

In hoeverre bepalen leeftijd, geslacht, VO_{2max} en lichaamsvetpercentage het risico op decompressieziekte? Een theoretisch model

Nico A.M. Schellart

Samenvatting

Tijdens maar hoofdzakelijk ruim een uur na de opstijging kunnen N_2 bellen ontstaan, ook als men zich bij sportduiken houdt aan de duiktabellen of decompressiecomputer. Het ontstaan van N_2 bellen na de opstijging blijkt niet alleen afhankelijk te zijn van het duikprofiel, en externe en interne omstandigheden, maar ook van de persoonlijke fysieke eigenschappen, te weten leeftijd, lichaamsvet% en aërobe conditie, te meten als aërobe capaciteit. VO_{2max} , het maximale O_2 verbruik bij uiterste inspanning, kwantificeert deze capaciteit. Uit lengte, gewicht, leeftijd en geslacht en aërobe activiteit, kunnen vet% en VO_{2max} (mL/min·kg) geschat worden. Uit deze twee parameters samen met leeftijd en geslacht kan vervolgens met een theoretisch model voorspeld worden in welke mate N_2 bellen kunnen ontstaan. De mate van belvorming geeft de theoretische kans op decompressieziekte (DCZ). Wil men duiken met een kans van 1% op DCZ, dan moeten de nultijden worden aangepast. Deze aanpassing is in principe te berekenen.

Inleiding

Bij gebruik van duiktabellen en vooral duikcomputers bij sportduiken is het in het algemeen mogelijk bij bijzondere, d.w.z. zwaardere duikomstandigheden (bijv. bergmeren, stroming, koude) een zodanige aangepaste tabel of instelling te kiezen dat de nultijden korter zijn dan onder normale condities. Het is echter meestal niet mogelijk in de keuze van de aangepaste tabel of instelling van de duikcomputer ook rekening te houden met de fysieke eigenschappen van de duik(st)er. Dit artikel beschrijft een theoretische methode hoe deze tekortkoming is op te heffen of tenminste te verkleinen. Ook beschrijft het de relatie tussen de fysieke eigenschappen en het risico op decompressieziekte (DCZ).

Vanzelfsprekend wordt het risico op DCZ (rDCZ) ook bepaald door factoren van het milieu interieur, zoals de hydratatie toestand, alcoholpromillage, vermoeidheid, wellicht psychische stress en, zoals onlangs bericht door aërobe activiteit 20 uur voorafgaand aan de duik (Wisloff et al. 2004). Deze factoren zijn echter onderhevig aan korte termijn fluctuaties en blijven buiten beschouwing.

Bij het aanhouden van de nultijden van duiktabellen en duikcomputers wordt volgens de theorie het ontstaan van DCZ geminimaliseerd tot een vast percentage. Algemeen wordt aangenomen dat DCZ gepaard gaat met het optreden van N_2 bellen in de weefsels, in het bijzonder het bloed. Zelfs indien na de duik geen enkel symptoom van DCZ aanwezig is, wordt verondersteld dat er altijd kleine bellen, microbellen ontstaan, ook als deze met de Doppler methode niet detecteerbaar zijn. Het massaal optreden van grotere bellen, van enkele tientallen μm , hoeft niet noodzakelijkerwijs het ontstaan van DCZ in te houden. Hun aanwezigheid vormt echter wel een potentieel risico.

Tabellen en computer algoritmes zijn gebaseerd op een fictieve normduiker. Een klassiek voorbeeld is de Amerikaanse (VS) marineduiker. Veel sportduikers wijken echter behoorlijk af van deze normduiker, bijv. qua leeftijd, postuur en conditie. Uit onderzoek is gebleken dat een hoge leeftijd (Carturan et al., 1999, 2002; Dunford et al. 2002), een slechte aërobe conditie (Carturan et al., 1999, 2002) en een hoog percentage aan lichaamsvet (Dembert et al. 1984; Lam en Yau 1989, Carturan et al. 1999, 2000) het risico vergroot. Dezelfde bevindingen komen uit hypobaar DCZ onderzoek (Sulaiman et al. 1997, Conkin et al. 2002). Als de mate van het ontstaan van bellen per individu is te berekenen, dan is het mogelijk de nultijden voor de theoretische hoeveelheid bellen te corrigeren, zodanig dat deze hoeveelheid wordt teruggebracht tot het normale niveau, de norm van het risico op DCZ (rDCZ) die men zich gesteld geeft. We zullen zien dat rDCZ hierdoor aanzienlijk kan worden verkleind.

Doel

Dit artikel beoogt om aan de hand van leeftijd, geslacht, aërobe conditie (VO_{2max}) en vet% de mate van voorkomen van bellen, de 'bubble grade' (BG), in de veneuze bloedbaan te schatten. Deze theoretische hoeveelheid bellen, treedt op als men zich precies aan de nultijden van de duiktabellen of de duikcomputer houdt. De elementaire eigenschappen lengte, gewicht, leeftijd, geslacht en de mate van aërobe conditie vormen de grootheden waaruit het percentage lichaamsvet (vet%) rekenkundig wordt geschat. Als maat voor aërobe conditie, wordt de VO_{2max} gebruikt. De VO_{2max} wordt rekenkundig geschat uit de leeftijd, de mate van beoefening van aërobe sport ('endurance sport') en het vet%.

Een uitgebreidere wetenschappelijke onderbouwing van het onderstaande is te vinden in Schellart, 2005.

