

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}

Nico A. M. Schellart*

Met groot genoegen door de Stichting Duik Research ter beschikking gesteld aan de Nederlandse Vereniging voor Duikgeneeskunde voor publicatie in het NVD Bulletin.

SDR Report SD-02-2005
© 2005, Stichting Duik Research

* 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.

Inhoudsopgave

Ten geleide	5
Samenvatting	5
1. Inleiding	6
2. Methoden en resultaten	7
2.1 Bepaling van BF	7
2.1.1 Rekenmodellen	7
2.1.2 Bio-impedantie (BIA) meting	9
2.1.3 De huidplooimethode en andere metingen	9
2.1.4 Geavanceerde methoden	10
2.1.5 Vergelijking van het rekenmodel, BIA-meting en huidplooimeting	10
2.1.6 Normaalwaarden BF	10
2.2 Bepaling van VO_{2max}	10
2.2.1 Niet-inspanningsmodellen	11
2.2.2 Inspanningstesten	11
2.2.3 Normaalwaarden VO_{2max}	12
2.3 Berekening van de Bubble Grade (BG)	12
2.4 De correctie van de nultijd met BG	13
2.4.1 De relatie tussen rDCZ en BG, en tussen NT en diepte bij gegeven rDCZ	13
2.4.2 De NT-correctie om rDCZ te verkleinen tot 1%	14
3 .Discussie	16
3.1 BF	16
3.2 VO_{2max}	17
3.3 De Bubble Grade (BG)	17
3.4 DCZ risico van mannen en vrouwen	19
3.5 Betrouwbaarheid van het BG-predictiemodel	20
3.6 Correctie van de nultijden	21
3.7 Conclusies en aanbeveling	21
Referenties	22
Appendix 1 Betrouwbaarheid van methoden om BF te bepalen	23
Appendix 2 Methoden om VO_{2max} te bepalen	24
A2.1 Een Amerikaans niet-inspanningsmodel op basis van een vragenlijst	24
A2.2 Afleiding van het hier gebruikte niet-inspanningsmodel	26
A2.3 Andere modellen	26
A2.4 Een hardloop- en zwemttest	27
Appendix 3 Afkortingen	28
Appendix 4 Belangrijkste formules	28

Ten geleide

Al decennia lang is een wens van de (medische) duikwereld de persoonlijke gevoeligheid van de duiker voor DCZ (decompressieziekte) vast te stellen, zodat het duikprofiel kan worden aangepast. Deze aanpassing kan bestaan uit een verkorting van de nultijden teneinde het risico op DCZ terug te brengen tot een vooraf gekozen norm. In januari 2005 verscheen op de website van de NVD (www.duikgeneeskunde.nl) van mijn hand het artikel "In hoeverre bepalen leeftijd, geslacht, VO_{2max} en lichaamsvetpercentage het risico op decompressieziekte? Een theoretisch model". Dit artikel gaat dieper in op de theorie en geeft meer achtergrondinformatie.

Het artikel is allereerst bedoeld voor medici, maar ook lezenswaardig voor andere academici en technisch onderlegde HBO-ers. Vanzelfsprekend wordt verwacht dat de lezer de brevet-duiktheorie op het hoogste niveau beheerst en daarnaast enige kennis van elementaire statistiek heeft.

Omdat vetzucht momenteel een belangrijk aandachtsgedeelte is binnen de westerse gezondheidszorg wordt, de pure duikgeneeskunde overstijgend, extra aandacht besteed aan het lichaamsvetpercentage. De noodzaak van aërobe activiteit voor iedere volwassene en i.h.b. oudere geniet meer en meer de belangstelling in de media. De VO_{2max} zal daarom ook wat meer aandacht krijgen dan strikt noodzakelijk voor het doel van dit stuk in engere zin. Overigens zij opgemerkt dat bij de beslissing 'fit to dive' van de keuringsarts het van belang is een schatting te hebben van het vetpercentage en VO_{2max} . Hiertoe worden hem vele eenvoudige methoden aangereikt, voor het vetpercentage in §2.1 en voor VO_{2max} in §2.2 en Appendix 2.

Er zijn 4 appendices opgenomen die echter voor de begripsvorming niet noodzakelijk zijn.

Samenvatting

Bij sportduiken circuleren ca. een uur na de opstijging de meeste N_2 bellen in de bloedbaan, ook als men zich houdt aan de duiktabellen of de decompressiecomputer. Het ontstaan van N_2 bellen blijkt niet alleen afhankelijk te zijn van het duikprofiel, en externe en interne omstandigheden, maar ook van de persoonlijke fysieke eigenschappen. Deze zijn leeftijd, lichaamsvet% en aërobe conditie. De laatste is te kwantificeren met de VO_{2max} , de aërobe capaciteit. Dit is het maximale O_2 verbruik bij uiterste inspanning. Uit lengte, gewicht, leeftijd en geslacht en aërobe activiteit kan het vet% BF geschat worden, dat op zijn beurt met de aërobe activiteiten een schatting geeft van VO_{2max} (mL/min·kg). Met een theoretisch model kan voorspeld worden in welke mate N_2 bellen, uit te drukken in de 'bubble grade' (BG), kunnen ontstaan bij een eerste duik. De bubble grade BG (in Spencer eenheden) blijkt gelijk aan $BG_{man} = 0,048A - 0,023VO_{2max}$ en $BG_{vrouw} = BG_{man} - 0,3$ met A de leeftijd in jaren. De mate van belvorming geeft de theoretische kans op decompressieziekte (rDCZ) middels de relatie $rDCZ = 0,53 \cdot 10^{0,46BG}$. Wil men duiken met een kans van 1% op DCZ, dan zou men de nultijden moeten aanpassen als $BG > 1,1$. Deze aanpassing is in principe te berekenen. De schattingsfout in de diverse stappen van de berekening is echter zo groot, met name bij BG, dat de uitkomst als numerieke waarde in een individueel geval alleen een richtinggevende waarde heeft.

1. Inleiding

Bij gebruik van duiktabellen en vooral duikcomputers 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 fysieke eigenschappen en het risico op decompressieziekte (DCZ).

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 N₂ bellen in de weefsels, in het bijzonder in 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 is niet bekend of deze microbellen, als ze keer op keer bij het duiken ontstaan, op den duur schade geven, bijv. aan het ruggemerg. Het massaal optreden van grotere bellen, van enkele µm tot enkele tientallen µm, hoeft niet noodzakelijkerwijs het ontstaan van DCZ in te houden. Hun aanwezigheid vormt echter wel een potentieel risico (Sulaiman et al. 1997, Brubakk and Neuman 2003). 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, 2002) het ontstaan van bellen vergroot en aldus het risico op DCZ (rDCZ). Dezelfde bevindingen komen ook uit hypobaar DCZ onderzoek (Sulaiman et al. 1997, Conkin et al. 2002).

Onlangs is op directe wijze aangetoond dat met een grote aërobe conditie bellen minder makkelijk worden gevormd (Carturan et al. 1999, 2002).

Algemeen wordt aangenomen dat rDCZ toeneemt met vorderende leeftijd en daarmee de aanwezigheid van bellen toeneemt (e.g. Sulaiman et al. 1997; Brubakk and Neuman 2003; Carturan et al. 1999). Dit impliceert dat er nog meer factoren zijn die belvorming bevorderen en dat deze factoren met toenemende leeftijd een grotere rol gaan spelen.

Als de mate van het ontstaan van bellen per individu uit de leeftijd, aërobe conditie, geslacht en BF te berekenen is, dan is het in principe 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.

Dit artikel beoogt om aan de hand van leeftijd, geslacht, aërobe conditie en vet% de theoretische mate van voorkomen van bellen, de 'bubble grade' (BG), in de veneuze bloedbaan te schatten als men zich aan de nultijden van de duiktabellen of de duikcomputer houdt. De elementaire eigenschappen lengte, gewicht, leeftijd, geslacht en de mate van aërobe sportbeoefening 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%.

De charme van de methode is dat, althans in principe, de individuele BG en rDCZ te berekenen is met een minimaal aantal eenvoudige gegevens, te verkrijgen via een vragenlijst. Vervolgens kan de nultijd gecorrigeerd worden om rDCZ terug te brengen tot 1%, de gangbare norm voor sportduikers. Deze berekeningen gelden overigens alleen voor een eerste duik (de duiker is bij aanvang van de duik gesatureerd aan 1 bar lucht, dus 0,79 bar N₂). Bij leeftijden jonger dan 20 en ouder dan 65 jaar, bij topsporters en bij mensen met ziekmakende obesitas of een extreem zittende levenswijze zijn ze minder betrouwbaar. Ze gelden niet voor duik(st)ers jonger dan 15 en ouder dan 75 jaar.

De getalsmatige uitkomsten van dit model lenen zich vanwege het grote aantal aannamen en de grote waarschijnlijkheidsintervallen niet voor individuele 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 naast leeftijd en aërobe conditie ook 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).

2. Methoden en resultaten

2.1 Bepaling van BF

Het vetgehalte BF, betrokken op het totale lichaamsgewicht, kan op meerdere manieren geschat worden. Hier zullen vooral rekenkundige modellen, de bio-impedantie meting en de huidplooiemeting besproken worden omdat deze schattingen met zeer weinig middelen door elke arts kunnen worden uitgevoerd.

