



Duikcomputers Een vergelijkend onderzoek naar hun prestaties, betrouwbaarheid en veiligheid¹

Nico A.M. Schellart



Proloog

Dit rapport berust op een onderzoek van de Stichting Duik Research (SDR) en is gedaan met een UWATEC testvat, een kostbare gift van de firma HyTech te Raamsdonkveer. Zonder deze gift was dit onderzoek, dat in december 2002 van start, ging vermoedelijk niet mogelijk geweest. Wij zijn HyTech daarom zeer erkentelijk.

De methodiek van de testen is beschreven in een SDR rapport (Schellart, 2002) waarin vooral veel aandacht is besteed aan de multilevel en herhalingsprocedures van de NOB duiktabellen 1995. Op de stijgtijd na (10 m/min) komen die geheel overeen met de DCIEM lucht tabellen 1992 (stijgsnelheid 18 m/min). In genoemd rapport is onderzocht hoe de procedures van DCIEM precies toegepast konden worden bij de multilevelduiken waarbij ook niveauverschillen van 3 meter en interpolatietechnieken bekeken zijn. Geconcludeerd werd dat het strikt volgen van de procedure de juiste aanpak was. De tientallen sessies met het testvat, waarin met passen en meten de DCs, vaak vier of vijf, inclusief

¹ © Voor de tekst van deze les berust het copyright bij de SHF en SDR. Beperkte overname is toegestaan mist voor niet-commerciële doeleinden en indien de bron vermeld wordt.

© Copyright SHF and SDR 2006 All rights reserved. Material of this lesson may not be reproduced in any form without permission of SHF and SDR. An exception is made for educational purposes, provided that there is no financial profit.

de lastige te hanteren slangmodellen in het testvat geplaatst moesten worden, zijn uitgevoerd door Drs. Eduard van Riet Paap en de auteur.

Twee sessies zijn uitgevoerd in de fraaie "Carol van Gelderen" tank van de Stichting Recompressietank Maarsseveen (SRM). Dit is een 6-persoons compressietank, ooit het bezit van Smit Internationale, die indertijd door de SDR voor een vriendelijke prijs is overgenomen en later weer door de SRM. De SDR dankt de SRM voor de geboden gastvrijheid om de hectische temperatuurtesten met kokend water en grote partijen ijsblokjes in een bijna-waterballet uit te voeren.

Inleiding

Duikcomputers (DCs) bieden vele voordelen boven het gebruik van tabellen. Duiken volgens een tabel gebeurt volgens een heel strak diepte-tijd regime. De DC geeft veel meer vrijheid want de partiële stikstofdruk van elk type weefsel wordt elk minuut berekend en hieruit wordt de Niet-Stoptijd (NST)² berekend van het weefsel dat het eerst de M-waarde³ op die diepte bereikt. Hoe gecompliceerd een duikprofiel er ook uitziet, de DC rekent het allemaal *du moment* door. Moderne DCs kunnen duikplanningen maken. Bij het gebruik van tabellen voor de duikplanning zijn menselijke fouten gauw gemaakt, zoals bijv. bij herhalingsduikprofielen van multilevelduiken. Ook een foutloze uitvoering van de duik volgens het duikplan is geen vanzelfsprekendheid. Met een DC is dat allemaal een stuk makkelijker.

De DC speelt in op de actuele situatie, dus ook onvoorziene omstandigheden waardoor het duikplan veranderen moet. DCs geven elk moment aan hoeveel tijd nodig is om aan de oppervlakte te komen. Zijn ze lucht geïntegreerd⁴ dan berekenen de DCs elk moment of er voldoende lucht is om aan de oppervlakte te komen. Ze waarschuwen wanneer moet worden opgestegen als de luchtvoorraad onvoldoende dreigt te worden voor de opstijging.

Er zijn ook al DCs die met de watertemperatuur rekening houden, d.w.z de NST aanpassen.

Al meer dan een decennium is het mogelijk de DC in een conservatievere stand te zetten, bijv. vanwege stroming, een lage water temperatuur of vanwege persoonlijke eigenschappen die het risico op DCZ vergroten (bijv. hoge leeftijd of slechte conditie).

Het duiken met een DC is om deze redenen een waar genoegen. Er rijzen echter ook vragen:

- Is hun onderliggende model conservatiever dan een gerenommeerde tabel zoals DCIEM?
- Kunnen ze nooit falen, bijv. door 'bugs' in het programma?
- Zijn ze foutief te gebruiken terwijl het schijnbaar goed gedaan wordt?

De 1ste vraag is niet eenvoudig te beantwoorden. Het hangt af van het type duik, van het type DC en de tabel en hoe veilig precies gedefinieerd wordt.

De tweede vraag ligt wat eenvoudiger. DCs kunnen inderdaad falen, bijv. door bugs in het algoritme, maar dat zal meestal niet voor alle denkbare duiken gelden. Ook kan het zijn dat ze de fabrieksspecificaties niet waarmaken. Het allerergste is natuurlijk dat ze tijdens een duik uitvallen en dit niet door een lege batterij. En wat de derde vraag betreft; dat kan wel degelijk.

In het vervolg zal gepoogd worden op de gestelde vragen zo goed mogelijk antwoord te geven.

Tevens zal een onderlinge vergelijking tussen DC-typen gemaakt worden en zullen ze vergeleken worden met de DCIEM tabel (die ook door de NOB gebruikt wordt). Aan de hand van diverse profielen wordt het gedrag behandeld van DCs op eenmalige en herhalingsduiken (in feite strak geredigeerde simulaties), op deco-duiken, duiken met een te snelle opstijging, jojo-duiken en duiken met sterke temperatuurvariaties. Ook wordt wat verteld over de nauwkeurigheid van de meters, de consistentie van de NST tijdens de duik, en de reproduceerbaarheid.

² De term nultijd wordt hier gereserveerd voor de maximale duikdiepte (MDD). Nadat aan het traject van opstijging begonnen is zal de afkorting NST gehanteerd worden.

³ De maximale inerte gasdruk waar de inerte gasdruk van het weefsel nooit bovenuit mag komen op staffe van de vorming van bellen.

⁴ De flesdruk wordt continue geregistreerd waaruit het werkelijke verbruik op de gekozen diepte berekend wordt.

Duikcomputers

Duikcomputers nader beschouwd

Duikcomputers (DCs) geven indirect inzicht in hoe de mate van stikstofsaturatie er tijdens de duik voor staat door elk moment de NST naar de oppervlakte (= diepte veiligheidsstop) of het eersttoegestane decompressieplafond en evt. overige plafonds met hun decotijden aan te geven. Geavanceerde DCs kunnen dit ook voor Nitrox (sommige zelfs andere mengsels), ook onder abnormale omstandigheden zoals extreme laag temperatuur of sterke temperatuurwisselingen, grote inspanning, of 'afwijkende' persoonlijke eigenschappen zoals hoge leeftijd of slechte conditie ("persoonlijke instelling' of 'micro-bubble'stand' gebruiken) of extreme omstandigheden (altitude diving; bergmeerstand instellen) en een combinatie van beide. Geavanceerde computers kunnen ook de mate van acute en chronische zuurstofintoxicatiegraad aangeven en een planning voor het restant van de duik geven waarbij luchtverbruik en luchtvoorraad het uitgangspunt is.

De kwaliteit van DCs is het afgelopen decennium onmiskenbaar sterk verbeterd. Ook nu, bij de moderne typen, zijn de verschillen in prestaties en prijzen groot. Bij de aanschaf de keuze moet dus goed overwogen waarvoor men de DC wil gebruiken en wat de veiligheidseisen die men zelf stelt.