De getalsmatige uitkomsten van dit model lenen zich vanwege het grote aantal aannamen en de grote waarschijnlijkheidsintervallen niet voor directe toepassing in de duikpraktijk. Wel kan het dienen als theoretisch referentiekader bij de overwegingen van de keuringsarts om in voorkomende gevallen de sportduiker te adviseren zijn duikgedrag aan te passen om het risico op DCZ te verkleinen. Hierbij spelen vanzelfsprekend vooral leeftijd en aërobe conditie naast andere factoren een rol. Opgemerkt zij dat elke verkorting van de nultijd, ook een kleine, het duiken veiliger maakt en dat geldt zeker boven de 50 jaar.

De lezer wordt uitgenodigd op dit stuk commentaar te geven (n.a.schellart@amc.uva.nl).

Methoden en resultaten

Het Bubble Grade model

Berekening van het vet%

Het vet%, voortaan aangeduid als BF (*body fat*) wordt allereerst berekend uit lengte en gewicht, waarbij Black et al. (1983) als uitgangspunt diende. Door mij ingevoerde correcties voor een kleine constante afwijking (zie Jebb et al, 2000), leeftijd en aërobe conditie zijn daaraan toegevoegd. De vergelijking luidt:

$$BF_{man} = 1,28W/H^2 - 14,9 + 0,14A - (0,2 \cdot uLS + 0,4 \cdot uMS + 0,6 \cdot uUS) \quad (1a)$$

$$\mathbf{BF}_{\text{vrouw}} = 1,48W/H^2 - 9,9 + 0,16A - (0,2 \cdot uLS + 0,4 \cdot uMS + 0,6 \cdot uUS) \quad (1b)$$

met:

BF	body fat: vet in %, betrokken op het totale lichaamsgewicht,
W	weight: gewicht (kg),
H	height: lengte (m)
A	age: leeftijd (jaar. Boven 65 jaar geldt: A = (130 - leeftijd),
(0,2·uLS + 0,4·uMS + 0,6·uUS)	kleine correctieterm voor aërobe conditie (zie later).

Het quotiënt W/H^2 , de dominante variabele, is de Quetelet-index of BMI (body mass index). De drie grootheden van de correctieterm voor conditie worden als volgt gedefinieerd:

uLS

uren/week lichte aërobe sport, gedefinieerd als $HR_{\max} < HR < 0,8HR_{\max}$. HR_{\max} is de maximale HR (heart rate; slagen/min) van mensen die intensief aërobe sport beoefenen, gemeten in de laatste maanden tijdens in ca. 12-20 minuten opgebouwde extreme inspanning bij aërobe sport. Als HR_{\max} niet gemeten is geldt $HR_{\max} = 208 - 0,7A - 0,5(uLS + uMS + uUS - 1)$;

uMS

idem maar matig, gedefinieerd als $0,8HR_{\max} < HR < 0,93 HR_{\max}$;

uUS

idem maar uitputtende, gedefinieerd als $HR > 0,93 HR_{\max}$.

Bij meer dan 8 uur/week in totaal gelden de uren boven de 8 voor de helft.

Normaalwaarden (Caukasisch ras) zijn:

$$\mathbf{BF}_{\text{man, normaal}} = 21 + 0,14(A-47);$$

$$\mathbf{BF}_{\text{vrouw, normaal}} = 33 + 0,16(A-47).$$

Rekenvoorbeeld 1:

Een man 40 jaar, 75 kg en 175 cm lang, en 1 uur/week lichte en 2,5/week middelmatige aërobe sport. Zijn BMI is 24,5 en het vet% volgens 1a) is:

$$\mathbf{BF}_{\text{man}} = 1,28 \times 75/1,75^2 - 14,9 + 0,14 \times 40 - (0,2 \times 1 + 0,4 \times 2,5 + 0,6 \times 0) = 20,8 \%,$$

één procent boven de normaalwaarde. Gaat het om een vrouw dan wordt 31,5% gevonden, de normaalwaarde.

Berekening van $VO_{2\max}$

Een statistische analyse (lineaire multi-pele regressie) toegepast op literatuurdata (Carturan et al., 1999) met en correctie voor leeftijdsafhankelijkheid en bovendien een correctie voor aërobe sport, levert voor $VO_{2\max}$ de volgende vergelijking:

$$\mathbf{VO}_{2\max} = 60,7 - 0,23A - 0,83 \cdot \mathbf{BF} + 2 \cdot uLS + 3,5 \cdot uMS + 5,5 \cdot uUS \quad \text{mL/min.kg} \quad (2)$$

Bij meer dan 8 uur/week in totaal gelden de uren boven de 8 ook hier voor de helft.

Normaalwaarden voor de volgende leeftijdsklassen (McAdler et al. 2003, Hfdst. 7) zijn:

leeftijd	<30	30-40	40-50	50-60	60-70	(jaar)
mannen	39	36½	33	31½	29½	(mL/min.kg)
vrouwen	35	32½	30	28	27	(mL/min.kg)

Rekenvoorbeeld 2:

Voor onze man uit Rekenvoorbeeld 1 wordt VO_{2max} :

$$VO_{2max} = 60,7 - 0,23 \times 40 - 0,83 \times 20,8 + (2 \times 1 + 3,5 \times 2,5 + 5,5 \times 0) = 45,0 \text{ mL/min}\cdot\text{kg},$$

ruim boven de norm, en voor de vrouw 36,1 mL/min·kg, eveneens ruim boven de norm.

