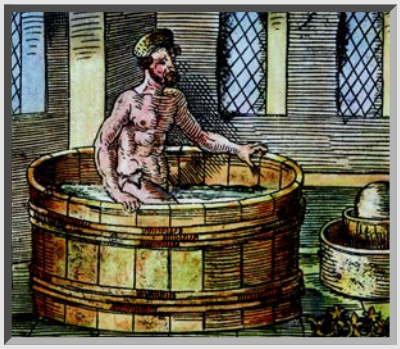
Abstracte theorie

Het fundament voor begrip



Fysica

Fysiologie

Deco theorie

SCUBA

Courses & Publications

SCUBA
Courses & Publications

Abstracte theorie – het fundament voor begrip
Scuba Publications – Daniela Goldstein
Jan Oldenhuizing

Alle rechten van de auteur en zijn licentiegevers voorbehouden

Deze uitgave, en alle delen daarvan, is beschermd door de wetgeving op het auteursrecht. Ieder gebruik buiten de grenzen van het auteursrecht is, zonder schriftelijke toestemming van de uitgever, niet toegestaan en strafbaar. Daaronder valt in het bijzonder het kopiëren, vertalen of het opslaan en distribueren in elektronische systemen.

De weergave van gebruiksnamen, handelsnamen, logo's of merken, et cetera in dit werk geeft, ook zonder bijzondere markering, niet het recht tot de aanname dat deze in de zin van de wettelijke regelingen voor handelsmerken vrijgegeven zijn en daarom door een ieder gebruikt zouden mogen worden.

Inhoudsopgave

Fysica 2
Zien onder water 3
Horen onder water 6
Heat and Water 7
Beweging 8
Eenheden, constanten en een introductie tot berekeningen 10
Archimedes 12
Boyle 13
Druk, volume en dichtheid 15
Charles 16
Dalton 18
Henry 20
Fysiologie 21
Stikstof (N_2) & zuurstof (O_2) 22
Koolmonoxide (CO) & kooldioxide (CO_2) 28
Mechanische verwondingen 32
Temperatuurproblemen 35
Zoogdieren-duikreflex & Carotis-sinus-reflex 37
Bijna-verdrinking 37
Deco theorie 39
Achtergrond 40
Geschiedenis 41
Stikstofopname 43
Compartimenten 46
M-waarden 47
Controleweefsel (of compartiment) 49
Oppervlakte-interval 54
Opstijgen 56
Wat gebeurt er wanneer we meer compartimenten aan een model toevoegen? 58
De keuze van duiktabellen en duikcomputers 59
Index 64

Inleiding

Van duikers op ieder niveau wordt een bepaald niveau van theoriekennis verwacht. Over het algemeen is dat theorie die je toestaat te weten waarom we bepaalde dingen moeten doen en laten en om te begrijpen waarom bepaalde dingen gebeuren. Voor de meeste brevetniveaus wordt de kennis beperkt tot dat wat noodzakelijk is om veilig en plezierig te duiken.

De noodzaak voor kennis verandert op het moment dat een duiker besluit om een kaderopleiding te volgen. Dit kan Assistant Scuba Instructor of instructeur zijn, maar ook Master Scuba Diver. Op dat moment is het "wat je moet weten" niet meer beperkt tot de dingen die nodig zijn om zelf veilig en comfortabel te kunnen duiken. Je kennis dient nu op het niveau te zijn dat je toestaat een passend antwoord te geven op vragen die door leerlingen of klanten gesteld worden.

Wanneer je de leiding over een duik of een cursus op je neemt, dan is het belangrijk dat de klanten of leerlingen je als autoriteit zien. De tijden waar een titel respect afdwong zijn al lang voorbij. Het respect dat nodig is om mensen te motiveren je aanwijzingen te volgen en je beslissingen te respecteren vindt nu z'n basis in je kennis en je vaardigheden De titel op je kaart is daarbij secondair.

Wanneer we het over kennis hebben, dan is het niet voldoende dat je weet wat in de boeken van je leerlingen geschreven staat. Je klanten hebben die boeken al gelezen. Wat ze van jou verwachten is uitleg over de dingen die ze niet begrepen hebben en aanvullende informatie wanneer ze het gevoel hebben dat dit nodig is om de behandelde theorie echt te begrijpen. Om aan deze verwachtingen te kunnen voldoen moet je als professional in het duiken niet alleen "kennis" hebben van duiktheorie, maar je moet de concepten echt "begrijpen".

Dit boek is niet het enige boek dat duiktheorie diepgaand behandeld, maar het is speciaal. Het boek is geen opsomming van feiten die je moet onthouden voor fysica en geen lijst van symptomen voor fysiologie. Dit boek gaat in op de concepten die beschrijven hoe dingen zich ontwikkelen. Het brengt je op het niveau dat je toestaat duidelijke en gemotiveerde antwoorden te geven op vragen die duikers aan je stellen. Dat is de soort antwoorden dat nodig is om het nodige respect te verdienen. Dit boek is geschreven om "begrip" te ontwikkelen en niet alleen "kennis".

Het boek gaat in op aspecten van de algemene duiktheorie. Het kan gebruikt worden voor kaderopleidingen van alle duikorganisaties en bonden. Het is een boek in je eigen taal en is een "must" wanneer je aan een Assistant Scuba Instructor, Master Scuba Diver of instructeursopleiding deelneemt.

Fysica

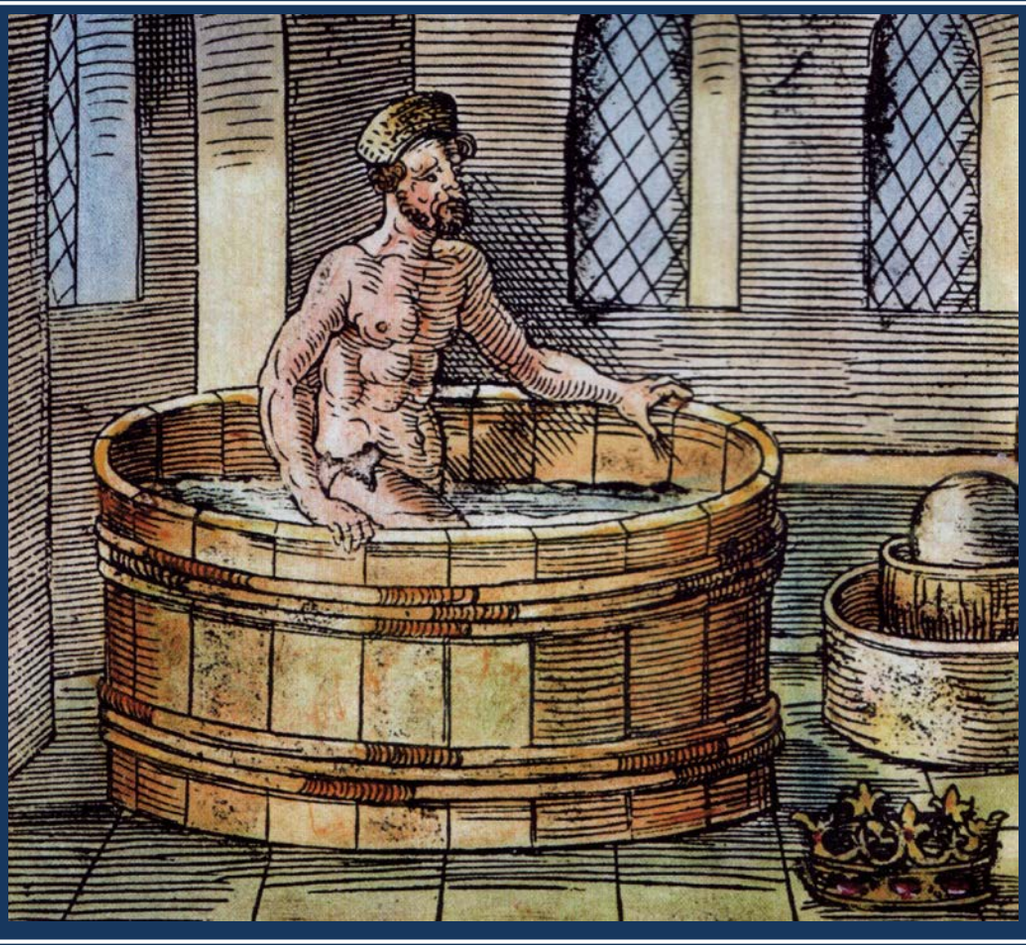
Fysica is de basis van duiktheorie. Fysica is nodig om veilig en comfortabel te duiken. In beginnersopleidingen wordt al lesgegeven in fysica, maar het wordt niet bij naam genoemd. De concepten worden uitgelegd en geleerd en duikers passen deze concepten toe in andere aspecten van de duiktheorie.

In kaderopleidingen voor het sportduiken noemen we fysica (of natuurkundige aspecten) dan plotseling wel bij naam. Dit brengt bij velen herinneringen uit de schooltijd terug. Wanneer we over natuurkunde of fysica spreken, dan komen snel gedachten op in de trend van “dit wordt moeilijk” of “geen kans dat ik dat begrijp”.

Dit hoofdstuk is geschreven om een ieder toe te staan de voor het sportduiken noodzakelijk concepten van fysica te begrijpen. De volgorde van de tekst gaat van eenvoudig naar complex. De informatie wordt gegeven met een woordgebruik waar een ieder mee om kan gaan.

Het hoofdstuk gaat in op de onderdelen van de fysica die voor kader in het sportduiken als noodzakelijke kennis gezien worden. De kennis die nodig is om je rol als leider te vervullen.

Als eerste worden algemene aspecten over het zien, horen, beweging en warmteverlies behandeld. Daarna gaat het hoofdstuk verder met berekeningen op basis van de diverse wetten die in het sportduiken gebruikt worden.



Archimedes in de badkuip bij de ontdekking van de wet voor het drijfvermogen. HEUREKA!

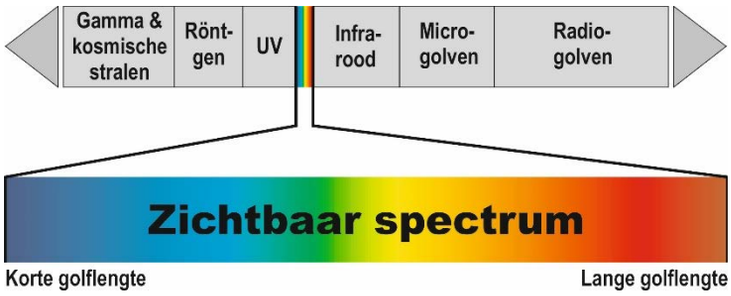
Zien onder water

Onder water zien we dingen anders dan aan land. Er zijn vier verschijnselen die het zien onder water beïnvloeden. Er is ook een vijfde fenomeen dat te maken heeft met de manier waarop onze hersenen interpreteren wat we zien. Deze verschijnselen zijn reflectie, refractie, diffusie en absorptie. De beschrijving die verklaart hoe onze hersenen afstanden verkeerd schatten, heet het "visuele omkeerfenomeen".

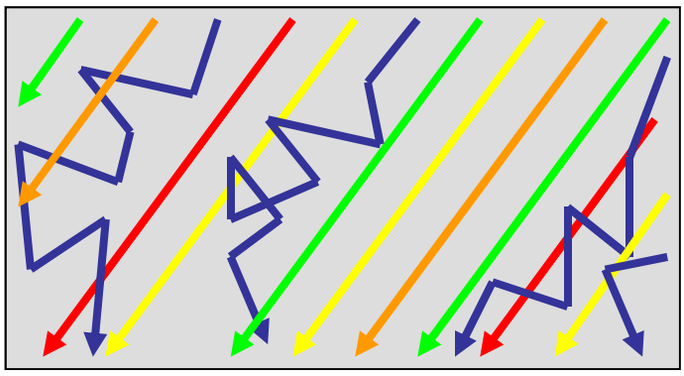
Als duiker moet je kunnen beschrijven wat met licht gebeurd en welke consequenties dit heeft. Alvorens op de details in te gaan dienen we eerst de begrippen op een rijtje te zetten. Reflectie betekent dat het licht op het wateroppervlak reflecteert (en dus niet door het oppervlak heen gaat) Vergelijk dit met het licht van een auto, dat op een reflector op een fiets valt.

Refractie betekent dat het licht van richting verandert wanneer het van het ene medium naar het andere gaat (denk daarbij aan een beenbreuk, of fractuur, en de richting van het been onder de wond). Absorptie betekent dat licht verloren gaat, net als bij een spons die het water van de tafel absorbeert. Het water is dan van de tafel weg. Diffusie betekent dat het licht in verschillende richtingen verstrooid wordt. Dit ken je van het diffuse glas in een badkamervenster. Het licht komt er wel doorheen, maar je kunt niet herkennen wat er aan de andere kant is. Door het "normale glas" in de woonkamer zie je dat wel. Het visuele omkeerfenomeen beschrijft hoe je hersenen afstanden verkeerd schatten, door de dingen die we onder water zien te vergelijken met de manier waarop we dingen aan land zien.

Diffusie – Licht verandert van richting wanneer het ergens tegenaan komt. Licht is energie en plaatst zich als golf voort. Het is een golf van vibrerende elektrische en magnetische velden, ofwel elektromagnetische straling (niet alleen licht is elektromagnetisch. Er zijn meer zulke "stralingen". Allemaal samen heten ze het elektromagnetische spectrum). Elektromagnetische straling plaatst zich voort met de lichtsnelheid, wat ongeveer 300.000 kilometer per seconde is. Elektromagnetische golven hebben verschillende golflengtes of frequenties. De golflengte van een zichtbare elektromagnetische golf bepaald de kleur.



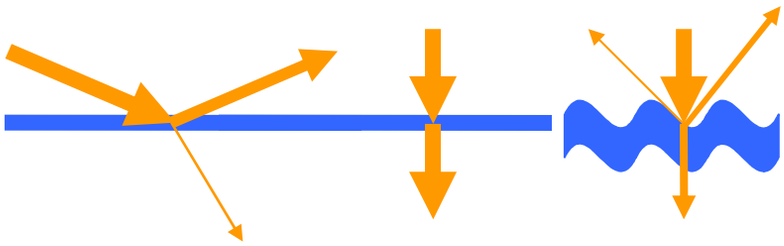
Blauw licht heeft een korte golflengte (meer energie) en rood licht een langere. De stikstofmoleculen in de atmosfeer nemen de energie van blauw licht op en geven het dan weer af. Daardoor ontstaat "selectieve diffusie". Blauw licht wordt verstrooid, terwijl de andere kleuren (groen, geel, oranje en rood) zich vrijwel ongestoord door de atmosfeer bewegen. Dit geeft de indruk dat blauw licht "overal vandaan komt". Het is ook de reden waarom je de indruk hebt dat de hemel blauw is.



Obstructies, zoals de waterdruppeltjes in een wolk, zijn groot genoeg om alle zichtbare frequenties te verstrooien. Alle kleuren worden gelijkmatig verstrooid. Dat is reden waarom wolken wit zijn. Bij een dik wolkendek komt minder licht door de wolken heen en zijn ze donkerder van kleur. Wanneer je op de maan zou staan en naar de zon kijkt, dan zou je deze zien als een witte plek tegen een zwarte achtergrond. De maan heeft geen atmosfeer en dus ook geen stikstofmoleculen die het blauwe licht verstrooien.

Onder water hebben we te doen met deeltjes die groot genoeg zijn om alle lichtkleuren te verstrooien. Afhankelijk van het aantal deeltjes (zicht) komt een deel van het licht dat op een voorwerp valt in een rechte lijn naar onze ogen. Een deel verandert een aantal keren van richting, of komt helemaal niet bij onze ogen aan. Wanneer het meeste licht in een rechte lijn komt dan zien we het voorwerp duidelijk. Wanneer veel licht verstrooid wordt, dan zien we het voorwerp onscherp. Dit onscherpe beeld door verstrooiing van licht noemen we in het duiken diffusie.

Door diffusie zien we onder water dus minder contrast (een onscherp beeld). Met toenemende diepte gaat door diffusie ook steeds meer licht verloren, waardoor het donkerder wordt. Zoveel te beter het zicht, zoveel te minder diffusie. Er is onder water echter altijd een bepaald niveau van diffusie. Zicht is gedefinieerd als de afstand waarop we horizontaal nog voorwerpen kunnen herkennen.

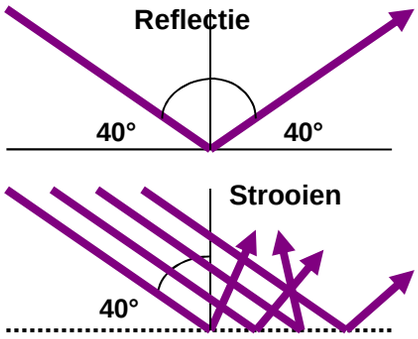


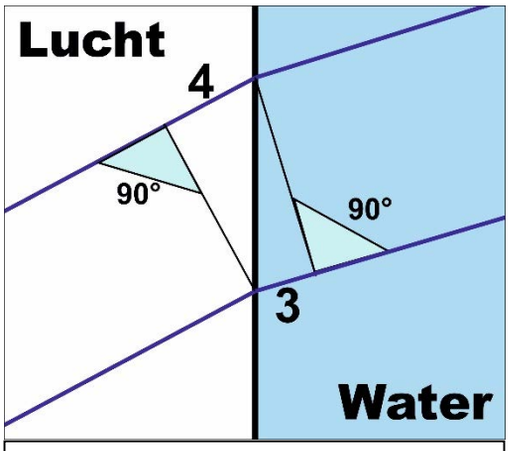
Reflectie – Licht reflecteert op het wateroppervlak. Gereflecteerd licht "blijft boven water". Van al het licht dat op het wateroppervlak valt, komt alleen het deel onder water aan dat niet gereflecteerd wordt. Dit heeft tot gevolg dat het onder water altijd donkerder is dan aan de oppervlakte. De hoek waaronder het licht op het wateroppervlak valt, heeft invloed op de hoeveelheid licht die gereflecteerd wordt. Zoveel te lager de zon boven de horizon staat, zoveel te meer licht wordt gereflecteerd. Theoretisch gezien zal al het licht dat op het water straalt onder een hoek die kleiner is dan 48° gereflecteerd worden. Dit is theoretisch omdat het water dan zo vlak als een glazen plaat zou moeten zijn en omdat je er dan vanuit gaat dat al het licht in een rechte lijn vanaf de zon komt, wat zoals voorheen vermeld voor blauw licht niet het geval is.

Wanneer het licht in een hoek van 90° op het oppervlak valt (midden op de dag), dan zou je ervan uit gaan dat al het licht onder water aankomt en dat het onder water dus net zo licht is als aan de oppervlakte. Ook dit is om dezelfde twee redenen theoretisch. Er is altijd minder licht onder water dan aan de oppervlakte. Hoeveel minder hangt af van de hoek waaronder het zonlicht op het wateroppervlak valt en van de golfslag. Zoveel te dichter de hoek 90° nadert en zoveel te minder golfslag er is, zoveel te

meer licht zal onder water komen. Zoveel te kleiner de hoek en zoveel te meer golfslag, zoveel te minder licht komt onder water.

We spreken over reflectie wanneer de hoek waaronder licht op een oppervlak valt gelijk is aan de hoek waaronder het licht vanaf dat oppervlak verder gaat. Wanneer de verschillende lichtstralen in verschillende richtingen verder gaan, dan spreken we niet meer over reflectie. In dat geval heet het strooiing. Een spiegel reflecteert licht en een blad papier strooit licht. Kijk in een spiegel en je ziet een reflectie van jezelf, kijk naar een blad papier en je ziet een blad papier. Fotografen houden rekening met reflectie wanneer ze bepalen hoe laat ze gaan duiken. Ze gebruiken reflectie ook voor creatieve aspecten. Ook onder water is er reflectie. Daardoor kun je een foto maken met de spiegeling van een duiker in het wateroppervlak.

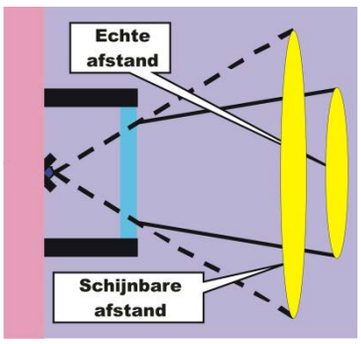




Wanneer licht in water aankomt, zal het vertragen en van richting veranderen. De hoek is niet altijd gelijk. Wanneer we twee parallelle lichtstralen bekijken, dan is er een consequente 4:3 verhouding. Wanneer de ene straal op het water komt zal deze afremmen, terwijl de parallelle straal zich nog op volle snelheid door lucht voortbeweegt. De straal in het water zal drie afstandseenheden afleggen, in dezelfde tijd dat de lichtstraal in de lucht 4 afstandseenheden aflegt.

Refractie – Wanneer licht van het ene medium in een ander medium overgaat, dan zal de lichtsnelheid veranderen. Dit staat in relatie tot de optische dichtheid van het "nieuwe medium". Wanneer licht vanuit lucht in water overgaat, dan zal het langzamer worden (de lichtsnelheid gedeeld door 1,33). Het licht zal dan in een andere richting "breken". Door deze richtingverandering ontstaat een "optische illusie", die te vergelijken is met wat je ziet als je door een loep kijkt.

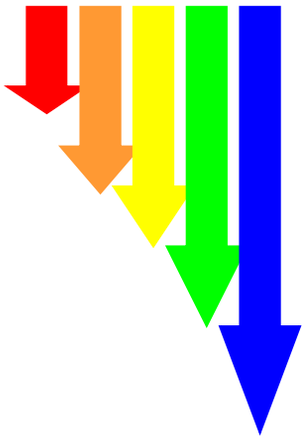
De index voor refractie in lucht is bijna 1 (wat de index in een vacuüm is) en voor water is dit 1,33. Dit resulteert in een verhouding 4 op 3 (4 gedeeld door 3 is 1,33). Dit veroorzaakt een optische illusie voor grootte, afstand en richting (voor dingen buiten het midden van je gezichtsveld). De verhouding 4:3 blijft waar, ongeacht de hoek waaronder het licht op het water valt. Afhankelijk van de afstand van je oog tot het glas van het masker en de afstand tot het voorwerp dat je ziet, ontstaat een optische fout waardoor je voorwerpen tot 33% groter waarneemt. Naarmate de afstand naar het voorwerp kleiner wordt en je ogen dichter bij het glas van het masker zijn, wordt de optische fout kleiner. Je ziet voorwerpen 25% dichterbij dan ze in werkelijkheid zijn. Voorwerpen links in je beeldveld lijken verder links te zijn (en rechts verder rechts).



Het oog ziet licht dus alsof het uit een andere richting komt. Hierdoor zie je dingen altijd groter. Voor de afstand zijn er meer factoren die een rol spelen. Dit zullen we doornemen in het deel over visuele omkeer. Daar wordt uitgelegd hoe het ondervinden van afstand ook door diffusie beïnvloedt wordt. Duikers passen zich goed aan de optische fouten aan en ontwikkelen al na korte tijd een goede oog/hand coördinatie.

Net als bij reflectie, maken fotografen soms gebruik van refractie voor creatieve effecten in hun foto's. Wanneer je een foto maakt richting het wateroppervlak onder een hoek die groter is dan 48°, dan toont de foto dingen die boven water zijn. Een fotograaf kan dus drie verschillende aspecten in een foto (die dicht bij de oppervlakte gemaakt is) combineren. Dat zijn een direct beeld van een duiker, de reflectie van de duiker in het wateroppervlak én, dankzij refractie, dingen die zich aan de oppervlakte bevinden.

Absorptie – Licht met een korte golflengte heeft meer energie dan licht met een langere golflengte. Water is 800 keer dichter dan lucht. Daardoor is het voor licht moeilijker om zich voort te bewegen. Zoveel te minder energie het licht bevat, zoveel te sneller zal het door het water afgeremd worden (de lichtenergie wordt dan omgezet in warmte). Van de zichtbare kleuren van licht heeft rood licht het minste energie en wordt dus als eerste geabsorbeerd. Zelfs bij zeer goed zicht kan rood zich niet meer dan ongeveer drie meter door water voortbewegen. Bij slecht zicht zijn er zoveel richtingveranderingen dat rood licht nog geen meter diep komt. Absorptie volgt de kleuren van de regenboog. Rood verdwijnt eerst, dan oranje, geel, groen en als laatste blauw. Bij absorptie verdwijnt het licht. Absorptie is dus iets anders dan reflectie, refractie en diffusie. Die fenomenen beschrijven alleen hoe licht van richting verandert.



Vanwege absorptie nemen veel duikers ook overdag, en bij goed zicht, een lamp mee onder water. De fantastische kleuren van het onderwaterleven zijn alleen zichtbaar wanneer een lichtbron van dichtbij op het onderwerp straalt. Zonder deze extra lichtbron kunnen we de echte kleuren van het onderwaterleven niet zien. Al op geringe diepte zien we bloed alsof het groen is. Wanneer we er dan met een lamp op stralen, dan zien we de normale rode kleur. Absorptie is ook de reden waarom onderwaterfotografen altijd een lamp of flitser gebruiken.