De SDR, heeft vele tientallen DCs getest in vele tientallen sessie en onder allerlei omstandigheden. Het resultaat kort samengevat komt er op neer dat DCs niet altijd (geheel) waar maken wat de handleiding beweert. In het algemeen is dit gelukkig wel het geval. Wel bedenkelijk is dat er af en toe bij duiksimulaties ook onregelmatigheden zijn gevonden die eigenlijk ontoelaatbaar zijn. Bij sterke afwijkingen van gangbare duiken of bij een calamiteit weet men niet altijd wat men dan aan de DC heeft. De hulp die de DC biedt kan de situatie soms zelfs verergeren.

Hoewel DCs een groot gemak zijn bij het sportduiken zijn het beslist geen duikgidsen die men blindelings kan volgen. Er dient altijd vooraf een duikplan te zijn, waarbij men geïnformeerd is over de omstandigheden (diepteprofiel, stroming temperatuur, helderheid) zodat men verzekerd is van voldoende lucht. Sommige typen DCs kunnen helpen bij de duikplanning, en heel nuttige faciliteit. DCs kunnen decoduiken en zeer diepe en extreme duiken goed aan maar ook met een DC behoren ze tot de hoogste risicoklasse.

Dit artikel zal alleen ingaan op het werkingsprincipe van DCs voor zover dat specifiek is voor hun momentane functioneren. Wel zal besproken worden hoe men de elementaire functies kan testen. Ook zal besproken worden hoe meer bijzondere functies en afwijkende profielen getest kunnen worden. Tenslotte zullen de belangrijkste resultaten van de diverse testprotocollen verkregen met zo'n 20 typen van 6 fabrikaten besproken en geëvalueerd worden. De profielen zijn beschreven in Bijlage A.

Essentie van de werking van de duikcomputer

De essentie van de werking is dat het onderliggende Neo-Haldeniaanse model of RGBM elk moment voor elk weefsel (wisselend van 8 tot tegenwoordig wel 32) uitrekent hoe lang men op dat moment op de dan aanwezige diepte kan blijven tot het moment dat een decostop verplicht is. Elk weefsel heeft dus zijn eigen (momentane) NST. De NST die het kortste is wordt op de display weergegeven. Dat betreffende weefsel is dominant. Bij het verstrijken van de tijd op de gekozen diepte wordt de NST korter, elke minuut ongeveer 1 min. (Dit geldt niet altijd precies omdat een ander weefsel dominant kan worden.) Blijft men op de gekozen diepte dan wordt de NST tenslotte 0 min en komt men in deco. De 1ste deco-display geeft altijd 3 m diepte aan met de decotijd. Wordt nog steeds geen actie ondernomen (actie is opstijgen) dan wordt de decostop op 3 m steeds langer en tenslotte komt er een diepere stop bij etc. Het voert hier te ver om uit te leggen hoe dat precies berekend wordt.

Bovenstaande principe is in moderne DCs van UWATEC (met Bühlmanns ZH-L8 ADT model) op allerlei wijze uitgebreid of 'gerepareerd' om de nadelen van het Neo-Haldeniaanse model te ondervangen. Is de DC gebaseerd op het VPM of RGBM dan wordt uitgegaan van een Neo-Haldeniaanse aanpak maar de M-waarden worden uitgerekend met P_{ss}^{new} ⁵.

Elk compartiment heeft halfwaarden. De kortste bij de DCs met een Bühlmann model is 5 min, terwijl RGBM en VPM computers met 2,5 min. werken. Dit grote verschil van een factor twee werkt sterk door in de MDD-nultijden op grotere diepten. Bij laatstgenoemde DCs zijn deze korter.

⁵ Een soort M-waarde die afhankelijk is van diverse constanten van de bel-dynamica, van de halfwaardetijd, en van de variabelen maximale duikdiepte en de duiktijd tot aan de opstijging.

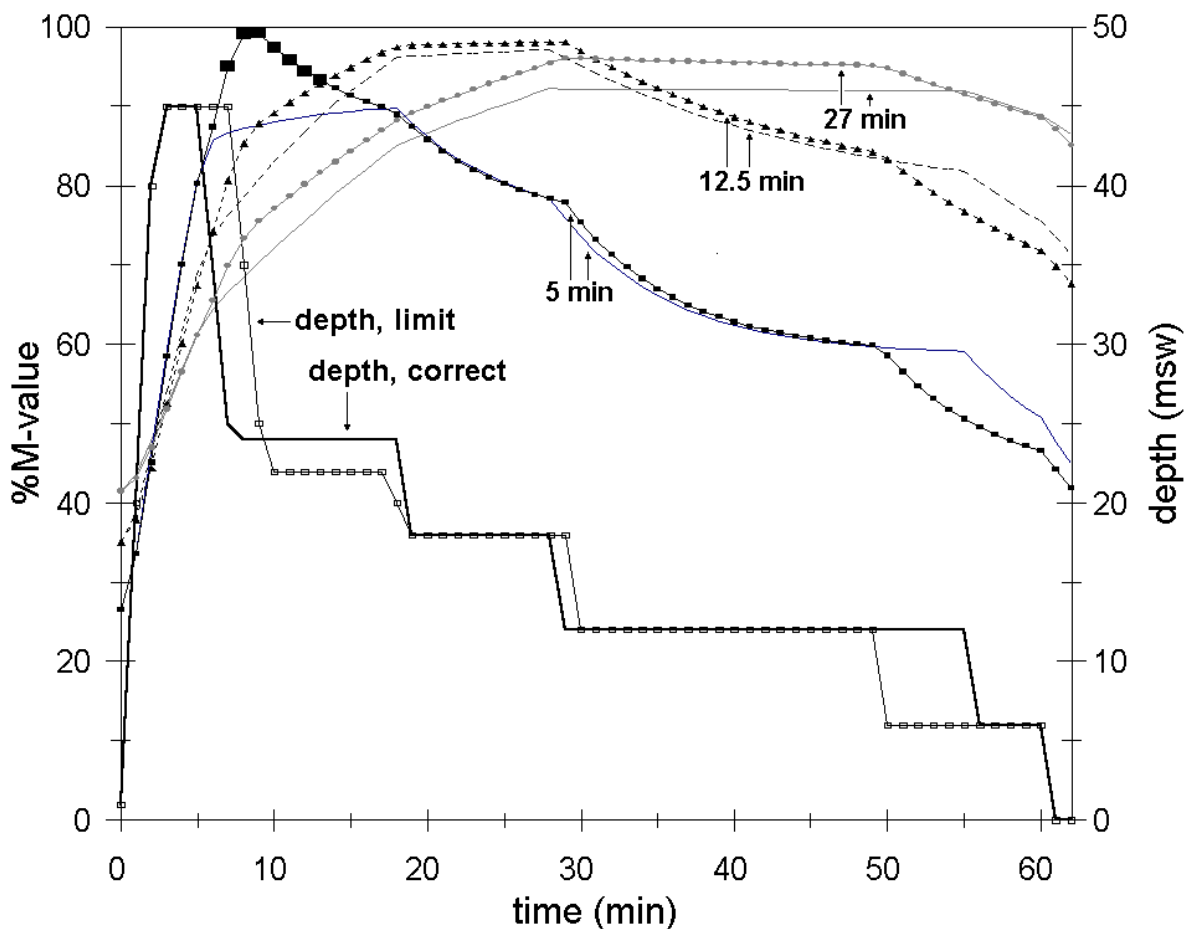


Fig. 1a De linker verticale as geeft %M-waarde ($=100P_{\text{comp}}(t)/M$ -waarde) voor 0 m diepte (oppervlak). Deze zijn gegeven voor het 5, 12,5 en 27 min compartiment. Voor de 'limit' duik bevatten de curven symbolen en voor de 'correcte' duik niet. De rechter verticale as geeft de diepte en hierbij behoren de duikprofielen aangegeven met 'depth, limit' en 'depth, correct'. M-waarden volgens ZH-L16A.