Berekening van Bubble Grade (BG)

De mate van voorkomen van N_2 bellen wordt gekwantificeerd met het aantal bellen dat in een bloedvat (meestal de arterie pulmonalis) per tijdseenheid passeert. Twee bijna gelijke schalen, lopend van 0 tot 4 worden bij de kwantificering gebruikt, die van Spencer en die van Kisman-Masurel (Ishi et al. 2003). Hierbij worden respectievelijk de Spencer eenheid (SE) en de Kisman-Masurel eenheid (KME) gebruikt.

Een lineaire multipele regressie, toegepast op literatuurdata van manlijke sportduikers (Carturan et al. 1999) met leeftijd, VO_{2max} en BF levert voor BG de volgende expressie:

$$BG_{man} = 0,041A - 0,023 \cdot VO_{2max} + 0,019 \cdot BF \quad (3a)$$

$$BG_{vrouw} = 0,041A - 0,023 \cdot VO_{2max} + 0,019 \cdot BF - 0,4 \quad (3b)$$

BG is hier uitgedrukt in SE (een index van 0 tot 4 en geheel). De constante 0,4 bij 3b) is nodig als wordt aangenomen dat vrouwen voor DCZ even gevoelig zijn dan mannen (zie Discussie).

Rekenvoorbeeld 3:

Voor onze man en vrouw uit beide vorige rekenvoorbeelden wordt BR volgens (3):

$$BR = 0,041 \times 40 - 0,023 \times 45 + 0,019 \times 20,8 = 1,0$$

De correctie van de nultijden met BG

Nu BG bekend is kan de nultijd (NT) van de duiktabel of duikcomputer gecorrigeerd worden. Het principe is dat de resterende NT op elk moment van de duik met een aantal minuten verlaagd wordt. Het aantal minuten, 'strafminuten', is afhankelijk van de (momentane) diepte en, vanzelfsprekend, BG. Zodra de uitkomst na correctie nul is moet worden opgestegen. Hieronder zal worden toegelicht hoe deze waarden ontstaan zijn.

De relatie rDCZ versus BG en de NT versus diepte relatie bij gegeven rDCZ

Het is algemeen bekend dat het aantal bellen en ook het risico op DCZ veel sterker dan lineair met BG stijgt. Uit data van Nishi et al. (2003) is een exponentieel verband berekend met exponent 6,2 voor de aantallen bellen (KME omgerekend in SE). Uit een combinatie van data over rDCZ van dezelfde publicatie kan de volgende relatie herleid worden (lineaire regressie na logtransformatie en weging van de aantallen; totaal 1837 Dopplermetingen):

$$rDCZ = 0,53 \cdot 10^{0,46BG} \quad (4)$$

met BG in SE (standaardfout coëfficiënten van 0,12 en 0,04 resp.). M.a.w., het risico neemt zeer snel toe, per Spencereenheid met een factor 2,9.