Visuele omkeerfenomeen – Het visuele omkeerfenomeen is eigenlijk geen fysica. Het gaat hier niet om een verandering van richting of om verlies van licht. Dankzij "stereozicht" zijn we in staat afstanden te schatten. Wanneer je een pen van de tafel wilt pakken, dan kun je nauwkeurig "richten" wanneer je beide ogen open hebt. Wanneer je één oog sluit zal het "richten" moeilijker worden. Voor grotere afstanden werkt het "stereozicht" niet meer. Dan zijn we dus afhankelijk van andere factoren. Dit zijn vroegere ervaringen met de grootte van een voorwerp en hoe scherp we een voorwerp zien.

Ervaring met de grootte van een voorwerp (bijvoorbeeld een auto) helpt onder water niet veel. Het enige mechanisme dat een rol speelt bij het schatten van afstanden onder water is hoe duidelijk we iets zien. Door diffusie zien we voorwerpen onder water minder duidelijk dan we gewend zijn. Dit onscherpe beeld van het onderwerp van onze observatie geeft ons de indruk, dat het verder weg is als in werkelijkheid het geval is.

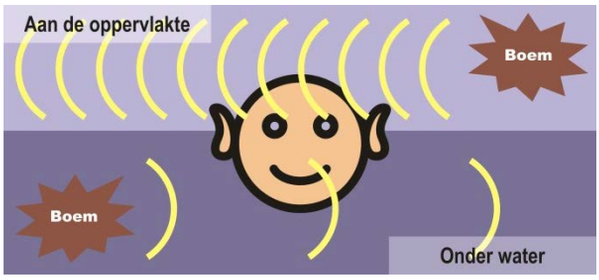
Op afstanden waarop ons "stereozicht" nog werkt worden we alleen beïnvloed door refractie en zien we voorwerpen dus groter en dichterbij dan ze in werkelijkheid zijn. Op afstanden die buiten ons gebeid voor "stereozicht" vallen, zullen we voor afstanden waarschijnlijk een inschattingsfout maken. Dit wordt veroorzaakt door het onscherpe beeld van het onderwerp. Aan land speelt dit fenomeen een rol bij verkeersongevallen op mistige dagen. Een auto botst niet tegen een obstakel op de weg omdat de chauffeur het niet gezien heeft, maar omdat hij vanwege het onscherpe beeld een inschattingsfout maakt voor de beschikbare remweg.

Horen onder water

In zout water, en bij relatief lage temperaturen, is de snelheid van geluid ongeveer 1,5 km/s. In zoet water 1,44 km/s. Bij toenemende temperatuur neemt de snelheid van geluid toe. Boven water gaat ge-

luid veel langzamer, slechts 0,344 km/s. Dit betekent dat geluid zich onder water 4,17 tot 4,36 keer sneller voortbeweegt dan in lucht. Dit wordt in de praktijk afgerond op 4 keer sneller.

Er zijn diverse factoren die invloed hebben op de snelheid van geluid. Dichtheid hoort daarbij. Het zou echter verkeerd zijn om te zeggen, dat geluid zich sneller voortbeweegt in dichtere materialen. Je kunt wel zeggen dat geluid sneller gaat in vaste stoffen dan in vloeistoffen en dat het in vloeistoffen sneller gaat dan in gassen.



Voor duikers betekent dit dat ze niet kunnen bepalen uit welke richting een geluid komt. Aan land is het horen van richting mogelijk door een klein tijdsverschil tussen de aankomst van een geluidsgolf bij het ene oor en dan bij het andere. Door de hogere snelheid van geluid onder water, is deze vertraging veel korter en stemt dus niet overeen met onze ervaringen. We horen geluid alsof het uit een koptelefoon komt die op “mono” ingesteld is. Duikers kunnen zich niet aan de hogere snelheid van geluid aanpassen. Ongeacht hoe vaak je duikt, je zult nooit de vaardigheid ontwikkelen om onder water de richting van een geluidsbron te bepalen.

Dit betekent niet dat geluid volledig nutteloos is voor navigatie. Het volume van geluid wordt sterker naarmate je de bron nadert en zwakker wanneer je je daarvan weg beweegt. Op veel duikplaatsen kan het volume van bepaalde geluiden aangeven of je van de kust wegzwemt of dat je de kust nadert. Soms door stenen die in ondiep water door de golfslag tegen elkaar aantikken, of wanneer er een stevige branding staat. Wanneer er geen bron van zulke constante geluiden is, dan dien je op je kompas en andere navigatietechnieken te vertrouwen.

Warmte en water

Om 1 kilogram water (1 liter) 1 graad in temperatuur te verhogen, is ongeveer 4 keer zoveel energie nodig dan voor het verwarmen van 1kg lucht (ongeveer 800 liter) 1 graad warmer te maken. Wanneer we eenzelfde volume van water en lucht (bijvoorbeeld een liter) een graad warmer willen maken, dan is voor water ongeveer 3.200 keer zoveel energie nodig. Dit veroorzaakt de langzame aanpassing van de watertemperatuur aan de luchttemperatuur. Vroeg in de zomer kan het water in een meer beduidend kouder zijn dan de luchttemperatuur, maar het water blijft nog een poosje warm nadat de luchttemperatuur in de herfst afneemt.

In water verliest een onbeschermde duiker de lichaamstemperatuur tot 25 keer sneller dan in lucht van dezelfde temperatuur. Daarom is zelfs in relatief warm water bescherming tegen de kou nodig. Warmte wordt op 3 verschillende manieren overgedragen. Dit zijn geleiding, convectie en straling (radiatie). Het verlies van lichaamswarmte gaat hoofdzakelijk via geleiding, maar op de onbeschermde huid speelt ook convectie een rol.

Om warmte via **geleiding** van de ene substantie aan het andere over te dragen, moeten de twee substanties met elkaar in contact zijn. Wanneer je in de ene hand de metalen eerste trap van een automaat neemt en in de andere hand een tweede trap van kunststof, dan zal je de indruk hebben dat de eerste trap kouder is. De eerste en tweede trap komen echter van dezelfde locatie. We moeten dus aannemen dat ze beiden even warm zijn (wat ook zo is). Waardoor wordt dit (ondervonden) temperatuurverschil veroorzaakt?

De eerste en tweede trap hebben “kamertemperatuur”, wat kouder is dan je lichaamstemperatuur. Zodra je de koudere voorwerpen in de hand neemt begint de overdracht van warmte om het temperatuurverschil op te heffen. De automaat wordt met je lichaamstemperatuur opgewarmd. Bij de eerste trap gaat dat snel, omdat metaal een goede warmtegeleider is. Bij de tweede trap gaat dat langzamer, omdat plastic warmte niet goed geleid. De snellere warmteoverdracht veroorzaakt dat de eerste trap “kouder aanvoelt”. Uiteindelijk zullen zowel de eerste als de tweede trap je lichaamstemperatuur aannemen, maar bij de tweede trap gaat dat langzamer.

Water is een betere warmtegeleider dan lucht. Directe contact met het water veroorzaakt tijdens de duik heeft een sneller warmteverlies tot gevolg. Je lichaam is niet in staat om de warmte te genereren die nodig is om een meer tot je lichaamstemperatuur op te warmen (zoals dat bij de automaat het geval was). Uiteindelijk zal je lichaamstemperatuur zich dus aan de temperatuur van het meer aanpassen. Om ons tegen warmteverlies door geleiding te beschermen, moeten we ons isoleren (een duikpak). Neopreen en de lucht in een droogpak zijn “slechte geleiders”. Ze geleiden wel warmte, maar veel langzamer dan bij direct contact met het water. Een duikpak vertraagt de afkoeling, maar houdt je niet warm.

Bij **radiatie** is er geen contact tussen de warmtebron en de materie die opgewarmd wordt. Bij radiatie wordt warmte als elektromagnetische golf overgedragen. Wanneer je je hand 5 centimeter boven de eerste en tweede trap van een automaat zou houden, dan zou je geen temperatuurverschil voelen. De automaat straalt geen warmte af omdat deze op “kamertemperatuur” is. Voor radiatie moet de warmtebron warmer zijn dan de omgeving. Dit is het geval bij de radiator van de verwarming, de zon of een vuur. Je kunt de warmte van de warmtebron voelen zonder deze aan te raken.

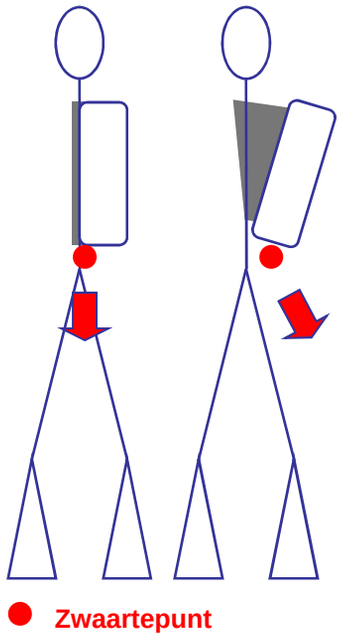
Convectie is wat gebeurt nadat een gas of een vloeistof door radiatie of geleiding opgewarmd is. Het warmere gas of de warmere vloeistof (convectie gebeurt alleen bij vloeistoffen en gassen) wordt minder dicht. Hierdoor zal het opgewarmde deel opstijgen, waarna de plaats die het verlaten heeft opgevuld wordt met gas of vloeistof dat nog niet is opgewarmd. Een onbeschermde duiker zal het water dat met de huid in contact staat opwarmen. Dit water stijgt dan op en wordt vervangen door koud water. Zelfs wanneer je je niet beweegt, zal je huid altijd met koud water in contact staan. Een natpak (en in het bijzonder een semi-droogpak) beperkt de convectie, door water dat al opgewarmd is op de plaats te houden. Je warmt het koude water in het pak één keer op en het blijft dan waar het is.

De situatie is anders wanneer de moleculen van een gas in hun beweging beperkt zijn. Wanneer de temperatuur toeneemt, gaan moleculen sneller bewegen. In een gesloten vat (zoals een duikfles) resulteert dit in een hogere druk. Wanneer moleculen niet beperkt zijn in hun beweging, dan gaan ze verder van elkaar. De dichtheid neemt daardoor af. Het gedrag van gassen die in hun beweging beperkt zijn wordt niet door convectie verklaard. Dat is de reden waarom we later in dit hoofdstuk op warmte terugkomen, voor berekeningen met de wet van Charles (relaties tussen druk, volume en temperatuur).

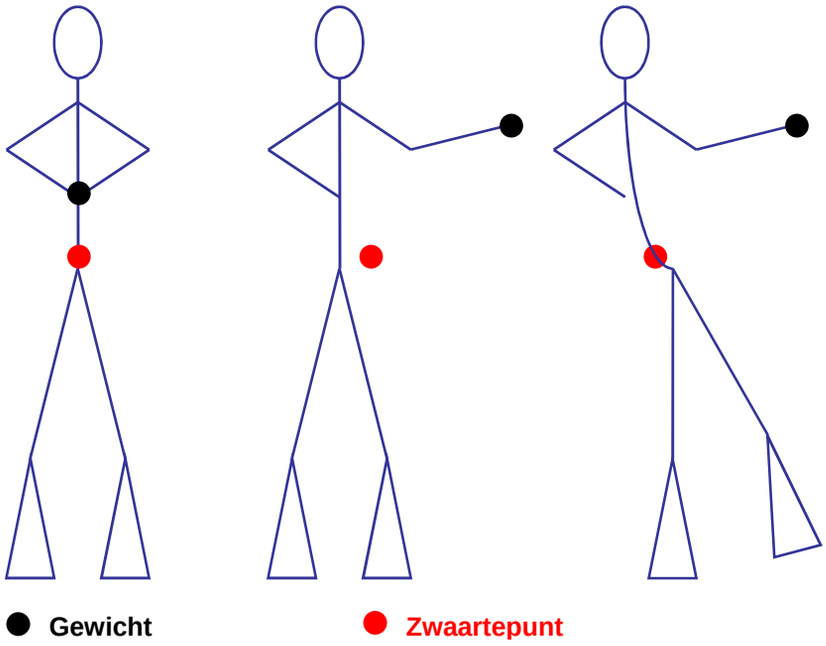
Beweging

Zoals eerder aangegeven is water ongeveer 800 dichter dan lucht. Die dichtheid biedt weerstand tegen beweging. Dit is de reden waarom duikers langzaam en weloverwogen moeten bewegen. Een gestroomlijnde positie (in de bewegingsrichting) beperkt de weerstand. Alle uitrusting moet dicht bij het lichaam gedragen worden en het trimvest moet de juiste maat hebben. Naast de compactheid van de uitrusting moeten duikers aandacht besteden aan de gewichtsverdeling.

Je uitrusting moet je toestaan om zowel verticaal alsook horizontaal (het gezicht beneden) te zweven. Daartoe moet het zwaartepunt zich in het midden van je lichaam bevinden. Wanneer het gewicht van de duikfles je op de rug trekt, dan moet de uitrusting aangepast worden. Wanneer de fles je naar achteren trekt, dan kan het zijn dat de fles te zwaar is, of dat deze een te grote diameter heeft (dit is vaak het geval bij een korte 12). Vaak is echter een te groot trimvest de reden. Door een te groot vest verliest de duikfles bovenaan het contact met je rug, wat het gewicht van de fles verder achter je brengt. Een andere overweging is de verdeling van het lood. Het kan zijn dat je een poosje moet experimenteren om je uitrusting aan te passen, maar het is de moeite waard.



De volgende stap met betrekking tot je positie in het water is uitproberen of je verschillende posities kunt innemen, zonder dat het nodig is om met je armen of benen te bewegen om die positie te handha-ven. Een droogpak is daarvoor ideaal. De lucht gaat in het pak altijd naar het hoogste punt, wat je stabiliseert in de positie die je ingenomen hebt. Je kunt dan zonder problemen horizontaal, met je gezicht onder, op je zij, verticaal of in een andere positie zweven. Wanneer het water te warm is voor een droogpak, dan kun je kiezen voor een trimvest dat de lucht zo min mogelijk hindert om van het ene deel van het vest naar het nadere te stromen.



Het innemen van de positie van je keuze heeft niet alleen met de uitrusting te doen. Je moet ook met je wervelkolom en de positie van je benen werken. Je kunt dit oefenen door een stuk lood van 2kg in een hand te nemen en dan tijdens het zweven je arm in verschillende richtingen uit te strekken. Het idee is dat je bovenlichaam daarbij niet van positie verandert. Om dit te doen moet je met je lichaamsgewicht compenseren. Door je wervelkolom in de tegengestelde richting te bewegen kun je het zwaartepunt op dezelfde plaats houden. Het duurt even om het gevoel voor deze handelingen te ontwikkelen, maar degenen die deze techniek onder de knie hebben doen het als een tweede natuur.

Wanneer je je niet hoeft te bewegen om je positie in het water te handhaven, dan zal dit je luchtverbruik verminderen. Je luchtverbruik gaat nog verder naar beneden wanneer je je langzaam beweegt. Twee keer zo snel zwemmen, kost vier keer zoveel energie.

Eenheden, constanten en een introductie tot berekeningen

Als duiker zijn we hoofdzakelijk geïnteresseerd in druk, volume, gewicht, hoeveelheid en temperatuur. Alvorens met berekeningen te beginnen zullen we eerst de eenheden en constanten bekijken die voor het duiken gebruikt worden.

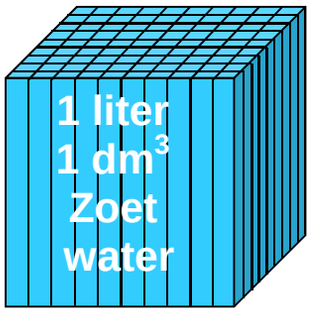
Constanten om te onthouden

0,98	druktoename voor 10m zoet water
1	soortelijk gewicht zoet water
1	druktoename voor 10m zout water
1,01325	gemiddelde atmosferische druk in bar
1,03	gemiddeld soortelijk gewicht zout water
4	snelheid van geluid in water t.o.v. in lucht
Tot 25 keer	warmteverlies in water t.o.v. in lucht
273	omrekening °C naar Kelvin
800	dichtheid van water t.o.v. lucht (ongeveer)

Liter – de eenheid voor volume is liter. Je kunt dit het beste afkorten met een hoofdletter L, of met een handgeschreven "ℓ". Dit om te voorkomen dat verwarring met het cijfer 1 ontstaat. Liter is het woord dat gebruikt wordt om een kubieke decimeter aan te geven (dm^3). Dit betekent dat we het hier te doen hebben met een eenheid voor grootte. Voor iets dat met een meetband gemeten kan worden in breedte, hoogte en diepte. Een 10 liter duikfles met een druk van 20 bar heeft een volume van 10 liter. Dezelfde fles met een druk van 200 bar heeft nog steeds een volume van 10 liter. Liter is een eenheid voor de feitelijke grootte en niet voor een hoeveelheid van een gas. Het kan echter gebruikt worden voor een hoeveelheid vloeistof, omdat een vloeistof ongeacht de druk hetzelfde volume behoudt.

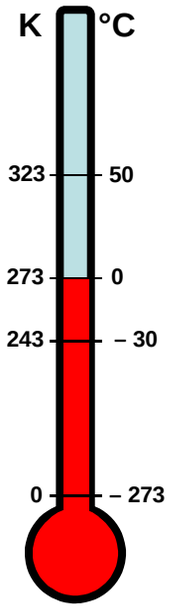
Barliter – de eenheid voor een hoeveelheid gas. Barliter is de uitkomst van de wet van Boyle. Druk maal volume is een constante. Volgens het voorgaande voorbeeld van een 10 liter duikfles op 20 bar bevat deze fles 200 barliter (20 bar x 10 liter = 200 barliter). De dezelfde fles op 200 bar bevat 2.000 barliter (200 bar x 10 liter = 2.000 barliter). Barliter is dus niets anders dan het volume dat het gas op atmosferische druk zou hebben. Dit wordt soms het "oppervlakte-equivalent" genoemd.

Kilogram – de eenheid voor gewicht. We drukken de massa van een object uit in kilogram. We gebruiken de eenheid kilogram ook voor de opwaartse kracht die een object ondervindt door het gewicht van de verplaatste vloeistof. Een kilo is het gewicht van een liter of dm^3 zoet water. Wanneer we kilogram met liter combineren, dan kunnen we het soortelijke gewicht van een stof aangeven. Omdat een liter zoet water 1 kilogram (kg) weegt kunnen we zeggen dat het "soortelijk gewicht" van zoet water 1 kilogram per liter is, of 1kg/ℓ. Het specifieke gewicht kan dus ook uitgedrukt worden als $1kg/dm^3$. Hoe kilogram gebruikt wordt voor het kwantificeren van een opwaartse kracht komt later aan de orde.



Bar – de eenheid voor druk. Druk is het gewicht dat op een gegeven oppervlakte een kracht uitoefent. We zouden een liter, of een dm^3, water in 100 staafjes van 1cm x 1cm x 10cm kunnen verdelen. Wanneer we die 100 staafjes op elkaar zetten, dan geeft dit een waterkolom van 100dm, ofwel 10 meter. Het gewicht van die lange staaf oefent dan een kracht uit op een oppervlak van $1cm^2$. In dit voorbeeld zou de druk op 10 meter diepte in zoet water dus $1kg/cm^2$ zijn. $1kg/cm^2$ heet "technische atmosfeer" of AT (vroeger bekend als ATA voor absolute druk en ATO voor de hydrostatische druk die de atmosferische druk negeert). Verwar de AT niet met ATM (de "atmosferische" atmosfeer die de gemiddelde atmosferische druk op zeeniveau is). Bar is slechts indirect gebaseerd op kilogram per oppervlakte-eenheid. Bar is afgeleid van Pascal, wat de officiële eenheid voor druk is. Pascal staat voor 1 Newton ($kg.m/s^2$) per vierkante meter (1 Pascal = $1N/m^2$). Deze eenheid is echter niet praktisch voor het duiken, omdat het zeer kleine drukverschillen aangeeft. De gemiddelde atmosferische druk in Pascal is bijvoorbeeld 101.325 Pascal. Dit is waarom we gebruik maken van de afgeleide eenheid bar. 1 bar is 100.000 Pascal (1ATM = 101.325 Pascal = 1013,25 Hectopascal of Millibar = 1,01325 bar ≈ 1bar).

Merk op dat bar en Pascal op Newton gebaseerd zijn en daarmee slechts indirect op kilogram. Daardoor moeten we rekening houden met een factor 0.98 die voort komt uit het verschil tussen Newton en kilogram. Wanneer we in bar rekenen dan neemt de druk 0,98 bar toe voor iedere 10 meter zoet water. Soms lees je dat dit 0,97 bar per 10 meter zoet water is, maar dat is fout. Dat is de omrekening van kg/cm^2 of AT naar ATM. Het gemiddelde soortelijk gewicht van zout water is 1,03 kg/ℓ. Daardoor zal de druk 1,03AT toenemen voor iedere 10 meter zeewater. Wanneer we nu de omrekening van AT naar bar doen (0,98) dan stellen we vast dat de druk ongeveer 1 bar toeneemt voor iedere 10 meter zeewater (1,03 x 0,98 ≈ 1). Omdat 1,03 een gemiddelde is, is het niet zinvol nauwkeuriger te rekenen.



Wanneer je de druk op een diepte van 25 meter wilt berekenen in zoet water, dan vermenigvuldig je 2,5 (2,5 keer 10 meter) met 0,98 en vindt 2,45 bar. Dit is de hydrostatische of instrumentendruk (de meeste instrumenten, zoals een manometer of een dieptemeter, geven 0 aan op atmosferische druk en negeren dus de atmosferische druk). We moeten hier 1 bar bij optellen om de absolute druk van 3,45 bar te vinden. Voor de atmosferische druk wordt aangenomen dat 1 bar gelijk is aan 1ATM of 1013,25hPa (Hectopascal). De atmosferische druk is niet constant. Het is onwaarschijnlijk dat de druk op de duikplaats die je bezoekt precies de "gemiddelde atmosferische druk" is. Om die reden accepteren we de "fout" van 1,3%. Reken de atmosferische druk op zeeniveau dus altijd 1 bar.

Kelvin en Celsius – de eenheden die we voor temperatuur gebruiken. Celsius is de eenheid voor het dagelijkse leven. We weten welke temperatuur aangenaam is, bij welke temperatuur water bevriest, et cetera. Voor berekeningen kunnen we echter geen gebruik maken van Celsius. Celsius heeft zowel temperaturen boven nul als onder nul. Voor berekeningen moeten we gebruik maken van de "absolute temperatuur". Deze wordt uitgedrukt in Kelvin. De temperatuurschaal van Kelvin kent alleen positieve temperaturen. Dat betekent dat deze temperatuurschaal begint op de laagste mogelijke temperatuur. Dat is het absolute nulpunt. Dit is ongeveer 273 graden onder nul in Celsius. Om een temperatuur in Celsius om te rekenen naar Kelvin is het dus voldoende om er 273 bij op te tellen (10°C = 283K).

Om te onthouden welke naam bij welke fysicawet hoort, kun je je naar het alfabet richten. ABCD(H). Stel je voor dat je een gesloten flexibel vat in zee gooit. Het eerste wat berekend moet worden is of het zal zinken, drijven of neutraal zal zijn. Voor deze berekening maak je gebruik van de wet van Archimedes (A). Wanneer Archimedes toont dat het vat zal zinken, dan zal de druk met de diepte toenemen. De toenemende druk zal het volume van het vat veranderen. De verandering in volume wordt berekend met Boyle (B). Wanneer het vat verder zinkt, dan zal het door een thermocline heengaan. Daar verandert de temperatuur. Ook de verandering in temperatuur heeft invloed op het volume. Dat wordt berekend met de wet van Charles (C). Op de bodem aangekomen zal het vat niet meer bewegen en kun je details observeren. In fysica heeft dit te maken met het percentage en de druk van de individuele gassen Dat wordt berekend met de wet van Dalton (D). Na jaren raakt het vat lek en stroomt er water in. De gassen in het vat worden in het water opgenomen volgens de wet van Henry (H).

Het gebruik van formules – wanneer je formules gebruikt, dan moet je een aantal dingen in gedachten houden. Ten eerste dien je het tot een gewoonte te maken om in een formule niet alleen getallen in te vullen, maar ook de eenheid die bij dat getal hoort. Wanneer je dus een druk van 10 bar in een formule invult dan schrijf je niet gewoon 10, maar 10 bar. Dit helpt om vast te stellen in welke eenheid het antwoord zal zijn en het voorkomt fouten.