2.1.1 Rekenmodellen

Het voordeel van een rekenmodel boven een meting is dat meetfouten vrijwel zijn uitgesloten mits de gegevens correct zijn. In de literatuur worden vele modellen beschreven die BF schatten. Vrijwel allen maken ze gebruik van een body mass index (BMI) die de vorm heeft van W/H^k met gewicht W (kg) en H de lengte (m). De meest gebruikte is de Queteletindex met $k=2$. (Zonder nadere aanduiding wordt met BMI altijd de Queteletindex bedoeld.) Wil deze constant zijn, dan betekent dit dat W slechts mag toenemen met H^2 , dus evenredig met oppervlakken, zoals de dwarsdoorsnede van spieren en botten in de extremiteiten, uit mechanisch en energetische oogpunt een goed uitgangspunt. Het hier gebruikte model van Black et al. (1983) gebruikt deze index, waarbij BF evenredig is met W/H^2 , de BMI. In het model van Garrow and Webster (1985) is BF evenredig met $-H^2/W$ en is daardoor anatomisch onaantrekkelijk. Hoewel het statistisch niet onder doet voor dat van Black et al. (Jebb et al. 2000), is het hier niet gebruikt. De modellen met $k \neq 2$ (bijv. Smalley et al. 1990), hoewel biomechanisch interessant, bleken te lage schattingen te geven. De beste rekenmodellen hebben een

SEE (Standard Error of the Estimate ¹) van ca. 6%. Omdat uit een vergelijkende studie (Jebb et al. 2000) Blacks model goed naar voren kwam is dit hier als uitgangspunt gekozen. In dit model wordt BF (in % lichaamsgewicht), geschat met:

$$BF_{\text{man}} = 1,281W/H^2 - 10,13 \quad (1a)$$

$$BF_{\text{vrouw}} = 1,480W/H^2 - 7,00 \quad (1b)$$

Correctie voor bias van BF

Volgens de analyse van Jebb et al. (2000) heeft de vergelijking van Black et al. (1983) voor mannen een systematische fout (positieve bias), want gemiddeld is BF +0,9% vet te hoog. Voor vrouwen is de afwijking van -2,7%. Na gedeeltelijke ² correctie worden de constanten dan 10,68 en 5,65.

Leeftijdscorrectie van BF

Blacks model kent geen leeftijdscorrectie. Uit de literatuur zijn een aantal leeftijdscorrecties bekend of te berekenen. De correctie is uit te drukken in een coëfficiënt (verandering/jaar). Uit de data van Black et al. (1983, Tabel 14) is deze coëfficiënt berekend op 0,094 voor mannen en 0,135 voor vrouwen. Combinatie van de gegevens van Minten et al. (1991), and Garrow en Webster (1985) levert een coëfficiënt van 0,15 en 0,11%/jaar voor respectievelijk mannen en vrouwen. McArdle et al. (2001) geeft resp. 0,12 en 0,11%/jaar, en uit de data van Carturan et al. (1999) is voor mannen 0,23%/jaar berekend. Combinatie van deze gegevens met inbegrip van de vermelde leeftijden resulteert in een correctie 0,14(A - 36) voor mannen en 0,16(A - 35) voor vrouwen met A de leeftijd in jaren ³. Vergelijking (1a) en (1b) worden derhalve:

$$BF_{\text{man}} = 1,281W/H^2 - 10,68 + 0,14(A - 36) = 1,281W/H^2 + 0,14A - 15,72 \quad (1c)$$

$$BF_{\text{vrouw}} = 1,480W/H^2 - 5,65 + 0,16(A - 35) = 1,480W/H^2 + 0,16A - 10,25 \quad (1d)$$

Correctie van BF voor conditie

De overweging is dat bij gelijke Queteletindex (W/H^2) bij een goede conditie de spiermassa groter is dan bij een slechte conditie. Zo zal er minder interabdominaal en onderhuids vet zijn. De min of meer arbitraire correctie is:

$$- 0,2uLS - 0,4uMS - 0,6uUS, \text{ met}$$

uLS

uren Lichte duurSport/week. Licht wordt gedefinieerd als $\frac{2}{3}HR_{\text{max}} < HR < 0,8HR_{\text{max}}$. HR is de hartslag, en HR_{max} is de maximale HR bij langzaam opgebouwde extreme inspanning bij duursport gemeten in de laatste maanden. Als HR_{max} niet bekend is

¹ SEE = SD{waargenomen - voorspeld}, vaak opgegeven als percentage van het gemiddelde m.

² Dit vanwege de SEE van deze schatting (ca. 0,5% vet), het tekenverschil tussen mannen en vrouwen, en vanwege een betere aansluiting bij BF-literatuur van vrouwen.

³ Bij mannen boven 70 jaar geldt A = (140 - leeftijd) omdat BF (en spiermassa) dan afneemt.

geldt $HR_{max} = 208 - 0,7A$ (Tanaka et al. 2001) met $\frac{1}{2}$ punt per uur sport/week minder (maximaal 6 punten). Deze waarde geldt ook als de gemeten HR_{max} kleiner is dan die van de formule. Zonder hartslagmeter wordt licht gedefinieerd als het nog redelijk kunnen praten bij het hardlopen, racefietsen, roeien etc. en beoefening van veldsporten, ook al is het ademhalingsritme al duidelijk verhoogd en dieper.

uMS

uren *Matige* duurSport/week. Matig wordt gedefinieerd als $0,8HR_{max} < HR < 0,93 HR_{max}$. Zonder hartslagmeter betekent dit pittig tot zeer pittig trainen, waarbij het recreatieve element geheel ondergeschikt is aan presteren. Men is goed 'bij de les'. Het ademhalingsritme is sterk verhoogd en dieper.

uUS

uren *Uitputtende* duurSport/week. Uitputtend wordt gedefinieerd als $HR > 0,93 HR_{max}$. Dit is extreem zware aërobe sportbeoefening. Zonder hartslagmeter wordt uitputtend gedefinieerd als het niet meer kunnen praten (alleen kreten). Het gaat om een wedstrijd of de inspanning heeft hier het karakter van. Men is bij hardlopen *constant* geconcentreerd bezig met ademfrequentie en ademdiepte, paslengte en pasfrequentie en lichaamshouding (hoofd, armen) en bij andere duursporten gelden soortgelijke zaken. Wil uUs 15-45 minuten/week zijn, dan loopt men als veertiger de halve marathon binnen ca. 90 min. Bij minder dan 2 uur/week sporten is uitputtende sportbeoefening geheel niet aan de orde. De grote meerderheid van de duikers zal hier '0' in moeten vullen. Opgave in min/60.

Deze indeling sluit goed aan bij de RPE-schaal (Rating of Percieved Exertion, McArdle, Hfdst. 17, 2001). Bij meer dan 8 uur/week in totaal gelden de uren boven de 8 tot 16 uur/week voor 2/3de. Deze uren worden eerst in rekening gebracht bij de uLS categorie, dan die van uMS, etc. tot 8 uur resteert. Uren boven de 16 tellen voor 1/3de mee.

Aangenomen is dat mannen uit het onderzoek van Black et al. (1985) gemiddeld op 2 uLS en 1 uMS kwamen en de vrouwen op 2 uLS (met inbegrip van vergelijkbare lichamelijke arbeid) waarvoor de constante van (1c,d) gecorrigeerd is.

Na verwerking van de correctie voor conditie wordt BF (met een SEE van 6% relatief):

$$BF_{man} = 1,281W/H^2 - 14,92 + 0,14A - 0,2 \cdot uLS - 0,4 \cdot uMS - 0,6 \cdot uUS \quad (1e)$$

$$BF_{vrouw} = 1,480W/H^2 - 9,85 + 0,16A - 0,2 \cdot uLS - 0,4 \cdot uMS - 0,6 \cdot uUS. \quad (1f)$$

2.1.2 Bio-impedantie (BIA) meting

Deze berust op de meting van de elektrische impedantie tussen bijv. beide handen of beide voeten. Meestal moet W, H, A en geslacht worden opgegeven. De meting geeft alleen een goede schatting als de instructies van de fabrikant strikt worden opgevolgd. Als de BIA-meter geen systematische fout vertoont (en dat komt wel voor, zie Jebb et al. 2000 en Appendix 1) dan is SEE in de praktijk 5,5% (relatief).

2.1.3 De huidplooi methode en andere metingen

Eenvoudige morfometrische metingen zoals alleen de heupomvang zijn inadequaat. BF, bepaald via de huidplooidikte (huid en onderhuidse vet) bij biceps, triceps, subscapula en

suprailium, is echter wel geschikt indien deskundig uitgevoerd. In de praktijk is de SEE 5% (relatief). Brinkhorst et al. (1986) geeft een methode om BF te bepalen. Meer recente methoden maken naast leeftijd ook gebruik van lengte en eventueel ook gewicht. <http://users.telenet.be/lode.stevens/cma/tabel.htm> geeft de waarden in tabelvorm en www.triton.studver.uu.nl/vetmeting.html geeft direct het antwoord.

2.1.4 Geavanceerde methoden

De belangrijkste zijn densitometrie, total body water (TBW), Dual-energy X-ray, MRI en absorptiometrie (DXA). Deze bepalingen zijn nauwkeurig maar kostbaar, vooral omdat meestal een combinatie van deze methoden wordt gebruikt om BF te berekenen.

2.1.5 Vergelijking van het rekenmodel, BIA-meting en huidplooiemeting

Jebb et al. (2000) deed hier onderzoek naar. Als referentie (gouden standaard) gebruikte hij een 4-compartimentenmodel (waarbij gewicht, drooggewicht, totaal aan lichaamswater en volume de compartimenten vormen). De primaire metingen werden gedaan met densitometrie, TBW en DXA. Zij gebruikten onder meer het ongemodificeerde Black model en de bipolaire voet-voet Tanita-305. Een door mij uitgevoerde analyse van statistische uitkomsten van Jebb et al. (2000) laat zien dat de Tanita-305 en het Black-model statistisch even goed zijn (zie Appendix 1). Hetzelfde geldt voor de vergelijking tussen de Tanita en de iets beter lijkende huidplooiemethode. Wel is er een tendens dat de Tanita-305 het iets beter doet dan het Black-model.