Foutief gebruik

Triviaal zijn natuurlijk het niet opvolgen van instructies op de display en het negeren van waarschuwingen. Hoewel vaak voorkomend, te triviaal om op in te gaan.

Hetzelfde geldt voor de handleiding. Als handleiding en display goed worden opgevolgd dan wordt m.i. met moderne DCs het risico op DCZ sterk verminderd.

De vraag *'Zijn DCs foutief te gebruiken terwijl ze schijnbaar goed gebruikt worden'* moet helaas bevestigend worden beantwoord. Het volgende voorbeeld illustreert dit en betreft een veel gemaakte fout, of gebruik dat daar te veel naar tendeert.

Als voorbeeld neem ik een hypothetische zeer diepe duik naar 45 m met als uitgangspunt om steeds net niet in deco te komen. Er wordt rechtstreeks (zoals het hoort) met 20 m/min naar de grootste diepte afgedaald. Vervolgens wordt met opstijgen gewacht tot de (resterende) NST bijna op 0 min springt. De nultijd volgens DCIEM van 7 min is dan tot op bijna de seconde verstreken. Het duikgedrag wordt nu volledig bepaald door de M-waarden voor 0 m diepte, die dus voor geen enkel compartiment bereikt mogen worden op straffe van een deco (afgezien van de veiligheidsstop). Het dominante compartiment is het 5 min (ZH-L16) compartiment, het snelste compartiment, dat op 7 en 8 min vrijwel een waarde van 100 voor de %M-waarde⁶ heeft, zoals Fig. 1a toont.

⁶ %M-waarde = 100% maal de partiële gasdruk van stikstof in het compartiment/M-waarde.

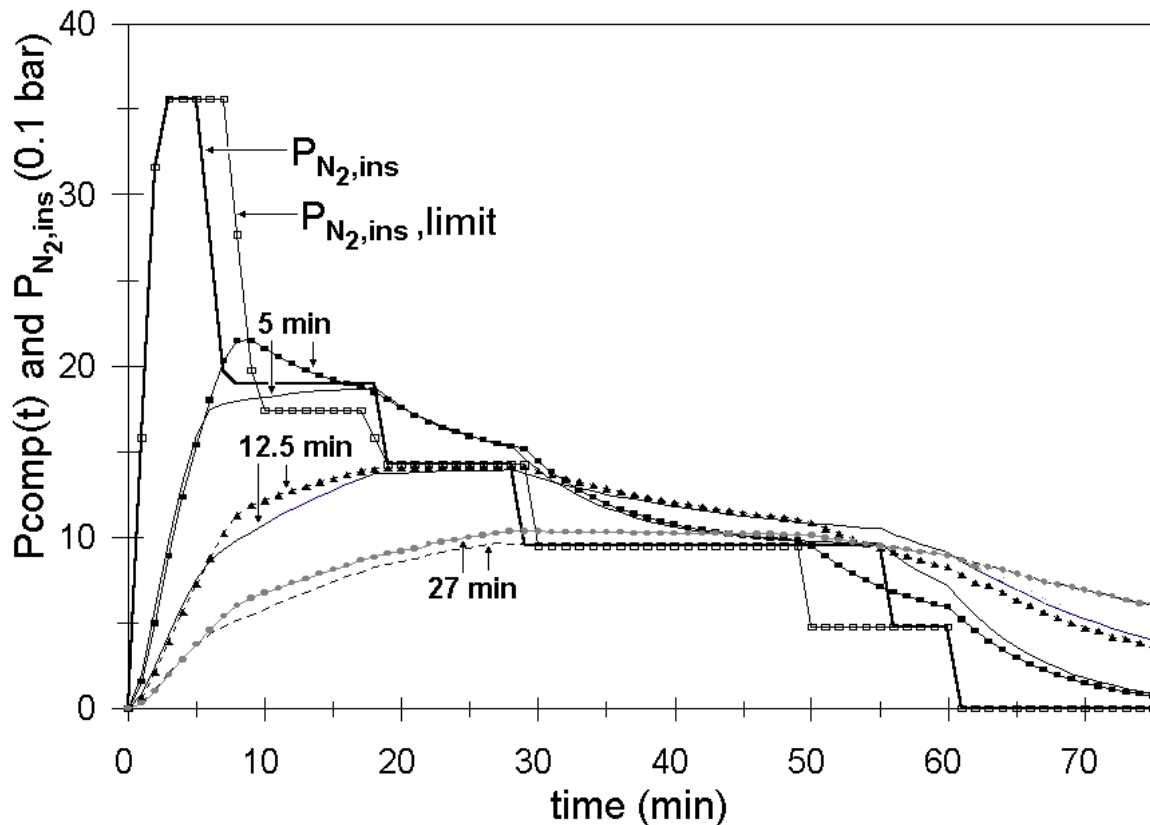


Fig. 1b Deze figuur betreft dezelfde duikprofielen en dezelfde compartimenten als in Fig. 1a. Nu zijn uitgezet de partiële stikstofdrukken van de 3 compartimenten bij de 'limit' en de 'correcte' duik en bovendien de partiële stikstofdrukken van de ingeademde lucht. (NB langs de verticale as komt de waarde 10 overeen met 1 bar).

Men stijgt na de (bijna) 7 min op naar de groots mogelijke diepte waar men net niet in deco gaat. Dit is dus een duik op de NST-limieten, hier aangeduid met 'limit' duik. Bij deze diepe duik is dat, zoals de berekening (iteraties voor de 1^{ste} 4 compartimenten) leerde, noodgedwongen meteen naar 22 m met 10 m/min, zoals geïllustreerd in Fig. 1a. Elk dralen doet de duikcomputer in deco gaan. Het 5 min compartiment is na de opstijging oververzadigd, zoals Fig. 1b laat zien. Het heeft een zeer grote gradiënt G (N_2 weefsel­druk – N_2 beldruk) in de eerste 7 min na het begin van de opstijging, in Fig. 1a aangeduid met de grote vierkantjes op de 5 min curve van de 'limit' duik. Deze G is tot 0,35 bar groter dan G van een duik die de nultijd limiteerde tot 5 min, de 'correcte' duik (zie de getrokken lijn van het 5 min compartiment van Fig. 1b). Veel uitgezette nucleï zullen boven hun kritische straal (r^{min}) komen en dus uitgroeien tot microbellen en evt. stille bellen. Het 5 min compartiment (hart, nieren, grijze stof hersenen, netvlies en orgaan van Corti), zal vanaf de opstijging oververzadigd blijven. Na enige minuten verblijf op 22 m neemt het 12,5 min de rol van dominant compartiment het over (zie Fig. 1a). Na 17,5 min moet worden opgestegen naar 18 m, omdat een deco-stop dreigt. Vanaf nu blijft het 12,5 min compartiment oververzadigd (zie Fig. 1b). Na de gedwongen opstijging, hier tot 12 m is het 27 min compartiment dominant (zie Fig. 1a), en ook dit komt in supersaturatie. Na 50 min dreigt weer deco, nu vanwege het 54 min compartiment (niet afgebeeld) dus opstijgen.

Vergelijking met de curven van de correcte duik, die altijd minimaal 2 min NST over had, laat zien dat de verschillen i.h.a. klein zijn, ook al is er meer 'reserve' in %M-waarde bij de correcte duik. Het 4de compartiment (54,3 min) blijkt een verschil van 10% in %M-waarde op te leveren voor de stop op 6 m. Het verschil in de %M-waarden van het 5 min compartiment is het grootst. Tussen de 7 en 15 min is dit meer dan 10% tussen beide simulaties (Fig. 1a). Wat echter doorslaggevend is, is de veel grotere gradiënt. Door 2 minuten in te leveren wordt de kans op DCZ vele malen kleiner. Qua duikplezier is de 'limit' duik ook inferieur: elke halve minuut moet de display afgelezen worden op NST en diepte omdat de hele duik een deco dreigt. Bij de correcte duik hoeft dat maar af en toe. Men kan zijn diepte goed in de gaten houden door visueel contact met de omgeving (bijv. de wand onder de drop off).