Ten tweede dien je het tot een gewoonte te maken om de uitkomst van een opgave te schatten, alvorens deze met een formule te berekenen. Je maakt een opgave met een relatie tussen druk en volume. Dee druk wordt lager. In dit geval moet de uitkomst van je berekening zijn dat het volume groter geworden is. Na het berekenen kijk je dan of het antwoord met je schatting overeen komt. Wanneer dat het geval is, dan kun je ervanuit gaan dat je berekening correct is. Wanneer je berekening een volledig ander antwoord geeft, dan heb je waarschijnlijk een fout met de formule gemaakt.

Regel 1: Wanneer je de twee kanten van een formule met hetzelfde vermenigvuldigd of door hetzelfde deelt, dan is de formule nog steeds waar. 4x3=2x6 is waar (12=12) en wanneer je beide kanten met 2 vermenigvuldigd is het nog steeds waar 4x3x2=2x6x2 (24=24). Beide kanten door 2 delen werkt ook:

$$\frac{4x3}{2} = \frac{2x6}{2}$$

Dit is de techniek die je gebruikt om iets van de rechter kant van de formule naar de linker kant te brengen. Je doet dit totdat rechts alleen nog dat over is wat je zoekt. Stel je voor dat de vergelijking als volgt is: 4x3=2xY. In dat geval zoek je de waarde van Y. Voor dit doel gebruik je regel 2.

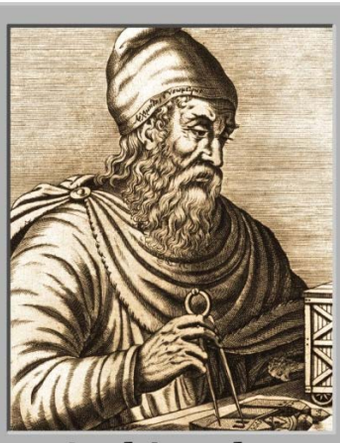
Regel 2: Wanneer iets eerst met een waarde vermenigvuldigd wordt en dan door diezelfde waarde gedeeld, dan kun je deze waarden uit de formule strepen. Het heeft geen zin eerst met iets te vermenigvuldigen en dan door datzelfde te delen.

$$\frac{4x3}{2} = \frac{2x6}{2} \qquad \frac{4x3}{2} = \frac{2xY}{2} \qquad \frac{4x3}{2} = \frac{\cancel{2}xY}{\cancel{2}} \qquad \frac{4x3}{2} = Y \qquad Y = 6$$

Regel 3: De laatste regel is slechts af en toe nuttig (voor het duiken is dat niet vaak). Je mag een formule "omdraaien". Wat beneden staat gaat naar boven en wat boven staat gaat naar beneden.

$$\frac{4x3}{2} = \frac{\cancel{2}xY}{\cancel{2}} \qquad \frac{4x3}{2} = \frac{Y}{1} \;\Big|\; \frac{2}{4x3} = \frac{\cancel{2}}{\cancel{2}xY} \qquad \frac{2}{4x3} = \frac{1}{Y} \qquad \frac{4x3}{2} = \frac{Y}{1} \qquad \frac{4x3}{2} = Y$$

De situatie rechts van de rode streep is de enige situatie waarin je een formule "omdraait". Wanneer je aan de rechter kant van de formule twee gelijke getallen wegstreept, dan staat er niets meer boven of onder de streep. Wanneer er niets meer staat dan betekent dit dat de waarde 1 is. Wanneer dit onder de streep gebeurt, dan mag je dat negeren (ieder getal dat door 1 gedeeld wordt behoud dezelfde waarde), maar wanneer dit boven de streep gebeurd, dan betekent dit dat je op zoek bent naar 1 gedeeld door je antwoord. Om nu te zoeken naar het echte antwoord (en niet 1 gedeeld door het antwoord) draai je, alvorens te rekenen, de formule om. Dit kan gebeuren met de wet van Charles wanneer je op zoek gaat naar een nieuwe temperatuur bij twee gegeven drukken. Later meer hierover.



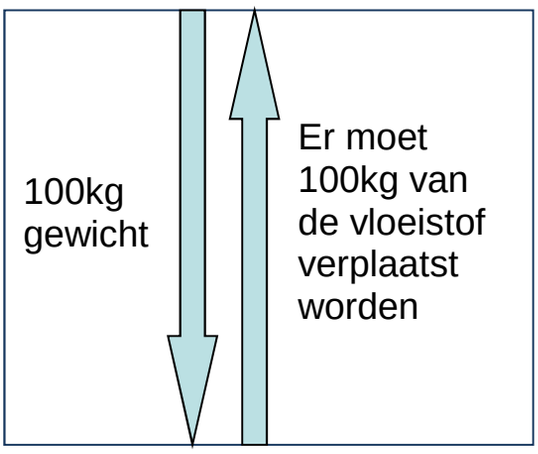
Archimedes
287 - 212 BC

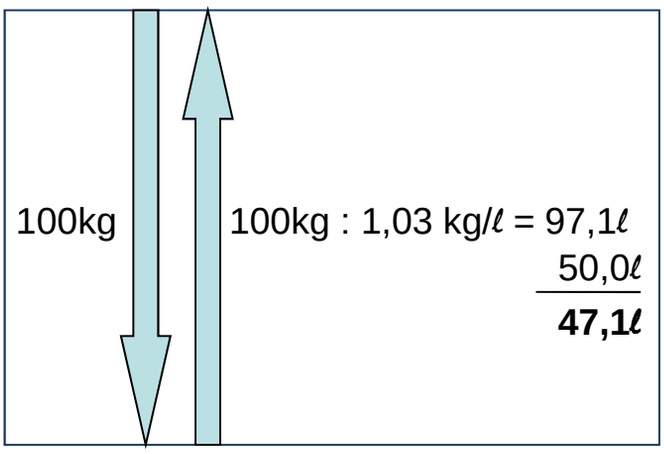
Archimedes

De wet van Archimedes wordt gebruikt om drijfvermogen te berekenen. Drijfvermogen kan positief, negatief of neutraal zijn. Alle berekeningen worden echter gedaan om een neutraal drijfvermogen te bepalen. Daarna kunnen we gewicht toevoegen of wegnemen, of het volume veranderen, om het object een positief of negatief drijfvermogen te geven.

Volgens Archimedes ondervindt een object een opwaartse kracht die gelijk is aan het gewicht van de verplaatste vloeistof. Neutraal drijfvermogen betekent dus dat het object hetzelfde gewicht aan vloeistof verplaatst als het zelf in kilogram weegt. Wanneer de verplaatste vloeistof zoet water (1kg/ℓ) is, dan is de te verplaatsen hoeveelheid water hetzelfde aantal in liters als het gewicht van het voorwerp in kilogram. Wanneer de verplaatste vloeistof een grotere dichtheid (soortelijk gewicht) dan zoet water heeft, dan is de hoeveelheid vloeistof die verplaatst moet worden in liters een geringer aantal dan het gewicht van het voorwerp in kilo, omdat iedere verplaatste liter meer dan 1 kilogram weegt.

De eerste stap in de berekening is, dat je uitzoekt hoeveel liters vloeistof verplaatst moeten worden om de opwaartse kracht te verkrijgen die voor een neutraal drijfvermogen benodigd is. Wanneer het object 100kg weegt, dan moet 100kg water verplaatst worden. In zoet water zou dit 100 liter zijn (100kg : 1kg/ℓ = 100ℓ). Voor zeewater met het gemiddelde soortelijke gewicht (1,03kg/ℓ) is dit 100kg : 1,03kg/ℓ

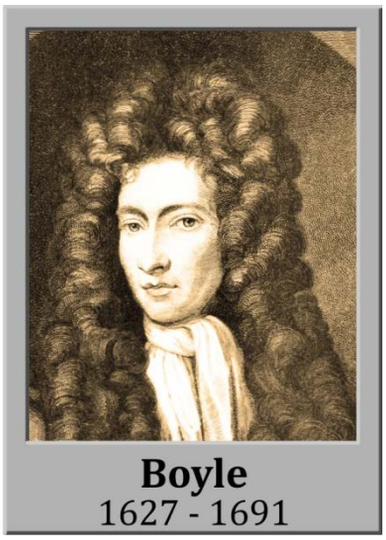




= 97,1ℓ. De tweede stap is het vergelijken van het benodigde volume met het volume van het voorwerp zelf. Wanneer het voorwerp zelf een volume (grootte in liter of dm^3) van 50 liter heeft, dan moeten we volume toevoegen om een neutraal drijfvermogen te bewerken. Dat kan met een hefballon gedaan worden. In dit voorbeeld moet de hefballon 50ℓ groot zijn in zoet water en 47,1ℓ in zout water.

Om kg naar liter om te rekenen moet je delen door het soortelijke gewicht. Voor het omrekenden van liter naar kg vermenigvuldigen met het soortelijke gewicht.

Sommige duikers rekenen op een andere manier. Voor het voorbeeld met zout water rekenen ze eerst 50ℓ x 1,03kg/ℓ = 51,5kg om de opwaartse kracht van het voorwerp te vinden. Dan trekken ze het antwoord van 100kg af. Ze vinden dan 48,5kg als waarde voor de ontbrekende opwaartse kracht. Dit antwoord in kg wordt dan naar liter omgerekend: 48,5kg : 1,03kg/ℓ = 47,1ℓ Zo wordt het volume van de hefballon gevonden. Deze manier is echter niet zinvol. Wanneer je op zoek bent naar een antwoord in liter, dan is het beter wanneer je eerst de waarden in kilo naar liter omrekent en niet de waarden in liter naar kilo. Dit omdat je die dan later weer naar liter terug moet rekenen (wat je kunt vergeten waardoor je op het verkeerde antwoord zou komen).



Boyle

De wet van Boyle wordt gebruikt voor de relatie tussen druk en volume (gevonden door Boyle in 1662 en later, onafhankelijk daarvan, door Mariotte in 1676). De manier waarop we als duiker deze wet toepassen is $p_1 x V_1 = p_2 x V_2$. In de formule is p de druk in bar en V is

het volume in liter. Situatie 1 (p_1xV_1) is waar we zowel de druk als het volume weten. In situatie 2 (p_2xV_2) is slechts één van de twee waarden bekend (druk of volume). De tweede waarde wordt gezocht. De druk is niet altijd direct in bar gegeven maar als diepte gegeven. In dat geval moet je eerst de druk op die diepte uitrekenen. Het zou correct zijn om daarbij verschil te maken tussen zoet en zout water, maar wanneer we met Boyle rekenen doen we dat niet (het verschil zou miniem zijn). Reken gewoon 1 bar voor 10 meter diepte en tel daar 1 bar voor de atmosferische druk bij op.

Om de wet van Boyle aan te passen aan onze behoefte (de gezochte waarde – p_2 of V_2 – moet alleen rechts van het is gelijk teken staan) moeten we regel 1 en 2 uit de introductie toepassen.

Het volume in een omgekeerd vat op 5 meter diepte is 4 liter. Wat is het nieuwe volume wanneer we het omgekeerde vat meenemen naar een diepte van 30 meter?

Als eerste moeten we weten wat we missen. 5 meter wordt 1,5bar en is p_1. 4 liter is V_1 en 30 meter wordt 4 bar en is p_2. We zoeken V_2. $p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2$ wordt dus $p_1 \times V_1 = p_2 \times$ gezocht.

$$\frac{p_1 \times V_1}{p_2} = \frac{p_2 \times \text{gezocht}}{p_2}$$

We passen nu regel 1 toe door beide kanten te delen door p_2 (de waarde die we hebben en die dus van rechts weg moet). Daarmee creëren we de mogelijkheid voor de toepassing van regel 2.

We kunnen nu p_2 boven en onder de streep aan de rechter kant wegstrepen (regel 2) en verkrijgen zo de formule die we willen hebben. De gezochte waarde staat boven de streep. Regel 3 is dus niet van toepassing.

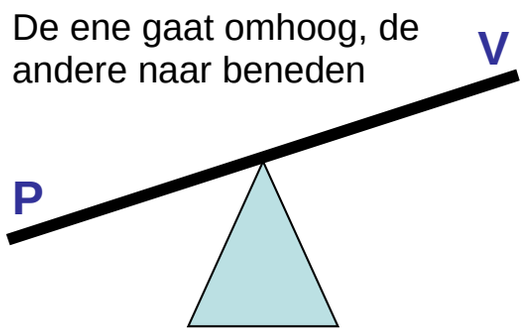
$$\frac{p_1 \times V_1}{p_2} = \frac{\cancel{p_2} \times \text{gezocht}}{\cancel{p_2}} \quad \Rightarrow \quad \frac{p_1 \times V_1}{p_2} = \text{gezocht}$$

We hebben nu de juiste formule en kunnen de gegevens invullen, uitzoeken wat de eenheid van het antwoord zal zijn en de gegevens in de rekenmachine typen om het antwoord te vinden. Het antwoord moet overeenkomen met de schatting dat het volume zal afnemen bij een toenemende druk.

$$\frac{1.5\ \text{ba}\cancel{\text{r}} \times 4\ \text{liter}}{4\ \text{ba}\cancel{\text{r}}} = 1.5\ \text{liter}$$

Wanneer P_2 gezocht zou zijn, dan is de procedure gelijk. In dat geval delen we beide kanten door V_2 (regel 1) en strepen de twee V_2 boven en onder de streep aan de rechter kant weg (regel 2).

De wet van Boyle gaat ervanuit dat de temperatuur niet verandert. Onder water is dat meestal het geval, maar aan land is dat zeldzaam. De wet van Boyle is dus een typische "duikerswet". Er is een ander probleem met druk, maar ook dit speelt onder water nauwelijks een rol. In een autoband kun je de druk behoorlijk laten oplopen zonder een duidelijk verschil in volume te zien. Aan land hebben we meestal te maken met de beperkte flexibiliteit



van het vat waarin we de druk verhogen (zoals een ballon of een autoband). Daarnaast speelt de zwaartekracht een rol (deze trekt de houder "richting de aarde trekt"). Aan land heeft de wet van Boyle daardoor meer theoretische dan praktische waarde. Onder water zijn er echter veel situaties (een trimvest, een hefballon, et cetera) waarin de wet van Boyle 100% van toepassing is. Verschillen in temperatuur, flexibiliteit en zwaartekracht zijn daar onbeduidend.

Druk, volume en dichtheid

Naast de wet van Boyle (druk en volume) moeten we in sommige situaties ook rekening houden met de dichtheid. Dit is in het bijzonder het geval bij het luchtverbruik en bij berekeningen voor hefballon. De dichtheid neemt evenredig met de druk toe. Wanneer de druk verdubbelt, verdubbelt de dichtheid van een gas ook. Dit betekent dat zich twee keer zoveel gasmoleculen in hetzelfde volume bevinden. Dat verklaart ook de wet van Boyle. Het volume reduceert tot de helft wanneer de druk verdubbelt omdat de aanwezige gasmoleculen slechts half zoveel plaats innemen.

Wanneer we een hefballon gebruiken, dan moeten we verschillende gegevens hebben om een object op een verantwoorde manier aan de oppervlakte te brengen. We moeten het gewicht van het object onder en boven water weten. Daarvoor gebruik je de wet van Archimedes. Het gewicht onder water bepaalt de keuze van de hefballon en het gewicht boven water (dat beduidend hoger kan zijn), is nodig om te kijken of de lier sterk genoeg is. Je moet ook weten hoeveel lucht nodig is om de hefballon te vullen (niet het volume, maar de hoeveelheid). Dit is nodig om te beslissen of je die hoeveelheid ademgas kunt missen van je persoonlijke luchtvoorraad, of dat het nodig is een extra fles mee te brengen om de hefballon te vullen.

Voor deze berekening moeten we het gewenste volume van de hefballon vermenigvuldigen met de druk op de diepte waar het te bergen voorwerp zich bevindt. Om op 30 meter diepte een hefballon te vullen tot een volume van 80 liter is dit: 4 bar x 80 liter = 320 barliter. Een 10 liter duikfles met 200 bar lucht bevat 200 bar x 10 liter = 2.000 barliter. Na het vullen van de hefballon is er dus 2.000 barliter min 320 barliter = 1.680 barliter over om te ademen. De 1.680 barliter komt overeen met 168 bar in de fles (1.680 barliter gedeeld door 10 liter = 168 bar). Bij het vullen van de hefballon verliest de duikfles dus 32 bar druk (320 barliter gedeeld door 10 liter = 32 bar).

Met betrekking tot luchtverbruik weten we, dat we op 10 meter (2 bar) diepte onze lucht twee keer zo snel verbruiken dan aan de oppervlakte (1 bar). Het verbruik is 4 keer zo snel op 30 meter diepte (4 bar). De wet van Boyle is hier niet van toepassing. Het volume van de longen blijft immers gelijk (het is geen druk/volume relatie). In dit geval is het verbruik hoger door de grotere dichtheid van de lucht.

Om de berekening te kunnen maken, moeten we weten hoeveel lucht zich per tijdeenheid in en uit de longen beweegt. Wanneer we dat weten, dan kunnen we op iedere gewenste diepte het luchtverbruik berekenen (wanneer we ervanuit gaan dat alle andere factoren, zoals inspanning, gelijk blijven). Dit doen we door het bekende volume te vermenigvuldigen met de druk (wat ook de dichtheid is) op de nieuwe diepte. Omdat we hier een druk met een volume vermenigvuldigen komt het antwoord in barliter.

Een duiker op 12 meter diepte verbruikt 3 bar per minuut uit een 10 liter duikfles. Wat zal de consumptie van deze duiker zijn op een diepte van 30 meter? Door logisch na te denken kunnen we aannemen dat het verbruik op 30 meter diepte bijna het dubbele zal zijn van het verbruik op 12 meter (schatting). 3 bar per minuut uit een 10 liter duikfles is 30 barliter op een diepte van 12 meter. 30 barliter gedeeld door 2,2 bar geeft een longbeweging van 13,6 liter per minuut aan (wat gelijk is aan het luchtverbruik aan de oppervlakte). Op 30 meter diepte is het verbruik dus 4 bar keer 13,6 liter = 54,4 barliter.

Charles

De wet van Charles (uit 1787) beschrijft de relatie tussen druk, volume en temperatuur (Gay-Lussac heeft ditzelfde 15 jaar later, in 1802, beschreven). Onder water hebben temperatuurrelaties niet veel zin. Zoals voorheen aangegeven zijn er onder water niet veel situaties waarin de wet van Boyle niet toegepast kan worden, zonder je veel zorgen over temperatuur te maken. Om die reden gebruiken we de wet van Charles meestal voor situaties boven water. In het bijzonder in relatie tot het vullen van duikflessen. Als duiker gebruiken we de wet van Charles in de volgende vorm:

$$\frac{p_1 \times V_1}{T_1} = \frac{p_2 \times V_2}{T_2}$$

Druk (p) wordt in bar aangegeven, volume (V) in liter en temperatuur (T) in Kelvin (°C + 273). Het zou correct zijn om de druk als absolute druk te gebruiken, maar de meetinstrumenten die we gebruiken (manometer) geven de hydrostatische druk (de manometer geeft 0 aan wanneer de fles atmosferische druk heeft). Omdat manometers niet nauwkeurig genoeg zijn om druk in stappen van 1 bar aan te geven én omdat 273 een afgeronde waarde is (273,16), is het niet noodzakelijk om met grote nauwkeurigheid te rekenen. Gebruik gewoon de druk die je op de manometer afleest (hydrostatische druk). De berekening is dan nauwkeurig genoeg. Door deze vereenvoudiging voorkom je de veel gemaakte fout om aan het einde van de berekening de gevonden absolute druk om te rekenen tot een hydrostatische druk.

Om de berekeningen te vereenvoudigen, is de eerste stap om één van de factoren (druk, volume of temperatuur), uit de formule weg te strepen. Wanneer we de temperaturen wegstrepen zijn we terug bij de wet van Boyle (druk/volume relaties). Wanneer we de volumes wegstrepen, dan kunnen we de verandering in de druk van een duikfles bij veranderde temperatuur berekenen (druk/temperatuur relaties). Wanneer we de drukken wegstrepen kunnen we een volumeverandering bij veranderende temperatuur berekenen (volume/temperatuur relaties). Deze laatste optie is zeldzaam. Ongehinderde veranderingen in volume zijn door de zwaartekracht en de beperkte flexibiliteit van de houder niet mogelijk. Onder water zijn we zelden geïnteresseerd in veranderingen van temperatuur.

Het te verwachten gebruik van de wet van Charles heeft dus te maken met een relatie tussen druk en temperatuur in een duikfles. Dat betekent dat we de factor volume uit de formule weg kunnen strepen (het volume van een duikfles kan wel veranderen, maar die verandering is zo gering dat dit voor ons niet meetbaar is).

$$\frac{p_1 \times \cancel{V_1}}{T_1} = \frac{p_2 \times \cancel{V_2}}{T_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Net als bij de wet van Boyle moeten we eerst op zoek gaan naar de ontbrekende factor. De situatie waarin we zowel een druk als een temperatuur weten, is situatie 1 (p_1 en T_1). De situatie waarin de temperatuur of de druk ontbreekt, is situatie 2.

Een 10 liter duikfles wordt gevuld tot een druk van 210 bar. Na het vullen is de temperatuur van de fles 56°Celsius. De duikfles wordt dan meegenomen voor een duik in water van 15°Celsius. Wat zal de druk in de fles zijn wanneer geen lucht uit de fles ontsnapt is?

Ten eerste zijn we niet geïnteresseerd in het volume. Het is een 10 liter duikfles tijdens het vullen en zal ook tijdens de duik nog steeds een 10 liter duikfles zijn. We hebben T_1 (56°Celsius), p_1 (210 bar) en T_2 (15°Celsius). We zoeken dus p_2.

We moeten nu de gezochte factor (p_2) aan de rechter kant van de formule isoleren. Daartoe moeten we T_2 naar links brengen. Dit kan gedaan worden door eerst regel 1 toe te passen (beide kanten met T_2 vermenigvuldigen) en dan de twee T_2 weg te strepen omdat we boven en onder de streep dezelfde waarde vinden (regel 2). In dit geval is het niet nodig om regel 3 toe te passen.

Formule	Regel 1	Regel 2	Nieuwe formule
$\frac{p_1}{T_1} = \frac{\text{gezocht}}{T_2}$	$\frac{p_1 \times T_2}{T_1} = \frac{\text{gezocht} \times T_2}{T_2}$	$\frac{p_1 \times T_2}{T_1} = \frac{\text{gezocht} \times \cancel{T_2}}{\cancel{T_2}}$	$\frac{p_1 \times T_2}{T_1} = \text{gezocht}$

Nu we de formule in de benodigde vorm omgezet hebben, moeten we de temperaturen omrekenen naar Kelvin. Dit doe je door 273 op te tellen bij de temperatuur in Celsius. T_1 is 56°Celsius + 273 = 329K, T_2 is 15°Celsius + 273 = 288K. P_1 is 210 bar. De gegevens kunnen nu ingevuld worden.

$$\frac{p_1 \times T_2}{T_1} = \text{gezocht} \qquad \frac{210 \text{ bar} \times 288 \text{ K}}{329 \text{ K}} = \text{gezocht} \qquad \frac{210 \text{ bar} \times 288 \cancel{\text{K}}}{329 \cancel{\text{K}}} = 183{,}8 \text{ bar}$$

Onze schatting dient te zijn dat de druk bij afnemende temperatuur zal verminderen. Omdat de druk ongeveer 200 bar is, kunnen we ook een redelijk nauwkeurige schatting maken. Daartoe nemen we voor iedere graad temperatuurverschil een drukverlies van 0,6 bar aan. In dit geval is het verlies van temperatuur van 56° naar 15°Celsius. Dat is een verschil van 41°Celsius. Vermenigvuldigd met 0,6 geeft dit aan dat de druk 24,6bar zou moeten verminderen. Onze berekening geeft een drukverschil van 26,2 bar. Het is dus aan te nemen dat de berekening juist is.

Dit is een vuistregel (0,6 bar per graad temperatuurverschil) die alleen gebruikt mag worden wanneer P_1 niet te ver van de 200 bar afwijkt. Bij grote afwijkingen van deze druk, werkt de vuistregel niet. Een voorbeeld: stel dat de fles in het bovenstaande voorbeeld een druk van 10 bar (P_1) had. De berekening met de bovenstaande formule geeft een druk (P_2) van 8,75bar:

$$\frac{10 \text{ bar} \times 288 \cancel{\text{K}}}{329 \cancel{\text{K}}} = 8{,}75 \text{ bar}$$

Bij gebruik van de vuistregel is het drukverlies 24,6 bar. Dit is dus een negatieve druk van min 14,6 bar. Ten eerste is dit extreem ver van het juiste antwoord. Ten tweede kan dit niet (negatieve druk bestaat niet).

Wanneer we op zoek gaan naar een ontbrekende T_2 in plaats van p_2, dan is het niet meer voldoende om regel 1 en 2 toe te passen. In dat geval komt ook regel 3 aan de orde.

Een zojuist gevulde duikfles heeft een temperatuur van 60°Celsius. De druk is 210 bar. In het water (na een poosje) ziet de duiker op de manometer dat de druk nog maar 190 bar is (waarbij geen lucht uit de fles ontsnapt is). Wat is de temperatuur van het water (en dus de fles)?