2.1.6 Normaalwaarden BF

Normaalwaarden voor Kaukasisch ras naar Deurenberg et al. (1998), maar iets gewijzigd (constanten met 1% vet verlaagd en leeftijdscoëfficiënten iets verlaagd, zie (1e,f)) zijn:

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

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

Voor het vaststellen van obesitas volgens de WHO wordt niet BF gebruikt maar de definitie dat BMI groter is dan 30. Dit is een grove versimpeling (zie ook Smalley et al. 1990), wat niet alleen blijkt uit terugrekenen van de normaalwaarden naar de bijbehorende BMI, maar ook uit het veronachtzamen van leeftijd, sekse en rasverschillen.

Rekenvoorbeeld 1:

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

$$BF_{\text{man}} = 1,281 \times 75/1,75^2 - 14,92 + 0,14 \times 40 - (0,2 \times 1 + 0,4 \times 2,5 + 0,6 \times 0) = 20,9 \%,$$

Slechts 0,8% vet boven de normaalwaarde. Gaat het om een vrouw dan wordt 31,6% gevonden, 0,3% vet onder de normaalwaarde.

2.2 Bepaling van $VO_{2\text{max}}$

$VO_{2\text{max}}$ kan bepaald worden met rekenmodellen (niet-inspanningsmodellen) op basis van een vragenlijst, eenvoudige inspanningstesten en inspanningstesten waarbij een gasanalyse wordt uitgevoerd. Deze laatste methode zal onbesproken blijven want deze is kostbaar en daarom niet haalbaar voor ons doel.

2.2.1 Niet-inspanningsmodellen

Niet-inspanningsmodellen geven schattingen van VO_{2max} en zijn gebaseerd op eenvoudige gegevens à la de bepaling van BF, waaronder inbegrepen gegevens over aërobe sportactiviteit, verkregen met een vragenlijst (zoals die van Appendix 2.1 of de vragen betreffende uLS etc. van §2.1.1). Gegevens over aërobe activiteit kunnen bijv. een opgave zijn van het aantal uren, al dan niet met de intensiteit van de sportbeoefening. Er zijn vele modellen, soms met een fysiologische basis, maar vaak zonder (zie Malek et al. 2004). Appendix 2.3&4 geeft een aantal bruikbare modellen. Om een eenvoudig en betrouwbaar model te vinden is uitgegaan van een multiple lineaire regressie toegepast op de data van Carturan et al. (1999) met A en BF als onafhankelijke variabelen. Dit gaf vergeleken met de literatuur een te grote leeftijdsafhankelijkheid. Na aanpassing van de leeftijdscoëfficiënt is in het model ook de aërobe activiteit opgenomen. Het verbeterde model (11b), zie Appendix 2.2 voor de afleiding, is toegepast op de gegevens van 62 duikers en 8 duiksters. Via kruisvalidatie met twee andere goed presterende modellen zijn de coëfficiënten geoptimaliseerd. Dit resulteerde tenslotte in het predictiemodel voor VO_{2max} :

$$VO_{2max,man} = 59 - 0,24A - 0,59 \cdot BF + 1,4 \cdot uLS + 2,5 \cdot uMS + 4 \cdot uUS \quad (2a)$$

$$VO_{2max,vrouw} = 57 - 0,24A - 0,59 \cdot BF + 1,4 \cdot uLS + 2,5 \cdot uMS + 4 \cdot uUS \quad (2b)$$

Voor vrouwen is de constante 2 kleiner dan voor mannen, wat een gemiddelde is uit Malek et al. (2004) en George et al. (1997), waarbij ook het verschil in BF verdisconteerd is. De SEE van dit model met als referentie het niet-inspanningsmodel van Jones is 3% en met de data van Baarda 18%.

Indien VO_{2max} minder dan 0,6 maal de norm is, moet de uitkomst gewantrouwd worden. Men moet dan VO_{2max} ook met een ander niet-inspanningsmodel van Appendix 2 bepalen, of anders door een ter zake deskundig keuringsarts bijv. een steptest van Åstrand laten uitvoeren (zie Baarda 2005).

Na substitutie van (1e,f), de BF van resp. man en vrouw, in (2a,b) wordt de VO_{2max} :

$$VO_{2max,man} = 68 - 0,32A - 0,76W/H^2 + 1,5 \cdot uLS + 2,7 \cdot uMS + 4,5 \cdot uUS \quad (2c)$$

$$VO_{2max,vrouw} = 63 - 0,34A - 0,87W/H^2 + 1,5 \cdot uLS + 2,7 \cdot uMS + 4,5 \cdot uUS. \quad (2d)$$

2.2.2 Inspanningstesten

Bij een inspanningstest wordt meestal HR geregistreerd en samen met bijv. H, W, A en geslacht kan dan VO_{2max} worden berekend. Een voorbeeld is het model van Storer et al. (gerefereerd door Malek et al. 2004), dat een SEE van minder dan 10% heeft.

Een ander voorbeeld is de door Baarda (2005) beschreven 'steptest' van Åstrand. Helaas zijn testwaarden hiervan boven de 40 overschattingen. Kruisvalidatie met de uitkomsten van andere testen en gegevens uit de literatuur heeft geleid tot de volgende correctie voor testwaarden boven de 40 mL/kg.min: $VO_{2max,stepAstrand,cor} = -0,0070S^2 + 1,34S -$

3,74 met $S = VO_{2\max, \text{stepAstrand}}$. Bij mensen die meer dan ca. 6 uur/week (race)fietsen is de uitkomst een overschatting door een verhoogde spierfysiologische efficiëntie (e.g. McArdle et al., Hfdst. 17, 2001), ook na de eerder genoemde correctie.

Een heel andere aanpak is de HR_{rust} (geheel uitgerust in zittende houding na opstaan) en de HR_{max} van de laatste drie maanden te gebruiken (één keer meten geeft een te lage uitkomst). $VO_{2\max}$ is vervolgens:

$$VO_{2\max} = 15 \cdot HR_{\text{max}} / HR_{\text{rust}} \quad (2e)$$

(Uth et al. 2004; nog niet gevalideerd voor mensen van middelbare leeftijd en ouder). Indien (2a,b) of (2c,d) voor de bepaling van uLS etc. gebruik maakt van de gemeten HR_{max} is het eigenlijk ook een inspanningstest. Er zijn ook testen die berusten op de afstand die men in een gegeven tijd afgelegd, zoals de Coopertest, of de tijd die men over een bepaalde afstand doet (hardlopen, zwemmen: zie Appendix 2.4).

Al deze verschillende inspanningstesten zijn en blijven schattingen van $VO_{2\max}$ met een SEE tot ca. 7-12% (Malek; McArdle Hfdst. 11, 2001), lager dan die van de niet-inspanningsmodellen. Het meest betrouwbaar is echter een ademgasanalyse te doen tijdens een inspanningsmaximaaltest. Dit is echter tijdrovend en vereist kostbare apparatuur, zodat deze methode hier buiten beschouwing blijft.

2.2.3 Normaalwaarden van $VO_{2\max}$

Normaalwaarden van $VO_{2\max}$, afgeleid uit McArdle et al. (Hfdst. 7, 2001) zijn:

	<30	30-40	40-50	50-60	60-70	leeftijd (jaar)
mannen	39	36½	33	31½	29½	$VO_{2\max}$ (mL/min·kg)
vrouwen	35	32½	30	28	27	$VO_{2\max}$ (mL/min·kg)

Deze data zijn te fitten met een parabool:

$$VO_{2\max, \text{man}} = 48,4 - 0,43A + 0,0020A^2$$

$$VO_{2\max, \text{vrouw}} = 44,1 - 0,42A + 0,0024A^2.$$

Rekenvoorbeeld 2:

Voor de man uit Rekenvoorbeeld 1 wordt $VO_{2\max}$ volgens (2a):

$$VO_{2\max} = 59 - 0,24 \times 40 - 0,59 \times 20,9 + (1 \times 1,4 + 2,5 \times 2,5 + 0 \times 4) = 44,7 \text{ mL/min·kg},$$

Zeer ruim boven de norm, en voor de vrouw 36,4 mL/min·kg, ruim boven de norm.

2.3 Berekening van de 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 (Nishi et al. 2003). Hierbij worden respectievelijk de Spencer eenheid (SE) en de Kisman-Masurel eenheid (KME) gebruikt.

Om de afhankelijkheid van BG van de leeftijd, VO_{2max} en BF te bepalen is gebruik gemaakt van literatuurdata van manlijke sportduikers (Carturan et al. 1999). Deze werden gebruikt in het volgende lineaire multipele regressie model:

$$BG_i = aA_i - v \cdot VO_{2max\ i} + b \cdot BF + \epsilon_i \quad (3a)$$

waarbij de index i de proefpersoon aangeeft en ϵ de overblijvende fout. In het model komt geen constante voor omdat deze ϵ niet verkleind. Na minimalisatie van ϵ (op basis van minimumkwadraten) leverde dit voor mannen de volgende BG-predictieformule op:

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

BG is hier uitgedrukt in SE (lopend van 0 tot 4 en geheel). BF draagt i.h.a. slechts 12-20% bij. Als wordt aangenomen dat vrouwen voor DCZ iets minder gevoelig zijn dan mannen (zie Discussie) dan moet een constante van $-0,3$ aan (3b) worden toegevoegd:

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

2.4 De correctie van de nultijd 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 de waarden van de correctie in principe zijn te bepalen.