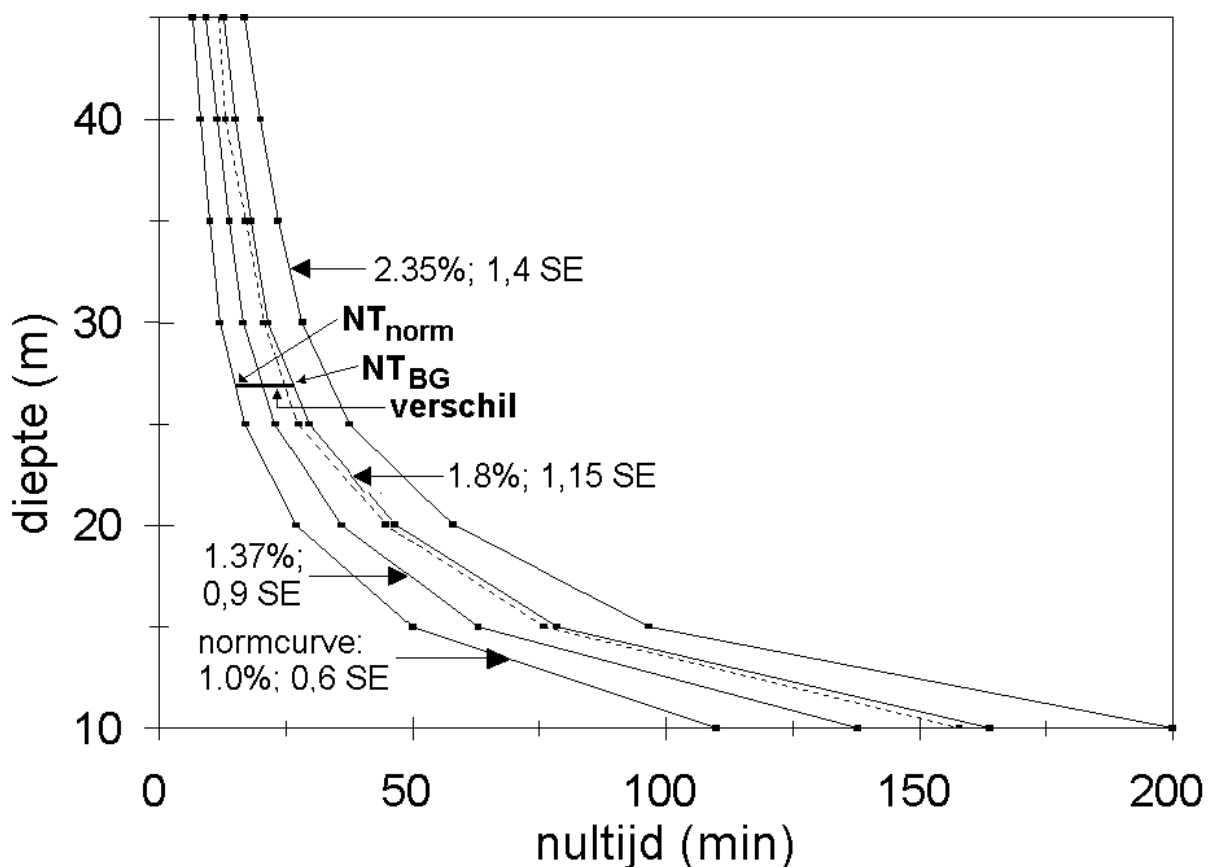


Fig. 1 Relatie tussen diepte en NT bij de diverse risico's op DCZ. Bij de vier curven aangeduid met grote pijlen is hun rDCZ (in %) aangegeven met de bijbehorende waarden van BG (in SE). Het vette horizontale balkje geeft het verschil tussen $NT_{BG} - NT_{norm}$ bij 27 m diepte. De vier curven gelden voor een stijgsnelheid van 18 m/min. De gestippelde curve geeft de diepte-NT curve bij 10 m/min stijgsnelheid met verlengde nultijden om uit te komen op een rDCZ van 1%.

De USN1958 (US Navy) nultijdentabel geeft in het traject 15-36 m een kans van 2,2% op DCZ (Hamilton en Thalmann 2003). Dit komt bij gebruikmaking van (4) overeen met $BG = 1.35$ SE (Nishi et al. 2003). De DECIEM1983 (Canada) nultijdentabel geeft bij 15-36 m een rDCZ van 1%, overkomend met een BG van 0,60. Beide tabellen zijn gebaseerd op een opstijgsnelheid van 18 m/min. Beide tabellen, i.h.b. die van de Amerikaanse marine gaan uit van een jonge, cardiovasculair en pulmonaal (zeer) gezonde en getrainde manlijke duikers. Voor de populatie van sportduikers, waarin leeftijden van boven de 60 jaar al gewoon zijn, geldt dit geen zins. Veel sportduikers (zie ook Inleiding) hebben een verhoogd risico.

De NT-correctie om rDCZ te verkleinen tot 1%

De relatie tussen duikdiepten en nultijden (van de duiktabellen) is bij meerdere waarden van rDCZ bepaald uit Fig. 10.2.4 van Hamilton en Thalmann, 2003. Uit rDCZ is met

toepassing van (4) de bijbehorende BG te berekenen. Een aantal diepte-nultijd curven zijn afgebeeld in Fig. 1. De verlaging van NT ten opzichte van de hier gevolgde rDCZ-norm van 1% van DECIEM is $NT_{BG} - NT_{norm}$, zoals Fig. 1 illustreert. De resterende, individuele NT is dan gelijk aan:

$$NT_{ind} = 2NT_{norm} - NT_{BG}. \quad (5)$$

Genoemde tabellen zijn echter gebaseerd op een opstijgsnelheid van 18 m/min. Opstijgen met 10 (of 9) m/min geeft een 0,5 lagere BG (Carturan et al. 2002 geeft 0,6 en Maronni et al. 2004 0,4 SE). De overgang naar 10 m/min is op te lossen door de 0,6 SE die hoort bij de norm van 1% rDCZ kunstmatig te verhogen met 0,5 SE tot 1,1 SE. rDCZ blijft 1%, en ook de diepte-NT relatie blijft dezelfde (de DECIEM nultijden). Op dezelfde wijze krijgen andere diepte-NT relaties bij andere risico's een bijbehorende BG waarde die 0,5 SE hoger ligt. Aldus zijn de diepte-NT curven van Fig. 2 na toepassing van (5) gevonden uit Fig. 1. Uit Fig. 2 blijkt dat een verhoging van 0,3 SE van BG al een behoorlijke verkorting van NT geeft. Mensen boven de 55 jaar hebben meestal een $BG > 1,9$ vanwege de dominante invloed van leeftijd in (3). Dit limiteert hun duikdiepte sterk. Links van de blauwe lijn, waarin een afdaalsnelheid van 20 m/min is verdisconteerd kan niet gedoken worden.

