

Een nieuwe methode om de nultijd bij te stellen op basis van leeftijd, aërobe conditie en diepte

Nico A.M. Schellart

Samenvatting

Op basis van leeftijd en aërobe conditie is het mogelijk indirect het risico op decompressieziekte te schatten. Dit risico is vermoedelijk ook afhankelijk van de maximale duikdiepte. Wil men het risico beperken, dan is het bij oudere duikers, vooral bij een slechte conditie, noodzakelijk de nultijden te beperken. Dit kan er toe leiden dat ook de duikdiepte beperkt wordt.

De theorie van deze nieuwe methode is essentieel anders dan die van de "persoonlijke standen" van duikcomputers waarbij nooit een beperking van de duikdiepte geldt. Bij veroudering en een slechte conditie is de longfunctie verslechterd en uit eerder werk [6] bleek dit ook te resulteren in een diepte beperking. De numerieke uitkomsten zijn vooralsnog voorlopig maar leiden ongetwijfeld tot veiliger duiken indien correct gehanteerd.

Summary

Based on age and aerobic fitness it is possible to assess indirectly ones risk to acquire decompression sickness. This risk seems also to be dependent on maximal diving depth. To lower the risk it is necessary, especially for older divers in poor condition, to reduce their no-deco limits. This may also mean a reduction in the maximal diving depth.

The theory here presented differs basically from that of the 'personal setting' of a dive computer where never a reduction in the maximal diving depth is enforced. Furthermore, as concluded from earlier work [6], with age and reduced fitness the function of the lungs is diminished as well, which in it self limits the maximal depth.

At this time numerical values are preliminary but will no doubt lead to safer diving when used appropriately.

Afkortingen

A	age (leeftijd, jaar)
BF	body fat (lichaamsvet; %)
BG	bubble grade, uitgedrukt in SE
DCZ	decompressieziekte
H	height (lengte, m)
HR	heart rate (hartslag; slagen/min)
HR _{max}	maximale HR bij extreme inspanning tijdens aërobe sport na ca. 10-20 min, of $HR_{max} = 208 - 0,7A - 0,5 \cdot uS$ (aërobe correctie maximaal 6 punten)
MDD	maximale duikdiepte
NT	nultijd (min)
rDCZ	incidentie (risico) van DCZ (%)
SE	Spencer eenheid
uLS	uren lichte aërobe sport/week; $\frac{2}{3}HR_{max} < HR < 0,8HR_{max}$ met HR_{max} gemeten of $HR_{max} = 208 - 0,7A - 0,5(uLS + uMS + uUS)$.

uMS	uren matige aërobe sport/week; $0,8HR_{\max} < HR < 0,93 HR_{\max}$
uS	uLS + uMS + uUS
uUS	uren uitputtende aërobe sport/week; $HR > 0,93 HR_{\max}$
VO _{2max}	maximale aërobe capaciteit, te meten bij stapsgewijs opgebouwde belasting t tijdens aërobe sport na ca. 20 min (mL/(kg.uur))
W	gewicht (weight, kg)

Inleiding

Na een opstijging, ook als deze in overeenstemming met de duiktabellen of decompressiecomputers gebeurt, kunnen in de grote veneuze circulatie N₂ bellen ontstaan. N₂ bellen kunnen decompressie ziekte (DCZ) veroorzaken. Hoe meer bellen, hoe groter de kans op DCZ. Omdat het om een kans gaat, kan het zijn dat de een met veel bellen DCZ krijgt terwijl er bij een ander met evenveel bellen niets gebeurt. Ook kan het zijn dat bij dezelfde duik bij de ene duiker weinig en bij de ander veel bellen ontstaan, ook als beiden in leeftijd, gewicht etc. zeer veel op elkaar lijken (goed "gematched" zijn). Anders gezegd, persoonlijke gevoeligheid voor het krijgen van bellen èn persoonlijke gevoeligheid, gegeven een hoeveelheid bellen, voor het krijgen van DCZ, zijn beide van belang. Bij elke duik ontstaan bellen en als deze groot genoeg zijn, dan zijn ze met een zgn. Doppler apparaat aan te tonen. Men vermoedt dat als de bellen vaak massaal optreden, ook al geven ze nooit een DCZ verschijnsel, er op de duur wel schade kan ontstaan, in het bijzonder in het zenuwstelsel. Het is dus veiliger belvorming te voorkomen.

Het ontstaan van N₂ bellen is niet alleen afhankelijk van het duikprofiel, externe omstandigheden (bijv. koude) en interne omstandigheden (bijv. inspanning), maar ook van persoonlijke fysieke eigenschappen, te weten leeftijd en regelmatig bewegen. Veel bewegen, zoals bij duursport geeft een goede aërobe capaciteit (hoge maximale verbruik van O₂), te meten met de VO_{2max}. Of geslacht en lichaamsvet% (BF, body fat) een directe rol spelen is minder zeker. Op basis van leeftijd (veroudering werkt verhogend) en VO_{2max} (verlagend) kan met een model in statistische zin voorspeld worden in welke mate bellen ontstaan. De mate van belvorming, de "bubble grade" (BG), geeft het risico (kans) op decompressieziekte (rDCZ). Wil men duiken met een kans van 1% op DCZ, de hier gekozen norm, dan kan men op basis van de modelmatig geschatte BG de nultijd (NT) aanpassen.

Deze bijdrage is een verkorte weergave maar tevens een voorzetting van een web-artikel [1]. Lezers die zich willen verdiepen in de achtergrond van deze bijdrage wordt aangeraden [1] te lezen.