We hebben T_1 (60°Celsius), p_1 (210 bar) en p_2 (190 bar). De gezochte waarde is T_2. We moeten weer de ontbrekende factor (T_2) rechts van het "is gelijk" teken isoleren. Dit betekent dat p_2 naar links moet. Dit

doen we door regel 1 toe te passen (beide kanten door p_2 delen) en dan de twee p_2, rechts boven en onder de streep, te verwijderen (regel 2). Het probleem is dat de lege plaats (1) nu boven de streep staat. Dat brengt de noodzaak met zich mee om regel 3 toe te passen (de formule omdraaien).

Formule	Regel 1	Regel 2	Regel 3
$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{\text{gezocht}}$	$\frac{p_1}{T_1 \times p_2} = \frac{p_2}{\text{gezocht} \times p_2}$	$\frac{p_1}{T_1 \times p_2} = \frac{\cancel{p_2}}{\text{gezocht} \times \cancel{p_2}}$	$\frac{T_1 \times p_2}{p_1} = \text{gezocht}$

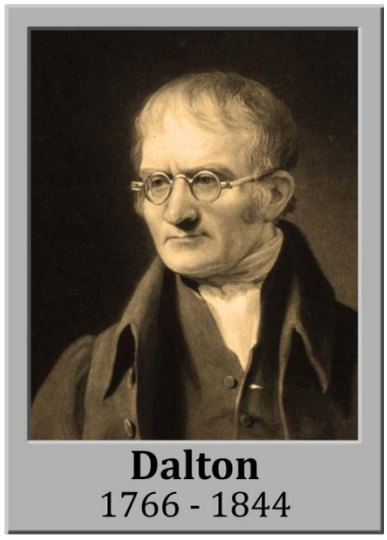
We moeten de temperatuur in °Celsius weer naar Kelvin omrekenen. Voor deze vraag is T_1 60°Celsius + 273 = 333K. P_1 is gegeven als 210 bar en P_2 als 190 bar.

$$\frac{T_1 \times p_2}{p_1} = \text{gezocht} \qquad \frac{333\text{ K} \times 190\text{ bar}}{210\text{ bar}} = \text{gezocht} \qquad \frac{333\text{ K} \times 190\ \cancel{\text{bar}}}{210\ \cancel{\text{bar}}} = 301{,}3\text{ K}$$

Als laatste moeten we de in Kelvin gevonden temperatuur omrekenen naar °Celsius, door er 273 van af te trekken. Een temperatuur van 301,3 Kelvin is dus 28,3°Celsius. Omdat de temperatuur afneemt, zoals we geschat hebben, kunnen we er van uitgaan dat de berekening juist is.

Deze berekeningen met Charles gaan ervanuit dat we met een "ideaal gas" te doen hebben. Dit betekent dat de moleculen in het gas zelf geen ruimte innemen en geen invloed op elkaar uitoefenen. Bij lucht en Nitrox tot een druk van 300 bar kunnen we dit doen, omdat de afwijkingen in de berekening klein zullen zijn. Wanneer we berekeningen doen met mengsels waarin gassen opgenomen zijn die duidelijk verschillen (zoals Helium), dan moeten we ook rekening houden met de ruimte die de moleculen innemen. Dit is echter niet van toepassing op het sportduiken. Wanneer flessen gevuld worden met mengsels die helium bevatten (Trimix), dan kan het nodig zijn nauwkeuriger te rekenen.

Dalton


Dalton
1766 - 1844

Bij de wet van Dalton gaat het om partiële druk. Deze wet postuleert dat de som van de individuele drukken van gassen in een mengsel de totale druk is – of – $p_1 + p_2 + p_3 \ldots\ldots = p_{tot}$

Alle gassen in een mengsel gedragen zich, alsof de andere gassen er niet zijn. Ze oefenen allen voor zich hun druk uit. De totale druk is de som van deze deeldrukken. Lucht bestaat uit 21% zuurstof, 78% stikstof en 1% restgassen. De totale druk aan land is 1 bar. Dat betekent dat de partiële druk van zuurstof 0,21bar is, de partiële druk van stikstof 0,78 bar en de gecombineerde druk van de restgassen 0,01bar. Wanneer we deze individuele drukken bij elkaar optellen, dan komen we weer op de atmosferische druk van 1 bar.

Wanneer een duikfles tot 200 bar met lucht gevuld wordt, dan veranderd de lucht niet. Het aandeel van zuurstof, stikstof en van de restgassen blijft gelijk. Dit betekent dat het percentage van ieder van de gassen een blijvende factor is. 21% van de gassen in het mengsel zal zuurstof zijn. Dit resulteert in een partiële zuurstofdruk, die 21% van 200 bar is. Dat is 42 bar. Voor het doel van berekeningen schrijven we een percentage als decimaal (21% = 0,21). De berekening is dus 0,21 x 200bar = 42bar. Percentages hebben geen eenheid.

Berekeningen met Dalton zijn eenvoudig. Het percentage blijft altijd gelijk en de partiële druk is niets anders dan het percentage (als decimaal) vermenigvuldigd met de totale druk. Wat een beetje aandacht vraagt zijn de uitzonderingen. Soms word je niet naar een percentage gevraagd, maar naar het effect dat

een gas in een bepaalde situatie heeft. In dat geval is de vraag niet wat het percentage is (want dat blijft gelijk), maar wordt je gevraagd naar een “equivalent gas”.

Een “equivalent gas” is vaak een gas op atmosferische druk. We weten bij welk percentage koolmonoxide (een gif) aan land een probleem wordt. Wanneer we willen weten welk percentage op diepte gevaarlijk is, dan moeten we het vergelijken met het bekende probleem aan land. Om dit te doen zou je bijvoorbeeld zeggen: een mengsel met 0,01% van dit gas heeft op 30 meter diepte hetzelfde effect als een mengsel met 0,04% van dat gas aan de oppervlakte.

Om een equivalent gas te vinden kun je een berekening doen die met de wet van Boyle vergelijkbaar is. $\%_1 \times p_1 = \%_2 \times p_2$. Het is niets officieels, maar het werkt. Het maakt niet uit of je het percentage invult als decimaal, of als volledig getal. De druk moet echter wel als absolute druk in bar ingevuld worden.

De regel dat het percentage altijd gelijk blijft, is alleen waar onder voorwaarde dat we met een inert gas te maken hebben (of met een niet-inert gas dat geen reactie aangaat). Wanneer een niet-inert gas reageert, dan hebben we te maken met een uitzondering. Het percentage zal veranderen. Bijvoorbeeld: het percentage van zuurstof in een duikfles blijft niet gelijk wanneer de fles vanbinnen aan het roesten (een vorm van oxidatie) is. Voor het roesten wordt zuurstof uit de lucht gebruikt en zal het zuurstofpercentage in de fles dalen. Dit is de reden waarom we niet duiken met een duikfles die al maanden geleden gevuld is. Het zuurstofgehalte zou te laag kunnen zijn om in je adembehoefte te kunnen voorzien.

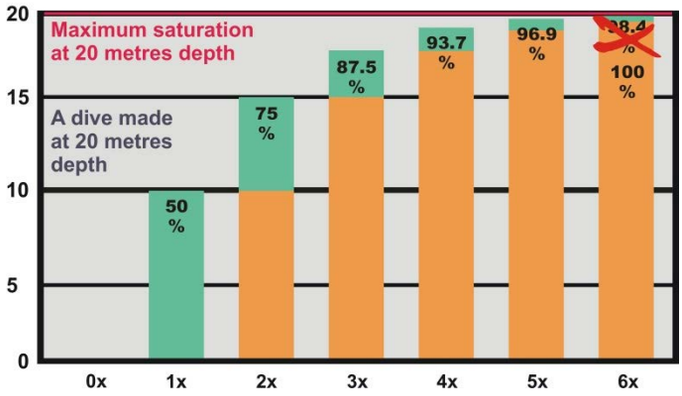
Percentageveranderingen zijn ook bij de ademhaling aan de orde. Wanneer we met lucht duiken, dan ademen we 21% zuurstof. Wanneer we aan de oppervlakte uit een open systeem (automaat) ademen, dan ademen we 17% van de zuurstof ongebruikt weer uit. Hetzelfde is van toepassing op Nitrox. Wanneer we aan de oppervlakte EANx36 ademen, dan ademen we 32% zuurstof ongebruikt weer uit. Een hoger aanbod van zuurstof brengt dus geen grotere consumptie met zich mee. Alleen een toename in lichamelijke activiteit doet dat. Met toenemende diepte neemt het percentage van de gebruikte zuurstof af. Een duiker die lucht ademt (21% zuurstof) op een diepte van 30 meter (4 bar) zal 20% ongebruikte zuurstof uitademen. Bij gelijke inspanning zal de duiker gelijk veel zuurstofmoleculen gebruiken. Op 30 meter diepte is de dichtheid van een gas in de longen 4 keer zo hoog. Dat betekent dat hetzelfde percentage (21%) 4 keer zoveel moleculen bevat. Ook hier gaat het grotere aanbod niet met toegenomen consumptie gepaard. De hoeveelheid zuurstof die ongebruikt wordt uitgeademd, neemt toe naarmate we meer zuurstof inademen (een hoger percentage of een hogere dichtheid). Merk echter op dat de som van de CO_2 en O_2 wel altijd gelijk blijft (voor lucht 21%). De verhouding verandert. We kunnen dus wel zeggen dat het percentage nooit verandert, maar moeten ons goed bewust zijn van de uitzonderingen.

Diepte	O_2 ingeademd	O_2 uitgeademd	CO_2 uitgeademd	O_2 ingeademd	O_2 uitgeademd	CO_2 uitgeademd
Oppervlakte	**21%**	**17%**	**4%**	**36%**	**32%**	**4%**
10 meter	**21%**	**19%**	**2%**	**36%**	**34%**	**2%**
30 meter	**21%**	**20%**	**1%**	**36%**	**35%**	**1%**

Henry

De wet van Henry beschrijft hoe andere stoffen met gassen verzadigd worden. Het is voornamelijk van toepassing op decompressietheorie en wordt in dat hoofdstuk in detail behandeld. Volgens Henry nemen vloeistoffen gassen op, totdat de spanning van dat gas in de vloeistof in evenwicht is met de partiële druk van dat gas in het mengsel dat met de vloeistof in contact staat. Opname van gassen is een langzaam proces. De snelheid verschilt, afhankelijk van de materie die het gas opneemt. Algemeen kunnen we zeggen, dat een drukverschil volgens de wet van Henry in een periode gehalveerd wordt. Het nieuwe drukverschil (de helft van wat het voorheen was), wordt wederom gehalveerd. Dat duurt dan net zolang als de eerste halvering. Wanneer we deze procedure 6 keer herhalen, dan zijn we zo dicht bij volledige verzadiging, dat we dit als evenwicht zien (de spanning van het gas in de vloeistof is in evenwicht met de partiële druk in het gas dat met die vloeistof in contact staat). De duur van een periode hangt af van de eigenschappen van de stof die verzadigd wordt.

We gaan hier niet verder op de wet van Henry in, omdat dit in een later hoofdstuk zeer uitvoerig aan de orde komt. Voor nu is het belangrijk dat je je realiseert dat deze theorie niet alleen op stikstof van toepassing is, maar op alle gassen. In het hoofdstuk fysiologie zien we bijvoorbeeld dat de grotere opname van zuurstof in het plasma (door toenemende druk) iets is waar rekening mee gehouden moet worden.



Fysiologie

Dingen veranderen tijdens het duiken. Veranderingen in druk en temperatuur, het feit dat je uit een duikfles ademt in plaats van de vrije lucht, het wegvallen van zwaartekracht en andere factoren oefenen allemaal een invloed uit op je lichaam. Fysiologie is de aan het duiken gerelateerde theorie die verklaart wat er tijdens een duik in je lichaam gebeurt. Het helpt je te begrijpen wat je moet doen en wat je moet laten, wanneer je onder water bent.

Fouten in examens over fysiologie hebben twee oorzaken. Sommigen maken fouten omdat ze de terminologie door elkaar halen, terwijl anderen niet goed begrijpen wat zich in het lichaam afspeelt. Om fysiologie op het vereiste niveau te beheersen moet je je dus op twee aspecten concentreren. Dat zijn het begrijpen van de processen die zich in het lichaam afspelen én het gebruik van de juiste woorden om deze processen te beschrijven.

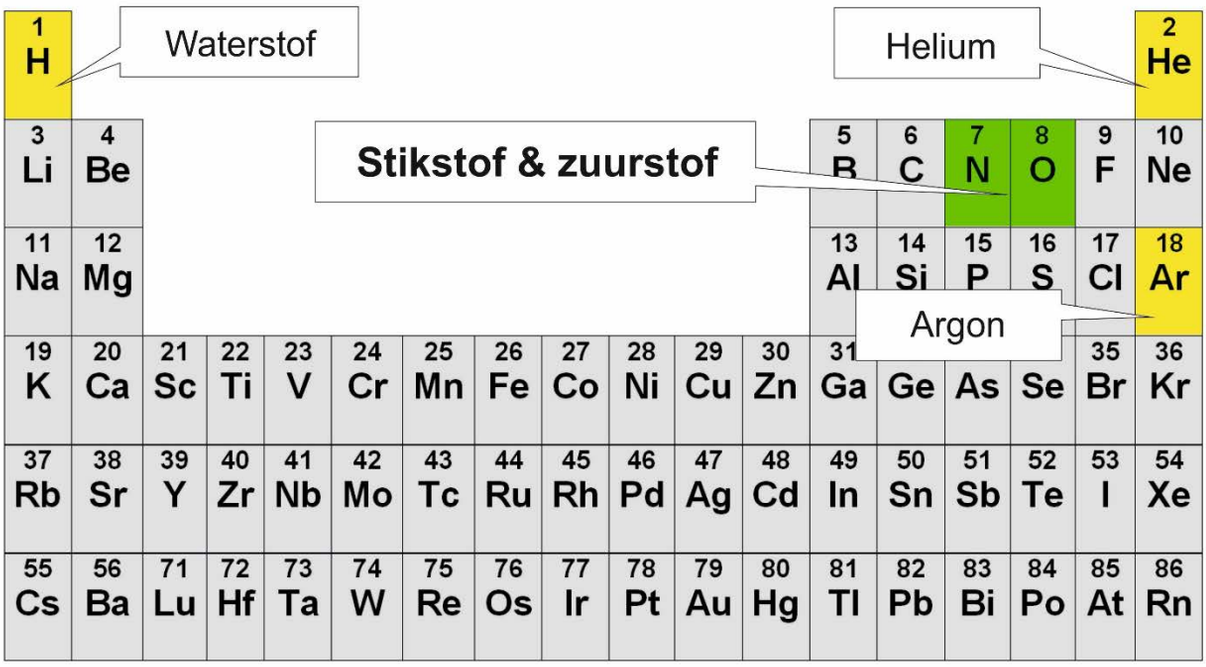
Dit hoofdstuk is geschreven om aan beide aspecten aandacht te geven. Het is niet het begin van je opleiding in fysiologie voor het duiken. De training op dit gebied is al begonnen in je eerste duikcursus en in alle verdere opleidingen is fysiologie weer aan de orde geweest. Soms voor algemene aan het duiken gerelateerde aspecten en in andere gevallen in samenhang met een speciale activiteit.

Dit hoofdstuk beperkt zich tot de algemene fysiologie voor het duiken. Onderwerpen die in voorgaande cursussen geleerd zijn worden niet diepgaand herhaald. Voor het ontwikkelen van een behorend niveau van kennis, is het aan te bevelen om de boeken uit voorgaande cursussen nogmaals door te nemen. Dit hoofdstuk is beperkt tot het sportduiken. We verwijzen af en toe naar andere ademgassen dan lucht of Nitrox, maar dat is niet gedaan met de intentie om volledige informatie over het gebruik van andere mengsels te geven.

Zoals geschilderd door Rembrandt heeft fysiologie een basis in vele eeuwen onderzoek

Stikstof (N_2) & zuurstof (O_2)

Wanneer we ons blootstellen aan drukveranderingen en/of wanneer we de percentages van gassen in ons ademmengsel veranderen, dan kunnen we daardoor van één van een gas teveel of te weinig binnenkrijgen. Wanneer een gas problemen kan geven wanneer we er te weinig van hebben en ook wanneer we er teveel van hebben, dan gebruiken we vaak Latijnse namen om de gevolgen te beschrijven. In dat geval zal een woord voor teveel met "hyper" beginnen en het woord voor te weinig met "hypo". In sommige gevallen willen we ook aangeven, dat een gas volledig afwezig is. In dat geval begint het woord met "ano". Voor zuurstof: hyperoxie (teveel zuurstof), hypoxie (te weinig zuurstof) en anoxie (helemaal geen zuurstof). Wanneer een gas slechts in één richting problemen geeft, dan gebruiken we geen Latijnse namen. We spreken dan bijvoorbeeld van "aan stikstof gerelateerde problemen". Stikstof veroorzaakt alleen problemen wanneer je er teveel van hebt opgenomen.



De elementaire gassen waar we het meest in geïnteresseerd zijn stikstof en zuurstof. Voor "technical divers" speelt ook helium een rol en in zeldzame gevallen waterstof voor beroepsduikers. Voor duiken in koud water wordt soms argon gebruikt, maar alleen om het droogpak te vullen en niet om te ademen. Helium en waterstof zijn in de bovenste rij te vinden en zijn dus zeer lichte gassen. Stikstof en zuurstof staan een rij lager en naast elkaar. Dit betekent dat het verschil in gewicht tussen zuurstof- en stikstofmoleculen zeer gering is.

Zuurstof is onze grootste zorg. Zonder zuurstof kunnen we niet leven. We kunnen relatief grote verschillen in partiële zuurstofdruk verdragen, maar er zijn grenzen. Wanneer je iemand bent die op zeeniveau leeft, dan veroorzaken partiële zuurstofdrukken van 0,16 bar (de partiële zuurstofdruk op 2.400 meter hoogte) tot 1,6 bar geen problemen. Buiten deze grenzen kan zuurstof problemen veroorzaken. Onder de 0,16 bar heet je toestand hypoxie. Boven 1,6 bar hyperoxie. Beide kunnen fataal zijn. Dat is één van de redenen waarom voor het duiken met andere mengsels dan lucht een omvattende opleiding nodig is. Het is gebruikelijk om tijdens de duikplanning een marge aan te houden. Daartoe worden duiken zo gepland dat de partiële zuurstofdruk niet onder de 0,18 bar en niet boven de 1,4 bar komt.

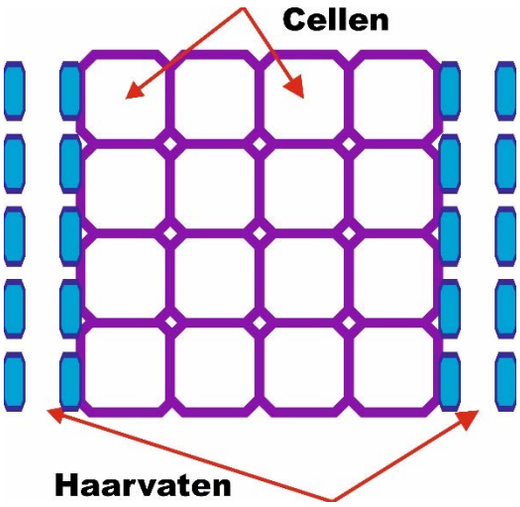
Hyperoxie is voornamelijk gerelateerd aan het duiken met Nitrox. Het risico dat de maximale partiële zuurstofdruk overschreden wordt, is groter naarmate het zuurstofgehalte in het ademmengsel toe-

neemt. Theoretisch is hyperoxie ook bij het duiken met lucht mogelijk, maar pas op een diepte van 66 meter (1,6 bar gedeeld door 0,21 = 7,6bar). Dat is veel dieper dan de grens voor het sportduiken. Door druk en de chemische toestand in je lichaam, kunnen vrije radicalen ontstaan wanneer de zuurstofdruk hoger dan 1,6bar is. Deze radicalen storen de communicatie via je zenuwen. Het gevolg zijn heftige spierstuipen die vergelijkbaar zijn met een epileptische aanval. Deze heten convulsies.

Convulsies maken het voor een duiker onmogelijk controle over spierbeweging te behouden. Dat resulteert waarschijnlijk in het verlies van de automaat. De duiker is niet in staat zijn de gesp van een loodgordel of de knop van een inflator te bedienen. Een duiker met convulsies zal verdrinken wanneer hij niet door een ander gered wordt. Redding is in dit geval een opstijging naar de diepte waar zuurstof nog geen probleem was. In Nitrox cursussen krijgen problemen met zuurstof dus veel aandacht. Een ander probleem met zuurstof is de duur van blootstelling aan hogere concentraties. Wanneer we zuurstof op een hogere druk ademen, dan gebeurt het omgekeerde van acclimatisatie voor grotere hoogte (zoals atleten en bergbeklimmers doen). Door acclimatisatie wordt het lichaam voorbereid op een omgeving met minder zuurstof. Acclimatisatie maakt het transport van zuurstof efficiënter. Wanneer je hogere concentraties ademt, dan ziet het lichaam geen noodzaak om de normale capaciteit voor transport te handhaven. Met de tijd (meerdere uren) zal de transportcapaciteit tot onder het normale niveau zinken. Eventuele problemen ontstaan dan wanneer je weer atmosferische druk ademt. Speciale tabellen en duikcomputers geven daarom aanbevelingen om de blootstelling aan zuurstof binnen grenzen houden.

Hypoxie is een tekort aan zuurstof. De cellen in je lichaam hebben zuurstof nodig om te functioneren en om in leven te blijven. Zenuwcellen zijn erg gevoelig voor een gebrek aan zuurstof. Daar kan schade al na 4 tot 6 minuten zonder zuurstof optreden. Vrijwel alle aan het duiken gerelateerde medische problemen brengen een bepaald niveau van hypoxie met zich mee. De mate van de hypoxie hangt af van de aard van het probleem. Het kan het gehele lichaam betreffen, of het gebrek aan zuurstof kan lokaal zijn. Wanneer het gehele lichaam betroffen is, dan krijgt ook de huid te weinig zuurstof. Dit resulteert in tekens die gemakkelijk te herkennen zijn, zoals een blauwe of grijze huidskleur. In dat geval kun je gemakkelijk zien dat het slecht gaat met de betroffen persoon en dat het nodig is om eerste-hulp te geven. Zo'n situatie kan bijvoorbeeld resulteren uit bijna verdrinking of een hartstilstand.

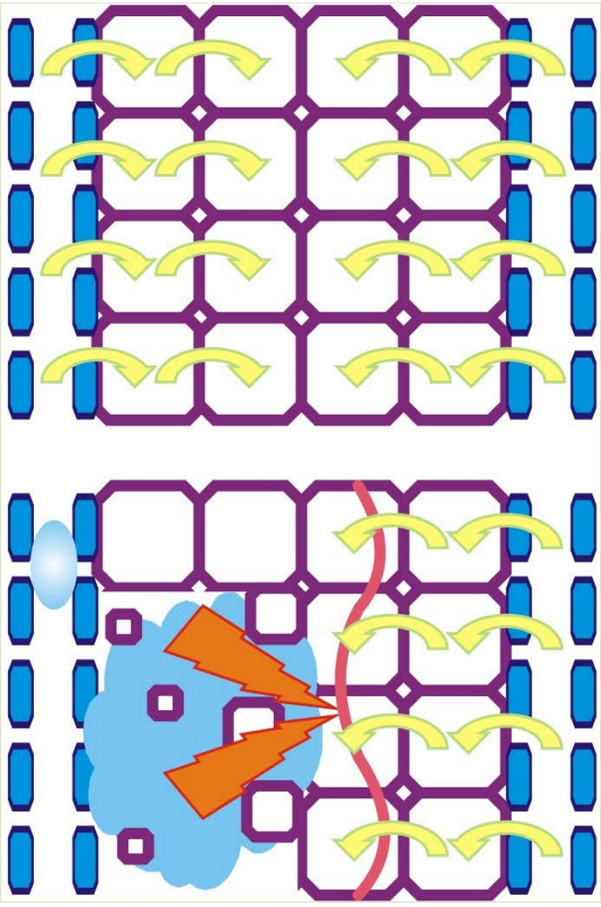
Het herkennen van lokale hypoxie is moeilijker. De betroffen persoon kan er op het eerste gezicht gezond uitzien. De huid is doorbloed, waardoor je niet meteen aan de huid ziet dat de persoon een medisch probleem heeft. Je kunt wel andere symptomen opmerken, zoals mank lopen, lokale pijn, problemen zich te concentreren en andere. Wanneer je weet waarop je moet letten, dan kun je milde tekens van hypoxie opmerken. Daarvoor is het nodig dat je begrijpt wat hypoxie in het lichaam doet en wat je ermee bereikt wanneer je zuurstof geeft. We zullen dit in detail doornemen.



