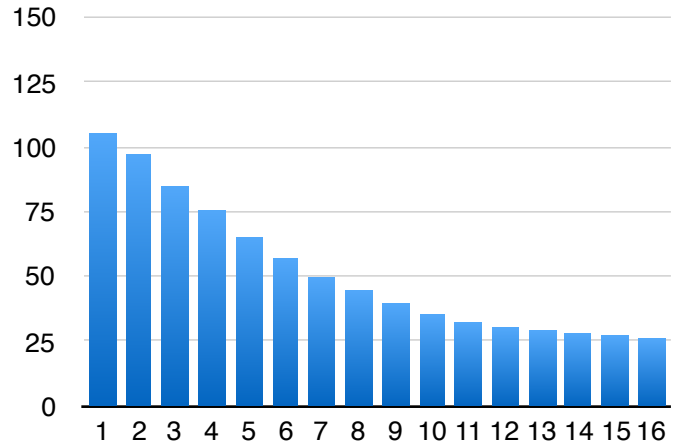
De diepte van het plafond geeft nog niet aan of er nog gas opgenomen wordt of reeds afgestaan wordt. Bühlmann gebruikte 16 weefselcompartimenten als model voor het oplossen van een inert gas in ons lichaam. Het is perfect mogelijk dat bepaalde weefselcompartimenten nog gas opnemen (verzadigen - on-gassing), terwijl andere weefsels reeds gas afstaan (ontzadigen - off-gassing). Het diepste plafond duidt aan wat de maximale drukverandering is die het leidende weefselcompartiment aankan om te ontgassen. Verdere stijging brengt een risico op decompressie ziekte mee.

Afbeelding 2 toont deze 16 weefselcompartimenten aan gedurende de duik uit afbeelding 1. Een weefselcompartiment (TC) heeft zijn verzadiging bereikt wanneer het 100% vol is. Gedurende het stijgen kan een TC oververzadigd worden (boven de 100%). De sleutel voor een correcte decompressie is om oververzadigd te zijn, maar niet zoveel dat het opgelost gas bellen vormt in onze weefsels en bloed.

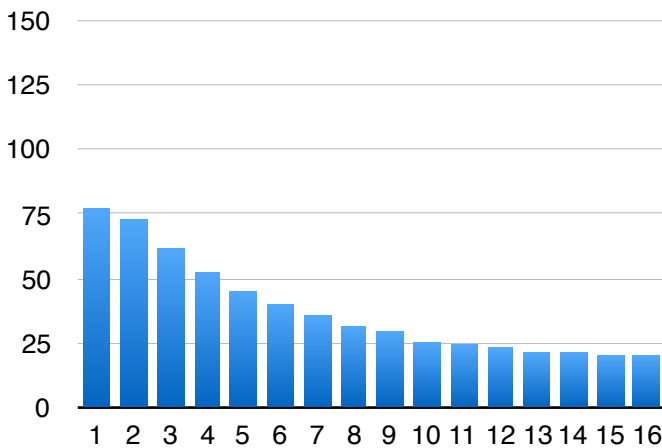
## AFBEELDING 2



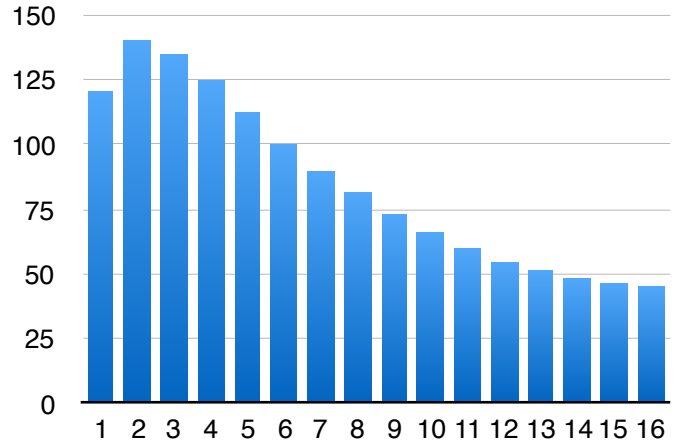
1) afdaling naar de bodem : alle weefselcompartimenten zijn aan het verzadigen



3) Deep stop : enkel het snelste weefsel is oververzadigd, andere gassen zijn nog aan het verzadigen.