Het model

Berekening van BG

Een statistische analyse [1], te weten een multiële regressieanalyse op Doppler data [2] met leeftijd en VO_{2max} als onafhankelijke variabelen leverde de volgende predictie-vergelijking:

$$BG_{35d} = 0,048A - 0,023VO_{2max}^1 \quad (1a)$$

¹ (1a) is geldig vanaf 20 jaar. Alleen bij een extreem hoge VO_{2max}, kan BG net negatief worden, wat besloten ligt in het 'curve fitten' van experimentele data.

met A de leeftijd in jaar, VO_{2max} in mL/(kg.min) en BG in Spencer eenheden (SE, een index van 0 tot 4). Hoe men VO_{2max} experimenteel bepaalt of schat staat uitgebreid beschreven in [1] en verkort in Bijlage 1. Sommige onderzoekers menen dat BG ook direct afhankelijk is van het vet%. Het materiaal waaruit (1a) is afgeleid laat dat echter niet zien, ondanks dat vet% en VO_{2max} wel significant negatief gecorreleerd zijn. Het onderzoek over BG en rDCZ van vrouwen is zeer inconsistent. Vooralsnog ga ik er van uit dat (1a) ook geldt voor vrouwen.

Het onderzoek dat aan (1a) ten grondslag ligt betrof een zware deco-duik naar 35 m gedurende 25 min met een decostop van 3 min op 6 en een decostop van 18 min op 3 m (Carturan, 2002). De duikers van dit onderzoek hadden leeftijden van 20-55 jaar en een VO_{2max} van 20 tot 60 mL/(kg.min).

Zeer recent deed de Stichting Scott Haldane een soortgelijk Doppler onderzoek (Seychellen, november 2005) met een veel lichter duikprofiel, namelijk een duik naar 20 m gedurende 40 min en decostops op 9 m van 2 min en op 4 m van 5 min. Deze duik zit op de uiterste grens van een deco-duik, maar voor de veiligheid zijn toch stops gemaakt. Dit vanwege de gemiddeld hoge leeftijd van de proefpersonen: 52,6 jaar, range 38-76 jaar (VO_{2max} van 21 tot 59 mL/(kg.min)). Een zelfde multi-pele regressieanalyse leverde de predictie-formule:

$$BG_{Se} = 0,0264A - 0,0092VO_{2max} \quad (1b)$$

met BG in Kisman-Masurel eenheden (KM, eveneens een index van 0 tot 4; deze is, gezien de nauwkeurigheid van de bepaling gelijkgesteld aan Spencereenheden, zie ook [3]). Ook het Seychellen-onderzoek laat geen (directe) afhankelijkheid van het vet% zien. Opvallend zijn de ongeveer twee maal lagere coëfficiënten in (1b) ten opzichte van (1a) en de ruim twee maal lagere coëfficiënten van VO_{2max} ten opzichte van die van de leeftijd. Het wordt algemeen aangenomen dat de bellenstress en daarmee rDCZ groter is bij zeer diepe duiken en zware deco-duiken. Wellicht is het verschil tussen (1a) en (1b) hiervan een afspiegeling. Om beide onderzoeken te vergelijken is het nodig de beide duikprofielen te classificeren naar zwaarte en vervolgens ieder profiel gelijk te stellen aan een andere duikprofiel, dat op de grens van "deco" zit. Aangenomen wordt dat (1a) en (1b) ook gelden voor deze equivalente bijna-deco-duikprofielen. Dan is het mogelijk (1a) en (1b) te combineren met de maximale duikdiepte (MDD) als 3de onafhankelijke variabele. Stel dat het verschil tussen beide equivalente duiken Δd is en d_{Se} is de diepte van de duik equivalent aan de Seychellenduik, dan wordt het resultaat:

$$BG_{MDD} = BG_{Se} - (MDD - d_{Se})(BG_{35d} - BG_{20})/\Delta d \quad (2a)$$

met als richtingscoëfficiënt $(BG_{35d} - BG_{Se})/\Delta d$. Wordt Δd groter, dan wordt BG_{MDD} minder snel groter bij verhoging van MDD. Invullen van de coëfficiënten van (1a) en (1b) geeft:

$$BG_{MDD} = (0,0264A - 0,0092VO_{2max}) + (MDD - d_{Se})(0,0216A - 0,0138VO_{2max})/\Delta d \quad (2b)$$

Een gebruikelijke definitie van de zwaarte van een emmervormige duik is $p\sqrt{t}$, met t de duur van de duik. Met p in bar t.o.v. zeeniveau blijken de niet-decoduiken van de DCIEM tabel waarden op te leveren die zeer dicht bij elkaar liggen. (Bij gebruik van stops wordt $p\sqrt{t}$ gelijk aan $\sum p_i t_i / \sqrt{t_{\text{totaal}}}$ met i de diepteniveaus). De snelheid van niveauverandering

wordt verondersteld oneindig snel te zijn. Bij beide onderzoeken betrof het een emmervormige duik, zodat deze methode hier kan worden toegepast. De Seychellenduik is dan equivalent met een duik op 24 m van 25 min en de deco-duik met een duik op 60 m van 5 min. Invullen van d_{Se} (=24 m) en Δd (=36 m) geeft:

$$BG_{MDD} = (0.012+0.0006MDD)A - 0.000383MDD \cdot VO_{2max}, \quad (2c)$$

Door toeval heeft de rechter term van het rechter lid geen MDD-onafhankelijke constante zoals de linker term wel (de constante 0,012). Het gedrag van (1c) is complex. Bij lage leeftijd (tot 30 jaar) en hoge VO_{2max} (>40) kan BG licht verminderen bij oplopende MDD. Dit wordt veroorzaakt door de te sterke invloed van MDD op het rechter lid van (2c). Dit adstrueert de voorlopige waarden van de coëfficiënten maar wellicht nog meer de keuze van lineariteit van het model. Zo zal wellicht in werkelijkheid het effect van VO_{2max} bij hoge waarden verzadigen. Het afwijkende gedrag van (2c) bij bepaalde combinaties van leeftijd en VO_{2max} vereist het instellen van de voorwaarde dat bij verhoging van MDD BG niet mag verminderen. M.a.w. (2c) behoeft enige bijstelling. Herschrijven van (2c) geeft:

$$BG_{MDD} = 0,012A + (0,0006A - 0,00038 \cdot k \cdot VO_{2max})MDD, \quad (2d)$$

met k een nader te bepalen fractie die er voor moet zorgen dat BG altijd oploopt met de diepte. De rechter term moet voor een extreme combinatie van waarden, dit is $A=30$ (de leeftijden van het Seychellen onderzoek begon bij 38 jaar) met $VO_{2max}=60$, dus positief blijven. Derhalve wordt k 0,78. Een bijkomend effect is dat de invloed van VO_{2max} iets kleiner is geworden. Uitwerken geeft:

$$BG_{MDD} = (0,012+0,0006MDD)A - 0,0003MDD \cdot VO_{2max}, \quad (2e)$$

geldend voor $A \geq 30$ jaar, $VO_{2max} \leq 60^2$ en als additionele voorwaarde dat $10^4 W/H^2$ (Body Mass Index, BMI) < 35³. BG_{MDD} blijkt ca. 5 tot 10 maal sterker afhankelijk van de leeftijd dan van VO_{2max} . In (1a) en (1b) was dit een kleinere factor, van bijna 2,5. De sterke afhankelijkheid van de leeftijd wordt duidelijk als de coëfficiënten van de linker en rechter term vergeleken worden. De berekening van BG is uitgewerkt in Voorbeelden van Bijlage 1, waarbij leeftijden van 40 en 70 jaar en een lage en hoge VO_{2max} gekozen zijn.

Berekening van rDCZ uit BG

Met BG is rDCZ te berekenen. De relatie tussen gemeten BG is rDCZ is bepaald uit een analyse van literatuurdata van ca. 2000 Dopplermetingen [3]. Het resultaat is:

$$rDCZ = 0,53 \cdot 10^{0,46BG}, \quad (3)$$

met rDCZ de kans in %. Met een BG van 0,6 SE heeft men 1% kans (de norm) en bij elke stijging van BG met een punt neemt rDCZ met bijna een factor 3 toe! Met de voorspelde BG uit (2e) is nu een voorspelde rDCZ volgens (3) te berekenen

De relatie tussen nultijden en MDD met rDCZ als parameter

² Indien groter dan gelijkstellen aan 60.

³ Bij een BMI > 35 kan men zich afvragen of duiken wel medisch verantwoord is.

Duiktabellen geven de relatie tussen de nultijd (NT) en de maximale duikdiepte (MDD). Deze zijn gebaseerd op een gekozen rDCZ norm, bijv. die van de US-Navy 2,2% en die van DCIEM dieper dan 20 m 1% [4]. Uit deze en andere gegevens zijn een aantal NT-MDD curven geconstrueerd bij gekozen rDCZ. Deze zijn afgebeeld in Fig. 1. Hierbij zijn ook de bijbehorende BG waarden volgens (3) vermeld.

De data van Fig. 1 zijn gebaseerd op een stijgsnelheid van 18 m/min in plaats van de nu gebruikelijke 10 m/min (of minder). Stijgt men met 10 m/min op bij gebruik van een op 18 m/min gebaseerde tabel of algoritme van een duikcomputer dan moet de met (2d) geschatte BG_{MDD} verlaagd worden. Dit verdisconteert de risicoverlaging door de tragere opstijging, die ongeveer overeen komt met een BG verlaging van 0,5 SE [2,5].

Vergelijking (2e) wordt dan:

$$BG' = (0,012 - 0,0006MDD)A - 0,0003 \cdot VO_{2max} \cdot MDD - 0,5. \quad (4)$$