2.4.1 De relatie tussen rDCZ en BG, en tussen NT en diepte bij gegeven rDCZ

Het het aantal bellen sterk stijgt bij toename van het KM of Spencer getal (of grade). Uit data van Nishi et al. (2003) is een exponentieel verband berekend met exponent 6,2 voor de aantallen bellen (KME omgerekend in SE). Dit suggereert dat rDCZ veel sterker dan lineair met BG (in SE of KME) zal toenemen. Uit de literatuur is bekend wat de kans is op DCZ bij gegeven, d.w.z. gemeten BG. Deze kans laat zich prima met een exponentiële relatie beschrijven. Combinatie van door Nishi et al. (2003) vermelde data geeft (lineaire regressie na logtransformatie en weging van de aantallen; totaal 1837 Dopplermetingen):

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

met BG in Spencereenheden (de SEE van de beide coëfficiënten is 0,12 en 0,04 resp.). M.a.w., het risico neemt zeer snel toe, per SE met vrijwel een factor 3. Fig.1 illustreert dit. BG is berekend met de later te behandelen formule (7b), waarna de waarde met 0,5 SE verlaagd is vanwege de stijgsnelheid van 10 m/min (zie Discussie 3.3). BG, met vierkantjes aangeduid, is uitgezet op de linker verticale as. Het DCZ risico, met rondjes uitgezet op de rechter as, is berekend met (4). Vanaf ca. 45 jaar overschrijdt rDCZ de

norm van 1% en de mate van de overschrijding gaat met de leeftijd exponentieel omhoog. De USN1958 (US Navy) nultijdentabel geeft in het traject 15-36 m een kans van 2,2% op

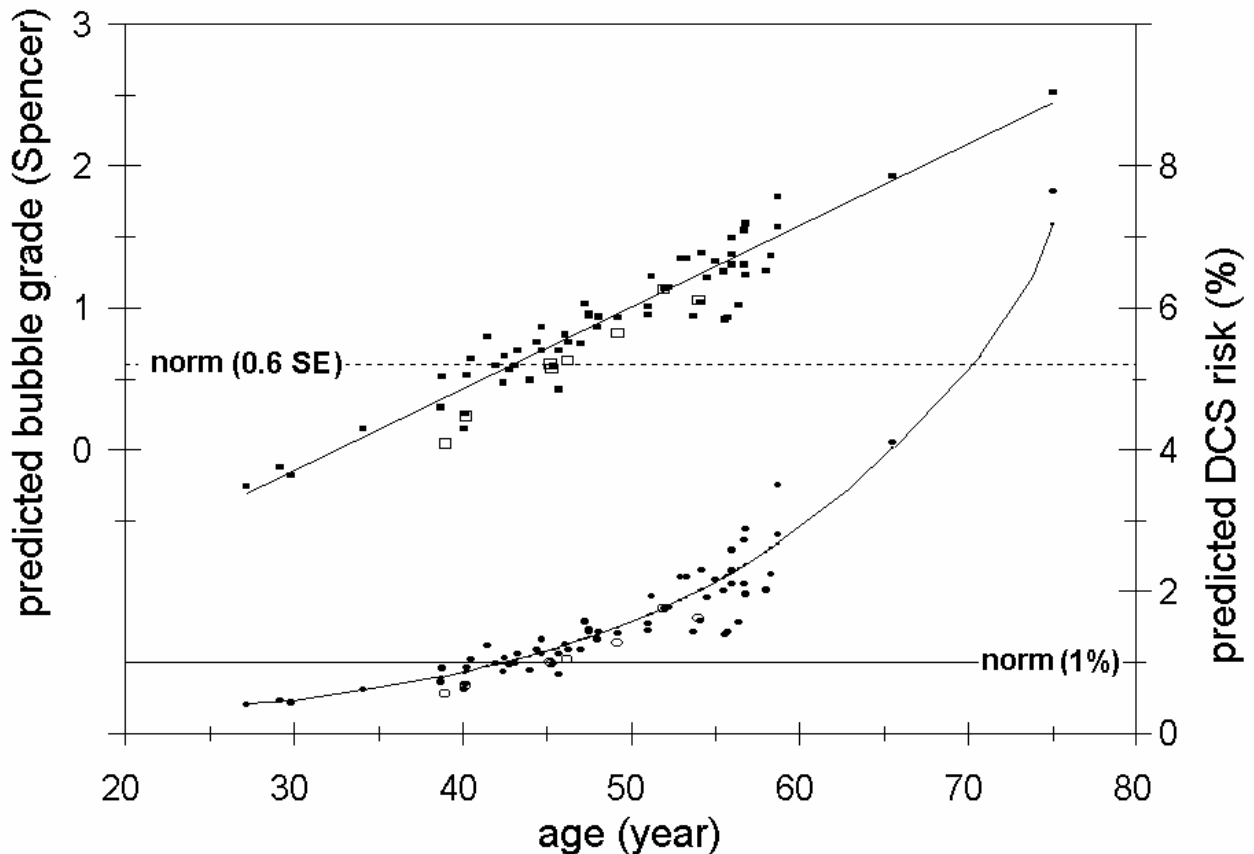


Fig.1 De relatie van BG (vierkantjes) en rDCZ (rondjes) met de leeftijd. De variatie in verticale richting wordt veroorzaakt door de variatie in VO_{2max} (gemiddeld $39,8 \pm 7,4$ mL/min.kg [$m \pm SD$, $n = 70$], berekend met (2a,b); vrouwen 2 eenheden lager) waarbij (1e,f) gebruikt is voor de schatting van BF. Open symbolen stellen vrouwen voor (met BG 0,3 extra verlaagd).

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. Ook gaan beide tabellen, i.h.b. die van de Amerikaanse marine, uit van jonge, cardiovasculair en pulmonaal (zeer) gezonde en getrainde manlijke duikers. Voor de populatie van sportduikers, waarin matige condities en leeftijden van boven de 60 jaar gewoon zijn, geldt dit geenszins.

2.4.2 De NT-correctie om rDCZ te verkleinen tot 1%

De relatie tussen duikdiepten en nultijden (van 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.2. De verlaging van NT ten opzichte van de hier gevolgde rDCZ-norm van 1% van DECIEM is $NT_{BG} - NT_{norm}$, zoals Fig.2 illustreert. Dit verschil is dus de

'stafftijd' die afgetrokken moet worden van de momentane NT van de decocomputer of de tabel. De resterende NT bij gegeven BG (de 'individuele' BG) is dan gelijk aan:

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

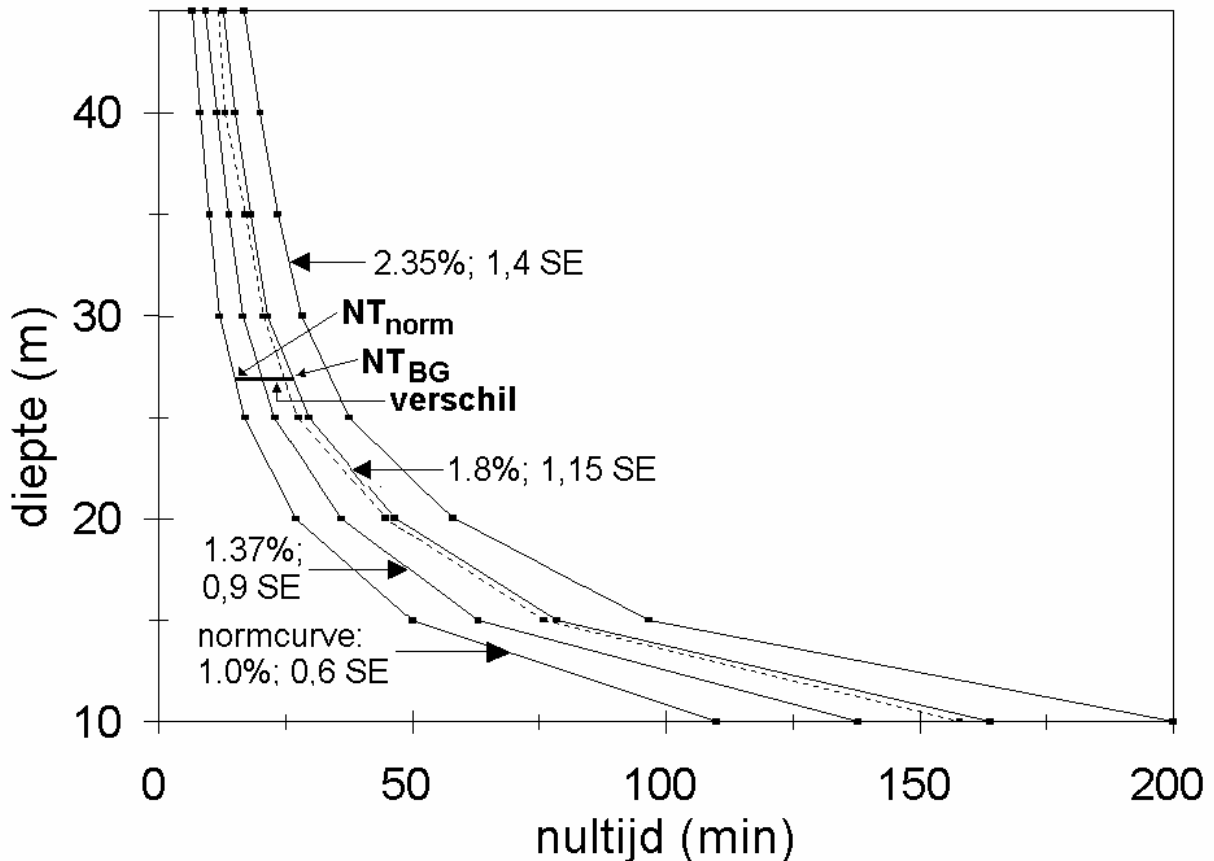


Fig.2 Relatie tussen diepte en NT bij de diverse risico's op DCZ. Bij de vier curven aangeduid met grote pijlen is hun rDCZ (in %) aangegeven met de bijbehorende waarden van BG (in SE). Het horizontale balkje geeft het verschil tussen $NT_{BG} - NT_{norm}$, de 'strafftijd' bij 27 m diepte. De vier curven 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%.

Genoemde tabellen zijn echter gebaseerd op een opstijgsnelheid van 18 m/min. Tien (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.3 na toepassing van (5) gevonden uit Fig.2. Uit Fig.3 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 (8). Dit limiteert hun duikdiepte sterk. Links van de verticale vette lijn, waarin een afdaalsnelheid van 20 m/min is verdisconteerd kan niet gedoken worden.