De tekening is een vereenvoudigde illustratie van wat weefsel en twee haarvaten. Normaal is de afstand tussen twee haarvaten groter dan 4 celrijen, maar ter illustratie is deze weergave voldoende. Je hebt zeer veel haarvaten. Er zijn Weliswaar meer dan vier celrijen tussen twee haarvaten, maar de afstand tussen twee is toch heel klein. Er zijn drie dingen die je over haarvaten dient te weten:

- Je hebt er precies genoeg. Wanneer je naar een omgeving met minder zuurstof gaat (bergen), dan neemt het aantal actieve haarvaten in je lichaam toe. Wanneer je naar een omgeving met meer zuurstof gaat dan neemt het aantal af. Wanneer je dikker wordt dan neemt niet alleen de hoeveelheid vet toe, maar worden ook haarvaten actief om het nieuwe vet met zuurstof te verzorgen.

- Haarvaten zijn semipermeabel. Dat betekent dat ze zuurstof, stikstof, zout, suiker, water, et cetera doorlaten. De haarvaten zijn ervoor bedoeld om een uitwisseling van verschillende stoffen tussen het bloed en de weefsels mogelijk te maken.
- De wand van haarvaten bestaat uit levende cellen. Het haarvat heeft dus ook zelf zuurstof nodig om in leven te blijven.



Op land adem je 21% zuurstof in. Je leeft in een omgeving met lucht en je lichaam (en dus de hoeveelheid haarvaten) is daaraan aangepast. In de tekening verzorgt ieder van de haarvaten de naastliggende twee rijen cellen met zuurstof.

Wanneer de capaciteit van een haarvat voldoende zou zijn om drie celrijen met zuurstof te verzorgen, dan zou het volgende haarvat verder weg zijn. Er is geen membraan tussen de celrijen, maar wanneer een haarvat niet meer functioneert, dan hebben de naastliggende haarvaten niet voldoende capaciteit om de taak van het betroffen haarvat over te nemen. Er kan dan een lokale hypoxie ontstaan.

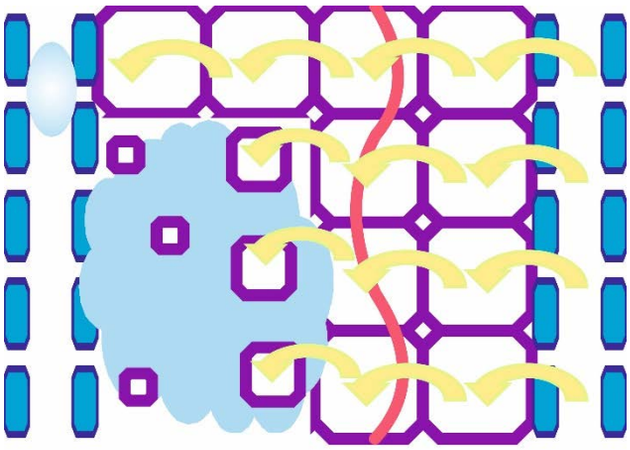
De meeste massa van het lichaam is water (vloeistof). Een groot deel van deze vloeistof bevindt zich in de cellen. Cellen behouden hun stabiliteit door volledig gevuld te zijn en onder spanning te staan. Deze spanning wordt bewerkt door het zoutgehalte in de cel hoger te houden dan dat in de omringende "vrije" vloeistof. De vloeistoffen proberen een evenwicht (equilibrium) in het zoutgehalte te creëren door naar de omgeving met het hogere zoutgehalte te vloeien. Door de beperkte elasticiteit van de celwand kan dit evenwicht nooit bereikt worden. De doorlopende poging om vloeistof toe te voegen, geeft de cel voldoende spanning om stabiel te blijven.

Cellen die op een onnatuurlijke manier sterven (zoals door hypoxie) geven vloeistof af. De vrijgekomen vloeistof heeft een hoger zoutgehalte dan de vrije vloeistof in het lichaam. Er is nu geen celwand meer die een beperkende factor is voor het toestromen van vloeistof (om een evenwicht in het zoutgehalte te bewerken). De toestromende vloeistof veroorzaakt een zwelling of oedeem. Deze zwelling kan symptomen veroorzaken door zenuwen te irriteren. Bijvoorbeeld pijn, jeuk of vermoeidheid. Wanneer het haarvat een zenuw met zuurstof verzorgde, dan kan deze zenuw sterven. Dat veroorzaakt neurologische schade. Symptomen van neurologische schade zijn bijvoorbeeld verlamming of het verlies van het vermogen om te lopen, spreken of zien.

De zwelling kan druk uitoefenen op een volgend haarvat. Hierdoor kan een volgend haarvat geblokkeerd raken (haarvaten hebben een diameter die net groot genoeg is om rode bloedlichaampjes één voor één door te laten. Wanneer het haarvat platgedrukt wordt dan zullen rode bloedlichaampjes het haarvat blokkeren). Hierdoor ontstaat een sneeuwbaleffect. De zwelling wordt groter. Er zijn vier medische problemen die dezelfde symptomen veroorzaken. De oorzaak verschilt, maar het verdere verloop van de zwelling is gelijk.

- Stikstofbelletjes bij type II decompressieziekte.
- Luchtbelletjes bij een arteriële gasembolie (AGE).

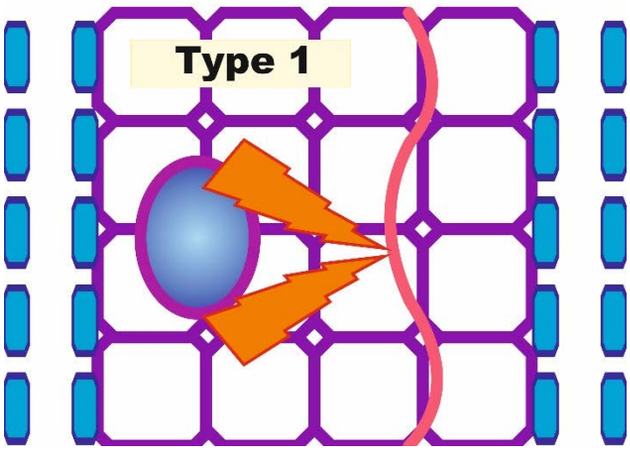
- Gestold bloed in een trombose.
- Een gesprongen bloedvat bij een beroerte (of een trombose in een slagader naar de hersenen).



Bij ademen 100% zuurstof

De afstand tussen twee haarvaten is gebaseerd op 21% zuurstof. Wanneer we 100% zuurstof geven, dan zal ieder haarvat meer zuurstof transporteren (echter niet 5 keer zoveel, vanwege de beperkte transportcapaciteit van de rode bloedlichaampjes). Zo kan meer weefsel met zuurstof verzorgd worden. Een naastgelegen haarvat neemt de taak van een geblokkeerd haarvat over. Dit brengt zuurstof naar de geïsoleerde cellen. Wanneer deze nog niet dood zijn, dan kan de zuurstof ze helpen te overleven.

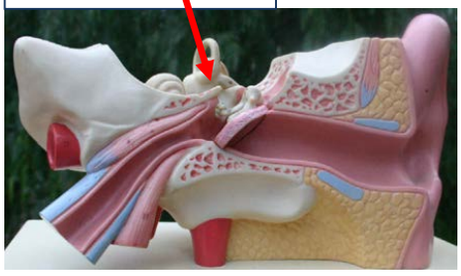
Een zwelling is het gevolg van gestorven cellen. Zuurstof kan de gestorven cellen niet tot leven wekken. Levende cellen kunnen dankzij de extra zuurstof echter in leven blijven. De zwelling ontwikkelt zich niet verder. Het sneeuwbaleffect is gestopt. Dit verklaart de eerste twee voordelen van zuurstof. Hypoxie wordt verholpen en een zwelling wordt gestopt op het niveau tot waar het zich op dat moment ontwikkeld had.



Er is een ander soort decompressieziekte, waarbij de bellen zich in het weefsel zelf vormen en niet in de bloedsomloop. De bloedstroom wordt dus niet geblokkeerd. Daardoor is de toevoer van zuurstof niet in gevaar. De cellen zullen niet door gebrek aan zuurstof sterven. Dit wordt type I decompressieziekte genoemd.

De symptomen worden veroorzaakt doordat zenuwen geïrriteerd worden door de druk van de bel. Wanneer de bel weg is, kunnen ook de symptomen verdwijnen. Er is geen neurologische schade en de kansen op volledige genezing zijn goed.

Een bel in het binnenoor

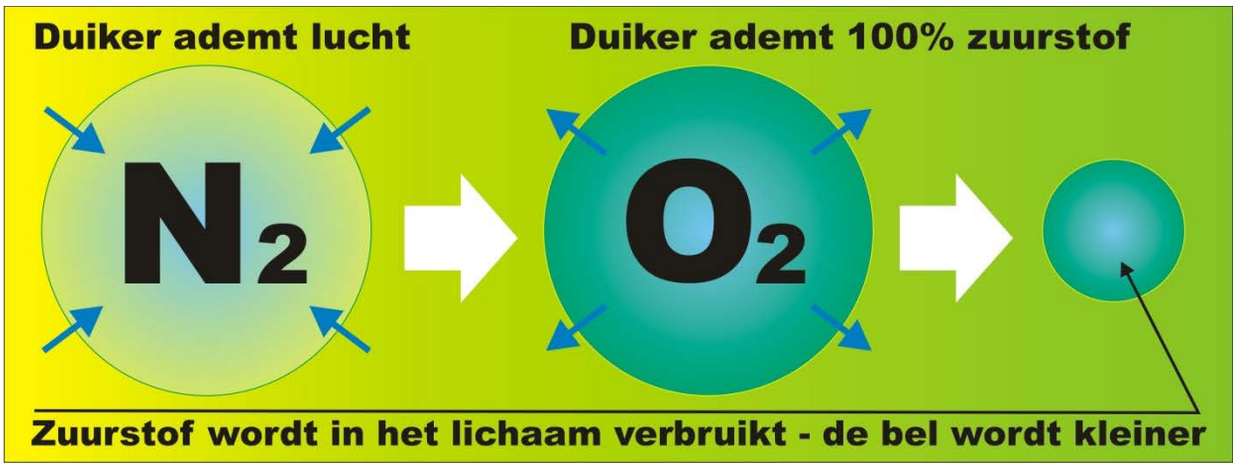


De symptomen kunnen bestaan uit pijn in de ledematen, irritatie, jeuk en andere. Er is in de meeste gevallen geen neurologische schade. Dus ook geen neurologische symptomen, zoals verlamming of problemen met het zien, praten en lopen. De patiënt verliest over het algemeen niet het bewustzijn en is alert. Er zijn echter uitzonderingen. Wanneer de bel zich in de vloeistof in het binnenoor vormt, dan kan het evenwichtsorgaan geïrriteerd worden. Dat brengt duizeligheid met zich mee. Het kan zijn dat de patiënt bij iedere hoofdbeweging moet overgeven. In dit geval is er geen neurologische schade, maar de symptomen kunnen verward worden met die van een neurologisch probleem. Dit is een veel voorkomende vorm van decompressieziekte.

Een andere uitzondering is een bel in het weefsel van de wervelkolom. Het weefsel in de wervelkolom is omringd door bot. Er is geen plaats voor een bel. Wanneer zich een bel vormt, dan zal deze weefsel en haarvaten aan de kant drukken. Vanwege het bot kunnen deze echter niet ontwijken. De druk van de bel zal de haarvaten daardoor platdrukken. Dat belemmert de bloedsomloop. In dit geval is er risico op

neurologische schade. De symptomen zijn vergelijkbaar met een hernia en kunnen in een later stadium verlamming onder de betroffen plaats veroorzaken. Eerst kan de duiker mank lopen of de controle over de benen verliezen. Er kunnen problemen met het urineren of een tintelend gevoel in de benen zijn. In dit geval kan een spoedbehandeling in een recompressiekamer noodzakelijk zijn. Bij de recompressie wordt de bel onmiddellijk kleiner. Dat kan de weg weer vrijmaken voor circulatie. De nieuwe aanvoer van zuurstof zou dan neurologische schade kunnen voorkomen of beperken.

Bij decompressieziekte heb je stikstofbellen en bij een embolie luchtbellen. In beide gevallen bestaat de bel voor het grootste deel uit stikstof. Stikstof is een inert gas. Wanneer we lucht ademen, dan zal de bel omringd worden door ongeveer 80% stikstof. Stikstof wordt in het lichaam niet gebruikt en de bel zal dus niet kleiner worden.



Wanneer 100% zuurstof geademd wordt, dan zal de bel na verloop van tijd door zuurstof omringd zijn. De bel zal dan zuurstof opnemen en stikstof afgeven om een evenwicht met de nieuwe omgeving te bewerken. Na verloop van tijd wordt de stikstofbel een zuurstofbel. Zuurstof is een gas dat in het lichaam verbruikt wordt. De levende cellen in de omgeving van de bel verbruiken doorlopend zuurstof. Er is dus altijd een gebrek aan zuurstof in de weefsels in de omgeving van de bel.

De bel zal in deze ontbrekende zuurstof voorzien. Door het afgeven van zuurstof aan het omringende weefsel zal die kleiner worden. Uiteindelijk is de bel volledig verdwenen. De tijd die verstrijkt voordat de bel weg is, hangt af van de snelheid waarmee de omringende cellen zuurstof verbruiken. Wanneer er geen neurologische schade is, dan kunnen de symptomen tegelijk met de bel verdwijnen.

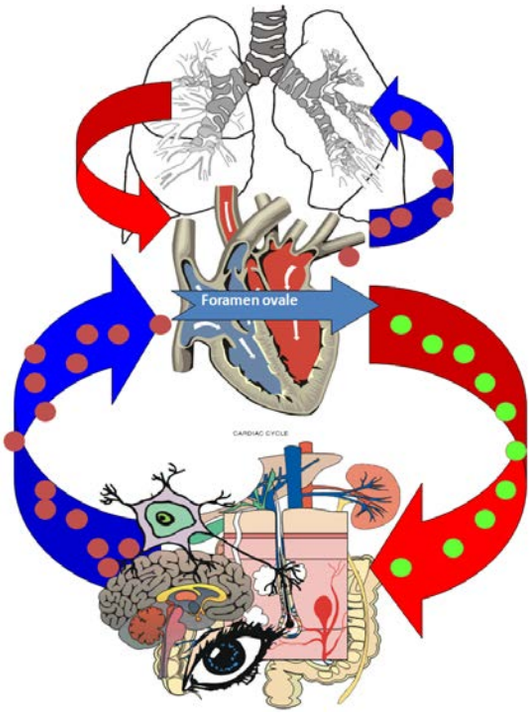
Voor een duiker is het dus belangrijk dat het ademgas zo min mogelijk stikstof bevat. Voor patiënten met “normale” medische problemen is dit minder belangrijk. We moeten daarom kiezen voor zuurstofuitrusting die het hoogst mogelijke zuurstofpercentage in de longen van de patiënt brengt. Het ontwerp van “normale” uitrusting voor het geven van zuurstof is niet altijd afgestemd op de behoeften van duikers. Het geeft wel de voordelen van een hoger zuurstofgehalte, maar de afwezigheid van stikstof in het ademgas is niet voldoende zeker gesteld. Cursussen in eerste hulp met zuurstof gaan gedetailleerd in op de uitrusting voor het geven van zuurstof.

In het deel over hypoxie is al veel uitgelegd over problemen die door stikstof ontstaan. De bellen die door een overschot aan stikstof ontstaan veroorzaken hypoxie. Het is niet altijd duidelijk of je te doen hebt met decompressieziekte of een overdrukverwonding aan de longen. Dat is de reden waarom (voor het doel van eerste-hulp) de twee aandoeningen vaak met dezelfde naam aangeduid worden – **decompressie-aandoening**.

Er zijn drie soorten decompressieziekte. Voor het doel van eerstehulp maakt het verschil weinig uit. De hulp voor alle decompressieaandoeningen is gelijk. Ook omdat een duiker meer dan één soort tegelijk kan hebben. Type I resulteert meestal uit een lange blootstelling aan stikstof. Het wordt ook wel mechanische decompressieziekte genoemd. In dit geval vormen de bellen zich in het lichaamsweefsel en oefenen druk op zenuwen uit. De bellen blokkeren de bloedstroom niet, dus de weefsels krijgen zuurstof. Er is geen hypoxie en geen neurologische schade. Symptomen zijn bijvoorbeeld pijn of jeuk.

Bij decompressieziekte type II gaat het om bellen in de bloedstroom. Dit is ernstiger omdat, net als bij AGE, een beroerte en trombose, neurologische schade kan ontstaan. Zenuwen sterven door gebrek aan zuurstof. Neurologische symptomen kunnen bestaan uit gevoelloosheid, problemen bij het zien, horen of spreken, verlamming en andere. In tegenstelling tot type I zijn de kansen op volledig herstel niet goed. Een slachtoffer met type II heeft vaak onherstelbare schade opgelopen en zal na behandeling waarschijnlijk met een beperking van de levenskwaliteit om moeten gaan.

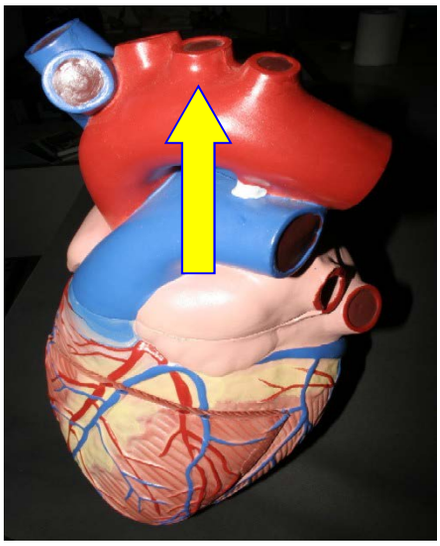
Schade die resulteert uit decompressieziekte, maar die geen onmiddellijke symptomen met zich meebrengt wordt soms type III genoemd. In dit geval zijn er wel bellen in het lichaam, maar deze irriteren geen zenuwen en blokkeren de bloedstroom niet. Er is geen onmiddellijke medische indicatie dat er een probleem is. Op lange termijn kan type III echter wel negatieve gevolgen hebben. Een typisch voorbeeld is necrose. De wervelkolom en gewrichten worden met de tijd slechter. Wanneer bellen geen symptomen veroorzaken, dan spreken we van stille bellen.



Theoretisch gezien kan type II helemaal niet gebeuren. Stikstof wordt door de weefsels afgegeven en wordt dus via de aders naar de long getransporteerd, waar de stikstof aan de lucht afgegeven wordt. De aders beginnen met een kleine diameter, maar op weg naar het hart wordt de diameter steeds groter. De bellen kunnen dus zonder problemen passeren. Ze blokkeren de circulatie niet. We gaan ervanuit dat de belangrijkste reden waarom bellen in de slagaders terecht kunnen komen (de slagaders nemen op de weg van het hart naar de weefsels in diameter af) het Foramen ovale is. Deze opening tussen de twee helften van het hart kan bellen toestaan met het bloed van de aders direct naar de slagaders te stromen.

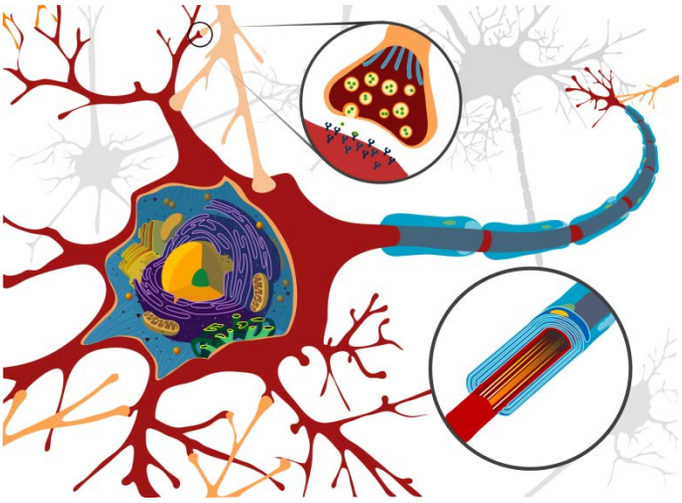
Voor je geboorte staat het Foramen ovale open om een gelijkmatige verdeling van zuurstof in het lichaam toe te staan. Het Foramen ovale blijft open door de verhouding in bloeddruk (een hogere bloeddruk in de kleine bloedsomloop dan in de grote bloedsomloop). Kort na de geboorte verandert de verhouding in bloeddruk. Door het uitzetten van de longen daalt de bloeddruk in de kleine bloedsomloop, terwijl de druk in de grote bloedsomloop door de zwaartekracht stijgt. De nu hogere bloeddruk in de grote bloedsomloop sluit het Foramen ovale en de distributie van bloed en zuurstof is aangepast aan de nieuwe situatie. Dat is het gebruik van de longen voor de opname van zuurstof. Wanneer de bloeddruk in de kleine bloedsomloop echter hoger wordt dan in de grote bloedsomloop, dan kan het Foramen ovale weer openen. Dit kan gebeuren wanneer veel bloedvaten in de longen door bellen geblokkeerd zijn, wanneer je hoest, wanneer je de adem

met volle longen inhoud, wanneer je met ingehouden adem een zware last tilt, et cetera. Bij sommige mensen sluit het Foramen ovale nooit volledig.



Wanneer het bloed met bellen uit de aders in de slagaders terecht komt, dan zijn de consequenties dezelfde als bij een arteriele gasembolie (AGE). Een deel van het lichaam krijgt geen zuurstof meer. Door gestorven zenuwen ontstaat neurologische schade. De kans dat de hersenen betroffen zijn is groot. Dit omdat de grote slagader die het hart verlaat meteen gedeeld wordt om verschillende delen van het lichaam met bloed te verzorgen. De bellen nemen waarschijnlijk de weg naar boven.

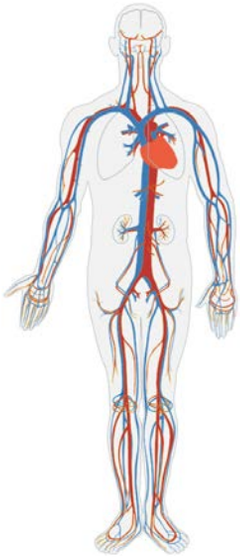
Een ander probleem met stikstof is **stikstofnarcose**. Het grotere aantal stikstofmoleculen in het lichaam stoort zenuwimpulsen. Bij het ademen van lucht gaan we uit van problemen vanaf een diepte van 30 meter, maar er zijn specialisten die een geringere diepte propageren. De symptomen van narcose bestaan uit afwezig gedrag, moeite zich te concentreren, slechte coördinatie, niet in staat zijn eenvoudige taken uit te voeren en emotionele veranderingen zoals euforie of een hoger niveau van stress. De symptomen verdwijnen bij het opstijgen.



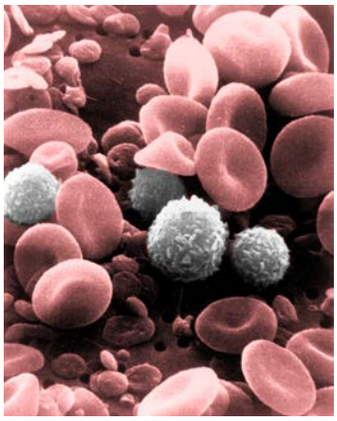
De problemen die aan stikstof gerelateerd zijn kunnen beperkt worden door een deel van de stikstof in het ademmengsel te vervangen door een ander gas. Zuurstof (zoals dat bij Nitrox gedaan wordt) is daarvoor niet geschikt. De narcotiserende eigenschappen van beide gassen zijn vrijwel gelijk. De enige optie om narcose te beperken is het gebruik van lichtere gassen. Dat brengt echter nieuwe problemen met zich mee. Wanneer helium als vervanging voor een deel van de stikstof gekozen wordt, dan ontstaat een probleem met warmteverlies. Een duiker die een mengsel met helium ademt koelt sneller af dan iemand die lucht ademt. Op grote diepte begint de duiker door HPNS te trillen (high pressure nervous syndrome). Wanneer we een deel van de stikstof met waterstof vervangen, dan worden de problemen nog groter. Een mengsel van waterstof en zuurstof is een “explosief”. De procedures die noodzakelijk zijn om een ontbranding te voorkomen zijn enorm. Het aantal experimentele duiken dat met mengsels met waterstof gedaan is, is daarom zeer laag.

Koolmonoxide (CO) & kooldioxide (CO_2)

Zuurstof is nodig om te leven. Het wordt in het lichaam gebruikt om energie te creëren. Het afvalproduct dat daarbij ontstaat is kooldioxide. Het proces waarin zuurstof gebruikt wordt, is deel van het metabolisme. Zuurstof wordt opgenomen in de longen en via de longaders naar het hart getransporteerd. Van daar wordt het in de slagaders gepompt wordt. Het komt dan aan bij de haarvaten waar de zuurstof aan de weefsels afgegeven wordt en het afvalproduct kooldioxide opgenomen wordt. Via de aders gaat de kooldioxide terug naar het hart, waar het bloed in de longslagaders gepompt wordt. In de longen wordt het kooldioxide dan weer afgegeven. In medische tekeningen zijn de slagaders rood en de aders blauw gekleurd.