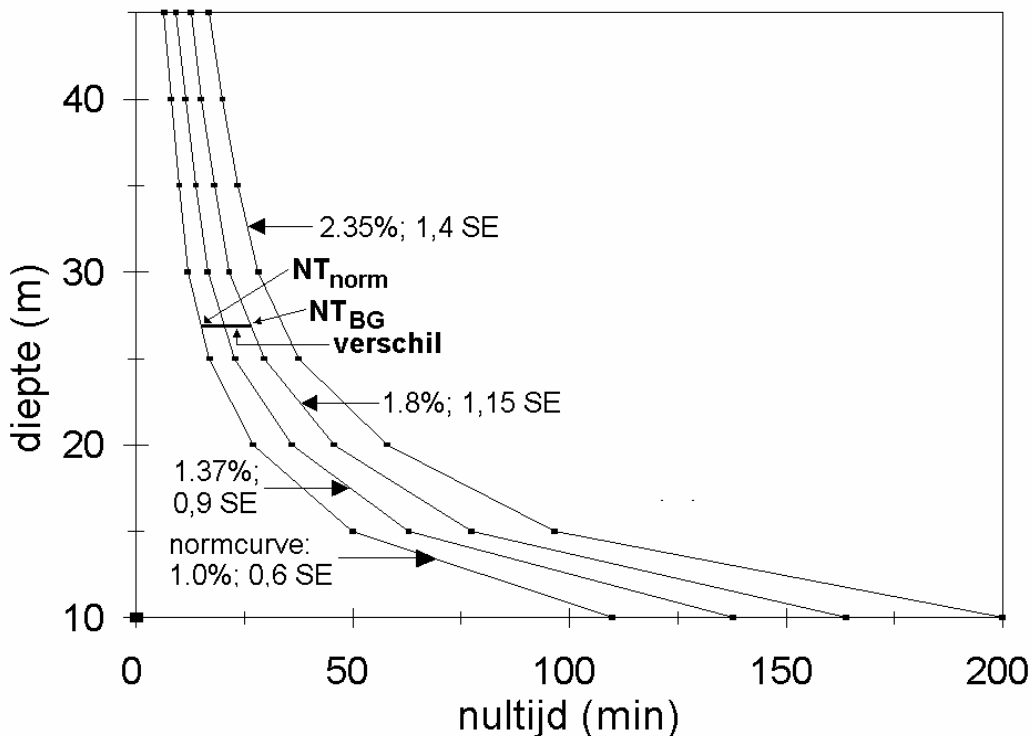


Fig. 1 Relatie tussen diepte en NT bij de diverse risico's op DCZ. Bij de vier curven aangeduid met grote pijlen is hun rDCZ (in %) aangegeven met de bijbehorende waarden van BG (in SE). Het horizontale balkje geeft het verschil tussen $NT_{BG} - NT_{norm}$, de 'straf tijd' bij 27 m diepte. De vier curven gelden voor een stijgsnelheid van 18 m/min.

Correctie van de nultijd

Als men zijn BG waarde kent, dus ook zijn rDCZ, en boven de 1% zit, dan is bij elke MDD te bepalen hoe de NT moet worden gecorrigeerd om een rDCZ van 1% te krijgen. De verlaging van NT ten opzichte van de hier gevolgde rDCZ-norm van 1% is $NT_{BG} - NT_{norm}$, zoals Fig.2 illustreert. Dit verschil is dus de 'staftijd' die afgetrokken moet worden van de

momentane NT van de decocomputer of de tabel (aanemend dat deze gebaseerd is op een snelheid van 18 m/min. Meestal is dat het geval.). Omdat deze grafische procedure wat bewerkelijk is, bleek het handiger de meetpunten van de curven aan te passen met een vergelijking, en dit voor alle curven gelijktijdig te doen. Vervolgens werd een vergelijking opgesteld waarmee de straf tijd wordt uitgerekend. Deze vergelijking is:

$$\text{straf tijd} = 891 \cdot \text{diepte}^{-1,43} (10^{0,46\text{BG}' - 1,89}) \quad (\text{min}) \quad (5)$$

De straf tijden berekend met (5) zijn weergegeven in Tabel 1. Tegenwoordig duikt vrijwel elke sportduiker met een duikcomputer (DC) die elk moment aangeeft wat de NT is. De momentane diepte is op te vatten als MDD, want voor het rekenmodel van de DC is de voorgeschiedenis irrelevant. Alleen de momentane partiële N₂ drukken, die elk moment berekend worden uit de net voorafgaande waarden in de weefsels (en eventuele al aanwezige bellen) wordt gebruikt om NT te berekenen.

Tabel 1 Straftijden in afhankelijkheid van BG en MDD

BG' (SE) →	STRAFTIJDEN (min)										0.6	≤1.0
	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5		
rDCZ (%) →	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.6	1.0	≤1.0
diepte (m)											NT _{MDD} 18m/min	NT _{MDD} 10m/min
9	<u>0</u>	8	17	27	39	51	65	80	98	117	141 (300)	192
12	0	<u>5</u>	11	18	26	34	43	53	65	77	72 (150)	102
15	0	4	<u>8</u>	13	19	25	31	39	47	56	45 (75)	64
18	0	3	<u>6</u>	<u>10</u>	14	19	24	30	36	43	32 (50)	42
21	0	2	5	8	<u>12</u>	15	19	24	29		25 (35)	32
24	0	2	4	7	10	<u>13</u>	16	20			20 (25)	24
27	0	2	4	6	8	11	<u>14</u>	17			16 (20)	19
30	0	1	3	5	7	9	12				14 (15)	15
33	0	1	3	4	6	8	10				12 (12)	12
36	0	1	2	4	5	7					10 (10)	10
39	0	1	2	3	5	6					8 (8)	8
42	0	1	2	3	4						7 (7)	7
45	0	<u>1</u>	2	3	4						7 (7)	7

De lege cellen geven BG-diepte combinaties waarbij de MDD niet gehaald kan worden vanwege een te hoge straf tijd. De linker kolom geldt zowel voor de MDD als voor de actuele diepte tijdens de duik. De een na rechter kolom geeft de waarden van NT op MDD bij rDCZ=1% bij 18 m/min opstijgsnelheid en tussen haakjes die van DCIEM. De NT van de 1% norm bij 18m/min blijkt ondieper dan 30 m conservatiever dan DCIEM (zie voorts de tekst). Dieper dan 36 m is de NT met 1 min verminderd, conform de meeste moderne NT tabellen. De rechter kolom geeft NT voor de MDD bij 10 m/min opstijgsnelheid. De vette waarden van de staftijden gelden voor een 70-jarige met een VO_{2max} van 35,9, de onderstreepte idem maar met een VO_{2max} van 20,3, die met cursief-outline voor een 40-jarige met een VO_{2max} van 30 (zie ook de Voorbeelden in Bijlage 1). Er is rekening gehouden met de tijd die het afdalen kost (afdaalsnelheid 20 m/min, deze wordt in praktijk zelden gehaald).