2) Einde bodemtijd: snelle weefsels staan dichterbij het saturatiepunt (100%) dan trage weefsels



4) Voorlaatste stop: het is duidelijk dat de meeste snelle weefsels oververzadigd zijn en aan het ontgassen

Zoals aangetoond is de hoeveelheid opgelost gas, of meer specifiek de partiële druk van het opgelost gas, in verhouding tot de omgevingsdruk die we op dat moment van de duik hebben. Hoe hoger het drukverschil (druk gradiënt), hoe sneller het gas oplost, in beide richtingen. Dat leidt ons tot de vraag: waarom niet gewoon stijgen tot aan de oppervlakte? Wat zijn de beperkingen van de oververzadiging en hoe worden deze gedefinieerd?

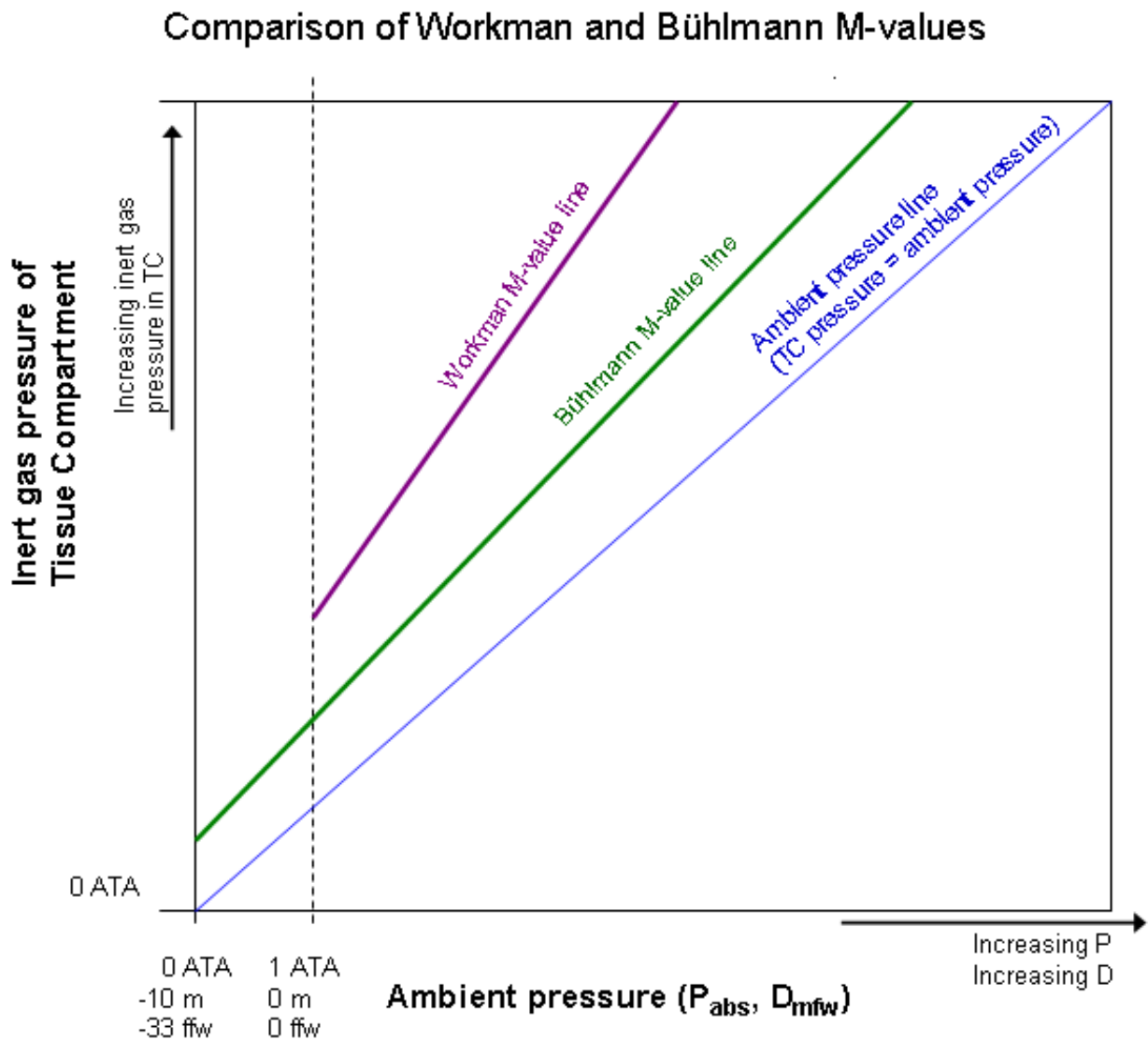
# M-Values

Terug naar de geschiedenis: Robert Workman introduceerde de term M-waarde als volgt: *de maximale druk van het inert gas in een bepaald (hypothetisch) weefselcompartiment, wat kan verdragen worden zonder decompressie ziekte*. Zoals we reeds zeiden vond Haldane in zijn onderzoek dat de M-waarde 2 is. Workman verfijnde dit door rekening te houden met het feit dat lucht voor 79% uit stikstof bestaat naar 1,58 (drukverschil van 2 bar naar 1 bar).