Zoals hierboven al bleek berekent de DC steeds per compartiment of de M-waarde bereikt is. Bereikt

betekent dominant worden van dat weefsel. Maar er is meer bij een DC. De NST van het weefsel met de kortste NST wordt gedisplayed. Hoe ver de andere weefsels zijn opgeladen is voor de display niet relevant.

De stikstofovermaat van *alle* weefsels moet er wel uit. Het risico op (stille)bellen en dus op DCZ neemt toe met de totale stikstof in het hele lichaam. Met de 'limit' duik is die hoeveelheid al gauw 10% meer.

Behalve dit is er een enorm nadeel van 'op de limiet' duiken. Als er maar iets onverwachts gebeurt (plotselinge stroming, buddy breathing e.d.), dan komt men 'out of air'. Een noodopstijging en een groot risico op DCZ zijn het resultaat.

Wat is dan wel verstandig gebruik?

Bij een diepe bounce dive (wrak) en een diepe duik langs een helling op de maximale duikdiepte (MDD; idealiter binnen smalle marge) minimaal 2 minuten op de NST overhouden. Dan in één keer de diepte essentieel verminderen, d.w.z opstijgen naar 40-60% van MDD. Daar ongeveer 5 min overhouden op NST en vervolgens weer behoorlijk opstijgen (6-10 m, meer naarmate men dieper begon). Met deze multi-level duik houdt men een uitstekende controle op het profiel. Als er iets gebeurt is er nog reserve om stikstof op te nemen en er is ook nog een luchtreserve. Als de DC uitvalt (zal zelden gebeuren) kan men de duik veilig afmaken. Men is ook meer gewapend tegen inconsistent gedrag van de DC (zie verder).

Is het zo dat de handleidingen aanleiding geven tot bovenstaand foutief gedrag? Tenminste tegenwoordig zeker niet. Bijna altijd wordt geadviseerd tenminste 2 min over te houden (en bij de oude Suunto modellen zelfs 5 of 10 min). Bij de modellen die de laatste 10 jaar zijn uitgekomen wordt bij niet-ideale omstandigheden *altijd* een persoonlijke instelling geadviseerd of tenminste meer dan 2 min nultijd op de MDD over te houden. Bedenk: *ouder* dan 45 jaar is een niet-ideale conditie.

Het testen van duikcomputers

De test-strategie

Voor het testen van DCs bestaan geen internationale consensus protocollen. Het aantal simulaties waarmee men een test kan uitvoeren, zelfs met discrete diepten (bijv. veelvouden van de gebruikelijke 3 of 5 meter, en alle tijden in veelvouden van minuten) is zeer groot. Het aantal mogelijkheden wordt kolossaal als men ook nog combinaties van simulaties maakt (herhalingsduiken). Het is dus zaak bij het ontwerpen van de simulatieprotocollen zich te beperken. Een andere complicerende factor is dat de eenvoudige vraag of de ene DC beter is dan de andere DC niet eenduidig is te beantwoorden (zie ook Diver Tests Extra, 1999). De vraag moet tenminste geëxpliciteerd worden naar het type duik, in de zin van diepte en duur, deco-duik of niet-deco-duik, en of het om herhalingsduiken gaat. De ene DC kan namelijk (zeer) veilig zijn bij zeer diepe duiken, terwijl de ander juist (zeer) veilig is bij een serie herhalingsduiken van middelmatig diepte. Ondanks bovenstaande complicaties dienen de simulaties en combinaties van simulaties bovendien goed aan te sluiten bij de gangbare duikpraktijk. Maar tevens moet de DC door de simulatie werkelijk op de proef gesteld worden. Dit is te bereiken door bepaalde aspecten van het gebruik in verschillende testen sterk te benadrukken, zoals zeer grote diepte, vele herhalingsduiken etc.

Om een DC te testen is een vergelijkende standaard nodig. Gekozen is voor de NOB versie van de DCIEM tabellen (NOB-sportduiktabellen 1995). Dit betekent dat diepten discrete waarden zijn in veelvouden van 3 m, dit i.t.t. het gangbare gebruik van DCs waarbij diepten weergegeven worden in meters tot de eerste decimaal.

De te testen parameter (de uitkomst) is allereerst de grootte van de momentane niet-stoptijd (NST) op elke diepte. Voorts wordt de aangegeven diepte en temperatuur vergeleken met de werkelijke gesimuleerde diepte en de temperatuur. Ook wordt de NVT en de desaturatietijd geëvalueerd.

Uitgangspunten van de simulaties

De DC behoort bij voorkeur getest te worden met simulaties die weliswaar realistisch zijn maar dan wel voor (zeer) geoefende duikers (CMAS 3*). Geen van de simulaties mag echter:

- de 60 min overschrijden (dit is de uiterste grens die sportduikbedrijven vaak stellen);
- dieper dan 50 m gaan;
- meer dan 1800 nL (1 nL is 1 liter bij 1 bar en 0 °C); (sportduikbedrijven eisen vaak dat de reservedruk bij een 12 l fles minimaal 50 bar is) en bij meer dan twee herhalingsduiken per dag een luchtverbruik van 1500 nL;
- een deco-duik betreffen (deco-duiken komen weinig voor en dienen vermeden te worden);
- een stijgsnelheid van meer dan 10 m/min hebben (10 m/min wordt aangehouden);
- de veiligheidsstop van 5 min op 3-6 m (gekozen is voor 6 m) overslaan.

De simulatie hebben voorst:

- een daalsnelheid van 20 m/min;
- de grootste diepte aan het begin van de duik en voorts steeds afnemende dieptes.

De simulaties worden uitgevoerd als multilevelduiken.

- Multilevelduiken behoren tot de mogelijkheden van de DCIEM-tabellen. Echter, de tabellen schrijven voor dat de niveaus minimaal 6 m uit elkaar liggen en dieper dan 30 m minimaal 9 m. Hier wordt voor diepten ≤ 30 m 6 m aangehouden. Het aantal niveaus is door DCIEM beperkt tot 4, exclusief de veiligheidstop (VS). DCIEM is niet zonder meer een 'gouden standaard'. De berekening van de NSTen van de levels, zoals hier gehanteerd, is iets te conservatief, omdat de verblijfsduur op de MDD van 45 6 min is, terwijl de nultijd van DCIEM 7 is. Via interpolatie is dit te corrigeren. Gebleken is dat dit beperkt blijft tot enige minuten tussen 24 en 12 m, en het verschil DCIEM-DC maar weinig verkleind. (Een nadere behandeling van interpolatie-methoden is behandeld door Schellart 2002).

Simulatie protocollen

Er zijn meerdere protocollen opgesteld. Het standaard protocol is een (zeer) diepe bijna deco-duik naar 45 m (speciale duik, bijv. een diepe wrakduik), gevolgd door een matig lang herhalingsinterval van 4 uur en een herhalingsduik op een redelijk grote diepte van 27 m. Het protocol is zodanig ontwikkeld dat het elke dag herhaald kan worden want men kan de volgende dag weer even lang op 45 etc. verblijven. (weekend- duiken en één-week duikvakanties op koraalriffen). Het 2de protocol

betreft vier lichte duiken die echter op één dag gemaakt worden. Ook hier geldt dat deze vier duiken elke dag herhaald kunnen worden (live-aboard duikcruises met meer dan twee duiken op een dag). Voorst is een protocol gebruikt met een diepte van 30 m (incidentele duik).