Omdat de tabel de straftijd geeft betekent dit dat op elk moment van de duik de nultijd van de DC minimaal de waarde van de straftijd moet aangeven. Komt men er onder (dus NT van de DC minus straftijd is negatief), dan moet men onmiddellijk opstijgen tot men op een diepte zit waar de nultijd op de DC display bij voorkeur tenminste 2 min groter is dan de straftijd. De nultijden van de 1% norm (één na rechterkolom, vet, Tabel 1) zijn gebaseerd op een rDCZ van 1% en met 18m/min opstijgen. De MDD-nultijden van de meeste duikcomputers wijken nauwelijks van elkaar en van DCIEM af maar ondieper dan 30 m zitten ze iets boven de 1% norm. Als veiligheid wordt in DCs een opstijgsnelheid van (ca.) 10 m/min gehanteerd, evenals bij de NOB-DCIEM tabel. Dit verruimt de MDD-nultijden van deze kolom, maar alleen ondieper dan 33 m (dieper liggen ze op grond van vrijwel internationale consensus vast). Bij 10m/min kunnen de MDD-nultijden vergroot worden. Dit is gedaan door een verhoging volgens de geïnterpoleerde waarden op de diagonaal {BG'(1.1,9m),BG'(0.6,30m)} op te tellen bij de waarden van de een na rechter kolom. De rechter kolom geeft het resultaat. Vanaf 27 m zijn deze nog wel kleiner dan de DCIEM NT's maar het verschil is kleiner geworden. De nieuwe NT_{MDD} waarden zijn de waarden die de duiktabellen en DCs volgens dit model zouden moeten gebruiken.

De correctie bij gebruik van een duikcomputer

Zoals bekend zijn er conservatieve (d.w.z. strenge) en liberale DCs (vaak oude modellen). De verschillen uiteten zich nauwelijks in de NT_{MDD} waarden, maar vooral in de NT tijdens de opstijging en meer naarmate de diepte geringer wordt. De rDCZ norm van DCs is (meestal) onbekend, terwijl Tabel 1 gebaseerd is op rDCZ=1%. Toepassing van Tabel 1 wordt hierdoor bemoeilijkt. Hoewel een echte regel niet is te geven hoe om te gaan met zijn DC en Tabel 1, is het onderstaande een praktische oplossing. Voor oude DCs (maximale halfwaarde 480 min en geen RGBM) geldt de tabel onverkort. Voor moderne, conservatieve DCs (bijv. de UWATEC Aladin® serie en de Suunto's met RGBM) kan tijdens de opstijging $\frac{3}{4}$ van de opgegeven straftijd genomen worden (gemakshalve de " $\frac{3}{4}$ -regel" genoemd). Dit echter alleen als men tenminste 6 m ondieper zit dan MDD en bovendien de diepte ten hoogste 21 m is. Voor de zeer conservatieve UWATEC Smart kunnen deze waarden gehalveerd worden (de " $\frac{1}{2}$ -regel"). Een voorbeeld. Men maakt een duik naar 33 m en gebruikt een Smart. Stel dat BG volgens (4) 1,1 SE is, dan is de straftijd op 33 m (MDD) 8 min, als men op 30 m aankomt 9 min, op 27 m 11 min etc. Wordt nu verder opgestegen dan gaat de halvering van de staftijd pas werken op 21 m. Deze wordt $0,5 \times 15 = 8$ min, op 18 m $0,5 \times 19 = 10$ min etc. Het is raadzaam, aannemend dat Tabel 1 praktische waarde heeft, voor elke MDD (in stappen van 3 m) de BG te berekenen. Onder de betreffende BG waarde in Tabel 1 kan dan op de lege 4^{de} regel (naast 'diepte (m)') de bijborende waarden van MDD worden ingevuld (zie Tabel 2 onder Voorbeelden, Bijlage 1). Alle niet van belang zijnde waarden en kolommen kunnen nu worden verwijderd. Onder Voorbeelden is dat gedaan voor de fitte 70-jarige duiker, die *zijn* tabel nu onderwater zou kunnen meenemen.

Discussie

Predictie van mannen en vrouwen

Het onderzoek van de decoduk betref alleen mannen, het Seychellen onderzoek mannen en vrouwen (7). Vrouwen hebben gemiddeld een ca. 12% lagere VO₂max (afhankelijk van leeftijd). Door vrouwen en mannen gezamenlijk te analyseren wordt extra

on nauwkeurigheid in de statistische analyse geïntroduceerd. Worden allen de data van mannen geanalyseerd, dan wordt (2c):

$$BG_{MDD} = (0,008 + 0,00067MDD)A - (-0,0023 + 0,00042 \cdot MDD)VO_{2max}, \quad (6a)$$

en (4):

$$BG_{MDD} = (0,008 + 0,00067MDD)A - (-0,0023 + 0,00034 \cdot MDD)VO_{2max}. \quad (6b)$$

Dit levert een kleine vermindering van de oorspronkelijke straf tijden en iets grotere MDD-en. Tabel 2 in Bijlage 1 geeft een uitwerking voor een 70-jarige man met een zeer goede en een slechte conditie (zie onderschrift van de tabel).

Veroudering

De invloed van de diepte is zeer aanzienlijk. De sterke dominantie van de leeftijd t.o.v. VO_{2max} is iets te verminderen door de factor k van (2c) dichterbij 1,0 te laten komen, maar het effect is gering. Gegeven de coëfficiënten van (1a) en (1b) en de procedure van het combineren van deze beide resultaten (waarbij het diepteverschil Δd tussen de beide equivalente duikprofielen tot een grootte van ca. 70 mag oplopen) is de sterke dominantie van de leeftijd niet substantieel te veranderen.