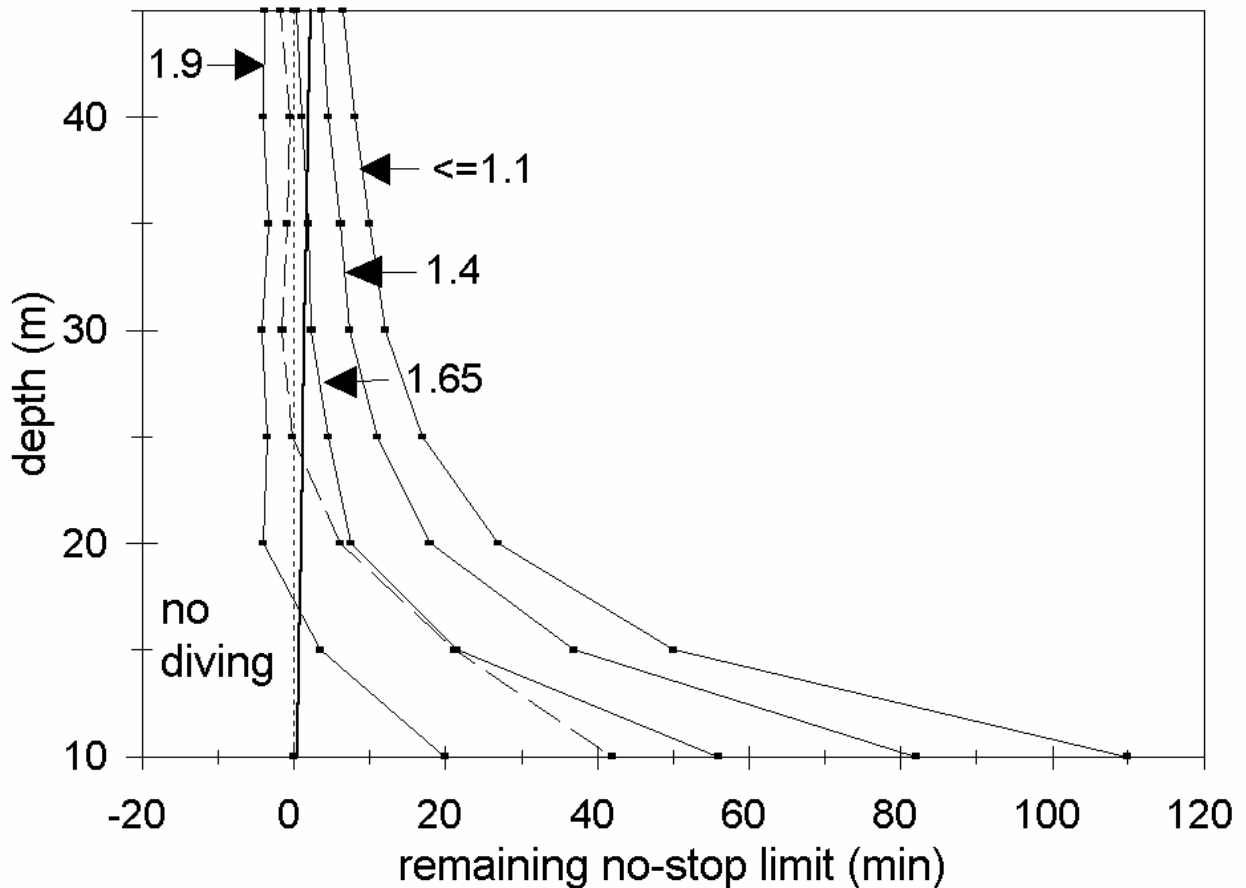


Fig.3 Relatie van diepte en resterende NT met rDCZ is 1% bij de gegeven BG waarden (SE). De curve aangeduid met $\leq 1,1$ SE geeft de onverkorte nultijden die geldt voor elke BG # 1,1 SE. Aangenomen is dat wordt opgestegen met 10 m/min. Wordt met 18 m/min opgestegen dan moeten alle BG waarden zoals bij de curven vermeld met 0,5 SE verlaagd worden. Links van de verticale vette lijn kan niet gedoken worden omdat NT negatief is of korter is dan de afdaaltijd.

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.2. 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.

3. Discussie

3.1 BF

Het gemiddelde van BF van Carturans data is laag: 16%, range 3,9-26%. 3,9% impliceert slecht 0,9% vetreserve (McArdle et al., Hfdst. 28). BF onder 10% komt alleen voor bij zeer goede duursport atleten, bij de studie van Carturan blijktbaar vier stuks. De

Nederlandse manlijke sportduikers hadden gemiddeld 22,5%, range 14 – 36%, een significant verschil. Een afwijking van Carturans BIA-meter zou zijn lage waarden ook kunnen verklaren. Zo een afwijking heeft echter een nihil effect op de predictie van BG. Appendix 1 gaat nader in op de betrouwbaarheid van de methoden om BF te bepalen.

3.2 VO_{2max}

Vergelijking (2a,b) heeft t.o.v. de feitelijke waarde een totale SEE (model- en meetfouten, en toevallige fouten) van 16% (zie Appendix 2.2). VO_{2max} kan ook verkregen worden uit vragenlijsten (Appendix 2.1&3). De laatste behelzen altijd A, W, H en geslacht om BF of de BMI uit te rekenen, nodig voor VO_{2max} , en vragen over de aërobe activiteit. Inspanningstesten (zie ook Appendix 2.3&4) zijn i.h.a. nauwkeuriger met een SEE van rond de 10%.

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 (2a,b). 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, het verschil in VO_{2max} (in mL/kg·min) de helft lager ligt (McArdle et al. 2001, Hfdst. 11). Dit heeft een spierfysiologische oorzaak. Een bijkomend effect is m.i. dat de spieren van een vrouw (en een dikke man) door de betere thermische isolatie eerder oververhit raken, wat de VO_{2max} verlaagd. De diverse methoden laten zien dat de intersubject-variatie in VO_{2max} toeneemt met A.

3.3 De Bubble Grade (BG)

Het BG-predictiemodel 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 (Comex tabel). Bij het opstellen van het statistisch model (3a) is een keuze gemaakt uit diverse theoretische mogelijkheden. Het invoeren van een interactieterm, bijv. $A \cdot VO_{2max}$, resulteerde niet in een kleinere SEE. Interactietermen zijn daarom niet opgenomen. De zgn. stepwise benadering, eerst bijv. de coëfficiënt van A bepalen, deze vastzetten en dan die van VO_{2max} , etc. gaf ook geen beter resultaat.

De P-waarde van de coëfficiënten van leeftijd en VO_{2max} in (3b,c) zijn 0,01. Beide parameters zijn dus zeer significant. Voor BF ligt dat anders daar zijn P-waarde 0,55 is. De hoogte van deze waarde heeft niets te maken met de lage BF waarden van Carturans studie. Statistisch gezien hoort BF dus niet in het BG-model thuis. 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 (6-10 uur) kan dit in het model (gegevens uit een eenmalige duik) nauwelijks een rol spelen. Myeline, een heel klein deel van BF, heeft echter een halfwaardetijd van ca. 13 minuten en is dus zeer relevant. Toch kan niet geheel uitgesloten worden dat BF wel in dit model (van een

1ste duik) thuishoort, zij het dan als (zeer) ondergeschikte parameter ⁴. Bij weglating van BF in (3a) wordt het BG-model:

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

De standaardfout van beide coëfficiënten is 0,009, wat beide zeer significant maakt, en SEE is 1,0. Wordt de VO_{2max} gebruikt die gebaseerd is op het voor BF gecorrigeerde lichaamsgewicht ('lean body mass'), dan wordt in essentie het zelfde resultaat verkregen. Een theoretische handicap van de lineaire regressie modellen van BG is het niet normaal verdeeld zijn van BG. Hierdoor worden de coëfficiënten niet zuiver geschat en hebben de uitkomsten van statistische tests een bias. Het probleem is opgelost door aan BG een random getal (tussen 0 en 1) en 0,5 toe te voegen. Na het nemen van de logaritme blijkt de nieuwe variabele normaal verdeeld. Het statistische model wordt nu:

$$\log(BG_{obs\ i} + 0,5 + rand_i) = \log(aA_i - v \cdot VO_{2max\ i} + 0,5 + rand_i) + \varepsilon_i \quad (7)$$

met *rand* het random getal, dat links en rechts van het gelijkteken hetzelfde is (maar steeds anders voor de volgende proefpersoon). De coëfficiënten *a* en *v* komen gemiddeld ⁵ uit op respectievelijk 0,048 op 0,023 ⁶, zodat de predictieformule wordt:

$$BG = 0,048A - 0,023 \cdot VO_{2max} (-0,3) \quad (8)$$

SEE is 1.0. Tussen haakjes staat de vermindering bij vrouwen (zie § 3.4). *Stijgt men op met 10 m/min terwijl een tabel (of zeer oude duikcomputer) van 18 m/min gebruikt wordt, dan kan BG met 0,5 verminderd worden om rDCZ te berekenen* (zie §2.4.2). Met 17 in plaats van 9 m/min gaat het gemiddelde m_{BG} van 0,91 naar 1,55 SE (Carturans data). Dan wordt verwacht dat 40% van de Dopplermetingen hetzelfde blijft en 60% 1 punt groter wordt. Echter, zes maal wordt een verschil van 2, eenmaal 3 SE gevonden en eenmaal 1 SE lager. Dit duidt enerzijds op de problematiek van het beoordelen van de Dopplers (af rondingsprobleem) en anderzijds op intra-subject variatie (vermoeidheid, hydratatie, etc.). De oplossing van het regressiemodel (zonder logtransformatie) met 17 m/min geeft dezelfde coëfficiënt van VO_{2max} maar die van leeftijd stijgt met 34%.
Rekenvoorbeeld 3:

Voor onze man en vrouw uit beide vorige rekenvoorbeelden wordt BG volgens (8):

⁴ Uit de halfwaarden en toepassing van de wet van Henry op de compartimenten volgt dat na de opstijging in vetweefsel ca. 30% van de totale opgeloste N_2 zit. Dit komt pas na vele uren vrij.