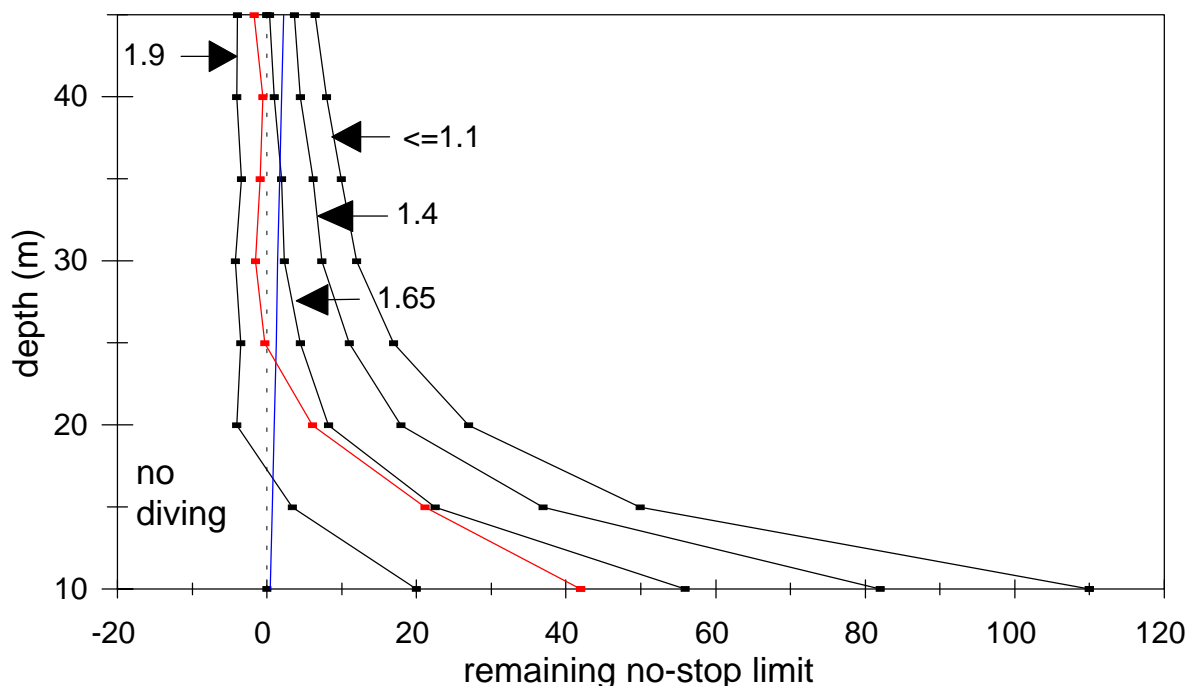


Fig. 2 Relatie van diepte en resterende NT bij de gegeven BG waarden (SE). De curve aangeduid met $\leq 1,1$ SE geeft de onverkorte nultijden die geldt voor elke BG $\# 1,1$ SE. Links van de blauwe lijn kan niet gedoken worden omdat NT negatief is of te kort.

De verrekening van de verlaging van stijgsnelheid van 18 naar 10m/min is ook op te lossen door vergroting van de nultijden van de norm. Deze nieuwe normcurve met een rDCZ van 1% is weergegeven met de gestippelde curve in Fig. 1. Dieper dan 20 m

verdubbelt de nultijd vrijwel. Tenminste voor de grotere diepten is dit in strijd met NT-tabellen en ook met de nultijden die de meeste typen duikcomputers gebruiken. Deze aanpak wordt derhalve niet gehanteerd.

Discussie

BF Vergelijking (1a,b) om BF (body fat) te berekenen heeft t.o.v. de referentiewaarde in de praktijk een SEE (standard error of the estimate, de standaarddeviatie van {gemeten – voorspeld}) van 6% (zie Schellart 2005). De referentie waarde is een 4-compartimentenmodel met gewicht, drooggewicht, totaal aan lichaamswater en volume als de compartimenten die bepaald zijn uit densitometrie, total body water (TBW) en Dual-energy X-ray absorptiometrie (Jebb et al. 2000).

De BF van vrouwen ligt gemiddeld ca. 12% vet hoger dan van een man van dezelfde leeftijd, wat ook doorwerkt in VO_{2max} . BF kan ook verkregen worden op andere wijze, bijv. met een elektronische bio-impedantie meting (BIA) of huidplooiemetingen. Deze metingen, indien deskundig uitgevoerd met betrouwbare apparatuur, hebben t.o.v. de referentiewaarde in de praktijk eveneens een SEE van 6%.

Het gemiddelde van BF van de Carturan-data is laag, 16%, range 3,9 – 26%. 3,9% impliceert slecht 0,9% vetreserve (McAdler et al. Hfdst. 28). BF onder 10% komt alleen voor bij goede zeer goede duursport atleten, bij de studie van Carturan blijkt vier stuks. Nederlandse manlijke sportduikers hebben gemiddeld 22,5%, range 14 – 36%, een significant verschil. Een afwijking van Carturans BIA-meter zou zijn lage waarden ook kunnen verklaren.

VO_{2max} Vergelijking 2) heeft t.o.v. de feitelijke waarde een totale (model- en meetfouten) SEE van 14,5% (zie Schellart 2005). VO_{2max} kan ook verkregen uit inspanningstesten zoals de door Baarda (2005) beschreven 'steptest' van Åstrand, uit $VO_{2max} = 15 \cdot HR_{max} / HR_{rust}$, of uit vragenlijsten. De laatste behelzen altijd leeftijd, gewicht, lengte en geslacht om BF of de BMI uit te rekenen en vragen over de aërobe activiteit. Inspanningstesten hebben een SEE van rond de 10%, VO_{2max} verkregen uit vragenlijsten van ca. 15%.

Statistisch zijn VO_{2max} en BF gecorreleerd (Carturans data geven een correlatiecoëfficiënt van $-0,55$), de reden waarom VO_{2max} deels uit BF geschat kan worden, zie vergelijking (2). Ten gevolge hiervan ligt de VO_{2max} van een vrouw met haar hogere BF lager dan van een man (zelfde A, H, W en aërobe activiteit). Fysiologisch gezien is deze grote invloed in het model op VO_{2max} opmerkelijk. Bekend is dat, als het lichaamsgewicht voor BF gecorrigeerd wordt, VO_{2max} (in mL/kg-min) het verschil de helft lager ligt. Dit heeft een spierfysiologische oorzaak. Een bijkomend effect is dat de spieren van een vrouw (en een dikke man) door de betere thermische isolatie eerder oververhit raken, wat de VO_{2max} verlaagd.