Een hoge leeftijd geeft een grote verkorting van de nultijden en daardoor al gauw een beperking van de duikdiepte. Opgemerkt zei dat ongeacht de leeftijd een zeer goede conditie meestal een MDD verschil van maar 3 m geeft ten opzichte van een slechte conditie, iets wat met de coëfficiënten van (1a) en (1b) niet verwacht wordt.

Bij veroudering en een slechte conditie is de longfunctie verslechterd. Deze verslechtering is als functie van de duikdiepte te berekenen [6] en dit blijkt ook te resulteren in een diepte beperking.

De waarde en elegantie van het model is zijn bevestiging van het algemeen in de sport- en inspanningsfysiologie geaccepteerde regel dat men ouderen minder moet belasten (hier de diepte) en dat zij dan nauwelijks minder functioneren dan jongeren.

Dieptebeperking ondanks gevalideerde duiktabellen

Men kan zich afvragen hoe het komt dat naast leeftijd en VO_{2max} tevens MDD de Doppler score, dus bellenstress, lijkt te bepalen zoals de gecombineerde analyse van de beide onderzoeken aangeeft. De combinatie grote diepte en hoge leeftijd is in het model onmogelijk, terwijl op geringe diepte de straf tijd ook bij oudere duikers in de praktijk nauwelijks een rol speelt.

Door de nultijden als functie van MDD aan te passen en bij deco-duiken stops in te voeren beogen duiktabellen rDCZ constant te houden en dit geldt ook voor BG vanwege het statistische verband tussen rDCZ en BG. Dit is leeftijdsonafhankelijk. NT is in het model afhankelijk van BG, die op zich een functie van (vooral) leeftijd en MDD is. De vermoedelijke reden van de leeftijdsonafhankelijkheid van de tabellen (en evt. achterliggende algoritmen) is dat de data waaruit tabellen geconstrueerd zijn i.h.a. jonge, fitte (hoge VO_{2max}) duikers betreft. Deze zijn gemiddeld (veel) jonger dan de proefpersonen van de hier beschreven twee onderzoeken. Dit is ook consistent met de uitkomst van het model, immers duikers tot 41 jaar met tenminste een normatieve conditie (34,1 mL/(kg.min) kunnen elke duik tot 45 m maken (volgens (6b)). Ook de

modellen van duikcomputers zijn vooral op jonge duikers gebaseerd, zij het vermoedelijk minder extreem.

Afgezien van de constatering dat in het model de data van maar twee duikprofielen zitten, is het denkbaar dat voor niet-emmervormige duikprofielen andere coëfficiënten in vergelijking (4) verkregen worden.

Het nadeel van de "persoonlijke stand" van duikcomputers

Een alternatief van het gebruik van Tabel 1 is het gebruiken van de 'persoonlijke standen' van de DC. Bij bijna alle DCs blijken de nultijden gelijk te zijn gelijk aan de "bergmeerstand". Het model om bergmeertabellen te maken is echter geheel gelijk aan dat op zeeniveau. Alleen worden andere drukken ingevoerd (kleiner dan 1 bar). De hier toegepaste methode heeft een heel ander uitgangspunt en de resultaten zijn dan ook essentieel anders. De p-standen geven nooit een diepte beperking maar geven wel veel groter straftijden ondieper dan 15 m. Het is zeer de vraag of de p-standen voor ouderen en niet-fitte duikers de beste oplossing is. Onder gekwalificeerde keuringsartsen heerst de algemene mening dat oudere duikers hun diepte dienen te beperken.

Vasculaire en extravasculaire bellen in relatie tot DCZ

De relatie tussen BG en rDCZ is zuiver statistisch. Uit de beroepsduikerij is het bekend dat er duikers die altijd een hoge Doppler score hebben en toch nooit DCZ krijgen. In gezonde longen staan alle veneuze bellen hun gasinhoud (stikstof) af aan de longblaasjes. De longen functioneren dus als bellenfilter, ook bij groot aanbod. Als het longfilter slecht werkt door veel shunts, veel bullea (roken, veroudering), dan zullen veel kleine bellen (tot ca. 7 μ m) passeren. Deze kunnen na arterieel transport zich in allerlei weefsels gaan nestelen en vervolgens groeien. Met een vrij lage Doppler score kan men dan DCZ krijgen. Dit verklaart een deel van de persoonlijke gevoeligheid voor DCZ. Een ander aspect is het patente foramen ovale. Hoe groter dit is en afhankelijk van het klaargedrag, kan dit ook DCZ bevorderen. Vatblokkerende bellen geven DCZ of tenminste subklinische pathologie, al dan niet met blijvende schade. Een andere manier waarop DCZ ontstaat, is het optreden van extravasculaire bellen. De Doppler methode is, zoals het Doppler principe aangeeft, alleen gevoelig voor bewegende bellen en die kunnen dus allen in bloedvaten of het hart lumen gemeten worden. Extravasculaire bellen zijn met normale klinische apparatuur niet aan te tonen. Maar bij een groot deel van de DCZ gevallen gaat het wel om deze bellen.

Robuustheid en praktische waarde model

Zoals al eerder behandeld blijkt (4) weinig gevoelig voor variatie in de coëfficiënten. Variatie in de diepte beperking blijkt meestal maar 3 m te bedragen. Het model is derhalve, en vrij verrassend, behoorlijk robuust. Daarnaast moet men wel steeds bedenken dat de NT-correctie berust op een predictie van BG. Het betrouwbaarheidsinterval van BG is groot [1]: bij de BG van (4) $\frac{3}{4}$ KM. Zolang echter de individuele gevoeligheid voor belvorming niet experimenteel is bepaald, is het veiliger NT te corrigeren. En zelfs als de Doppler score bepaald wordt is er nog een ruime incidentele intra-individuele variatie (ca. 0,4 KM).