Workman bepaalde de M-waarden op basis van de diepte (drukwaarden) in plaats van de verhoudingen van de druk en gebruikte deze dan om een lineaire projectie te maken in functie van de diepte. De helling van de lijn met M-waarden wordt  $\Delta M$  (delta-M) genoemd en het vertegenwoordigt het verschil tussen de M-waarden in verhouding tot het verschil in diepte.

Bühlmann gebruikte dezelfde methode als Workman om die M-waarden uit te drukken, maar ipv de relatieve druk, gebruikte hij de absolute druk (die 1 bar hoger is)

## AFBEELDING 3



Afbeelding 3 toont zowel de M-waarden voor het model van Workman als Bühlman. De verschillen zijn overduidelijk : de lijn met de M-waarden van Workman is steiler dan die van Bühlmann, maar er is ook minder veiligheidsmarge. De M-waarden van Workman laten ook hogere oververzadiging toe.

De zaken zijn in werkelijkheid nog iets complexer: de M-Waarden verschillen per weefselcompartiment (TC). Er zijn ook 2 groepen van M-waarden voor elke TC: de M0 waarden (of diepte) en de M-waarden van het drukverschil ( $\Delta M$ , delta m-waarden). Workman definiëerde de verhouding tussen deze 2 waarden als volgt :

$$M = M_0 + \Delta M * d$$

M = partiële druk grens voor elke TC

M0 = partiële druk grens op zee niveau voor elke TC

$\Delta M$  = de hoeveelheid dat M toe neemt per diepte voor elke TC (druk per meter)

d = diepte in meter

Heel belangrijk is ook dat de kans op decompressie ziekte niet exact overeenkomt met deze M-waarden.