De grote hoeveelheid zuurstof, die in de weefsels verbruikt wordt, kan niet in oplossing in het bloedplasma getransporteerd worden. Op basis van de wet van Henry zal slechts 21 procent van de gassen die in het plasma opgelost worden zuurstof zijn (wanneer we lucht ademen). Met deze beperkte capaciteit is er niet genoeg plasma om in de behoefte aan transport te voorzien (het is slechts voldoende voor 2% van het benodigde zuurstoftransport). Rode bloedcellen zijn de oplossing. Rode bloedcellen bevatten hemoglobine dat zich tijdelijk aan zuurstof bindt door in een omkeerbare vorm te "roesten". De zuurstof wordt zo als vaste stof getransporteerd. De gaswetten zijn hier dus niet van toepassing. Wanneer het bloed ergens komt waar een gebrek aan zuurstof is, dan wordt de "roest" ongedaan gemaakt en is de zuurstof beschikbaar voor de weefsels. "Verroest" hemoglobine is helderrood van kleur en hemoglobine zonder zuurstof is donkerrood. Dit verklaart het verschil in kleur tussen bloed in aders (donkerrood) en in slagaders (helderrood).



De witte bolletjes in de foto zijn witte bloedcellen, de afgeplatte rode bloedcellen.

Wanneer het plasma niet genoeg zuurstof kan bevatten om in de behoefte te voorzien, dan is het logisch dat het plasma ook de in het lichaam geproduceerde kooldioxide niet op een effectieve manier kan transporteren. Wanneer CO_2 het afvalproduct is van het metabolisme, dan moet het een verbinding zijn met een zuurstofmolecule. Er ontstaat dus een CO_2 voor iedere verbruikte O_2. Om het transport mogelijk te maken, zal kooldioxide in het bloed verschillende verbindingen aangaan. Hemoglobine transporteert niet alleen zuurstof, maar ook kooldioxide. Een deel bindt zich met een watermolecule (H_2O) en wordt koolzuur. Dat is H_2CO_3. Hetzelfde zuur dat de belletjes in frisdranken doet ontsnappen. Dit veranderd de samenstelling van het bloed. Het zijn deze veranderingen die de ademimpuls geeft. De drang om te ademen komt dus niet van te weinig zuurstof, maar van teveel CO_2.

Het afvalproduct CO_2 heeft dus de functie om je ademhaling te controleren. Te veel kooldioxide is een probleem, omdat de ademimpuls dan te snel op elkaar volgen. Te weinig is een probleem, omdat de ademimpuls dan te lang uitblijft om een afdoende toevoer van zuurstof te zeker te stellen. Teveel heet hypercapnie en te weinig (je hebt het al geraden) hypocapnie.

Bij milde hypercapnie krijg je vaker een ademimpuls dan nodig is om voldoende zuurstof op te nemen. In extreme gevallen verlies je het bewustzijn en zou je dus kunnen verdrinken. De symptomen ontwikkelen zich van desoriëntatie, paniek, hyperventilatie, stuiptrekkingen, bewusteloosheid tot de dood. Extreme gevallen komen niet voor bij het duiken met een open systeem. Deze zijn echter mogelijk bij het duiken met een rebreather wanneer de ventielen in het ademcircuit lekken, de ademkalk niet (meer) werkt of er te weinig ademkalk in de houder zit ("channeling").

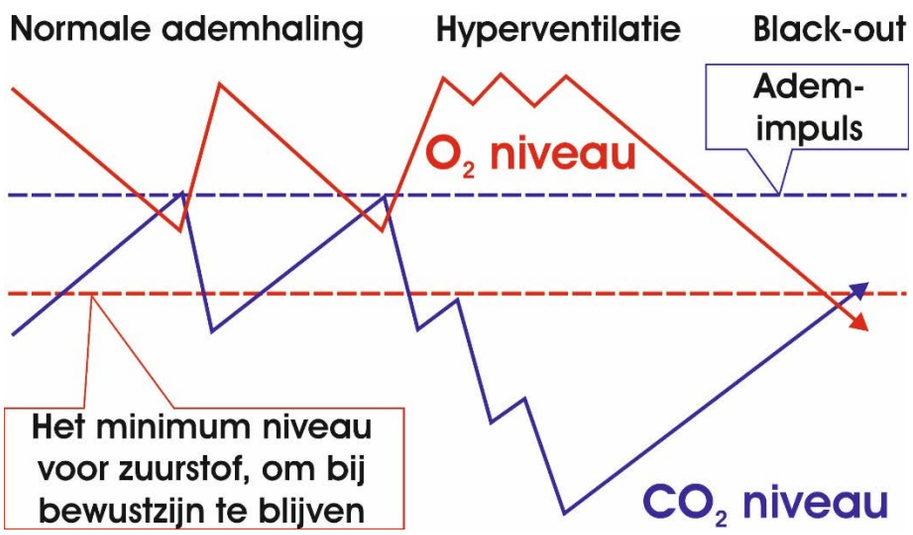
Milde hypercapnie is niet onmiddellijk gevaarlijk, maar dient toch voorkomen te worden. Het beperkt je comfort (hartslag, bloeddruk en ademritme gaan omhoog en je raakt buiten adem) en je luchtverbruik is groter dan nodig. Milde hypercapnie kan door diverse oorzaken ontstaan. Deze vallen allen in één van drie categorieën: je ademt teveel CO_2 in, je houdt teveel CO_2 vast of je produceert teveel CO_2.

De weg die fris ademgas moet afleggen om bij het actieve deel van je longen te komen (longblaasjes) heet dode ruimte. Wanneer we uitademen blijft een deel van het uitgeademde gas (met CO_2) achter in de dode ruimte. Wanneer je inademt komt dus eerst deze al verbruikte lucht terug in de longen, voordat vers ademgas bij de longblaasjes aankomt. Wanneer de dode luchtruimte een groot deel van je ademvolume is, dan adem je teveel CO_2 opnieuw in. Langzaam en diep ademen is dus beter dan oppervlakkig en

snel. In vergelijking tot het ademen aan land heeft een duiker een grotere dode ruimte. Een snorkel, de open ruimte binnen een tweede trap, of, in extremere gevallen, een duikhelm of een volgelaatsmasker voor beroepsduikers, doen allen de dode ruimte in volume toenemen. Daarom mag een snorkel niet te groot zijn en worden tweede trappen, helmen en volgelaatsmaskers van technische kenmerken voorzien om de dode ruimte te beperken. Ook bij een goed ontwerp van zulke uitrusting is er echter altijd nog een vergroting van de dode ruimte wat een goede ademtechniek noodzakelijk maakt.

Bij een hogere inspanning wordt meer zuurstof verbruikt en is dus ook CO_2 productie groter. Dit kan gebeuren door eenvoudige dingen. Bijvoorbeeld de toenemende diepte. Door de dichtere lucht op grotere diepte kost het ademen meer inspanning. Andere factoren bestaan uit weerstand bij het zwemmen door een te groot trimvest, een slechte trim, te snel zwemmen, stroming, et cetera.

“Skip breathing” is een techniek die vroeger door duikers gebruikt werd om lucht te sparen, maar bewerkte het tegenovergestelde. “Skip breathing” is het tijdelijk weerstaan van de ademimpuls (hypoventilatie). Het resultaat is dat de duiker zichzelf in hypercapnie brengt en dat de hartslag, bloeddruk en de behoefte om te ademen omhoog gaan. Daardoor zal de duiker na korte tijd meer ademgas gebruiken dan gespaard is tijdens het “skip breathen”.



Hypocapnie kan het gevolg zijn van een psychische toestand. Het kan ook vrijwillig veroorzaakt worden. Hypercapnie heeft zelden met hypoventilatie te maken, maar hypocapnie resulteert vrijwel altijd uit hyperventilatie. Hypocapnie is op zichzelf niet onmiddellijk gevaarlijk. Door een laag zuurgehalte in het bloed tintelen de ledematen en krijg je spierverkrampingen in de handen en voeten. Het grootste probleem is het uitblijven van de drang om te ademen. Wanneer hypocapnie het gevolg is van een psychische toestand, dan veroorzaakt het uitblijven van de drang om te ademen het gevoel dat je niet kunt ademen. De patiënt reageert daarop door overdreven te ademen. Daardoor verlaat nog meer CO_2 het lichaam en komt de patiënt in een vicieuze cirkel. De enige manier om te helpen is het verhogen van het CO_2 gehalte in het bloed. Dat kan gedaan worden door begeleiden om tot een rustig ademritme te komen. Wanneer je er zeker van bent dat je met hyperventilatie te maken hebt, dan kun je de patiënt z’n eigen uitgeademde lucht opnieuw laten inademen (bijvoorbeeld enkele keren in een plastic zak in- en uitademen).

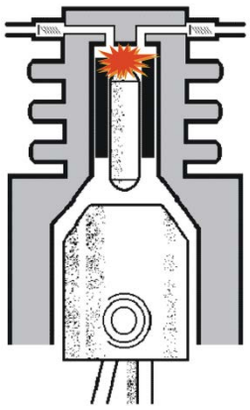
Bij het snorkelen spreken we van vrijwillige hypocapnie. Het principe is hetzelfde, maar het is gevaarlijker. Vrijwillige hyperventilatie wordt gedaan om de tijd die we onder water kunnen blijven te verlengen. Zoveel te langer de ademimpuls uitblijft, zoveel te mooier we het vinden. Het uitblijven van de drang om te ademen geeft een gevoel van succes. Hierdoor kunnen we te ver gaan en te lang onder water blijven. Te lang betekent dat er niet meer genoeg zuurstof in het lichaam is om ons bij bewustzijn te houden. Dit heet een zwembadblack-out en is gevaarlijk omdat het zonder waarschuwing gebeurd.

Hyperventileren doe je, door meerdere keren achter elkaar diep in en uit te ademen. Je wacht niet op een ademimpuls en ademt meer CO_2 uit, dan door het lichaam geproduceerd wordt. Hierdoor wordt het

CO_2 gehalte in het lichaam lager. Je neemt daarbij echter nauwelijks meer zuurstof op. Het bloed wordt bij een normale ademhaling al tot de maximale capaciteit met zuurstof vult. De zuurstof wordt dan verbruikt, om voldoende CO_2 te produceren om een ademimpuls te bewerken. Wanneer het zuurstofgehalte daarbij onder het niveau komt dat nodig is om bij bewustzijn te blijven (voordat er voldoende CO_2 geproduceerd is om een ademimpuls te bewerken), dan hebben we te doen met een zwembadblack-out. Beperk hyperventileren tot 2 of 3 ademteugen.

Een diep water black-out is vergelijkbaar, maar is niet hetzelfde. Een zwembadblack-out is het directe gevolg van overmatig hyperventileren en gebeurt meestal tijdens recordpogingen in een zwembad. Een diep water black-out wordt veroorzaakt door een snelle daling van de partiële zuurstofdruk tijdens een opstijging aan het einde van een snorkelduik naar een diepte van tenminste 10 meter. Het treedt in de meeste gevallen op in de laatste 3 meter voor aankomst aan de oppervlakte. Het risico op een diep water black-out neemt toe door hyperventilatie, maar het kan ook gebeuren zonder hyperventileren, terwijl dat bij een zwembad black-out onmogelijk is.

Van koolmonoxide (CO) kun je niet te weinig binnenkrijgen. Alleen teveel. Koolmonoxide ontstaat door een onvolledige verbranding in een vuur of tijdens een explosie. Een ideaal vuur zou alleen kooldioxide afgeven (net als het metabolisme), maar in werkelijkheid zal de verbranding niet volledig zijn en een deel CO in plaats van CO_2 creëren. Problemen ontstaan wanneer de CO in de duikfles komt.



CO komt van vuur. CO kan in de duikfles komen wanneer een automotor naast de compressor draait, of wanneer de motor van de compressor zelf uitlaatgassen afgeeft bij de inlaat van de compressor. Een andere oorzaak is echter dat de compressor zelf (die met olie gesmeerd is). Wanneer die heet loopt kan de olie in de cilinders tot ontbranding laat komen. Daardoor ontstaat CO en CO_2 veroorzaakt. Om potentiële problemen met CO te verhinderen wordt in compressorfilters soms niet alleen moleculaire zeef (drogen) en actieve kool (olie en geur verwijderen) gebruikt, maar ook Hopcalite. Dit is een stof die als katalysator optreed om CO te veranderen in CO_2.

De affiniteit van CO tot hemoglobine is 200 keer sterker dan die van zuurstof. De ingeademde CO neemt plaats in op de rode bloedcellen en beperkt zo de transportcapaciteit voor zuurstof. Wanneer teveel hemoglobine door CO geblokkeerd is, dan zal de transportcapaciteit van het bloed niet meer voldoende zijn om het lichaam met zuurstof te verzorgen. Dan ontstaat hypoxie. Een persoon met hypoxie heeft normaal een grijze/blauwe huidskleur. Dit is bij hypoxie die door CO veroorzaakt is een beetje anders. De reden is de kleur van de hemoglobine. We weten al dat hemoglobine de kleur van het bloed bepaald. Hemoglobine dat met zuurstof gebonden is heeft een helderrode kleur. Dat is ook zo wanneer het met CO gebonden is. Zuurstof zou de hemoglobine in de haarvaten verlaten en het bloed in de aderen donkerrood terug laten stromen. CO doet dat niet. Een patiënt met CO vergiftiging heeft helderrood bloed in de slagaders én de aders. De kleur van het bloed verandert ook de kleur van de huid. Dat is in het bijzonder het geval op plaatsen met veel bloedvaten, zoals de lippen en onder de nagels. Een rode verkleuring op deze plaatsen geeft aan dat de patiënt koolmonoxidevergiftiging heeft.

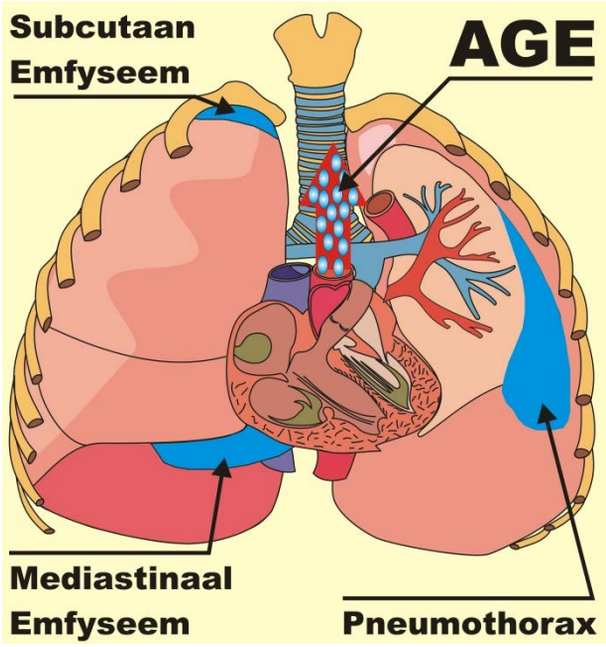
Op diepte kan koolmonoxidevergiftiging langer onopgemerkt blijven dan aan land. Aan de oppervlakte kan het plasma ongeveer 2 procent van de zuurstofbehoefte afdekken. Op diepte neemt het transport in het plasma echter toe. Wanneer de partiële zuurstofdruk in de longen met toenemende diepte groter wordt, dan neemt het plasma evenredig meer zuurstof op. Op 30 meter diepte heb je 4 keer zoveel zuurstof in de longen dan aan de oppervlakte. In deze situatie kan het plasma in ongeveer 8 procent van de transportbehoefte voorzien. Er is dus minder hemoglobine nodig en hypoxie zal pas later optreden. Wanneer de duiker aan het einde van de duik opstijgt, dan valt de transportcapaciteit van het plasma terug op het normale niveau. De duiker is dan weer afhankelijk van hemoglobine, dat echter niet meer beschikbaar is. Het is onder water dus moeilijker om problemen met CO te herkennen. Ten eerste

treedt hypoxie later op en ten tweede is de kans kleiner dat een buddy de rode verkleuring van lippen en nagelbedden herkent, omdat rood licht op diepte geabsorbeerd wordt.

Mechanische verwondingen

Mechanische verwondingen resulteren uit volumeveranderingen. De lucht-houdende holtes in het lichaam zijn hierdoor betroffen. De meeste lucht-houdende holtes hebben een bepaalde elasticiteit die volumeveranderingen toestaan. Wanneer deze marge overschreden wordt, dan zullen medische problemen ontstaan. De ernstigste verwondingen door drukveranderingen zijn overdrukverwondingen aan de longen. Daar onderscheiden we vier types. In drie daarvan komt lucht uit de longen tussen lichaamsweefsels terecht. De naam van de verwonding geeft aan waar die lucht zich ophoopt. In tegenstelling tot decompressieziekte, waar het tot uiting komen van symptomen met een beduidende vertraging kan volgen, zal een duiker met een overdrukverwonding onmiddellijk symptomen bemerken.

De long is een passief orgaan. Longen kunnen niet uit zichzelf bewegen. De long is "ingepakt" in a vacuum. Beweging van de spieren rondom de long wordt dankzij het vacuüm omgezet in longbeweging (ademen). Tussen ademteugen valt de long terug in het natuurlijke volume (uitgeademd). Wanneer we inademen wordt de long groter. De long wordt ook groter wanneer we opstijgen zonder uit te ademen. Wanneer die uitzetting de flexibiliteit overschrijdt, dan ontstaat een overdrukverwonding. Wanneer zowel het longweefsel als de "verpakking" het begeven, dan ontwikkeld zich een emfyseem. Wanneer alleen het longweefsel, of alleen de "verpakking", beschadigd is, dan hebben we te doen met een pneumothorax.

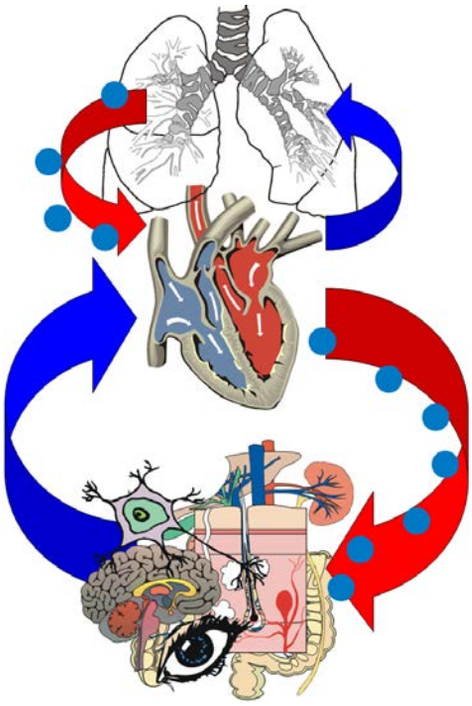


Subcutaan emfyseem – de lucht verlaat de long en verzamelt zich aan de basis van de hals bij het sleutelbeen. Er is een opening ontstaan vanaf de lucht-houdende holte in de longen tot de "verpakking" om de long. De lucht verplaatst zich nu langs de "verpakking", tot het aan het hoogste punt komt. In dit geval is dit de top van de longen. Een emfyseem is een ophoping van lucht. In dit geval bevindt de ophoping zich vlak onder de huid (subcutaan). De naam van deze toestand is daarom subcutaan emfyseem. Dit is de minst ernstige vorm van overdrukverwondingen aan de longen. De long zal snel genezen en de opgehoopte lucht kan verwijderd worden.

Mediastinaal emfyseem – de lucht verlaat de long en verzamelt zich tussen de longen in de buurt van het hart. Ook hier is er, net als bij het subcutaan emfyseem, een opening van de lucht-houdende holte tot de "verpakking". Nu echter in het lagere deel van de long. De lucht gaat weer naar het hoogste punt. Dat is nu de plaats is waar de bronchiën de long binnengaan. De opgehoopte lucht (emfyseem) drukt op het hart. Dat kan problemen bij het functioneren van het hart veroorzaken. De verwonding aan de longen zal weer snel genezen, maar de achtergebleven lucht is moeilijker te verwijderen en kan complicaties veroorzaken.

Pneumothorax – de lucht verzamelt zich tussen het longweefsel en de "verpakking". In dit geval neemt de ontstane luchtophoping dus de plaats van de long in. Dit beperkt de longbeweging. Deze toestand ontstaat wanneer het longweefsel óf de "verpakking" het begeeft. Daardoor ontstaat een opening waardoor lucht aangezogen kan worden. Aan land is het meestal een beschadigde "verpakking". Bijvoorbeeld door een verwonding met een mes. Bij een overdrukverwonding zal het lek in het longweefsel ontstaan, terwijl de "verpakking" die voor een vacuüm moet zorgen heel blijft.

Tijdens het inademen wordt de long groter. De long heeft echter het natuurlijk volume in uitgeademde toestand. De long "verzet" zich dus tegen deze volumetoename. Wanneer de weerstand voor de lucht die door de opening stroomt geringer is dan de weerstand die de long tijdens het uitzetten heeft, dan zal een nieuwe luchtruimte tussen de long en de "verpakking" ontstaan. Tijdens het uitademen ontstaat geen druk (de long "valt terug" tot z'n normale volume). De lucht zal dus niet door de opening terugstromen. Bij de volgende ademteug wordt opnieuw lucht door de opening aangezogen. Zo wordt de pneumothorax stap voor stap groter. Soms wordt dit een klaplong genoemd, maar de long kan niet "inklappen". Deze wordt door de opgehoopte lucht verdrongen.



Een pneumathorax is ernstiger dan een emfyseem. Het longweefsel oefent nu druk uit op het hart. Net als bij een mediastinaal emfyseem kan dit hartproblemen veroorzaken. Tegelijkertijd mist de duiker een groot deel van de capaciteit om zuurstof uit de omgeving op te nemen. Dat heeft hypoxie tot gevolg. In veel gevallen mag iemand na een pneumothorax nooit meer duiken. Het kan ook voorkomen dat iemand spontaan een pneumothorax krijgt (een opening in het longweefsel), zonder aan drukverschillen blootgesteld te zijn. Ook deze mensen kunnen een totaal duikverbod krijgen.

Bij het vierde type hoopt de lucht zich niet op tussen organen of weefsels. In dit geval komt de lucht in het bloed terecht. Dit kan gebeuren door het drukverschil tussen de bloedvaten en de omgeving. Slagaders hebben een hoge druk (daarom bevinden ze zich diep in het lichaam met veel weefsel eromheen). In de aders (waarvan vele dicht onder de huid lopen) neemt de druk af tot net boven de omgevingsdruk. De oorzaak van een embolie is dat het hart bloed uit de bloedvaten in de long zuigt, nadat bloed onder hoge druk in de slagaders gepompt is. Dit betekent dat de bloeddruk in de aders die van de long naar het hart lopen, op het moment dat het hart bloed aanzuigt, lager is dan de omgevingsdruk.

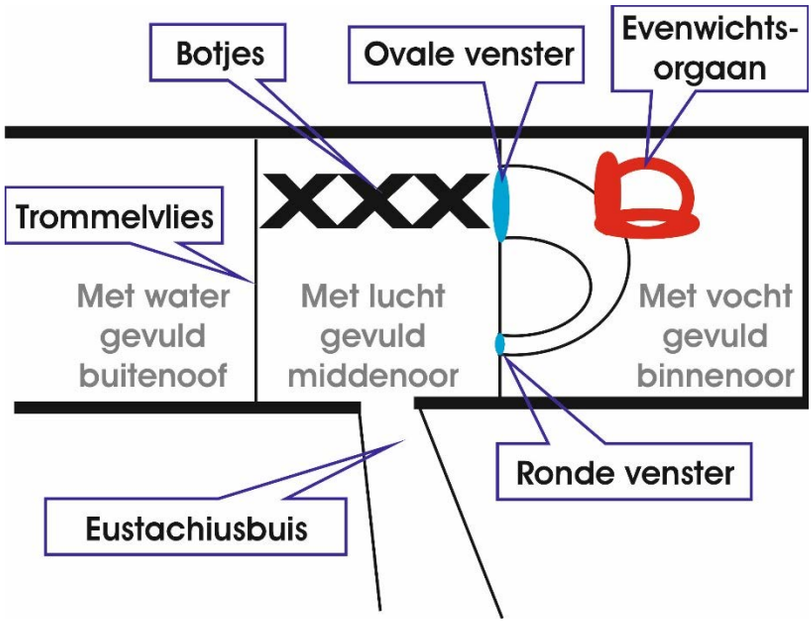
Wanneer de bloeddruk hoger is dan de omgevingsdruk, dan zal bij een verwonding bloed uit het bloedvat stromen. Wanneer de bloeddruk geringer is dan de omgevingsdruk, dan zal bij een verwonding lucht in het bloedvat gezogen worden. Op het moment dat het hart bloed aanzuigt daalt de bloeddruk tussen het hart en de longen tot onder de omgevingsdruk. Wanneer een bloedvat rond een longblaasje verwondt raakt, dan wordt lucht in de bloedbaan gezogen (op alle andere plaatsen zou bloed uit de wond stromen). De lucht wordt dan via het hart in de slagaders gepompt.