Nogmaals wordt opgemerkt dat de uitkomsten van deze methode van correctie van NT in numeriek opzicht vooralsnog voorlopig zijn. Dat blijkt bijv. uit de noodzaak (1c) bij te stellen door de voorwaarde op te leggen dat ouder dan 30 jaar BG altijd oploopt met

MDD. Het bovenstaande maakt duidelijk dat meer onderzoek met duikprofielen naar diverse andere MDDs nodig is om een betere predictievergelijking te krijgen. Vergelijking (1e) is dus in numeriek opzicht vrij speculatief. Desondanks is Tabel 1 theoretisch het beste alternatief en een goed referentiekader bij de overwegingen van de keuringsarts of de ervaren sportduiker (die de theorie voor de sportduiker goed beheerst) om tot een aanpassing van het duikgedrag te komen. Aldus wordt het risico op DCZ, en op termijn eventuele schade aan het zenuwstelsel verkleind.

Disclaimer *Hoewel elke verkorting van de nultijd onbetwist een veiliger situatie schept*, is toepassing van de tabel voor eigen risico (SDR en auteur zijn niet aansprakelijk te stellen).

Referenties

- [1] .Achtergronden van een theoretisch model over het risico op decompressieziekte met leeftijd, geslacht, VO_{2max} en lichaamsvetpercentage als parameters. Is een correctie van de nultijd mogelijk? Met speciale aandacht voor vet% en VO_{2max} . <http://www.duikgeneeskunde.nl/> (literatuur).
- [2] Carturan D, Boussuges A, Vanuxem P, Bar-Hen A, Burnet H, Gardette B. Ascent rate, age, maximal oxygen uptake, adiposity, and circulating venous bubbles after diving. *J Appl Physiol* 93, 1349-1356, 2002.
- [3] Niskhi RY, Brubakk AO, Eftedal OS, Bubble detection. In: Brubakk AO, Neuman TS, red. Bennett and Elliott's physiology and medicine of diving, Edinburgh, Saunders, 2003, 501-29.
- [4] Hamilton RW, Thalmann ED Decompression Practise. In: Brubakk AO, Neuman TS, red. Bennett and Elliott's physiology and medicine of diving. Edinburgh, Saunders, 2003, 455-500.
- [5] Marroni A, Bennett PB, Cronje FJ, Cali-Corleo R, Germonpre P, Pieri M, Bonuccelli C, Balestra C. A deep stop during decompression from 82 fsw (25 m) significantly reduces bubbles and fast tissue gas tensions. *Undersea Hyperb Med*;31, 233-243, 2004.
- [6] Schellart NAM, Physics of compression chambers and physiological physics of hyperbaric environments, part 2. <http://www.duikgeneeskunde.nl/> (literatuur).

Dankwoord

Met dank is gebruik gemaakt van de door de auteur uitgevoerde analyses van data van het Doppler-Seychellen onderzoek van de Stichting Scott Haldane, november 2005. De wiskundige bewerking van de MDD-NT relaties is uitgevoerd door Ir. Jos Jacobs, 3* duiker en werktuigbouwkundige. Met dank maakte ik hiervan gebruik en verkreeg daarmee vergelijking (5).

Bijlage 1

Bepaling van VO_{2max} VO_{2max} wordt berekend [1] met:

$$VO_{2max} = 59 - 0,24A - 0,59 \cdot BF + 1,4 \cdot uLS + 2,5 \cdot uMS + 4 \cdot uUS \text{ (mL/min.kg)}, \quad (B1)$$

Hierbij is A de leeftijd in jaren en BF het vetgehalte in % (zie hieronder). Voor de vrouw is de constante 57 i.p.v. 59. Voorts is:

uLS is het aantal uren Lichte duurSport/week, gedefinieerd als $\frac{2}{3}HR_{max} < HR < 0,8HR_{max}$. HR is de hartslag, en HR_{max} is de maximale HR bij langzaam opgebouwde extreme inspanning bij duursport gemeten in de laatste maanden. HR wordt gemeten met een

hartslagmeter of aan de halsslagader (5 punten bijtellen) . Als HR_{max} niet bekend is geldt de *theoretische* $HR_{max} = 208 - 0,7A$, verlaagd met $\frac{1}{2}$ uur duursport (maximaal 6 punten). Zonder hartslagmeter is de norm het nog net kunnen praten bij duur/veldsporten. Doe je niet aan duur/veldsport neem dan de helft van aantal uren van zwaar werk met een maximale uitkomst van 10 uur.

uMS: uren Matige duurSport/week. Matig is: $0,8HR_{max} < HR < 0,93 HR_{max}$. Als HR_{max} meer dan 20% onder de theoretische HR_{max} ligt dan gelden deze uren als uLS. Zonder hartslagmeter betekent dit (zeer) pittig trainen, waarbij het recreatieve element ondergeschikt is aan presteren. Het ademhalingsritme is sterk verhoogd en dieper.

uUS uren Uitputtende duurSport/week. Uitputtend geldt als $HR > 0,93 HR_{max}$. Dit is extreem zware aërobe duursportbeoefening. Als de gemeten HR_{max} meer dan 7% onder de theoretische HR_{max} ligt dan gelden deze uren als uMs. Zonder hartslagmeter wordt uitputtend gedefinieerd als het niet meer kunnen praten (alleen kreten). Het gaat om een wedstrijd of iets dergelijks. De meeste duikers zullen hier '0' moeten invullen. Opgave in min/60.