## Gradiënten

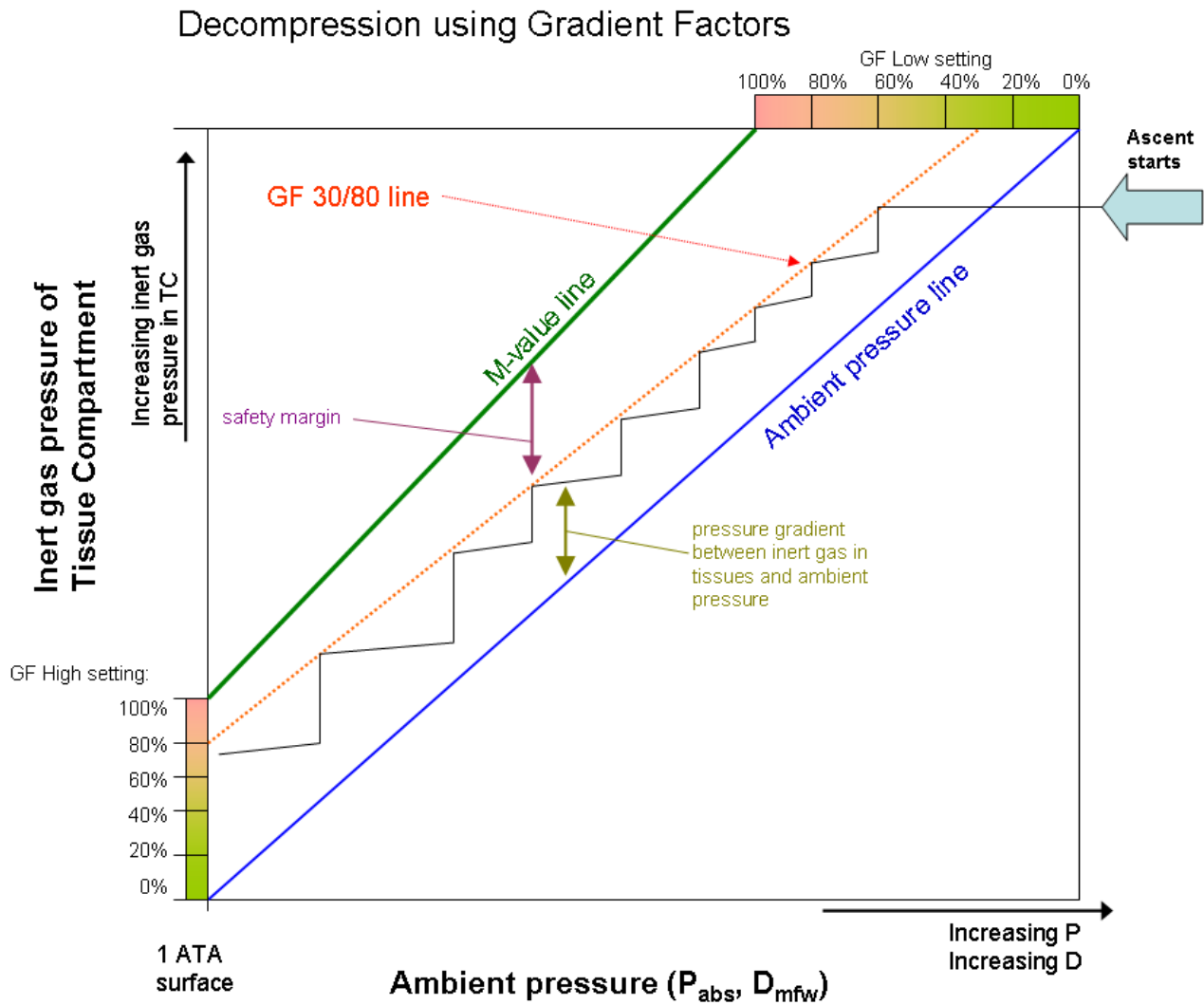
Gradiënten of Gradient Factors zijn een manier om een extra veiligheid, een extra conservatisme, in te bouwen in het model van Bühlmann. Zoals hierboven beschreven bepalen de M-waarden de limiet die niet mag overschreden worden bij het stijgen en decompresseren. Decompressie is echter geen exacte wetenschap en geen enkel model kan 100% elke kans op ziekte vermijden. Omdat elke duik en elke duiker anders zijn, is het meer dan aangewezen om een extra veiligheidsmarge in te bouwen.

Zoals we in afbeelding 3 konden zien gebeurt de decompressie tussen de lijn van de M-waarden en de lijn van de omgevingsdruk. Om te ontgassen moeten we boven de lijn van de omgevingsdruk zijn, maar aan de andere kant mogen we niet te dicht bij de lijn van de M-waarden komen omwille van de veiligheid. Gradient Factors geven de hoeveelheid van oververzadiging van het inert gas aan in het leidende weefsel. 0% wordt aanzien als geen oververzadiging, 100% wil zeggen dat we tegen de M-waarden lijn zitten (met een hoger risico op dcz dus). Let op we spreken steeds over het leidende weefselcompartiment, wat niet noodzakelijk het snelste is.

Sommige duikers vonden het niet fijn om gedurende de volledige duik dezelfde Gradiënt aan te houden. Dit leidde tot 2 GF waarden : GF low en GF high. De GF low definieert de eerste decompressiestop, terwijl de GF High de waarde aangeeft als men aan de oppervlakte komt.