Aangenomen wordt dat de protocollen in het water uitgevoerd kunnen worden bij een verbruik van 14 l/min, wat een zwemsnelheid van ca. 12 m/min mogelijk maakt (Schellart, 2002). Dit impliceert bij een duikfles van 12 resp. 10 liter (200 bar) dat het verbruik binnen het maximale verbruik van 1800 en 1500 nL moet vallen om aan de reservedruk van 50 bar te voldoen.

Indien slechts één simulatie wordt uitgevoerd, verdient de simulatie van 30 m de voorkeur omdat dit in alle opzichten een gemiddelde duik is voor de goed geoefende duiker (3* CMAS). Wil men de DC aan een zware enkelvoudige test onderwerpen dan is de 45 m simulatie aanbevolen. Deze stelt hoge eisen aan de DC vanwege de grote duikdiepte en de snelle opstijging naar bijna de halve MDD. Er is een sterke dominantie-competitie vanwege de sterke supersaturatie van de snelste weefsels. De test met 4 duiken op één dag beoogt wat meer nadruk te leggen op de trage weefsels. Alle protocollen worden geacht ernstige afwijkingen van het DCIEM model bij de DC te achterhalen.

Enige elementaire gegevens over de modellen van DCs

De UWATEC(-Scubapro) DCs gebruiken ZH-L8 ADT en hebben 8 compartimenten, (ongeveer) een subset van ZH-L16C, beginnend bij 5 en eindigend bij 640 min (naar ik aanneem). Smart, Aladin® Z en Aladin® Pro Nitrox, Aladin® Air Nitrox, Aladin® Air X, Aladin® Pro en Aladin® Sport hebben een temperatuur correctie op de halfwaardetijden van de weefsels huid en spier. (Wat de verschillen tussen deze modellen zijn, afgezien van triviale zaken als het 'hebben' Nitrox, flesdruk via slang of zender e.d. is totaal onduidelijk, met uitzondering van de Smart). De Maris Surveyor heeft 9 compartimenten, beginnend bij 2,5 min en eindigend bij 480 min.

De moderne Suunto's, zoals de Mosquito, Vyper, en Cobra hebben 9 compartimenten, beginnend bij 2,5 min en eindigend bij 480 min. De laatste drie hebben RGBM. De oude Suunto's hebben er 8, tot 320 min.

Testresultaten

In de periode dec. 2002- okt 2005 zijn 37 DCs van 24 typen (aantal typen hangt af van definitie van type, handleidingen geven geen enkel inzicht in model-modificaties, maar die zijn er wel) van 6 fabrikanten getest in 46 sessies. 216 DC profielen zijn uitgelezen (ca. 15000 Niet-stoptijden en diepten). Dit betekent gemiddeld bijna 5 DCs per sessie. Dit maakt onderlinge vergelijking nog zuiverder omdat er altijd, zij het zeer kleine, verschillen zijn bij sessies volgens hetzelfde protocol. Onderlinge vergelijking is vooral belangrijk voor jo-jo simulaties want die zijn met het testvat moeilijk precies te reproduceren. Vanzelfsprekend worden met de DCs van een sessie ook altijd een controle sessie uitgevoerd.

Hieronder worden typen DCs die niet met hun naam aangeduid worden, benoemd naar het compartiment met de langste halfwaardetijd. Bijv. een 320DC is een DC met als langste halfwaardetijd 320 min.

Diepteaflezing

In het algemeen valt deze binnen de productspecificatie en zo niet dan is er een kleine, niet relevante afwijking (op een enkele uitzondering na: afwijkingen tot ruim 0,5 m). Volgens de productspecificatie is de diepte temperatuurgecorrigeerd en i.h.a. blijkt dit ook zo (soms afwijking op 45 m van een meter bij een oud type)..

Temperatuuraflezing

Valt i.h.a. binnen de productspecificatie, d.w.z. wijkt niet meer dan een of twee graad Celsius af, maar is vanwege de zeer trage verwerking van de actuele watertemperatuur inadequaaf (de vertraging heeft een halfwaardetijd van liefst ca. 4 min, obsoleete technologie) .

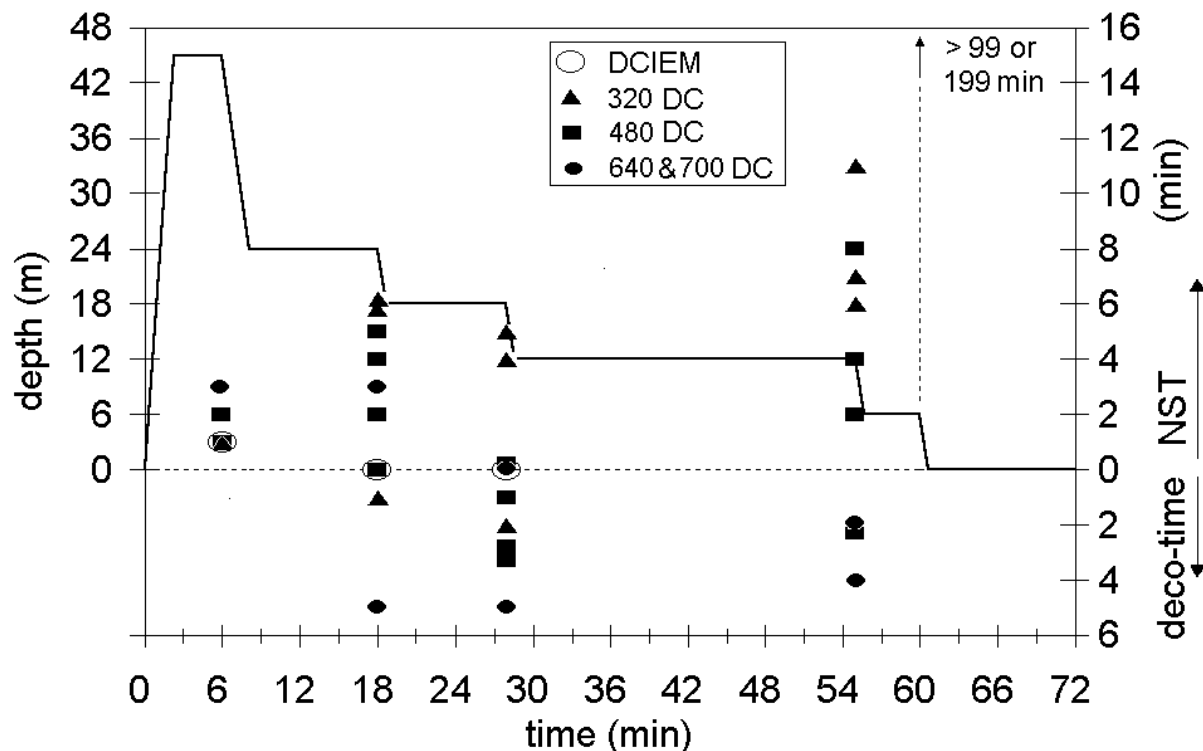


Fig. 2 NST van de diverse typen DCs bij de 45 m simulatie (duikprofiel getrokken lijn, diepte linker as). De rechter as geeft omhoog uitgezet de NST en naar beneden uitgezet de deco-tijd op een stopdiepte van 3 m. Aan het eind van het 12 m level geeft DCIEM een NST van 43 min. Bij de opstijging van 6 naar 0 m springen alle DCs naar een NST van 99 of 199 min, de maximale waarde die kan worden weergegeven.

Vergelijking NST met het standaard protocol

45 m simulatie

Oude typen DCs met meestal 8 compartimenten en de traagste 320 min zijn gemiddeld gesproken minder conservatief (d.w.z. grotere NST) dan modernere DCs en veel minder conservatief dan DCIEM. Met de oude DCs tot de 'limit' gaan is dus onwijs. De verschillen tussen de diverse typen zijn zeer groot (zie Fig. 2) De 480 computers zijn gemiddeld bij grotere diepten gemiddeld iets minder conservatief dan DCIEM. De 640(+)DCs zijn het conservatiefst (niet alle geteste typen weggeven) maar de verschillen zijn vrij groot. Bijv. tot ruim 15 minuten op 6 m tussen een Suunto Cobra en DCs van de Aladins® serie (conservatiever). De bevindingen van ander onderzoek zijn soortgelijk (Huggins 2004, Lippmann, 2004).