BG Het BG (Bubble Grade)-model kent een aantal aannamen en zwakheden. Allereerst wordt verondersteld dat de DECIEM tabel en het algoritme van duikcomputers zich gedraagt als het duikprotocol van Carturan et al. (1999) wat niet geheel het geval zal zijn. Een theoretische handicap van het BG model (vergelijking (3)) is dat BG niet normaal is

verdeeld (dit is te ondervangen, zie Schellart 2005). VO_{2max} heeft een grote relatieve schattingsfout (SEE 14,5%), wat eigenlijk een orthogonale regressie vereist. De kans dat leeftijd en VO_{2max} toevalligerwijs BG verklaren is gering, daar hun P-waarde 0,01 is. Beide zijn dus zeer significant. Voor BF ligt dat anders daar zijn P-waarde 0,55 is. Statistisch gezien hoort BF dus niet in het BG-model thuis. Wellicht hangt dit samen met het geringe aantal duikers (44) waarvan de data gebruikt zijn voor de schatting van de coëfficiënten en hoort BF er feitelijk als 3^{de} factor van betekenis wel in. De hoge P-waarde heeft niet te maken met de lage BF waarden van Carturans studie. BF bestaat vooral uit onderhuids- en interabdominaal vet en daarnaast in geringe mate uit bouwvet, waarvan de myeline in het kader van DCZ het belangrijkste is. Vanwege de zeer lange halfwaardetijd van onderhuids vet (en vermoedelijk ook interabdominaal vet) kan dit in het model (gegevens uit een eenmalige duik) nauwelijks een rol spelen. Myeline heeft echter een halfwaardetijd van ca. 12 minuten en is dus zeer relevant. Maar dit vetcompartiment heeft niets met zwaarlijvigheid te maken. Bij weglating van BF in het multi-pele regressiemodel wordt BG:

$$BG = 0,049A - 0,024 \cdot VO_{2max} \quad (6)$$

Wordt niet de VO_{2max} gebruikt die gebaseerd is op het lichaamsgewicht maar op het lichaamsgewicht gecorrigeerd voor BF (de 'lean body mass'), dan wordt in essentie het zelfde resultaat verkregen.

Rekenvoorbeeld 4:

Op welke leeftijd moeten onze man en vrouw uit de vorige rekenvoorbeelden beginnen hun nultijden in te korten?

Invullen van de gegevens van de man in (1) en vervolgens het resultaat te substitueren in (2) levert op dat $VO_{2max} = 58,8 - 0,346A$ en dit vervolgens te substitueren in (6) geeft:

$$A = (BG + 1,41)/0,057.$$

Voor $BG = 1,1$ wordt dan 44 jaar gevonden. Voor BG is 1,4, 1,65 en 1,9 SE wordt respectievelijk 49, 53½ en 58 jaar gevonden. Fig. 2 geeft de nultijden voor deze BG waarden. De vrouw ligt 3,4 jaar voor op de man. Als de 58 jarige man zijn aërobe activiteit opvoert tot 2 uur lichte en 4 uur matige sport en afvalt tot 70 kg, dan wordt $BG = 1,68$ SE gevonden, wat een diepte beperking tot ca. 32 m geeft (zie Fig. 2). Het voorbeeld geeft aan dat het effect van leeftijd zeer drastisch is en door afvallen en extra sporten maar gedeeltelijk is te compenseren.

DCZ risico van mannen en vrouwen

Het BG-model berust op metingen aan uitsluitend manlijke sportduikers. Bij vrouwen zouden de coëfficiënten iets anders kunnen zijn. Omdat vrouwen een lagere VO_{2max} hebben is hun BG volgens (6) ca. 0,2 hoger, wat volgens (4) vrouwen een factor 1,24 (24%) gevoeliger maakt voor DCZ. In de praktijk betekent dit dat ca. 6 meter minder diep kan worden gedoken dan een man met gelijke leeftijd, gewicht, lengte en aërobe activiteit. Gaat men uit van een BG-model volgens (3), waarin BF direct meedoet, dan zijn vrouwen ca. 1,5 maal gevoeliger.

Het onderzoek over het verschil in rDCZ tussen mannen en vrouwen, zowel in de beroeps- als recreatieve sfeer is zeer divers van opzet en de resultaten zijn heel inconsistent (zie bijv. Dunford et al. 2002; St. Leger Dowse et al. 2002, Conkin et al.

2003; Dermout 2005, tevens voor ref). Het relatieve risico (RR) van vrouwen ten opzichte van mannen varieert van (ten hoogste) 0,25 tot 4,3 (7 literatuurbronnen). Het (meetkundig) gemiddelde is 1,23 en niet significant afwijkend van $RR = 1$. Zich beperkend tot hypobaar onderzoek en onderzoek met droge compressie, dan varieert RR van 0 tot 4,3 (3 onderzoeken). Bij een beperking tot duiken wordt een RR van 0,25 tot 3,3 gevonden (4 onderzoeken). Sportduiksters plegen ruimere marges t.a.v. de nultijden te hanteren dan sportduikers. Dit zou een reden kunnen zijn dat in een grootschalig retrospectief onderzoek (gelogde sportduiken) juist een lager RR (0,38) geeft (St. Leger Dowse et al. 2002). Een prospectief onderzoek vertoonde echter evenmin een hoger RR (0,83; Dunford et al. 2002). Alles samenvattend ga ik er vooralsnog vanuit dat vrouwen iets gevoeliger zijn, wellicht enkele tientallen procenten. Voor een gedetailleerde behandeling van dit punt zij verwezen naar Dermout, 2005.