Een voorbeeldje met GF low = 30% en GF high = 100% is te zien in afbeelding 4 :

AFBEELDING 4:

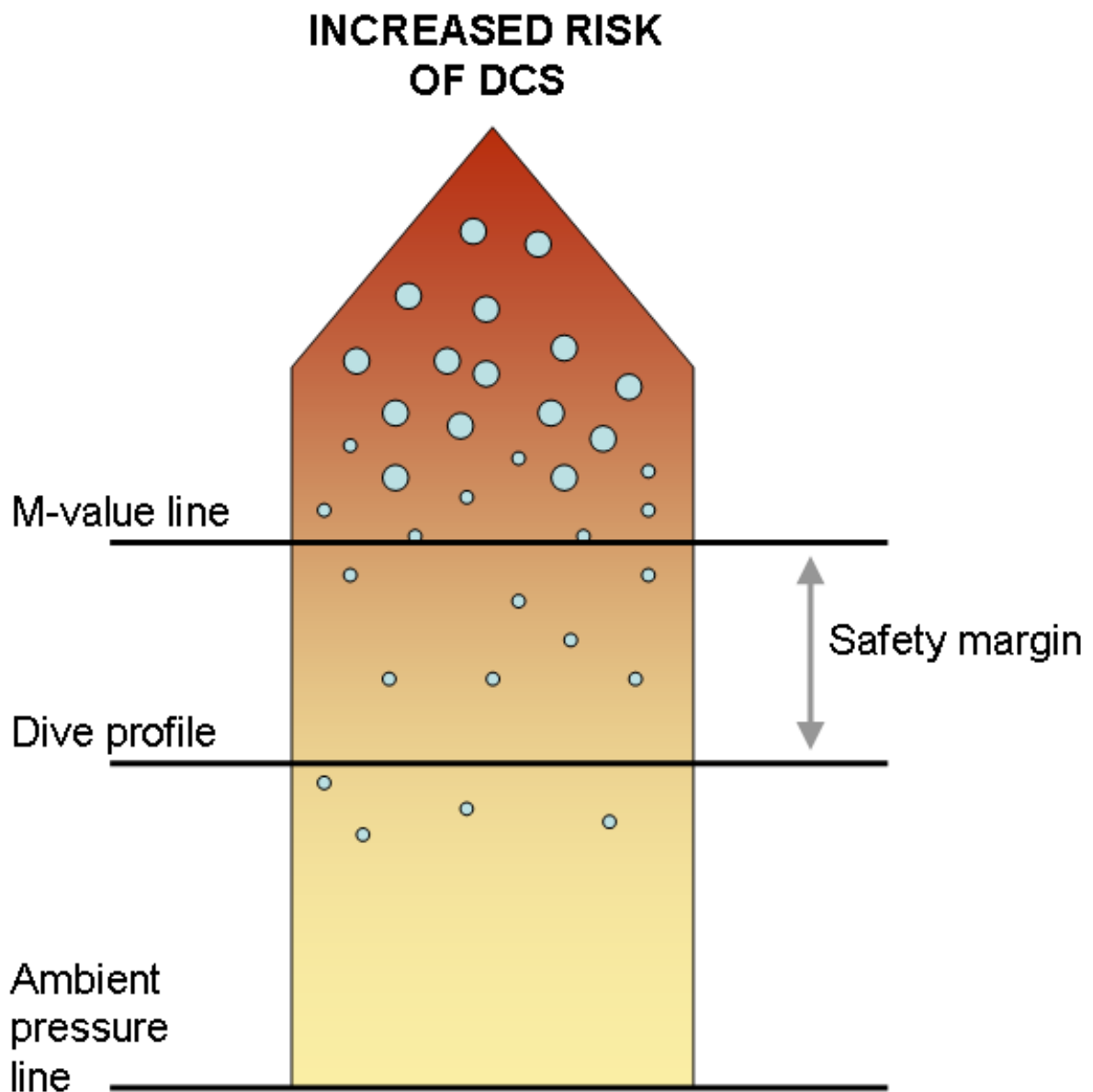


Model van de decompressie van 1 weefsel. De grafiek start rechtsboven en eindigt links onder. We zien dat de GF lijn steeds onder de lijn van de M-waarden blijft en zo een extra veiligheidsmarge in de decompressie inbouwt. Pure Bühlmann decompressie zou de M-waarden lijn volgen (GF 100/100)

## Praktische toepassingen en veilige duikgewoontes

Geen enkel decompressiemodel biedt 100% veiligheid: de M-waarden zijn geen harde lijn tussen geen of wel decompressieziekte. Meer nog modern onderzoek heeft aangetoond dat, ook al zijn er geen symptomen van decompressie ziekte, er toch bellen aanwezig kunnen zijn in onze weefsels. Daarom moeten we de M-waarden eerder beschouwen als de *aanvaardbare* hoeveelheid (stille) bellen, dan als een bellenvrije situatie.