⁵ Omdat $rand_i$ van de 44 proefpersonen steeds een andere realisatie heeft zijn de *a* en *v* van vijf realisaties gemiddeld (standaardfout respectievelijk 0,0020 en 0,0012). De oplossing van een enkele realisatie werd onderzocht met de 'one leaving out' methode wat respectievelijk een standaardfout van 0,0009 en 0,0007 gaf. Iteraties liepen vaak vast wegens het negatief worden van de term rechts alvorens de logaritme werd genomen.

⁶ $m\{aA_i - v \cdot VO_{2max\ i}\}$ berekend uit (7) is kleiner dan $m\{BG_{obs\ i}\}$ omdat de *a* en *v* kleiner zijn dan die van (6). Dit komt doordat de waarde $BG = 0$ SE in de data sterk overheerst. Dit geeft te lage coëfficiënten van (7) en dus een te lage voorspelde *m*. Daarom zijn *a* en *v* herschaald op de *m* van BG_{obs} . (Het verschil tussen (6) en (8) wordt deels door afronden veroorzaakt.)

$$BG_{\text{man}} = 0,048 \times 40 - 0,023 \times 44,7 = 0,89,$$

$$BG_{\text{vrouw}} = 0,048 \times 40 - 0,023 \times 36,4 - 0,3 = 0,78$$

Rekenvoorbeeld 4:

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

Invullen van de gegevens van de man in (1e) geeft $BF = 15,25 + 0,14A$, en dit te substitueren in (2a) levert op dat $VO_{2\text{max}} = 57,65 - 0,322A$. (Kan ook direct met (2c).) Dit vervolgens te substitueren in (8) geeft:

$$A = (BG + 1,326)/0,0554.$$

Voor $BG = 1,1$ (= $0,6 + 0,5$) wordt dan 44 jaar gevonden. Voor BG is $1,4$, $1,65$ en $1,9$ SE, de BG waarden waarvoor Fig.3 de nultijden geeft, wordt respectievelijk 49, 53 en 58 jaar gevonden. De vrouw bereikt deze BG waarden bijna 2 jaar later dankzij de verlaging van $0,3$ SE t.o.v. de man, zie (8). Als de 58 jarige man zijn duikgedrag niet aanpast dan loopt hij een 3 maal groter risico. Het effect van de leeftijd is zeer drastisch, en dat liet Fig.1 ook al zien. 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 $BG = 1,78$ SE gevonden, wat een vermindering van de diepte beperking van ca. 17 naar 24 m geeft (zie Fig.3). Het voorbeeld geeft aan dat het effect van leeftijd door afvallen en extra sporten maar gedeeltelijk is te compenseren.

3.4 DCZ risico van mannen en vrouwen

Het BG -predictiemodel berust op metingen aan uitsluitend manlijke sportduikers. Bij vrouwen zouden de coëfficiënten iets anders kunnen zijn. Bij gelijke A , W , H en aërobe activiteit als de man heeft de vrouw een lagere $VO_{2\text{max}}$, wat direct blijkt uit (2c,d).

Volgens (6) is haar BG dan ca. $0,2$ hoger, wat volgens (4) de vrouw ca. 22% gevoeliger maakt voor DCZ. Is BG groter dan $1,5$ SE dan betekent dit een dieptebeperking die heel sterk met BG toeneemt, zoals uit Fig.3 is af te lezen.

Het onderzoek over het verschil in $rDCZ$ tussen mannen en vrouwen, zowel in de beroeps- als recreatieve sfeer, is zeer divers van opzet. Dit wordt vooral veroorzaakt door een gebrek aan explicitering van de onderzoekscriteria waarin manlijke en vrouwelijke duikers overeen moesten komen om $rDCZ$ van beide geslachten te kunnen vergelijken. Van goede matching was geen of soms maar gedeeltelijk sprake. Het is daarom niet verrassend dat de resultaten heel inconsistent zijn (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 $0,25$ (of minder) 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) 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 vermoed ik dat qua leeftijd gematchte vrouwen in de praktijk gevoeliger zijn voor DCZ vanwege hun hogere BF en

lagere VO_{2max} , wellicht enkele tientallen procenten (relatief). Zijn echter BF en VO_{2max} ook gelijk dan is het omgekeerde niet uitgesloten. Bij gelijke BF is de vetverdeling van vrouwen gunstiger, waardoor de halfwaardetijden bij de opstijging (hogere schil- en manteltemperatuur) korter zijn, wat de N_2 uitwas bevordert.

De in (8) ingevoerde verlaging bij vrouwen van 0,3 SE zal t.o.v. gematchte mannen een lichte gevoeligheidsvermindering geven (ca. 13%). De gemiddelde duikende vrouw is echter jonger dan de dito man, maar dit voordeel wordt door de lagere VO_{2max} weer verkleind. Voor een behandeling van dit punt zij ook verwezen naar Dermout (2005).

3.5 Betrouwbaarheid van het BG-predictiemodel

Zowel het statistische model (vergelijking 7) als de uitkomst van de predictieformule (vergelijking 8) is behept met fouten. De grootste fout is ϵ , met een SD (= SEE) van vrijwel 1,0. Hij bestaat uit toevallige en systematische fouten. Onder de laatste is vooral begrepen de fout veroorzaakt door het niet bekend zijn van parameters die BG mede bepalen.⁷ Een toevallige fout wordt veroorzaakt door de (toevallige) samenstelling van de steekproef en de fout in BG_i en aan de predictiekant de fouten in de numerieke waarden van BF en VO_{2max} . Daar komt de intra-proefpersoon variatie (dag tot dag verschillen e.d.) van de parameters, i.h.b. BG, boven op. Deze relatief kleine fouten zullen de genoemde SEE van 1,0 (bij onafhankelijkheid van fouten) niet verder verhogen.

Door het bovenstaande zijn 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 (8)) en gemeten BG's (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 verschilden soms 2 of zelfs 3 (één paar) SE. Onmiskenbaar neemt BG statistisch en individueel (bij gelijkblijvende levensstijl) toe met de leeftijd. Van 95 Nederlandse sportduikers (hoge leeftijden oververtegenwoordigd) hadden er acht, allen boven de 56 jaar, een BG groter dan 1,9 SE. Bovendien neemt de interindividuele variatie, ook relatief, met de leeftijd toe. Boven de 50 jaar blijkt de schattingsfout SEE ruim boven 1,0 te zijn. Bij de interindividuele variatie spelen twee zaken een rol: persoonlijke gevoeligheid op zich en recente duikgeschiedenis. Sportactiviteit 20 uur voorafgaande aan de duik zou het optreden van bellen verminderen (Wisloff et al. 2004). 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, net 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

⁷ Een minder belangrijke systematische fout is dat het model in werkelijkheid slechts bij benadering lineair zal zijn (dus rechtlijnige verbanden tussen BG en de parameters). Met zo weinig proefpersonen en zo ruizige data is alleen een lineair model statistisch veroorloofd. Om dezelfde reden zijn interactietermen niet toegestaan. En andere systematische fout hangt samen met de keuze van het decompressieprofiel en de gebruikte tabel (Comex). Het betrof een decoduk en dat is weinig gangbaar.

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. De met de leeftijd afnemende longdiffusiecapaciteit is daarbij een belangrijke parameter. Andere, meer hypothetische factoren zijn: de met de leeftijd toenemende vorming van arteriosclerotische plaques waardoor er wellicht meer groeikernen zijn; verslechtering van de glycocalyx, wat ook toeneemt met de leeftijd, waardoor bellen mogelijk makkelijker aan de vaatwand verklevan, aggregeren en de longen slechter bereiken. Al deze factoren kunnen echter sterk met de leeftijd variëren. Immers, de fysiologische leeftijd van het cardiovasculaire en pulmonale systeem kan makkelijk 10 tot 20 jaar van de kalenderleeftijd afwijken. Ook het bel-surfactant, van belang voor het schrompelen van de bellen, kan veranderen met de leeftijd. 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 mogelijk 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.

Fig. 3 geeft aan dat de nultijden niet verkort worden als $BG \# 1,1 SE$. Jonge, atletische en aëroob goed getrainde duikers hebben een voorspelde BG dicht bij 0 SE en soms zelfs negatief. De laatsten 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 (duikcomputer in alarm, duiken in buddiesysteem). Daarom geldt dat als $BG \# 1,1 SE$ er verkorting noch verlenging is.

3.6 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). Vanwege deze onnauwkeurigheid zal 20% van de duikers in Fig.2 en Fig.3 bijna één curve (of iets meer) opschuiven. Meer epidemiologische gegevens en een betere statistische analyse (uitgaan van de mij onbekende primaire data) kunnen deze onzekerheid sterk 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.

3.7 Conclusies en aanbeveling

De betrouwbaarheidsmarges van de nultijden-correctie en vooral van het BG-model moeten verkleind worden alvorens de uitkomsten 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. De aandacht gaat daarbij primair uit naar het optimaal laten functioneren van het cardiovasculaire en pulmonale systeem.

Dankbetuiging Met dank aan alle (sport)duikers die hun gegevens ter beschikking stelde en i.h.b. aan Drs. J.-J. Brandt Corstius (gegevens SSH-cursisten november 2004 en C.M. Baarda (bedrijfarst, gegevens duikkeuringen). Ook dank ik Drs. E.A. van Riet Paap voor zorgvuldige nalezing van het manuscript.