Omdat lucht lichter is dan bloed zal het ertoe tenderen bij iedere splitsing van slagaders het bovenste bloedvat te volgen. De lucht kan zo een weg vinden naar de hersenen. Dat is de slechtst denkbare plaats voor een **AGE (arteriële gasembolie)**. Dit is de ernstigste vorm van overdrukverwondingen aan de longen. De symptomen zijn gelijk aan die van type II decompressieziekte, een beroerte en trombose. Wanneer de patiënt niet sterft, dan is het denkbaar dat de genezing niet volledig is en een beperking van levenskwaliteit blijvend is.

De meest voorkomende oorzaak van overdrukverwondingen aan de longen is zonder lucht raken. Zolang duikers lucht hebben ademen ze iedere paar seconden. Dat helpt een overdrukverwonding te voorkomen. Een duiker die zonder lucht zit, kan niet meer inademen. De stress die in zo'n situatie ontstaat kan tot gevolg hebben dat de duiker ook niet meer uitademt. Statistieken geven aan, dat voorkomen zonder lucht te raken de beste manier is om overdrukverwondingen te voorkomen.

Een andere zorg met betrekking tot overdrukverwondingen aan de longen is “air trapping”. In dit geval is slechts een deel van de long geblokkeerd. Dit is een reden waarom aanbevolen wordt dat mensen met astma niet duiken. Ook rokers hebben een verhoogd risico op “air trapping”. Wanneer door een zwelling luchtpassages in de longen sluiten, dan kan de lucht niet uit de ruimte die zich achter deze zwelling bevindt ontsnappen. De overdrukverwonding ontstaat dan dus in een klein deel van de long. De consequenties zijn hetzelfde als bij een overdrukverwonding door het inhouden van de adem.

Ook het oor is gevoelig voor drukveranderingen. Het middenoor is met de luchtruimte in de mond en neus verbonden via de Eustachiusbuis. Deze “buis” is niet star, zoals de luchtpijp, en is meestal gesloten. Daardoor kan lucht niet “spontaan” naar de oren stromen wanneer dat nodig is (van de oren naar de mond/neus gaat dat meestal wel). Duikers moeten daarom tijdens het afdalen een handeling uitvoeren die klaren heet. In een beginnerscursus worden meerdere technieken voor het klaren geleerd.

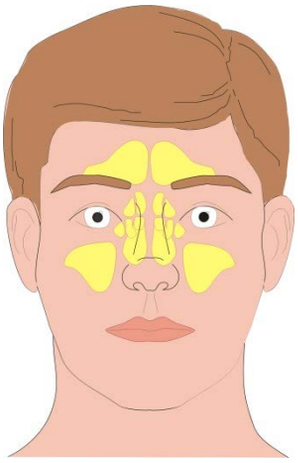


Wanneer de duiker het nalaat om tijdens de afdaling te klaren, dan doet het lichaam dit zelf. Het midmiddenoor vult zich dan met lichaamsvocht. Dit om het volume van het middenoor te reduceren. Dit vocht blijft na de duik in het middenoor (een dag of langer). De duiker zal het vocht voelen en een “dof” gehoor hebben. Wanneer een afdaling zonder te klaren te snel is, dan kan het lichaam niet op tijd reageren door vocht in het middenoor brengen. In dat geval zal door het drukverschil het trommelvlies scheuren.

De belangrijkste rol van het middenoor is de thermische isolatie van het binnenoor. Het evenwichtsorgaan is erg gevoelig voor temperatuurveranderingen en bevindt zich in het binnenoor. De luchtruimte van het middenoor remt veranderingen in temperatuur. Net zoals de luchtruimte in een spouwmuur van een huis helpt, om de temperatuur binnen constant te houden. Wanneer het trommelvlies scheurt, dan stoomt water in het middenoor. Het water staat dan direct in contact met het ovale en het ronde venster. Deze vormen de overgang naar het binnenoor. Hierdoor ontstaan grote temperatuurveranderingen in het binnenoor (vooral wanneer dit in koud water gebeurt). Dat heeft duizeligheid (vertigo) tot gevolg. In doe situatie zijn de opstijgende luchtbellen een goede hulp om een duik in de juiste richting te beëindigen (naar de oppervlakte). Door duizeligheid verliest de duiker het gevoel voor richting.

Een ander gevoelig deel van het oor is het ronde venster (zowel “**R**ound” als “**R**upture” begint met een **R**). Wanneer je aan de oppervlakte te krachtig zou klaren, dan zou het trommelvlies naar buiten bewegen. Onder water wordt deze beweging door water in het buitenoor tegengewerkt. Het gevolg is dat het ovale venster (dat veel groter is dan het ronde venster) naar binnen buigt. Het ovale venster is via kleine botjes met het trommelvlies verbonden. Die geven de trillingen van geluidsgolven door. Die trillin-

gen worden dan via het ovale venster aan een met vocht gevulde gehoorbuis doorgegeven. Kleine "haartjes" aan de wand van die buis gaan daardoor heen en weer. De beweging van die haartjes staat je toe om te horen. Om het vocht in de buis heen en weer te laten bewegen is het andere einde van de buis ook flexibel. Dat is het ronde venster. Het ronde venster is beduidend kleiner dan het ovale venster. Wanneer het ovale venster te ver naar binnen buigt, dan gaat de verplaatste hoeveelheid vocht de flexibiliteit van het ronde venster te boven. Het ronde venster zal dus scheuren wanneer het ovale venster te ver naar binnen gedrukt wordt.



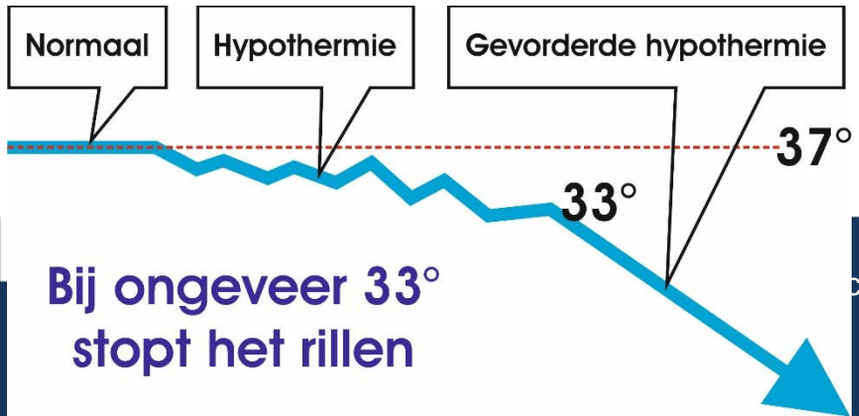
Problemen met de bijholten komen bij het duiken zelden voor. Wanneer de sinussen geblokkeerd zijn, dan zou je nog geen halve meter kunnen afdalen zonder door intense pijn gedwongen te zijn de duik af te breken. Wanneer je de sinussen niet kunt klaren, dan kun je niet duiken. Het enige mogelijke probleem is een omgekeerd blok. Een omgekeerd blok ontstaat wanneer een ruimte wel geklaard kan worden tijdens de afdaling, maar de lucht tijdens de opstijging niet kan ontsnappen. Bij de sinussen (bijholten) kan dit het gevolg zijn van een verkoudheid of een allergische reactie. Dat zou spontaan kunnen gebeuren, maar dan is zeldzaam. In de meeste gevallen ontstaat een omgekeerd blok door het gebruik van afzwellende middelen voor de duik. De werking van neusspray is niet onbeperkt. Wanneer het middel tijdens de duik uitgewerkt raakt, dan kan dit een omgekeerd blok tot gevolg hebben.

Een omgekeerd blok is ook op andere plaatsen mogelijk, zoals de maag of het gebit. Ook deze vormen komen niet vaak voor. De maag is zeer elastisch. Een omgekeerd blok (dat heet hier koliek) zou alleen een oncomfortabel gevoel met zich meebrengen. De tanden en kiezen zijn een ander verhaal. Wanneer zich onder een vulling een luchtruimte bevindt, dan zou langs de vulling een passage kunnen ontstaan. Daardoor kan tijdens de duik lucht onder de vulling terecht komt. Wanneer de stijgsnelheid te groot is om de lucht via deze kleine doorgang te laten ontsnappen, dan kunnen problemen ontstaan. In veel gevallen gaat het om een tand of kies waarvan de zenuwen al verwijdert zijn. In dat geval kan de tand gewoon openbreken, zonder dat het pijn doet. Wanneer in een tand of kies zenuwen door de toenemende druk geïrriteerd worden, dan kan een omgekeerd blok een intense pijn veroorzaken.

Kunstmatige lucht-houdende holten vragen ook aandacht. Om het masker te klaren dien je af en toe door de neus uit te ademen. Duikers met een droogpak moeten tijdens de afdaling regelmatig lucht aan het droogpak toevoegen, om te voorkomen dat ze blauwe vlekken krijgen op plaatsen waar het pak tegen de huid gezogen wordt wanneer het volume in het pak afneemt.

Temperatuurproblemen

Voor het juiste functioneren van het lichaam is een relatief constante temperatuur noodzakelijk. Warmte of kou van buitenaf, kunnen de pogingen van het lichaam om een constante temperatuur te handhaven storen. Deze maken het noodzakelijk dat het lichaam actie onderneemt. Het lichaam beschikt over diverse mechanismen om voor invloeden van buitenaf te compenseren. Zolang deze werken zal de lichaamstemperatuur redelijk constant blijven. Wanneer de invloeden te sterk zijn of te lang duren, dan zal het lichaam uiteindelijk opgeven. Temperatuurproblemen zijn een reëel risico voor duikers. We dragen voor een duik soms een dik pak terwijl we in de brandende zon staan. Aan de andere kant gaan we soms het water in, bij temperaturen die het vriespunt naderen.

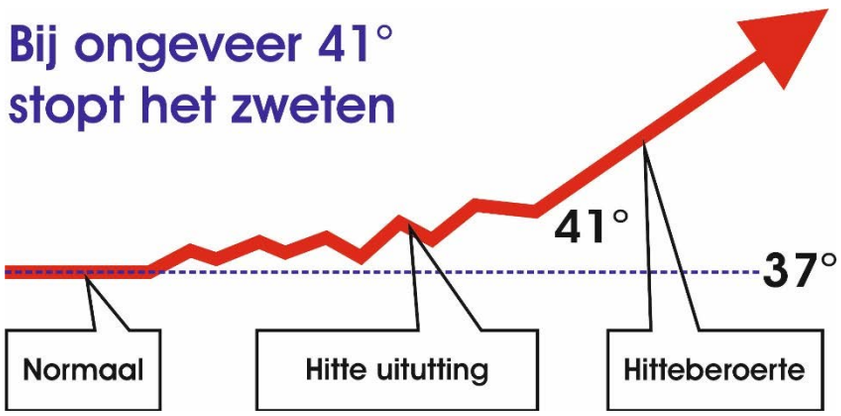


Tijdens een duik in koud water zal een duikpak de afkoeling afremmen. Wanneer je

een pak gekozen hebt dat geschikt is voor de watertemperatuur, dan hoeft je lichaam niet op de kou te reageren. Wanneer het pak te dun is, dan zal je lichaam actie ondernemen om afkoeling te voorkomen. Daartoe zal je lichaam proberen verder warmteverlies te beperken door de bloedsomloop "naar binnen" te verleggen. Haarvaten dicht bij de huid hebben de mogelijkheid het bloed dicht bij de huid te laten stromen, of verder naar binnen waar een dunne vetlaag tegen warmteverlies beschermt. Dit verklaart ook "skin bends". Aan het begin van de duik wordt stikstof naar de bovenste lagen van de huid gebracht, maar aan het einde van de duik stroomt het bloed langs een andere weg en voert de opgenomen stikstof niet meer effectief af.

Het lichaam zal ook beginnen warmte te genereren. Daartoe begin je te rillen. Zolang de combinatie van warmteverlies beperken en warmte genereren werkt, is er geen probleem. Het feit dat je lichaam begonnen is tegen de kou te vechten moet als waarschuwingsteken gezien worden. De afstand die je moet afleggen om het water te verlaten, kan groot zijn. Het is ook niet zeker dat je je onmiddellijk kunt opwarmen als je uit het water bent. Het is gebruikelijk dat duikers op rillen reageren, door de duik onmiddellijk af te breken. De toestand waarin je circulatie naar binnen verplaatst wordt en waarin je rilt heet hypothermie. De volgende stap is gevorderde hypothermie.

Bij gevorderde hypothermie heeft het lichaam de pogingen, om de lichaamstemperatuur omhoog te brengen, opgegeven. Het lichaam accepteert dat het gevecht verloren is en staat verdere afkoeling toe. Het rillen houdt dus op en je wordt gedesoriënteerd. Na verloop van tijd voel je de kou niet meer.



Dit is een levensbedreigende toestand. Het is moeilijk om iemand met gevorderde hypothermie op te warmen. Wanneer de ledematen opgewarmd worden, dan zullen de bloedvaten zich uitzetten wat problemen met de circulatie en shock (niet genoeg circulerend bloed om het volume te vullen) veroorzaakt. Opwarmen moet dus geleidelijk gedaan worden. En dat zo dicht mogelijk bij de kern van het lichaam. Dat kan bijvoorbeeld door warme lucht te ademen. In eerste instantie moet eerste-hulp beperkt worden tot het voorkomen van verder warmteverlies. Dit totdat een methode gevonden is die aan de bovenstaande criteria voldoet, of totdat de medische hulpdiensten ter plaatse zijn. Een duiker die nog rilt kan met minder voorzorgen opgewarmd worden, maar ook hier is het voorkomen van verder warmteverlies de prioriteit.

De situatie bij warmte is vergelijkbaar. In eerste instantie zal het lichaam vechten tegen de stijgende temperatuur. Dit wordt gedaan door de circulatie naar buiten te verleggen (wat soms precies het omgekeerde effect bewerkt) en door te zweten om overtollige warmte kwijt te raken. Deze toestand heet hitte-uitputting (het lichaam is bezig de beschikbare middelen – vocht en zout – uit te putten om tegen de stijgende temperatuur te vechten). Zolang het lichaam zich de situatie meester voelt zal je doorgaan met zweten, maar je zult symptomen bemerken die met het verlies aan zout en vocht te maken hebben. Bijvoorbeeld vermoeidheid en hoofdpijn. Ook bij hitte-uitputting is een moment waarop het lichaam het gevecht opgeeft. Het staat dan toe dat de temperatuur verder stijgt, zonder hier iets tegen te ondernemen. Dit heet een hitteberoerte of zonnesteek.

Een patiënt met een hitteberoerte zweet niet meer (er kan nog wel zweet van voorheen op de huid aanwezig zijn). De huid voelt warm en eventueel droog aan. Wanneer de temperatuur te ver stijgt, zal

het bloed verdikken en zullen circulatieproblemen ontstaan. De patiënt zal sterven. Een persoon met een hitteberoerte is in levensgevaar, net als iemand die een hartaanval heeft gehad. De patiënt moet onmiddellijk afgekoeld worden. Ook wanneer dit betekent dat je de patiënt in koud water dompelt. Zoals voor iedere levensbedreigende aandoening dien je onmiddellijk de medische hulpdiensten te alarmeren.

Zoogdieren-duikreflex & Carotis-sinus-reflex

De zoogdieren-duikreflex is een overblijfsel uit de evolutie (net als de blinde darm). Walvissen kunnen lang onder water blijven omdat hun hartslag daalt wanneer ze afdalen. Onder bepaalde omstandigheden kan hetzelfde bij mensen gebeuren. Sommigen zijn gevoeliger voor dit fenomeen dan anderen. Om erachter te komen of je betroffen bent, kun je een poosje koud water over je vingers laten stromen en dan de koude natte vingers tegen je gesloten ogen drukken terwijl je de polsslag meet. Wanneer de pols vertraagd, dan ben je gevoelig voor de **zoogdieren-duikreflex** (of **bradycardie**).

De zoogdieren-duikreflex treed meestal op wanneer je tijdens een duik in koud water het masker afneemt. De daling in hartslag veroorzaakt een oncomfortabel gevoel. Als reactie kan een duiker de automaat uit de mond laten vallen. Om problemen met bradycardie te voorkomen vragen instructeurs die lesgeven in koud water hun leerlingen vaak om voor de duik het gezicht even in het water te houden, alvorens het masker op te zetten. Zo zijn de zenuwen in het gezicht al aan de temperatuur gewend en is de kans geringer dat bij het afnemen van het masker de polsslag daalt.

Een ander risico waar duikers mee te doen hebben is de carotis-sinus-reflex. De halsslagader voorziet het hoofd van zuurstof. Het zintuig dat de bloeddruk meet en de kracht reguleert waarmee het hart pompt, is bij deze slagader te vinden. Wanneer deze sinus caroticus een verhoogde bloeddruk meet, dan geeft deze “opdracht” aan het hart om minder krachtig te pompen. Helaas kan de sinus caroticus niet bepalen of een prikkeling door bloeddruk of door druk van buitenaf veroorzaakt wordt. Wanneer iets van buitenaf op de carotis sinus drukt, dan zal dit geïnterpreteerd worden als een te hoge bloeddruk.

Druk van buitenaf kan veroorzaakt worden door een te kleine cap, of een te nauwe seal van een droogpak. Wanneer de bloeddruk te hoog is, dan lost een teken van de sinus caroticus het probleem op. Wanneer het gaat om een druk van buitenaf, dan blijft die druk bestaan. De sinus caroticus zal dan telkens opnieuw geprikkeld worden en tekens aan het hart geven om de bloeddruk nog verder te laten dalen. Uiteindelijk zal de bloeddruk te laag zijn om de zwaartekracht te overwinnen. Wanneer het zover komt dan ontvangen de hersenen te weinig bloed. De duiker zal het bewustzijn verliezen.

Bijna-verdrinking

Bij bijna-verdrinking is de uitwisseling van gassen tussen de longen en de bloedstroom betroffen. Ook wanneer een duiker water in de luchtwegen gekregen heeft, maar zelf in staat was om het er door te hoesten weer uit te krijgen, dienen we met de situatie om te gaan alsof het een bijna verdrinking is. Wanneer zich water in de longen bevindt, dan kan de duiker niet meer ademen. Wanneer het water zo lang in de longen blijft, dat de zuurstofvoorraad in het lichaam volledig verbruikt wordt, dan spreken we van verdrinking (dodelijk ongeval). Wanneer een persoon op tijd beademd wordt en weer begint met ademen, dan spreken we van een bijna-verdrinking.

De problemen die bij een bijna-verdrinking ontstaan, zijn niet opgelost op het moment dat de patiënt weer begint te ademen. Met het water dat uit de longen komt (dit is slechts een deel, omdat de rest in de circulatie opgenomen wordt) wordt ook surfactant (dat staat voor: **Surf**ace Re**act**ive **A**ge**nt**) uitgespoeld. Dit is de reden waarom rond de lippen schuim te zien is. Het surfactant is een laag die voorkomt dat de longblaasjes na het uitademen in gesloten toestand blijven. Wanneer het surfactant weg is, dan zal het ene longblaasje na het andere in gesloten positie blijven. Uiteindelijk zal de capaciteit om zuur-

stof uit de long in de bloedstroom te brengen te gering zijn. De patiënt ontwikkelt dan hypoxie. Dit, gecombineerd met een risico op infectie van de longen, maakt medische zorg na een bijna-verdrinking noodzakelijk.

Deco theorie

Het aantal publicaties en discussies over decompressietheorie in het internet is enorm. Je kunt publicaties vinden over M-waarden, compartimenten, procedures voor het opstijgen, enzovoort. Helaas komen de meeste van deze publicaties uit de hoek van het "technical diving" en van beroepsduikers. Ze zijn erop gericht de grenzen te zoeken. Er wordt niet vaak ingegaan op conservatieve duikprocedures. Informatie over decompressietheorie voor het sportduiken is moeilijker te vinden.

Duikcomputers baseren hun aanbevelingen voor de resterende duiktijd op een beperkt aantal factoren. Dat zijn diepte, duiktijd, hoogte, voorgaande duiken, het mengsel van het ademgas en in sommige gevallen het gedrag van de duiker, de watertemperatuur en inspanning. Duikcomputers houden geen rekening met secondaire factoren. Inspanning voor of na een duik, ziekte of verwonding, het gebruik van alcohol of medicijnen, geslacht, uitdroging en diverse andere factoren waarvan we weten dat deze invloed hebben op decompressieziekte.

Het wordt aan de duiker overgelaten om beslissingen te nemen op basis van de gegevens op de computer (computer geassisteerd duiken). Wanneer je domweg de gegevens van de computer volgt, zonder daarover na te denken (computer gecontroleerd duiken), dan neemt het risico op decompressieziekte beduidend toe. Beslissingen op basis van gezond verstand maken het echter noodzakelijk dat je weet wat de computer doet (en vooral dat je weet wat de computer niet doet). Je dient na te denken over een eventuele noodzaak om conservatiever te duiken dan de computer voorstelt en hoe je dat gaat doen. Dit hoofdstuk is bedoeld om je in staat te stellen geïnformeerde beslissingen te nemen.

Decompressieziekte was voor de duiken van Alexander de Grote nog geen probleem. Dat is nu anders!

Achtergrond

Decompressietheorie is een poging om te voorspellen wat het gedrag van stikstof zal zijn in het lichaam van een duiker, tijdens en na de opstijging aan het einde van een duik. Die poging kan als succesvol gezien worden. Nauwkeurige statistieken zijn niet beschikbaar, omdat onbekend is hoeveel duiken gemaakt worden én omdat niet alle gevallen van decompressieziekte gemeld worden. Het aantal gevallen is echter relatief gering. Een geaccepteerde schatting voor het sportduiken is 1 geval per 25.000 duiken.

We kunnen dus aan de hand van deze schatting argumenteren, dat duiken in vergelijking met andere vormen van vrijetijdsbesteding veilig is. We dienen echter in gedachten te houden dat ieder van deze incidenten het potentieel heeft om de levenskwaliteit te reduceren. In veel gevallen is de schade zo omvattend dat de kans op een succesvolle behandeling gering is. Wanneer je expres tot en over de grenzen van duikcomputers of duiktabellen duikt, dan mag decompressieziekte niet als verrassing gezien worden. Helaas tonen statistieken dat ongeveer 60 procent van alle gevallen van decompressieziekte wel een (onaangename) verrassing was. De betroffen duikers waren van mening dat ze alle procedures gevolgd hebben, die aanbevolen worden voor het voorkomen van decompressieziekte.

Bij zoveel gevallen die als een volledige verrassing komen – mensen die zichzelf aan gevaar hebben blootgesteld, zonder zich daarvan bewust te zijn – is de eerste gedachte dat de mathematische modellen van de hedendaagse decompressietheorie onjuist zijn. Het kan de indruk geven dat meer onderzoek gedaan moet worden om een beter mathematisch model te produceren. Een model dat duikers beter attent maakt op een toename van het risico decompressieziekte te krijgen. Dit om de duiker toe te staan decompressieziekte te voorkomen.

Het is goed mogelijk, dat toekomstig onderzoek een weg toont naar een nieuw mathematisch model dat het aantal gevallen van decompressieziekte kan beperken. Het is echter net zo goed mogelijk dat onderzoek aantoont dat de huidige modellen het beste zijn wat we kunnen doen. Er is niet genoeg informatie beschikbaar om de huidige modellen te bevestigen, of deze te verwerpen. Het is dus de vraag of verder onderzoek ons in staat stelt de situatie in de toekomst te veranderen. De huidige modellen zijn tientallen jaren beproefd in een enorm aantal duiken. Misschien kan het beter, misschien niet. Het grootste probleem dat voor een verbetering opgelost dient te worden, is het vinden van een antwoord op de vraag waarom sommige duikers sterker betroffen zijn door decompressieziekte dan anderen.

Duiktabellen en duikcomputers baseren hun aanbevelingen voor de opstijging op tijd, diepte, hoogte boven zeeniveau, het mengsel van het ademgas en voorgaande duiken. Tot een bepaald niveau worden in de berekening soms ook factoren meegenomen zoals watertemperatuur en het gedrag van de duiker. Factoren zoals leeftijd en het lichaamsgewicht kunnen soms door de duiker zelf ingesteld worden. Factoren zoals vermoeidheid, ziekte of verwonding, het gebruik van medicijnen, alcohol of verdovende middelen, vochtverlies en inspanning voor of na een duik worden niet in de berekening meegenomen. Het is ook niet waarschijnlijk dat dit in de toekomst wel gedaan wordt.