Betrouwbaarheid van het BG-model

De schattingsfout van BR bestaat uit een systematische fout (model niet ideaal) en een toevallige fout ($SEE = 1,0$) die door de duiker bepaald wordt. De toevallige fout is 3 maal groter dan systematische fout. Samen geven ze een SEE van 1,05 wat er toe leidt dat in ca. 30% van de gevallen de feitelijke BR meer dan 1 SEE punt afwijkt. Dit maakt de uitkomsten van deze methode slechts richtinggevend om de nultijden te corrigeren. De oorzaak van de grote SEE is dat er duikers zijn die ongewoon makkelijk bellen ontwikkelen en duikers die geen bellen ontwikkelen, ook als ze de duiktabel of duikcomputer geheel uitbuiten of zich zelfs niet geheel houden aan decostops of opstijgsnelheid. Dit blijkt heel duidelijk als men de berekende (volgens (6)) en gemeten BGs (Carturan et al., 2002) vergelijkt. Bij 4 van de 44 duikers was het verschil groter dan 1,5 en bij één net iets meer dan 2,0 SE. Duikers met vrijwel dezelfde leeftijd, VO_{2max} en BF van hetzelfde geslacht verschilden soms 2 of zelfs 3 (één paar) SE. Onmiskenbaar neemt BG statistisch en individueel (bij gelijkblijvende levensstijl) toe met de leeftijd. Van 58 Nederlandse sportduikers (hoge leeftijden oververtegenwoordigd, gemiddeld 43 jaar) hadden er vijf, allen tussen 54 en 66 jaar, een BG groter dan 1,9 SE. Bovendien neemt de variatie, ook relatief, met de leeftijd toe. Boven de 50 jaar blijkt de schattingsfout SEE ruim boven 1,0 te zijn. Twee zaken spelen een rol: persoonlijke gevoeligheid op zich en recente duikgeschiedenis. Bij meerdaagse duiken treedt na ca. 3 dagen een verlaging op van BG (Dunford et al., 2002). Duikervaring zou wellicht ook de persoonlijke gevoeligheid kunnen verminderen, zoals frequent duiken een afnemende N_2 -narcose gevoeligheid geeft. Het zou een reductie kunnen geven van BG en zo indirect van rDCZ. Het is ook mogelijk dat BG niet verandert maar er ongevoeligheid voor bellen optreedt, wellicht via een immunologische factor. Bij de persoonlijke gevoeligheid kunnen ook andere factoren een rol spelen. Vrijwel zeker speelt de effectiviteit van het bellenfilter in de microcirculatie van de longen (afhankelijk van rookgeschiedenis en leeftijd) een rol. Andere, meer hypothetische factoren zijn: vorming van arteriosclerotische plaques waardoor er wellicht meer groeikernen zijn; verslechtering van de glycocalyx waardoor bellen makkelijker aan de vaatwand verklevan, aggregeren en de longen slechter bereiken; verandering van het bel-surfactant waardoor ze minder makkelijk schrompelen. Deze factoren kunnen BG substantieel veranderen. Al deze factoren kunnen samenhangen met de leeftijd maar wel met grote variatie. De fysiologische leeftijd van het cardiovasculaire en pulmonale systeem kan makkelijk 10 tot 20 jaar van de kalenderleeftijd afwijken. Chronische dehydratie kan een andere factor zijn. Het geeft niet alleen een lagere feitelijke VO_{2max} ,

maar kan ook chronisch een negatief vasculair effect hebben waardoor bellen eerder ontstaan of langer blijven bestaan.

Door de dominante invloed van de leeftijd hebben ouderen al gauw een $BG > 1,75$. Echter, bij een oudere duiker met bijv. honderd duiken of meer, uitgevoerd op het scherp van de snede maar altijd vrij van enig symptoom van DCZ en met een zeer goede pulmonale en cardiovasculaire functie, kan de feitelijke BG veel lager liggen. Dan zou volstaan kunnen worden met minder inkorting van nultijden.

Volgens het nultijden-model worden de nultijden niet verkort als $BG = 1.1 SE$. Jonge, atletisch gebouwde en goed getrainde duikers hebben een BG dicht bij 0 SE en soms zelfs negatief. Zij zouden theoretisch hun nultijden kunnen verlengen. Daar echter hun feitelijke BG i.h.a. niet bekend zal zijn en hun feitelijke rDCZ nog minder, is dit af te raden, en dit nog afgezien van praktische bezwaren (duiken in buddiesysteem, duikcomputer in alarm). Daarom geldt dat als $BG \# 1.1 SE$ er verkorting nog verlenging is.

Correctie van de nultijden De exponentiele rDCZ versus BG relatie berust op ca. 2000 Dopplermetingen en de coëfficiënten hebben een zodanige standaardfout dat bij 70% van de duikers de schatting van rDCZ binnen 0,25% (absoluut risico) nauwkeurig is (als BG correct is). Dit betekent dat 20% van de duikers in Fig. 2 en 3 bijna één curve (of iets meer) opschuiven. Meer epidemiologische gegevens en een geavanceerdere statistische analyse kunnen deze onzekerheid verkleinen. Deze schattingsfout tezamen met onnauwkeurigheden in de diepte-nultijd curven in relatie tot rDCZ blijft echter ondergeschikt aan de ruim drie maal grotere fout in BG. Deze kan alleen verkleind worden door meer factoren in het BG-model te betrekken.

Conclusies en aanbeveling

De betrouwbaarheidsmarges van het model van de nultijden-correctie en vooral het BG-model moeten verkleind worden alvorens de uitkomsten van het model in de praktijk toe te passen. De BG uitkomst kan slechts dienen als toetssteen van de bevindingen van de keuringsarts omdat een betrouwbare numerieke bijstelling van de nultijden nog onmogelijk is. Daarnaast zou een hoge BG ook aanleiding moeten zijn om extra op andere factoren te letten die de kans op DCZ verminderen. Te denken valt aan extra vochtopname voor en na de duik, het vermijden van inspanning tijdens en na de duik, het vermijden van koude en warmtestuwing, verlenging van de niet-vliegtijd, etc.