27 m herhalings-simulatie

Dit laat hetzelfde beeld zien. Een saillant voorbeeld van een groot verschil is dat tussen de Trac en de Cobra (n DCIEM) op 15 m, een verschil van ruim 15 min. Geen van de DCs ging in deco, maar dat was ook niet verwacht.

Vier-simulaties op een dag.

Deze vier simulaties op een dag zijn maar eenmaal uitgevoerd, met 5 typen (oude Suunto typen, Trac en oude Aladin Pro van UWATEC (6 compartimenten tot 320 min). De maximale verschillen in NST op deze niveaus (van 24 t/m 12 meter) bedroegen steeds rond de 12 min op NSTen in de range van 10-30 min. De verschillen zijn dus aanzienlijk.

Consistentie van de NST tijdens de duik en instabiliteit

In het algemeen neemt de NST af met een minuut per werkelijke minuut en meestal is dit zo. Bij twee specimens van de Maris Surveyor en een Maris Surveyor Nitrox werden sprongsgewijze verlagingen maar ook *verhogingen* van de NST gevonden (bij de een resp. tot 5 en 3 min, bij de ander tot 15 min omhoog en omlaag op 9 m en bij grotere diepten minder). In totaal is een soortgelijke instabiliteit van de NST bij 7 van de 9 geteste DCs uit de UWATEC Aladin® serie gevonden. Deze DCs ondergingen 2 tot 6 simulaties en het euvel bleek reproduceerbaar en is bij verschillende profielen gevonden. De

incidentie is veel groter bij een herhalingsduik. Het euvel is het meest extreem na jojo-en tijdens het verblijf op een constant niveau. Bij drie UWATECs, een Aladin®Pro New Generation en twee Aladin® Air (X en Z) Nitrox was het "springen" van de NST het ergst.

De NST display kon snel wisselen (UWATECS) of er kon een 'zwalkend gedrag' (Maris) zijn met een cyclus van een paar minuten. De vraag is of men zich van deze m.i. onaanvaardbare 'bug' bewust wordt bij wat minder 'heftige' profielen. Vermodelijk niet.

Reproduceerbaarheid

Bij moderne typen (Aladin® serie, Smart, Suntoo's met RGBM zoals Cobra en Vyper), genomen over de hele simulatie, zijn de verschillen meestal minder dan 1 min. Bij oudere typen iets meer, maar i.h.a. goed genoeg. Een uitzondering was de oude (12 jaar) 320min Aladin Pro met een gemiddeld verschil van ca. 20 min op een paar niveaus van de 45 m simulatie. UWATECS scoren het best.

Hieronder staan een paar 'specials' die elk 3 tot 7 keer zijn uitgevoerd.

Test op jojoën

Volgens de "klassieke" theorie (Neo-Haldaniaans), die met de bellen-vloeistof interactie geen rekening houdt (zoals RGBM model van de moderne Suunto's) zal een symmetrische jojo rond een bepaalde diepte na de jojo (vrijwel) dezelfde PN_2 geven als de duik zonder de jojo. Dit geldt voor alle compartimenten. NST-en en decotijden zullen daarom ook vrijwel identiek zijn (hooguit 1-2 minuten schelen). (Twee jojo's precies in tegenfase geven gemiddeld de controlewaarden).

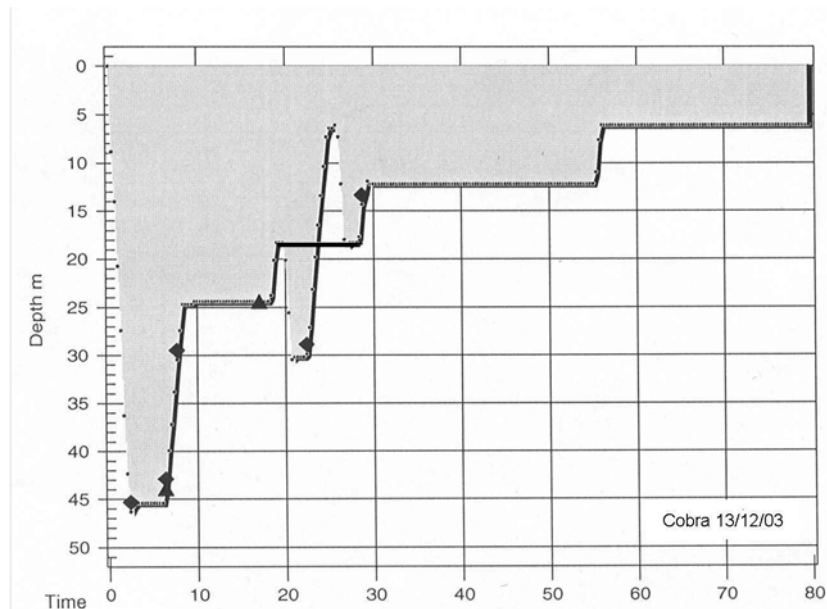


Fig. 3 Een enkele jojo om het niveau van 18 m van de controle simulatie, aangegeven met de dikke horizontale streep op 18 m. Het top-dal verschil van de jojo is 24 m.

De Aladin® serie en de Smart is "klassiek" terwijl dat van de Cobra van Suunto RGBM heeft, een reden om het gedrag van deze DCs op jojoën te onderzoeken. Met zes verschillende jojo profielen, waarvan er een staat afgebeeld in Fig. 3, is dit uitgevoerd. Andere profielen waren 2-6 sinusachtige veranderingen rondom één van de niveau's van de controle simulatie, de ene sessie weinig 'sinussen' met grote uitslagen, de ander meer met minder grote uitslagen (steeds afdaalsnelheid 20 m/s en een stijgsnelheid 10 m/s). Tijdens de jojo's gaat de NST voortdurend met het niveau op en neer. Dit duidt er op dat het snelste weefsel (vanzelfsprekend) de NST bepaalt. Bij de UWATEC Aladin DCs en de Smart waren de uitkomsten inconsistent of er was geen verandering en het zelfde geldt voor de Cobra. Andere typen gaven hetzelfde beeld.

Noodopstijgingen

De gesimuleerde noodopstijgingen vanaf 45 m naar wisselende diepten (o.a. 24 m ging met ca. 60 m/min. Oude typen (Companion, Spyder, Solution en Maris Surveyor) geven alleen een of meer typen auditief alarm en displayen de snelle opstijging ook, maar geven geen 'straf'. In tegendeel, hun NST is

vaak wat langer geworden (tengevolge van het iets snellere uitwassen). UWATEC Aladin DCs, Smart en Suunto Cobra met RGBM reageren adequaat. UWATECS verreweg het 'strengst'.

Deco-duik van 10 min 45 m multilevel

Alle DC reageren conform hun model. Van de 640DCs, de Aladin® DCs, Smart, Cobra, Vyper, Maris Surveyor, (Trac niet getest) reageerden de eerste twee het meest conservatief, gevolgd door de Cobra.

Alle typen houden nog steeds vast aan de stop op 3 m, terwijl het toch eenvoudig is te programmeren om als ondiepste stop een diepte van bijv. 4 m aan te houden. Ook bij behoorlijke deining is dit i.h.a. voldoende.