Referenties

- Baarda CM. Rekenprogramma ter ondersteuning van de keuring van sportduikers, zie NVD website: 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.
- Binkhorst RA et al. Richtlijnen voor de Ergometrie ten behoeve van Sportmedische Adviescentra. NISGZ publicatie nr 22, 1986.
- Brubakk AO and Neuman TS, ed., Bennett and Elliott's Physiology and medicine of diving, Saunders, Edinburgh, Chapter 10, 2003, 419-650.
- 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.
- Demura S, Sato S, Kitabayashi T. Percentage of total body fat as estimated by three automatic bioelectrical impedance analyzers. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 23, 93-99, 2004.
- Dermout SM. Vrouwen en Duiken. In: Leerboek Duikgeneeskunde, Dermout SM, Feenstra L en Brandt-Corstius JJ (ed.) 2005, in bewerking.
- Deurenberg P, Yap M, van Staveren WA. Body mass index and percentage fat: a meta-analysis among different ethnic groups. *Int Journal of Obesity*, 22, 1164-1171, 1998.
- 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.
- Garrow JS and Webster J, Quetelet's index (W/H²) as a measure of fatness. *Int. J. Obes.*, 9, 147-53, 1985.
- George JD, Stone WJ, Burkett LN. Non-exercise VO₂max estimation for physically active college students. *Med Sci Sports Exerc*, 29, 415-423, 1997.
- 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.
- Malek MH, Berger DE, Housh TJ, Coburn JW, Beck TW. Validity of VO₂max equations for aerobically trained males and females. *Med Sci Sports Exerc.* 36, 1427-32, 2004.

- 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.
- Nishi 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.
- Minten VK, Lowik MR, Deurenberg P, Kok FJ, Inconsistent associations among anthropometric measurements in elderly Dutch men and women. *J Am Diet Assoc*, 91, 1408-1412, 1991.
- Schellart NAM. In hoeverre bepalen leeftijd, geslacht, VO_{2max} en lichaamsvetpercentage het risico op decompressieziekte? Een theoretisch model, NVD website: www.duikgeneeskunde.nl, 2005.
- Smalley KJ, Knerr AN, Kendrick ZV, Colliver JA, Owen OE. Reassessment of body mass indices. *Am J Clin Nutr*, 52, 405-408, 1990.
- 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.
- Sulaiman ZM, Andrew AP and Robert BO, Relationship between age and susceptibility to altitude decompression sickness. *Aviat. Space Environ Med*, 68, 695-698, 1997.
- Tanaka H, Monahan KD, Seals DR. Age-predicted maximal heart rate revisited. *J Am Coll Cardiol*, 37, 153-156, 2001.
- Uth N, Sorensen H, Overgaard K, Pedersen PK.. Estimation of VO_{2max} from the ratio between HR_{max} and HR_{rest} —the Heart Rate Ratio Method. *Eur J Appl Physiol*, 91, 111-115, 2004.
- 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.

Appendix 1 Betrouwbaarheid van methoden om BF te bepalen

BIA-metingen zijn i.h.a. betrouwbaar, maar wisselend per type meter. Bij de voet-voet methode staat men meestal op een metalen plaat (elektrode) zodat de druk op de elektrode per oppervlakte vrijwel gelijk is tussen de subjecten. Op grond van de fysica mag verwacht worden dat de voet-voet methode betrouwbaarder is dan de hand-hand methode omdat bij de eerste en veel groter deel van het lichaam gebruikt wordt. De tetrapolaire methode (beide handen en voeten) is op theoretisch gronden de beste (6 stroompaden i.p.v. slechts 1, zie ook Jebb et al. 2000). Een nadeel is dat vaak kinderen, topatleten en allerlei patiëntengroepen worden uitgesloten van de standaardmeting.

Tabel 1 Vergelijking van vet% van de diverse methoden (uit Jebb et al., 2000)

	Correlatiecoëfficiënt r	bias	SEE (%)
Methode			
1 Huidplooimeting	0,903	0,5	4,6
2 BIA, Tanita-305	0,889	0,9	5,1
3 BMI, Black-model	0,862	-0,9	5,4

BIA apparaten zullen steeds betrouwbaarder worden. Het valt te verwachten dat een BIA apparaat met vier of meer elektroden en met meer dan één meetfrequentie superieur aan de BMI methode zal zijn (Demura et al. 2004). Door her distributie tussen vetdepot's (vermindering subcutaan vet) tijdens de meno- en andropauze wordt de hand-hand methode om fysische redenen boven de 50 jaar minder betrouwbaar. Tabel 1 geeft de statistische vergelijking van drie methoden gebaseerd op mannen en vrouwen samen (n = 205), waarbij vergeleken is met het 4-compartimentenmodel (zie § 2.1.4). De r van methode 2 en 3 zijn niet significant verschillend en hetzelfde geldt voor de bias en de

SEE. Het bovenstaande betekent dat de bepaling van BF met de Tanita-305 en het Black-model statistisch even goed zijn. Hetzelfde geldt voor de vergelijking tussen de Tanita-305 en de iets beter lijkende huidplooi methode. Wel is er een tendens dat de laatste het iets beter doet dan het Black-model.

De BF van 33 mannen (Baarda, persoonlijke mededeling, 2004) verkregen met de BIA methode (meestal Omron) komt 1,2% lager uit dan berekend met (1c) (Black-model met bias- en leeftijdscorrectie). Vanwege dit kleine verschil en een r van 0,89 zal vergelijking (1c,d) en zeker (1e,f) vrijwel even nauwkeurig schatten als een BIA hand-hand apparaat. Hoewel, zoals gezegd, een BIA hand-hand apparaat theoretisch minder nauwkeurig is dan een voet-voet apparaat geldt ook nu dat het verschil te klein is om hier van belang te zijn. BIA apparaten hebben een SEE van 4-5% en in de praktijk zal dit 1% hoger zijn (onnauwkeurigheid in lengte etc, niet ideale condities). Gezien het doel van deze bijdrage is vergelijking (1e,f) meestal adequaat, tenzij op grond van een afwijkende lichaamsbouw de uitkomst onwaarschijnlijk is. Zo zal een krachtsportbeoefenaar een veel lagere BF hebben dan de BMI methode berekend. Anderzijds kan de BIA-meting een grote afwijking geven als men zich niet aan de voorschriften houdt, bijv. als er een flinke vochtopname voor de meting was. In dit soort gevallen zal BF met een van de twee andere methode geschat moeten worden maar ook dan geldt hetzelfde voorbehoud.

Ook is het mogelijk langs een meer theoretische weg, op grond van literatuurgegevens en eigen berekeningen, een afschatting te maken van de systematische fout die kan zitten in vergelijking (1e,f). De fout in de eerste coëfficiënt en de constante geven samen de bias die Jebb et al. (2000) vond. Voor mannen geeft dit een fout van ca. 0,45% vet. Voor de 2de coëfficiënt wordt een fout van ca. 0,8% vet aangenomen en voor de conditieterm in zijn geheel 0,5% vet. Bij onafhankelijkheid van de fouten is de totale SEE dan 1,05 % vet, relatief ongeveer 5,5 %. Dit komt overeen met die van Jebb et al., die vergeleek met het 4-componentenmodel. Voor de zekerheid zal 6% worden aangehouden wegens fouten in de opgave van de conditiegegevens en meet- en opgavefouten in H en W.

In het algemeen wordt een schatting beter als men de uitkomsten van twee of meer methoden middelt. Als echter een uitkomst om evidente redenen niet goed is, moet deze niet gebruikt worden, ook niet voor middelen.

Appendix 2 Methoden om VO_{2max} te bepalen

A2.1 Een Amerikaans niet-inspanningsmodel op basis van een vragenlijst

Een veel gebruikt niet-inspanningsmodel behandeld in het standaardwerk van McArdle et al. (Hfdst. 11, 2001) is dat van George et al. (1997), dat gebruik maakt van de in de sportfysiologie vaak gebruikte PFA (percieved functional ability) en PA-R (physical activity rating) scores. De scores worden bepaald op grond van de onderstaande vragenlijst:

Questionnaire and formula to calculate VO_{2max} from age, sex and sport

Score PA-R (physical activity rating, from 0 to 10): Encircle the number that best describes your overall level of physical activity for the last 6 months.

0. Inactive: avoid walking or exertion; e.g. always use elevator, drive when possible instead of walking;

1. *light activity: walk for pleasure, routinely use stairs, occasionally exercise sufficiently to cause heavy breathing or perspiration;*
2. *moderate activity: 10 to 60 min per week of moderate activity such as golf, horseback riding, calisthenics, table tennis, bowling, weightlifting, yard work, cleaning house, walking for exercise;*
3. *moderate activity: over 1 hour per week of moderate activity as described above.*
4. *vigorous activity: run less than 1,6 km/week or spend < 30 min/week in comparable activity such as running, jogging, conditional swimming, race-cycling, conditional rowing, aerobics, skipping rope, running in place, or engaging in vigorous aerobic-type activity such as soccer, basketball, tennis, racquetball, or handball;*
5. *run 1,6 – 8 km/week (1-5 English mile) or spend 30-60 min/week in comparable activity as described above;*
6. *run 8-16 km/week or spend 1-3 hour/week in comparable activity as described above;*
7. *run 16-24 km/week or spend 3-6 hour/week in comparable activity as described above;*
8. *run 24-32 km/week or spend 6-7 hour/week in comparable activity as described above;*
9. *run 32-40 km/week or spend 7-8 hour/week in comparable activity as described above;*
10. *run > 40 km/week or spend > 8 hour/week in comparable activity as described above.*

Score PFA-A (Perceive functional ability, from 1 to 13). Cover a distance of 1600 m. Which exercise pace is right, not too easy and not too hard? Encircle the appropriate number.

1. *Walking at a slow pace in 18 min or more;*
3. *walking at a medium pace in 16 min;*
5. *walking at a fast pace in 14 min;*
7. *jogging at a slow pace in 12 min;*
9. *jogging at a medium pace in 10 min;*
11. *jogging at a fast pace in 8 min;*
13. *running at a fast pace in 7 min or less.*

Score PFA-B Cover a distance of 4800 m and not become breathless or overly fatigue. Be realistic. Encircle the appropriate number.