Voor een mogelijke oplossing van het probleem van de grote betrouwbaarheidsmarges zal een aanzet gegeven worden in het artikel te verschijnen in 2005 in het NVD Bulletin. De aandacht gaat daarbij primair uit naar het cardiovasculaire en pulmonale systeem.

Dr. Schellart is medisch fysicus en als universitair hoofddocent verbonden aan het Academisch Medisch Centrum bij de Universiteit van Amsterdam, lid van de NVD, bekleedt functies in het Certificeringssysteem voor (sport)duikerartsen, is auteur van publicaties over hyper- en hypobare (zintuig- en neuro)fysiologie, en voorzitter van de Stichting Duik Research.

Referenties

- Baarda CM. Rekenprogramma ter ondersteuning van de keuring van sportduikers, zie www.duikgeneeskunde.nl, 2005.
- Black D, James WPT, Besser GM, Brook CGD, Craddock D, Garrow JS, Hockaday TDR, Lewis B, Pilkington TRE, Silverstone, JT, Mann JI, Miller DD, Pyke DA, Williams DG and Skinner RK. Obesity. A report of the Royal College of Physicians. *J Royal Coll Physicians*, 17, 5–65, 1983.
- Carturan D, Boussuges A, Burnet H, Fondarai J, Vauxem P, Cardette B. Circulating venous bubbles in recreational diving: relationship with age, maximal oxygen uptake and body fat percentage. *Int. J. Sports Med*, 20, 410-414, 1999.
- 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.
- Conkin J, Powell MR, Gernhardt ML. Age affects severity of venous gas emboli on decompression from 14.7 to 4.3 psia. *Aviat Space Environ Med* 74, 1142-50, 2003.
- Dembert ML, Jekel JF, Mooney LW. Health risk factors for the development of decompression sickness among U.S. Navy divers. *Undersea Biomed Res* 11, 395-406, 1984
- Dermout SM. Vrouwen en Duiken. In: *Leerboek Duikgeneeskunde*, Dermout SM, Feenstra L en Brandt-Corstius JJ (ed.) 2005, in bewerking.
- Dunford RG, Vann RD, Gerth WA, Pieper CF, Huggins K, Wacholtz C, Bennett PB. The incidence of venous gas emboli in recreational diving. *Undersea Hyperb Med* 29, 247-59, 2002.
- Hamilton RW and Thalmann ED, Decompression Practise. In: In: Brubakk AO and Neuman TS, ed., *Bennett and Elliott's Physiology and medicine of diving*, Saunders, Edinburgh, 2003, 455-500.
- Jebb SA, Cole TJ, Doman D., Murgatroyd PR and Andrew M. Prentice AM, Evaluation of the novel Tanita body-fat analyser to measure body composition by comparison with a four-compartment model, *Brit J of Nutrition* 83, 115–122, 2000.
- Lam TH, Yau KP. Analysis of some individual risk factors for decompression sickness in Hong Kong. *Undersea Biomed Res* 16, 283-92, 1989.
- 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.
- McArdle, WD., Katch FI, Katch VL, *Exercise Physiology: Energy, Nutrition & Human Performance*, Lippincott Williams and Wilkins, 2001.
- Niskhi RY, Brubakk AO and Eftedal OS, Bubble detection. In: Brubakk AO and Neuman TS, ed., *Bennett and Elliott's Physiology and medicine of diving*, Saunders, Edinburgh, 2003, 501-529.
- Schellart NAM. Achtergronden van een theoretische model om de nultijd te corrigeren op basis van fysieke eigenschappen. *NVD Bulletin* 2005, in bewerking.
- St. Leger Dowse M, Bryson P, Gunby A, Fife W. Comparative data from 2250 male and female sports divers: patterns and decompression sickness, *Aviat Space Environ Med* 73, 743-749, 2000
- Wisloff U, Richardson RS, Brubakk AO Exercise and nitric oxide prevent bubble formation: a novel approach to the prevention of decompression sickness? *J Physiol* 555, 825-259, 2004.

Afkortingen

A	age (leeftijd, jaar)
BF	body fat (lichaamsvet; %)
BG	bubble grade, uitgedrukt in SE of KME
BMI	body mass index, hier gewicht/lengte ² (kg/m ²)
DCZ	decompressieziekte
HR	heart rate (hartslag; slagen/min)
HR _{max}	maximale HR bij extreme inspanning tijdens aërobe sport na ca. 10-20 min
H	height (lengte, m)
KME	Kisman-Masurel eenheid
NT	nultijd (min)
rDCZ	incidentie (risico) van DCZ (%)
RR	relatief risico
SE	Spencer eenheid
SEE	standard error of the estimate: standaarddeviatie {gemeten – voorspeld}
uLS	uren lichte aërobe sport/week; $HR_{max} < HR < 0,8HR_{max}$ met HR_{max} gemeten of $HR_{max} = 208 - 0,7A - 0,5(uLS + uMS + uUS)$.
uMS	uren matige aërobe sport/week; $0,8HR_{max} < HR < 0,93 HR_{max}$
uUS	uren uitputtende aërobe sport/week; $HR > 0,93 HR_{max}$
VO _{2max}	maximale aërobe capaciteit, te meten bij stapsgewijs opgebouwde belasting tijdens aërobe sport na ca. 20 min (mL/kg.uur)
W	gewicht (weight, kg)