Deco-duik van 10 min 45 m multilevel met noodopstijging

Tenslotte is een gesimuleerde noodopstijging uitgevoerd binnen een decoduik-simulatie, waarbij bovendien de stop op 3 m werd overgeslagen. De reactie was vergelijkbaar met die van de 'gewone' noodopstijging, maar 'strenger' en conform de specificaties in de handleiding. Aladin® DCs reageerde met de strengste sancties. Sancties kunnen een natte decompressie inhouden.

Invloed van de watertemperatuur

Testen zijn uitgevoerd bij extreme constante temperaturen van 36, 33, 3 en 0 °C Voorts een van 37 °C teruglopend naar 1 °C en een test teruglopend van 15 naar 3 °C.

Indien tijdens een duik (simulatie) de temperatuur constant is, dan geeft een lagere temperatuur volgens de theorie kortere NSTen en langere stoptijden. Dit geldt echter pas in het laatste deel van de opstijgfase en is afhankelijk van het profiel en de temperatuur van de beide duiken die vergeleken worden. De temperatuur compensatie is alleen ingebouwd in de UWATEC Aladins en de Smart.

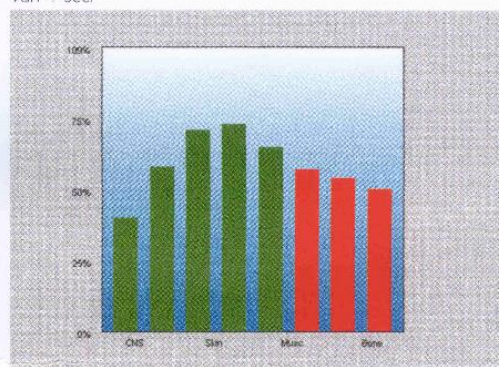
Bij constante watertemperatuur gedraagt de Smart (en Aladin Nitrox) zich conform de Neo-Haldaniaanse theorie en specificaties. Bij een dalende watertemperatuur is het effect te klein, dus ook bij een werkelijke duik. Als de effecten van bellenvorming ook in deze DCs verdisconteerd zouden worden, dan zou de correctie goed zijn. De correctie van de UWATEC DCs is echter nog altijd beter dan geen correctie voor de temperatuur.

Niet-Vliegtijd (NVT)

Bij de test met 4 duiken op een dag (1ste naar 24 m) gaven de 320DCs een NVT van ca. 20 uur, een 640DC 28 uur en de oude Aladin Pro slecht 6 uur, dus veel te weinig (museumstuk).

Bij herhaling op de 2de dag van het 45 m plus 27 m protocol waren de NVTen van achtereenvolgens

Smart TRAK toont het scherm van de Smart COM en Smart PRO zoals deze eruit ziet, met een opslag interval van 4 sec.



Smart TRAK toont het niveau van stikstof saturatie van de 8 lichaamsweefsels gedurende de duik. De gesatureerden in groen, de de-gesatureerden in rood.

Fig. 4 %M-waarden. De drie rechter staven zijn rood (niet-gesatureerd).

Companion (oude 320DC van Suunto), UWATEC Aladin modellen en Cobra resp. 17, 18 en 24,5 uur. T.o.v. de 1ste dag was bij de eerste twee 1 uur bijgekomen, maar bij de Cobra 3 uur. I.h.a. wordt in de literatuur tenminste 24 uur aangehouden bij meerdaagse herhalingsduiken. Veel DCs zijn op dit punt dus onvoldoende veilig. De Smart is aanzienlijk conservatiever dan de Aladin® DCs.

Handleidingen en PC-faciliteiten

Een ander punt van zorg is de matig tot bijna slechte kwaliteit van de handleidingen. Vele handleidingen geven erg weinig informatie over het werkingsprincipe. Zelfs geen enkele UWATEC handleiding geeft nultijden. UWATEC handleidingen zeggen dat ook bellenberekeningen geïmplementeerd zijn, maar of het gaat over bijv. een VPM- of RGBM-achtig model, een phase equilibrium, diffusie bubble growth of een eigen fysisch gefundeerd twee-fasen model is niet duidelijk. Het zou ook een probabilistisch of heuristisch model kunnen zijn. De met name genoemde vier bellenmodellen leiden alle tot een diepe stop, iets wat de UWATEC DCs niet adviseren. Literatuurverwijzingen komen niet voor en trefwoordenregisters i.h.a. ook niet. Het weergeven van testresultaten volgens gangbare normen wordt zelden gedaan en als dat zo is, is het zo incompleet dat het weinig zeggend is. Zich zo sterk beroepen op fabrieksgeheim is onredelijk. Op het gebied van consumentenvoorlichting schieten alle fabrikanten tekort. UWATEC spant hier de kroon, zij het dat het met de Smart de betere kant op gaat (ook al is het model nog zeer mysterieus en is de uitleg over de betekenis van info die men van een duik kan 'downloaden' gebrekkig.)

Geavanceerde DCs hebben vaak de mogelijkheid het gemaakte duikprofiel en bijbehorende bijzonderheden uit te lezen op een PC. Dit kan bijv. met de Smart, de Suunto Cobra en nieuwere Suunto's, en met de nieuwste Maris. Bij een aantal van deze DCs is het ook mogelijk, via een cursorlijn de saturatie van de diverse 'weefsels' elk moment van de duik te bekijken aan de hand van een staafhistogram (zie Fig. 4). Dit zou de saturatie weergeven. In feite wordt echter afgebeeld %M-waarde, de mate van saturatie t.o.v. de maximale toelaatbare partiële inerte gasdruk op een gegeven diepte, in formule $100P_{\text{comp},i}(t)/M\text{-waarde}(d_t)$. Dit is tijdens het verblijf op diepte een weinig zinvolle maat. Als men van plan is op te stijgen is het juist van belang te weten wat de waarden zijn op de eerst mogelijke stop, bij een niet-deco-duik dus 0 m (%M-waarde_{0m}). De groene staven (niet de rode, wat als kleur logischer lijkt) geven de gesatureerde compartimenten aan, maar daar moeten natuurlijk ook de supergesatureerde compartimenten onder worden begrepen. Als de waarde boven de 100% komt (hypergesatureerd) wordt de staaf paars. Wil men het staafdiagram echt kunnen gebruiken dan is het wel nodig het begrip %M-waarde te kennen. De zelfde faciliteit bestaat ook als een duik gesimuleerd wordt. Bij de D6 bleek enkele 10-tallen minuten na het ingaan van het oppervlakte interval de compartimenten opnieuw zeer sterk op te lopen. Bij een Haldane model kan dit niet. De D6 gebruikte echter de mode 50%RGBM/50%Haldane en dan is dit in principe wel mogelijk. Voor meerdere compartimenten werden echter %M-waarden van tot 200% bij duiken die ver van de deco-duik afstaan. Een programmafout? De D6 pretendeert de diepe stop in zijn programma te hebben. De diepe stop heeft als voorwaarde dat de deco-duik niet langer mocht duren dan zonder diepe stop. Dit is getest met meerdere simulaties (diverse MDDs). Met de diepe stop lagen de %M-waarden iets hoger. Het lijkt dus onder genoemde voorwaarde niet te helpen.