AFBEELDING 5



Stille bellen zijn altijd aanwezig in onze weefsels, ook al zijn er geen symptomen van dcz. Zoals we reeds zeiden is elke duik en is elke duiker anders... daarom is het verstandig om in functie daarvan verschillende GF instellingen te gebruiken. Laten we er even een praktisch voorbeeldje bij halen :



Een duiker gaat naar 50m en blijft daar 20 minuten. Deze duiker gebruikt een 18/45 Trimix (18% zuurstof, 45% helium) als bodemgas, en zuurstof voor decompressie op 6m. De daalsnelheid is 15m/min en de stijgsnelheid 10m/min. We baseren onze decompressie op Bühlmann ZH-L16B en vergelijken 5 verschillende GF :

Diepte	GF 10/90	GF 20/70	GF 30/85	GF 36/95	GF 100/100	Gas	Opm
afdaling	3	3	3	3	3		
50m	20	20	20	20	20	Tx 18/45	
30m	1					Tx 18/46	
27m	1	1				Tx 18/47	
24m	1	1	1			Tx 18/48	
21m	1	2	1	1		Tx 18/49	
18m	1	3	2	2		Tx 18/50	
15m	3	3	3	2		Tx 18/51	
12m	3	5	3	3	2	Tx 18/52	
9m	7	10	7	5	3	Tx 18/53	
6m	5	6	5	4	4	100% O2	ppO2 1.6
3m	8	13	9	7	7	100% O2	ppO2 1.4
Totale duik	54	67	54	47	39		

De GF waarden zijn typische waarden gebruikt voor verschillende types van duiken : rebreather, koud water, standaard waarde in bepaalde decompressie software,... en GF 100/100 dus pure Bühlmann (geen enkele marge, dus niet echt veilig).

Zoals je duidelijk kan zien in de tabel genereren lagere GF low waardes diepere deco-stops. Sommige duikers gebruiken 10% als GF low waarde om zo "Deep stops" te genereren analoog aan de methode van Pyle. Deze deep stops hebben als hoofddoel om micro bellen te reduceren tijdens de diepere fase van de opstijging. Het nadeel is echter wel dat vele tragere weefsels nog steeds verzadigen en dus de totale decompressie tijd langer zal worden. Lagere GF High waarden daarentegen genereren langere stops op ondiepte.

Doorgedreven kennis van Gradient Factors is dus essentieel voor veilige duiken. Op langere decompressie duiken brengen deze niet alleen een stukje extra veiligheid, maar ook extra gas en logistieke planning mee. Een ervaren duiker past ook zijn/haar GF aan naargelang de omgeving en het type duik.

Het is makkelijk om een duikplan volledig aan te passen door andere Gradient Factors te gebruiken. De meeste moderne decompressie software biedt de mogelijkheid om extra veiligheidsmarges in te bouwen: hetzij met gewone instellingen, met nummers, of via Gradient Factors.

Een duiker kan zo de totale duiktijd eenvoudig met tot 10 minuten verlengen, om maar niet te spreken van welke decompressie gassen hij nodig heeft. Maar uiteraard zijn er ook mogelijke valkuilen. Denk even aan volgende situatie: de decompressie software geeft aan dat er net meer tussengas nodig is dan er in de duikfles kan. Een eenvoudige maar gevaarlijke keuze zou zijn om

met de GF te spelen zodat de decompressie tijd korter wordt en men zo terug binnen de grenzen komt.

Duikers die in hun computer de GF kunnen instellen zouden moeten weten wat de gevolgen van deze instellingen zijn voor hun decompressie profiel. Te veel duikers gebruiken de standaard fabrieksinstellingen of die van een vriend, of zelfs van het internet, ongeacht het soort duik die ze doen. Sommige mensen hebben ook een hogere aanleg tot DCZ en sommige duiken vragen een grotere fysieke inspanning dan andere.

GF bieden een grote mogelijkheid om de decompressie profielen aan te passen, maar soms is het misschien verstandig om wat langer rond te hangen...

En zoals altijd als je gaat duiken: het blijft jouw EIGEN verantwoordelijkheid om de juiste gradient factors/conservatisme in te bouwen.

Origineel artikel : <http://www.diverite.com/articles/gradient-factors/>

Vertaling : Glenn Verhale. Opmerkingen, fouten en verbeteringen graag naar glenn@10-forward.be