Bij meer dan 8 uur/week aërobe sport in totaal gelden de uren boven de 8 voor de helft, beginnend bij uLS. VO_{2max} kan ook op andere wijzen geschat worden [1].

Bepaling van vet% (BF) Uit lengte (H, m), gewicht (W, kg), leeftijd (A, jaar), geslacht en aërobe sportactiviteit is vet% te schatten met:

$$BF_{man} = 1,3W/H^2 - 15 + 0,14A - (0,2 \cdot uLS + 0,4 \cdot uMS + 0,6 \cdot uUS), \text{ in } \%, \text{ en} \quad (B2a)$$

$$BF_{vrouw} = 1,5W/H^2 - 10 + 0,16A - (0,2 \cdot uLS + 0,4 \cdot uMS + 0,6 \cdot uUS), \quad (B2b)$$

De term tussen haakjes geeft een correctie voor aërobe sport. Vet% kan ook verkregen worden met een elektronische bio-impedantiemeter of huidplooiingen [1].

Rekenvoorbeelden

Een man 40 jaar, 75 kg en 180 cm lang, en 1uur/week lichte en 2,5/week middelmatige aërobe sport. Zijn vet% is dan na invullen van vergelijking (b2a):

$$BF_{man} = 1,3 \times 75/1,8^2 - 15 + 0,14 \times 40 - (0,2 \times 1 + 0,4 \times 2,5 + 0,6 \times 0) = 19,5\%,$$

VO_{2max} wordt dan na invullen van vergelijking (4):

$$VO_{2max} = 59 - 0,24 \times 40 - 0,59 \times 19,5 + (1 \times 1,4 + 2,5 \times 2,5 + 0 \times 4) = 45,5 \text{ mL}/(\text{min} \cdot \text{kg})$$

Bedenk, dat bij de berekening van BG eerst MDD moet worden gekozen. We nemen de diepste duik, 45 m dan wordt BG volgens (4):

$$BG' = (0.012+0.0006*45)40 - 0.0003*45*45,5 - 0.5 = 0,45 \text{ SE.}$$

Alle duiken kunnen dus zonder straftijden gemaakt worden. Nemen we nu aan dat de 40-jarige een overgewicht (106 kg) en slechte conditie (geen duursport) heeft dan is VO_{2max} 30 en de BG op 45 m wordt:

$$BG' = (0.012+0.0006*45)40 - 0.0003*45*30 - 0.5 = 0,66 \text{ SE.}$$

De duik naar 45 m blijkt met de nihil straftijd van 1 min te kunnen worden gemaakt (zie Tabel 1, weergegeven in cursief-outline).

Nemen we nu bovengenoemde slanke, sportieve duiker met dezelfde eigenschappen, maar 30 jaar ouder, dan komt zijn VO_{2max} op 35,9. De straftijden bij de bijbehorende MDD-BG waarden zijn onderstreept in Tabel 1. Er is een aanzienlijke beperking van de diepte. Op 27 m, de maximale MDD, kan maar zeer kort gedoken worden. Tabel 2 geeft de voor hem aangepaste Tabel 1, waarbij aangenomen is dat hij met een moderne DC duikt. Vanaf 21 m en ondieper is dus de $\frac{3}{4}$ -regel toegepast.

Nemen we vervolgens de dikke 40-jarige, maar nu 30 jaar ouder dan is, tengevolge van de leeftijd zijn VO_{2max} gezakt tot 20,3 (volgens (B1) en (B2a)). De maximale MDD is ook 27 m, maar er is na afdalen niet eens 1 min over op 27 m. De straftijden zijn een klasse korter t.o.v. zijn sportieve leeftijdsgenoot. De vette waarden in Tabel 1 geven de straftijden bij de bijbehorende MDD-BG combinaties. De invloed van VO_{2max} blijkt gering.

Tabel 2 Straftijden 70-jarige mannelijke duiker met VO_{2max} van 35,9 mL/(min·kg) en duikend met moderne DC

70 jaar, ♂, VO_{2max} 36 mL/(min·kg), moderne DC								
	STRAFTIJDEN (min), in grijs							risico $\leq 1\%$
BG (SE) →	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	0.6
MDD (m)→	9	12	15	18	21	24	27	
diepte (m)↓								NT_{MDD}
9	<u>0</u>	8	<u>12</u>	<u>21</u>	<u>30</u>	<u>38</u>	<u>46</u>	192
12	<u>0</u>	5	<u>11</u>	<u>15</u>	<u>21</u>	<u>27</u>	<u>31</u>	102
15		4	8	13	<u>15</u>	<u>21</u>	<u>23</u>	64
18			<u>6</u>	10	<u>14</u>	<u>15</u>	<u>18</u>	42
21				<u>8</u>	12	<u>15</u>	<u>15</u>	32
24					<u>10</u>	13	<u>16</u>	24
27						<u>11</u>	14	19
30							<u>12</u>	15

Straftijden op een grijs veld zijn die voor de 70-jarige, zoals gespecificeerd, conform (Cursieve waarden zijn zijn straftijden na toepassing van de $\frac{3}{4}$ -regel voor de moderne DC. Onderstreept: straftijden voor de MDD. Waarden met kleine, onderstreepte getallen (al dan niet vet) zijn conform (6b) voor de 70-jarige met goede conditie en de waarden in vette getallen (ongeacht formaat en onderstreping) voor de 70-jarige met overgewicht (zie Discussie).