Conclusies

- De oude Aladin Pro (een 320DC), en de Suunto's SME en oude Favor (Air), de Dive Mate en de Sherwood Source van 1992 zijn te beschouwen als museum stukken: volgens de huidige normen niet veilig.
- De 320DCs Companion en Favor (niet de nieuwste uitvoering) zijn eigenlijk ook museumstukken en alleen bruikbaar als men een zeer geoefend duiker is, zowel praktische als theoretisch, de productspecificaties goed kent en dus ook de beperkingen van de DC; ze zijn te weinig conservatief en men moet de NST tussen 30 en 10 m zelf behoorlijk inkorten;
- De 480DCs, waaronder ook de Maris Surveyor zijn i.h.a. bijna conservatief genoeg wat de NST betreft;
- De NST van de Trac, UWATECs en Suunto's met RGBM kunnen op diepten rond de 20 m meerdere minuten van elkaar schelen en dat kan sterk oplopen op 12 en 6 m. Hoewel wat minder conservatief dan DCIEM, wel conservatief genoeg. UWATECs en Suunto's behandelen deco-duiken adequaat;
- UWATECs en Suunto's met RGBM reageren adequaat op noodopstijgingen, waarbij de UWATECs het strengst zijn. Oude modellen zijn inadequaat (geven alarm, maar verhogen de NST i.p.v. verlagen).
- Een DC die adequaat op jojo-en reageerde is niet aangetroffen.
- Temperatuurcorrectie in de DCs met ZH-L8 ADT zijn bij constante lage temperaturen aan de krappe kant en dat geldt nog sterker bij een sterk dalende temperatuur. Andere DCs hebben geen correctie. De handleidingen adviseren bij koude zelf de NST in te korten of de 1^{ste} persoonlijke

stand te gebruiken.

- NVT i.h.a. realistisch na de 1ste duik. Bij meerdaagse herhalingsduiken te krap (is objectief niet goed na te rekenen), behalve de DCs met RGBM die wel een toerijkende NVT hebben. Marissen met een Neo-Haldaniaans model scoren onder de maat. 320DCs scoren het slechts (Companion geen verschil tussen 1ste en 2de dag). De oude Aladin Pro kwam met bijna levensgevaarlijke korte waarde (6 h). De Sherwood uit 1992 heeft geen aanduiding van de NVT.
- De UWATECS gedragen zich het meest reproduceerbaar, maar vanwege de instabiliteitsproblemen (ook de Maris Surveyor) zijn de Suunto's het meest bedrijfszeker.
- De handleidingen, met name die van UWATEC, geven te weinig informatie over de gebruikte modellen en leggen ook onvoldoende uit over het gebruik en de betekenis van de software over simulaties en gemaakte duiken.

Afgezien van de te traag veranderende weergave van de temperatuur en een enkele 'bug' in het algoritme zijn de DCs van het laatste 5 jaar zeer goede (de iets oudere typen) of bijna ideale hulpmiddelen. Als echt ALLE instructies en waarschuwingen in de handleiding naar letter en geest (voor zo ver niet expliciet behandeld) en de instructies en waarschuwingen op de display worden opgevolgd is het risico op DCZ minimaal. Dit betekent wel dat alleen de ideale, gezonde (cardiovasculair, pulmonaal, inspanningsfysiologisch) normduiker jonger dan 45 jaar die onder normale (dus ook sub-ideale) omstandigheden duikt zich geen beperkingen hoeft op te leggen. Alle anderen dienen hun NST meer of minder in te korten en zondig de 'persoonlijke stand' (met zijn gradaties) in te stellen. Nog veel doeltreffender is het bij het ouder worden de MDD te verkleinen. Een zeer globale vuistregel is: elk jaar boven de 40 één meter ondieper, gerekend vanaf een MDD van 50 m. (Zie voor een nadere uitleg over de dieptebeperking "Predisponerende factoren voor belvorming in relatie tot duikprofielen en hoe hun effecten te voorkomen" ,Schellart, 2006). De 'persoonlijke standen' kennen deze dieptebeperkingen niet. Dit is niet verwonderlijk daar het in feite bergmeerstanden zijn. Alleen als aan bovenstaande beperkingen wordt voldaan is het gebruik van een DC aan te raden.

Literatuur

- Diver Tests Extra, Does your computer run at your speed,
<http://www.divernet.com/gear/comps699/main699.htm> June 1999.
- Handleiding NOB-sportduiktabellen, Nederlandse Onderwatersportbond, 1995.
- Huggins KE. Performance of dive computers exposed to profiles with known human subject results. UHMS ASM 2004, abstract X304
- Lippmann: P. Comparing dive computers. UHMS ASM 2004, abstract G112
- Schellart Nico A.M. Het testen van een decocomputer middels een testapparaat met uitgewerkte testprotocollen, SDR Memo SD-01-2002.

Afkortingen

DC	duikcomputer
DCIEM	Canadian Forces Decompression Tables 1992
MDD	maximale duikdiepte
M-waarde	De maximale inerte gasdruk waar de inerte gasdruk van het weefsel nooit bovenuit mag komen op staffe van de vorming van bellen.
NST	niet-stoptijd (min), de tijd die resteert op de actuele diepte zonder in deco te gaan
NVT	niet-vliegtijd

Bijlage A De simulatie-duikprofielen

Protocol 1: 45 m simulatie en 27 m simulatie als herhalingsduik, oppervlakte-interval 4 uur

Doelstelling: diepe niet-deco simulatie gevolgd door een matig diepe niet-deco simulatie op 27 m, waarbij op grotere diepten de NSTen (vrijwel) maximaal zijn en de totale duiktijd toch tot 60 min beperkt blijft. Voor deze totale duiktijd is gekozen omdat er per dag "slechts" twee duiken gemaakt worden. Bovendien moeten dezelfde simulaties de volgende dag weer mogelijk zijn⁷.

Profiel 45 m simulatie (steeds achtereenvolgens aangegeven de leveltijd (inclusief de tijd om daar te komen), de duikdiepte en de NST, met tussen haakjes de NST na interpolatie vanwege de 1' die over is op 45 m)⁸:

6' 45 m 1' (1'), 12' 24 m 0' (1'), 10' 18 m 0' (2), 27' 12 m 43' (45) en 5' 6 m 415' (415').

Profiel 27 m simulatie: 10' 27 m 6', 10' 21 m 5', 10' 15 m 15', 25' 9m 155' en 5' 6m 245'.

Protocol 1A: 45 m simulatie met noodopstijging vanaf 45 m

Protocol 1B: 45 m simulatie met deco

Protocol 1AB: 45 m simulatie met deco en noodopstijging

Protocol 2: duik naar 24 m en 3 herhalingsduiken

Doelstelling: ondiepe simulaties met aflopende maximale duikdiepte, waarbij op de MDD de NSTen groot zijn en vaak niet geheel verbruikt worden om de volgende dag⁹ de dezelfde simulaties mogelijk te maken. De totale duiktijd is steeds 50 min. Multilevelduiken met diepteverschillen van 6 meter (of 3 m, alleen tussen 9 en 6 m).

De 1ste duik is 9' naar 24 m met NST 16'.

De 2de duik is 11' naar 21 m met NST 17'. Oppervlakte-interval 1h45', Herhalingsfactor 1.6.

De 3de duik is 20' naar 18 m met NST 20'. Oppervlakte-interval 2h30', Herhalingsfactor 1.5.

De 4de duik is 47' naar 15 m met NST 20'. Oppervlakte-interval 5h, Herhalingsfactor 1.4.

Na de 4de duik en een Oppervlakte-interval van 11h25min is de Herhalingsfactor voor de 1ste duik van de volgende dag 1.1. Dit impliceert dat de tweede en latere dagen dezelfde duiken kunnen worden gemaakt. De vraag is overigens of dit werkelijk kan, omdat het DCIEM model wellicht onvoldoende met de trage weefsels rekening houdt.

⁷ Bij de tweede dag betekent dit de Stikstofrekeningtijd = Herhalingsfactor · Levelverblijftijd = 1.1 x 6 = 7 min, dus precies op de nultijd. Luchtverbruik 940 nl. De waarde van de Herhalingsfactor is te vinden in NOB tabel B als het oppervlakte interval bekend is.

⁸ De nultijd op 45 m is 7 min. De levelverblijftijd is echter 6 min. Als de NSTen via interpolatie hiervoor worden gecorrigeerd worden ze bij de lagere niveaus allen iets hoger.

⁹ Bij de volgende dag betekent dit dat HFxtLn=1.1 x 9 = 10 min, dus ruim binnen de nultijd van 15 min.