- 1 *Walking at a slow pace in 54 min or more;*
- 3 *walking at a medium pace in 48 min;*
- 5 *walking at a fast pace with in 42 min;*
- 7 *jogging at a slow pace in 36 min;*
- 9 *jogging at a medium pace in 30 min;*
- 11 *jogging at a fast pace in 24 min;*
- 13 *running at a fast pace in 21 min or less.*

$$PFA = PFA-A + PFA-B \quad (9a)$$

$$VO_{2max} = 44,9 + 7,04Sex - 0,82W/H^2 + 0,69 \cdot PA-R + 0,74 \cdot PFA, \quad (9b)$$

with Sex is 0 and 1 for female and male respectively.

Na een door mij ingevoerde correctie voor leeftijd (0,6% afname per jaar) met uitsluiting van PFA die verondersteld wordt (vrijwel) leeftijdsonafhankelijk te zijn, wordt VO_{2max} :

$$VO_{2max} = (44,9 + 7,04Sex - 0,82W/H^2 + 0,69 \cdot PA-R) \cdot (1 - 0,006(A - 23)) + 0,74 \cdot PFA. \quad (10)$$

A2.2 Afleiding van het hier gebruikte niet-inspanningsmodel

Het niet-inspanningsmodel van (2a,b) kwam als volgt tot stand. Een multiple lineaire regressie toegepast op de data van Carturan et al. (1999) levert voor VO_{2max} :

$$VO_{2max} = 66 - 0,39A - 0,83 \cdot BF \quad (11a)$$

De coëfficiënt $-0,39$ is te negatief op grond van literatuurgegevens (McArdle, Hfdst. 11, 2001, Malek et al. 2004). De diverse aspecten van de prestatie van de spieren (kracht, maximaal vermogen beenspieren, snelheid opbouwen van kracht, versnelling, vezel verkortingsnelheid etc.) nemen met ongeveer 4-6% per decade af. VO_{2max} zelf neemt met ca. 6% per decade af, wat resulteert in een leeftijdscoëfficiënt van 0,23. Met deze nieuwe coëfficiënt zijn de uitkomsten van 39 manlijke duikers gekruisvalideerd met die van de steptest (gegevens van Baarda, met correctie voor hoge waarden). Dit leverde een correlatiecoëfficiënt r van slechts 0,40 op. Een reden is dat in het rekenmodel niet gecorrigeerd kon worden voor aërobe activiteit (ontbrekende gegevens). Aangenomen wordt dat de sportduikers van Carturan et al. (1999) gemiddeld een zelfde conditie hebben als Nederlandse duikers. Op grond van aërobe activiteiten wordt deze geschat op een gemiddelde bijdrage van 5,3 ml O_2 /min·kg ($n=18$). Om te komen tot de uiteindelijke VO_{2max} (2a,b) is een tussenstap gemaakt, gebruik makend van aërobe activiteit:

$$VO_{2max} = 60,7 - 0,23A - 0,83 \cdot BF + 2 \cdot uLS + 3,5 \cdot uMS + 5,5 \cdot uUS \quad (11b)$$

De hiermee verkregen VO_{2max} waarden van 62 duikers en 8 duiksters zijn vervolgens gekruisvalideerd met de modellen van George et al. (1997) (met de door mij ingevoerde leeftijdcorrectie) en Jones et al. (zie Malek et al. 2004 voor ref). De coëfficiënten van (11b) zijn vervolgens met beide modellen geoptimaliseerd, waarbij het model van Jones et al. 3 maal zo zwaar telde (op grond van de veel hogere correlatiecoëfficiënten: 0,92 tegen 0,79). Dit resulteerde tenslotte in de eerder vermelde betrekkingen (2a) en (2b). De SEE (modelfouten en toevallige fouten) van (2a,b) wordt geschat op 16%, 2% boven het gemiddelde van wel met een gasanalyse gekruisvalideerde niet-inspanningsmodellen⁸.

A2.3 Andere modellen

Malek et al. (2004) kruisvalideerde 9 niet-inspanningsmodellen uit de literatuur (manlijke en vrouwelijke variant) met een fietsergometrische gasbepaling. Slechts één, het model van Jones et al. (1985), had naast A, W en H ook de aërobe activiteit als parameter:

$$VO_{2max,man} = (2500H - 23A + 150uS - 2320)/W + 19 \quad (12a)$$

$$VO_{2max,vrouw} = (2500H - 23A + 150uS - 2860)/W + 19, \quad (12b)$$

⁸ Uitgaande van 10% fout in de coëfficiënten van A en BF en 20% in de aërobe correctie resteert bij ongunstige optelling een modelfout van ca. 13% en gemiddeld ca. 7%. De toevallige fout wordt op 14% geschat (het gemiddelde van niet-inspanningsmodellen getest door George et al. (1997). Na waarschijnlijksoptelling (Pythagoras) resulteert een totale SEE van 16%.

met uS het totaal aantal uren aërobe sportbeoefening per week.

De modellen zonder aërobe activiteit konden de toets van betrouwbaarheid niet goed doorstaan, wat met mijn model (2a,b) met de 70 duik(st)ers bevestigd werd. Van 9 door Malek et al. (2004) geteste modellen bleek dat van Fairbarn et al. (1994) nog de beste:

$$VO_{2\max,man} = (2300H - 31A - 332)/W + 11,7 \quad (13a)$$

$$VO_{2\max,vrouw} = (1580H - 27A + 207)/W + 8,99 \quad (13b)$$

Uit onderstaande correlatiematrix lijkt mijn model het best met de drie belangrijkste overige modellen te correleren. Dit model wordt daarom geadviseerd.

Tabel 2 Correlatiematrix BF methoden

model	formule	Schellart	Jones et al. 1985	George et al. 1997	Uth et al. 2004
Schellart	2a,b		0,92	0,80	0,53
Jones et al.	12a,b			0,71	0,43
George et al.	10				0,68
Uth et al.	2e				

Merk op dat het model van Uth et al. een inspanningstest is.

Een goede inspanningstest is die van Storer et al. (1990; zie Malek et al. 2004). Deze maakt gebruik van W_{\max} (maximaal opgewekt vermogen), die bijv. uit de Åstrand step test te halen is:

$$VO_{2\max,man} = (10,5W_{\max} - 10,5A + 519)/W + 6,35 \quad (14a)$$

$$VO_{2\max,vrouw} = (9,39W_{\max} - 5,88A + 137)/W + 7,70. \quad (14b)$$

A2.4 Een hardloop- en zwemttest

Andere bekende testen zijn een hardlooptest over 2500 meter en een zwemttest met een maximale afstand af te leggen in 12 min, beide getabelleerd in McArdle et al. (2002, Hfdst. 17, Tabel 1, resp. 2). De tabelwaarden van de hardlooptest zijn te benaderen met:

$$VO_{2\max} = 158 - 0,282t + 221 \cdot 10^{-6}t^2 - 65,9 \cdot 10^{-9}t^3 \quad (15a)$$

met t de tijd in seconde. (Deze benadering heeft een SEE van 1,9 mL O₂/min·kg t.o.v. die van de 78 tabelwaarden). Die van de zwemttest zijn te benaderen met:

$$VO_{2\max,man} = 30,0 + 0,034d + 1,7 \cdot 10^{-6}d^2 \quad (15b)$$

$$VO_{2\max,vrouw} = 23,5 + 0,029d + 2,3 \cdot 10^{-6}d^2 \quad (15c)$$

Hierbij is d de afgelegde afstand in meters. Deze test is alleen gevalideerd tot 30 jaar, maar verwacht wordt dat de afwijking boven de 30 jaar gering zal zijn. (SEE van 0,2 mL O₂/min·kg t.o.v. die van de 4 tabelwaarden).

Appendix 3 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
ϵ	resterende fout
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·uS (aërobe correctie maximaal 6 punten)
i	subject index
KME	Kisman-Masurel eenheid
m	gemiddelde (rekenkundig)
NT	nultijd (min)
r	correlatiecoëfficiënt
rDCZ	incidentie (risico) van DCZ (%)
RR	relatief risico
SD	standaarddeviatie
SE	Spencer eenheid
SEE	standard error of the estimate: SD van de afhankelijke variabele van de regressie analyse maal (1 – r ²), gelijk aan SD(ϵ)
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	aantal uren aërobe sport/week
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)
WHO	World Health Organization

Appendix 4 Belangrijkste formules

$$BF_{\text{man}} = 1,28W/H^2 + 0,14A - 15,7 \quad \text{zonder aërobe correctie} \quad (1c)$$

$$BF_{\text{vrouw}} = 1,48W/H^2 + 0,16A - 10,3 \quad \text{zonder aërobe correctie} \quad (1d)$$

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

$$BF_{\text{vrouw}} = 1,48W/H^2 - 9,85 + 0,16A - 0,2 \cdot uLS - 0,4 \cdot uMS - 0,6 \cdot uUS. \quad (1f)$$

$$VO_{2\text{max,man}} = 59 - 0,24A - 0,59 \cdot BF + 1,4 \cdot uLS + 2,5 \cdot uMS + 4 \cdot uUS \quad (2a)$$

$$VO_{2\text{max,vrouw}} = 57 - 0,24A - 0,59 \cdot BF + 1,4 \cdot uLS + 2,5 \cdot uMS + 4 \cdot uUS \quad (2b)$$

$$BG = 0,048A - 0,023 \cdot VO_{2\text{max}} - 0,5 (-0,3) \quad \text{alleen met 0,5 verminderen bij opstijgsnelheid} \\ 10 \text{ m/min met gebruik tabel of (oude) duikcomputer gebaseerd op 18 m/min.} \quad (8)$$

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

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