Een benadering om het duikprofiel van ieder geval van decompressieziekte te bepalen en daarna uit te sluiten in het model van toekomstige computers werkt niet. Veel ongevallen gebeuren zeer ruim binnen

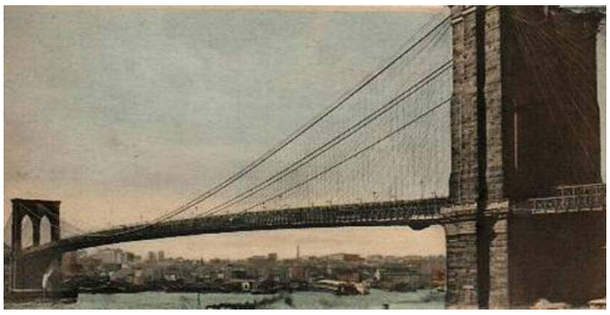
de huidige limieten. Wanneer we al deze gevallen in de mathematische modellen verwerken, dan zullen realistische duiken niet meer mogelijk zijn.

Het is een feit dat de huidige limieten die door duikcomputers gegeven worden een brede acceptatie hebben. Het is ook een feit dat zich binnen deze limieten ongevallen voordoen. Er zijn genoeg situaties in het dagelijkse leven, waarin we ook met “acceptabel risico” te maken hebben. Een geaccepteerde procedure om een straat over te steken is eerst naar links te kijken, dan naar rechts en als laatste weer naar links. De inschatting van de afstand en de snelheid van het aankomende verkeer, zijn dan de basis om te beslissen de straat wel of niet over te steken. Het is een geaccepteerde procedure en het werkt in de meeste gevallen. Er zijn echter toch ongelukken. Sommige mensen accepteren een hoger risico dan anderen. Wanneer je echter al het risico wilt uitsluiten, dan is de enige optie de straat niet over te steken (wat niet acceptabel zou zijn).

Wanneer je dus het risico op decompressieziekte wilt uitsluiten, ga dan niet duiken, stap niet in een vliegtuig en zorg dat je lichaam ook niet op een andere manier aan drukveranderingen blootgesteld wordt. Of ga duiken, maar kom niet meer boven. Zolang je op diepte blijft krijg je geen decompressieziekte. Wanneer het voor jou niet acceptabel is om niet te duiken, dan dien je het potentiële risico op decompressieziekte in koop te nemen.

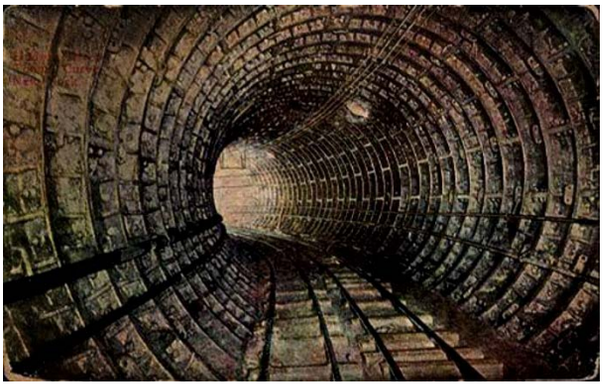
Voor het oversteken van een straat hebben we aangegeven, dat sommige mensen meer risico nemen dan anderen. Dit is bij het duiken niet anders. Wanneer je je risico wilt beperken, dan moet je weten hoe je dat moet doen. Om het risico op decompressieziekte te beperken moet je een “geïnformeerde beslissing” kunnen nemen. In het dagelijkse leven doe je dat op basis van je opvoeding, opleiding en ervaring. Bij het duiken heb je deze luxe niet. De theorie die behandeld wordt in een “standaard” duikcursus, voorziet niet in voldoende kennis voor zulke beslissingen en laten we hopen dat je ervaring met decompressieziekte ook niet in zo’n basis voorziet. Dit hoofdstuk heeft de intentie, voldoende begrip van decompressietheorie op te bouwen om geïnformeerde beslissingen nemen.

Met computer geassisteerd duiken (t.o.v. computer gecontroleerd duiken) kan de veiligheid behoorlijk toenemen. Het idee is dat je rekening houdt met de gegevens van je computer, maar dat je zelf situaties herkend waarin het verstandig is een beetje conservatiever te zijn. Om zulke situaties te herkennen moet je eerst weten wat het mathematische model doet. Dit wordt hier doorgenomen. Het gaat er niet om wat de “beste computer” is, maar wat de “beste manier is om een duikcomputer te gebruiken”.



Geschiedenis

Het eerste gedocumenteerde geval van decompressieziekte dat ons bekend is, dateert uit 1841. In dat geval was de patiënt geen duiker, maar een arbeider in een caisson (een omgekeerde container waarin mensen zonder duikuitrusting op de bodem kunnen werken). In die tijd was er nog geen verklaring voor de symptomen. De ziekte werd caissonziekte genoemd.



In 1878 ontdekte Paul Bert dat er een relatie bestaat tussen caissonziekte en stikstof en ook dat een langzame decompressie noodzakelijk was om symptomen te voorkomen. Stikstof was dus de oorzaak van de "Grecian bend," een term die gebruikt

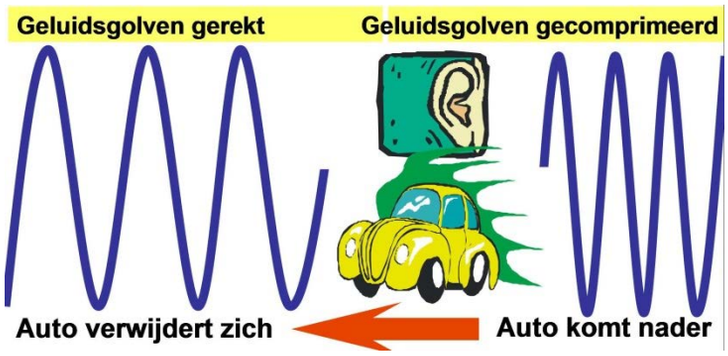
werd door arbeiders, tijdens de constructie van de pijlers van de Brooklyn Bridge. De gebogen houding van de betroffen arbeiders leek op de “Grecian bend” (een modieuze lichaamshouding van vrouwen uit die tijd). Decompressieziekte werd later bekend onder de naam "bends". Ernest Moir heeft als eerste in 1889 een succesvolle behandeling van decompressieziekte uitgevoerd voor arbeiders die aan de constructie van de Hudson River tunnel werkten (tot dat moment stierf ongeveer een kwart van de getroffen arbeiders aan decompressieziekte).

Het succes van Ernest Moir heeft velen geïnspireerd. Het idee was dat het mogelijk moest zijn een manier te ontwikkelen om “bends” te voorkomen (wat genezen kan worden, is ook te voorkomen). Het onderzoek begon en in 1908 publiceerden John Scott Haldane, Arthur Boycott en Guybon Damant een artikel over “het voorkomen van persluchtziekte”, hun naam voor decompressieziekte. We verwijzen nu naar dat onderzoek als “het model van Haldane”. De ontwikkelde procedure was in principe de eerste duiktabel ter wereld. Het werk was echter niet zeer toegankelijk en werd niet veel gebruikt.

"Grecian bend"

De eerste veelgebruikte duiktabel ter wereld was de US Navy duiktabel. De eerste versie uit 1937 had geen mogelijkheden voor herhalingsduiken. Die optie werd toegevoegd in de tweede versie uit 1956. Voor beide versies samen werden ongeveer 60 testduiken gemaakt ter bevestiging van het model. De versie van de US Navy tabellen uit 1956 is door sportduikers over de gehele wereld gebruikt. Er was nauwelijks een alternatief. De tabellen waren beschikbaar, ze waren al betaald door de belastingbetaler en ze waren vrij van copyright.

Tot 1974 was er nauwelijks sprake van discussie over decompressietheorie en tabellen. Duikers hadden er vertrouwen in dat de US Navy tabellen veilig waren, omdat deze door iedereen gebruikt werden (degenen die geen tabel hadden gebruikten vaak het cijfer 50 als maximale som van de diepte en de duiktijd voor een enkele duik). Er waren geen andere toegankelijke tabellen om mee te vergelijken. De vraag waar eventuele verschillen in nultijden vandaan kwamen, was dus niet aan de orde. Dit veranderde in de jaren zeventig. Toen heeft Spencer met Doppler-metingen aangetoond dat duikers beduidende hoeveelheden bellen in het lichaam konden hebben, ook wanneer ze binnen de grenzen van de US Navy tabellen doken. Tot dan toe dachten duikers dat decompressieziekte gelijk was aan bellen en dat geen decompressieziekte gelijk was aan geen bellen. De discussie kwam op gang en duikers begonnen met andere tabellen te vergelijken. Nultijden werden een gespreksthema tussen duikers.



Johann Christian Doppler (Oostenrijk) publiceerde in 1842 dat de frequentie van geluid (en licht) in beweging anders wordt ondervonden dan in een stationaire positie. We kennen allemaal het effect van het geluid van een ambulance die naar je toe komt, je passeert en dan van je weg rijdt. Het geluid heeft een hogere toon wanneer de ambulance nadert en een lager toon wanneer deze zich van je verwijdert. De toon verandert op het moment dat de ambulance je passeert. Doppler echoapparatuur maakt gebruik van dit principe. Met echoapparatuur wordt een toon in het lichaam van de duiker gestuurd, maar alleen veranderingen in de weerkaatste frequentie (het moment dat iets voorbij komt) worden geregistreerd. Deze frequentieveranderingen worden hoorbaar gemaakt op speakers of een koptelefoon. Een verandering in frequentie geeft aan dat een bel in de bloedbaan de sensor (microfoon)

passeert. Omdat de metingen aan de huid gedaan worden gaat het hier om bellen in de aders. Doppler kan alleen bellen registreren die in beweging zijn. Bellen die zich stationair in het weefsel bevinden worden door de Doppler niet opgemerkt. Bellen in de aders geven aan dat de duiker een hoger risico heeft op Type II decompressieziekte (neurologische decompressieziekte).

In 1983 kwamen de eerste duikcomputers voor het algemene publiek op de markt. Dat waren de EDGE in de USA en de "Hans Hass DecoBrain" in Europa. In vergelijking met de duikcomputers van nu, waren deze behoorlijk groot. Kleinere duikcomputers bestaan sinds 1987. Vanaf dat jaar zijn de verdere ontwikkelingen snel gegaan. Computers begonnen te "piepen", het gedrag van de duiker werd op de een of andere manier in het rekenmodel ingebouwd, aanvullende functies zoals het RGBM model voor opstijgingen werden geïntegreerd, et cetera.

Stikstofopname

Volgens de wet van Dalton oefent ieder gas in een mengsel een deeldruk uit die in relatie staat tot het percentage waarin dat gas in een mengsel vertegenwoordigd is. Wanneer een gas 50% stikstof bevat, bij een totale druk van 1 bar, dan is de deeldruk (of partiële druk) van stikstof 0,5 bar. Wanneer de totale druk 2 bar zou zijn (de druk op 10 meter diepte), dan zou de partiële stikstofdruk 1 bar zijn. Dat is 50% van 2 bar. Volgens Dalton gedraagt ieder gas in een mengsel zich alsof de andere gassen er niet zijn. Voor ons betekent dit dat het gedrag van stikstof niet beïnvloed wordt door de andere gassen in het ademmengsel. Zuurstof, helium of andere gassen in de duikfles hebben geen invloed op het gedrag van de stikstof. In de context van decompressietheorie voor het sportduiken zijn we uitsluitend geïnteresseerd in de partiële stikstofdruk, ongeacht of we met lucht of met Nitrox duiken.

Om de uitleg over decompressieziekte te vereenvoudigen gaan we ervanuit dat lucht een mengsel van 20% zuurstof en 80% stikstof is. Je zou het ook Nitrox 20 kunnen noemen. Dit maakt de komende berekeningen eenvoudiger. Bij dit mengsel is de partiële stikstofdruk aan de oppervlakte 0,8 bar in plaats van 0,78 bar. We besparen ons dus cijfers achter de komma.

Voor de verdere uitleg over decompressieziekte, hebben we voornamelijk te maken met de wet van Henry. Voor het deel over de opstijging speelt ook de wet van Boyle nog een rol.

Om te onthouden welke naam bij welke fysicawet hoort, kun je je naar het alfabet richten. ABCD(H). Stel je voor dat je een gesloten flexibel vat in zee gooit. Het eerste wat berekend moet worden is of het zal zinken, drijven of neutraal zal zijn. Voor deze berekening maak je gebruik van de wet van Archimedes (A). Wanneer Archimedes toont dat het vat zal zinken, dan zal de druk met de diepte toenemen. De toenemende druk zal het volume van het vat veranderen. De verandering in volume wordt berekend met Boyle (B). Wanneer het vat verder zinkt, dan zal het door een thermocline heengaan. Daar verandert de temperatuur. Ook de verandering in temperatuur heeft invloed op het volume. Dat wordt berekend met de wet van Charles (C). Op de bodem aangekomen zal het vat niet meer bewegen en kun je details observeren. In fysica heeft dit te maken met het percentage en de druk van de individuele gassen Dat wordt berekend met de wet van Dalton (D). Na jaren raakt het vat lek en stroomt er water in. De gassen in het vat worden in het water opgenomen volgens de wet van Henry (H).

Volgens de wet van Dalton zal de stikstof in ons 80/20 mengsel van stikstof en zuurstof aan de oppervlakte een partiële stikstofdruk uitoefenen van 0,8 bar. Wanneer we ervanuit gaan, dat je al langer geen duik gemaakt hebt, niet gevlogen bent én niet op een andere manier aan drukveranderingen blootge-

steld bent (of een ander gas geademd hebt), dan zal de stikstofdruk in je lichaam 0,8 bar zijn. Volgens de wet van Henry is dit van toepassing op alles om je heen. Bijvoorbeeld je kat en je kopje koffie. De partiele stikstofdruk van alles in je omgeving is in evenwicht met de partiële stikstofdruk van het omringende gas. Stikstof is een inert gas. Diep ademen, inspanning en het inhouden van de adem zullen consequenties hebben voor de concentraties van zuurstof en kooldioxide in je lichaam. Ze zullen geen invloed hebben op de partiële stikstofdruk. De enige manier om de hoeveelheid stikstof in je lichaam te veranderen, is het veranderen van het gas in je omgeving. Dat kan door verandering van de druk, of door verandering van het percentage stikstof in het mengsel.

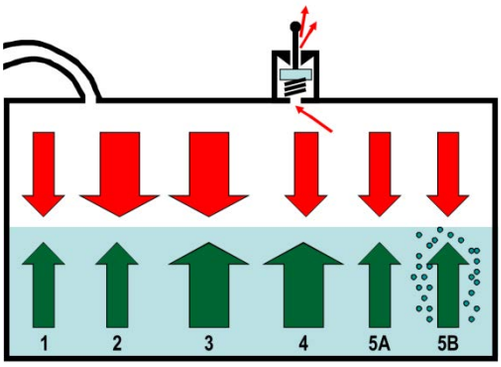
Je lichaam zal zich aanpassen aan de partiële stikstofdruk in je omgeving. Dat is het gas dat je ademt. Wanneer in je lichaam een hogere partiële stikstofdruk heerst dan in het omringende gas (wat kan gebeuren wanneer je uit een omgeving met een hogere stikstofdruk komt), dan ben je oververzadigd en zal je lichaam dus stikstof afgeven totdat een evenwicht gevonden is. Dat proces duurt totdat de stikstofdruk in je lichaam gelijk is aan die in het gas dat je ademt. Wanneer de partiële stikstofdruk in je lichaam lager is dan die in het omringende gas, dan zal je stikstof afgeven totdat een evenwicht gevonden is. Wanneer je langer in een nieuwe omgeving blijft dan nodig is om een evenwicht te vinden, dan houdt de opname van stikstof op. Je komt tot een evenwicht en dan stopt de opname.

Beroepsduikers maken soms gebruik van het concept “saturatieduiken”. Duikers leven in een decompressiekamer waaraan een gesloten duikklok aangesloten kan worden. De kamer en de duikklok worden op de druk gehouden die op de diepte van het werk heerst. Team na team gaat naar beneden om te werken en komt weer boven om in de kamer te eten, te rusten en te slapen. Het team leeft meerdere dagen onder druk. Dat is lang genoeg om volledig in evenwicht of gesatureerd te zijn. Aan het einde van de periode worden de duikers gedecomprimeerd. Vanwege het lange verblijf onder druk neemt dit proces veel tijd in beslag.

Sportduikers blijven te kort onder water voor volledige saturatie. Een sportduiker begint lang voordat volledige saturatie bereikt is aan de opstijging. Omdat het niveau van saturatie afhankelijk is van het profiel van de duik, kan gezegd worden dat iedere duik van een sportduiker uniek is Dat maakt een individuele berekening noodzakelijk. Hiervoor zijn twee hulpmiddelen beschikbaar: duiktabellen en duikcomputers.

Van de twee beschikbare instrumenten om een duik te berekenen is de duikcomputer het meest nauwkeurig. Computers en tabellen werken met equivalente mathematische modellen, maar de nauwkeurigheid verschilt. Een duiktabel kan vergeleken worden met een stapel enveloppen. Wanneer je een dossier voorbereid hebt om te versturen, dan zoek je in de beschikbare stapel naar een passende envelop. In de meeste gevallen zal de envelop te groot zijn. De keuze uit enveloppen van verschillende grootte is beperkt. Dat is hetzelfde voor het aantal combinaties van tijd en diepte op een duiktabel. In een tabel wordt verwacht dat je afrond op de naast grotere diepte en tijd en dat je de diepte rekent alsof je de gehele duik op de grootste diepte geweest bent. Een computer kan vergeleken worden met een machine die in “real-time” een passende envelop snijdt. Dat is een envelop die precies past voor de duik die je maakt. Het mathematische model is gelijk aan dat van een duiktabel, maar het werkt met de precieze tijd en diepte. Wanneer je een deel van de duik op geringere diepte doorbrengt, dan wordt dit in de berekening meegenomen.

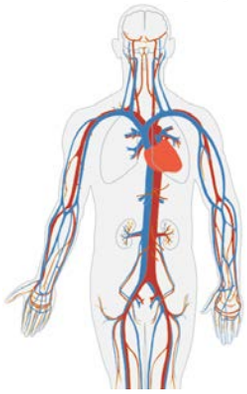
De decompressietheorie verandert niet met de keuze van het hulpmiddel om een duik te berekenen. We gebruiken dan ook in alle gevallen dezelfde mathematische modellen. Het verschil is de precisie waarmee dat gedaan wordt. Het eerste element van de berekening is de opname en afgifte van stikstof. Dit kan geïllustreerd worden in een kleine decompressiekamer voor het testen van instrumenten. De kamer is half gevuld met water en half met lucht. Wanneer we de kamer sluiten, dan is het water verzadigd met stikstof op omgevingsdruk. De stikstofdruk in het water is 0,8 bar. Dat is gelijk aan de stikstofdruk in het gas dat met het wateroppervlak in contact staat.



Wanneer we nu de druk in de kamer verhogen (2), dan zal in eerste instantie alleen de stikstofdruk in de lucht hoger worden. Dit verstoort het evenwicht tussen de partiële stikstofdruk in het water en de lucht. Het water begint stikstof op te nemen en zal daarmee doorgaan totdat een nieuw evenwicht ontstaan is (3). Met water gaat dit proces snel, maar het is toch een “vertraagd proces”. De tijd die nodig is om tot een nieuw evenwicht te komen, hangt af van verschillende factoren. Die behandelen we later. Voor nu is het voldoende om te weten dat saturatie een langzaam proces is.

Wanneer de druk in de kamer op 2 bar gebracht wordt, dan zal de partiële stikstofdruk in de lucht 1,6 bar zijn. Na verloop van tijd zal dat ook de stikstofdruk in het water zijn. Wanneer we nu lucht uit de kamer laten ontsnappen (4) en zo de druk weer op atmosferische druk verlagen, dan zal het water oververzadigd zijn. Het water geeft dan stikstof af. Het is de afgifte van stikstof die de kritische factor is van decompressietheorie. Decompressietheorie moet voorspellen tot welk niveau van saturatie een gecontroleerde afgifte van stikstof mogelijk is. Het moet voorspellen hoeveel extra stikstof het lichaam op gecontroleerde manier kan verlaten (5A) wanneer de duiker een directe opstijging naar de oppervlakte maakt. Het moet ook voorspellen vanaf welke hoeveelheden een decompressie in stappen (5B), nodig is. In dat geval maakt de duiker een decompressiestop (of meerdere).

Saturatie en stikstofafgifte zijn langzame processen. Dit kan getoond worden door een appel onder druk te brengen. Laat de appel een aantal minuten onder druk en begin dan aan de “opstijging”. Na terugkeer op de atmosferische druk zal je minutenlang gas uit de appel zien (en horen) ontsnappen.



De eerste stap in de berekening, is te bepalen hoeveel stikstof bij een gegeven duikprofiel in ieder deel van je lichaam opgenomen wordt. In ieder weefsel. Alleen al deze eerste stap is “onmogelijk”. Hoeveel stikstof in een bepaald deel van het lichaam opgenomen wordt, is afhankelijk van diverse factoren. De afstand tussen de haarvaten in dat weefsel, de dichtheid van het weefsel en tal van secondaire factoren. Deze factoren verschillen van weefsel tot weefsel, van persoon tot persoon, van dat tot dag en soms zelfs van minuut tot minuut.

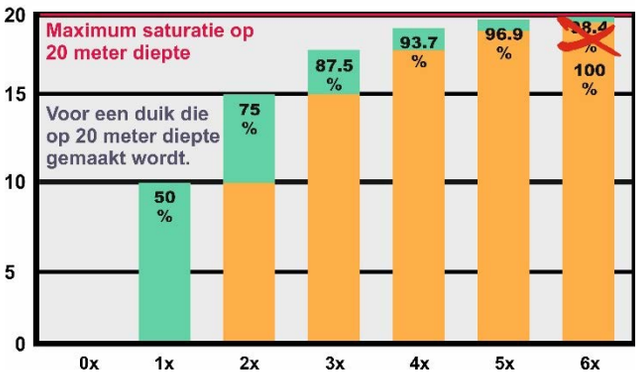
Het is niet mogelijk om al deze factoren in de berekening mee te nemen. Zelfs wanneer we dat zouden kunnen, dan zou er geen mogelijkheid zijn om met metingen de juistheid van de berekeningen te bevestigen. De berekeningen zijn gebaseerd op “aangenomen eigenschappen” van de verschillende weefsels. Deze “weefsels” hebben weinig relatie met de werkelijke weefsels in het menselijke lichaam. Ze worden

daarom “compartimenten” genoemd. Er bestaat weliswaar geen directe relatie tussen deze theoretische compartimenten en de werkelijke weefsels in ons lichaam. We weten natuurlijk wel dat bloed een snel weefsel is en bot langzaam. We weten echter niet precies hoe snel of langzaam ze zijn.

Compartimenten

Om de opname van stikstof in de verschillende delen van het lichaam te simuleren, heeft Haldane een model met 5 verschillende compartimenten geïntroduceerd. Deze 5 compartimenten gaan voor de opname van stikstof hetzelfde proces door. Echter met een verschillende snelheid. De naam van de compartimenten geeft de snelheid aan. De compartimenten in het model van Haldane zijn 5, 10, 20, 40 en 75 minuten compartimenten. De US Navy heeft later het 75 minuten compartiment vervangen door een 80 minuten compartiment en heeft het 120 minuten compartiment toegevoegd (een 6 compartimenten model).

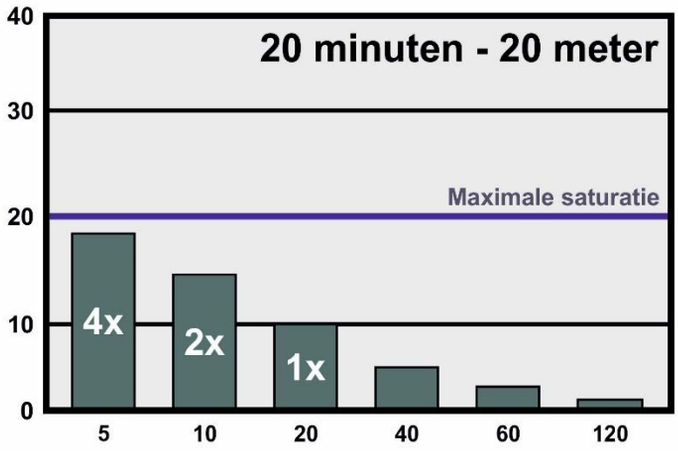
Het model dat voor de uitleg gebruikt wordt is een 6 compartimenten model met 5, 10, 20, 40, 60 en 120 minuten compartimenten. Dit is geen “echt” model. Het is niet getest is en wordt niet in een werkelijke tabel of computer gebruikt. Het is alleen bedoeld om decompressietheorie uit te leggen. Verschillende duikcomputers gebruiken ieder een eigen set van compartimenten. Er zijn verschillen in aantal en in de waarden. De manier waarop de verschillende computers de opname en afgifte van stikstof berekenen verschilt echter nauwelijks. De theorie van Haldane wordt ook nu nog in vrijwel alle tabellen en computers gebruikt.



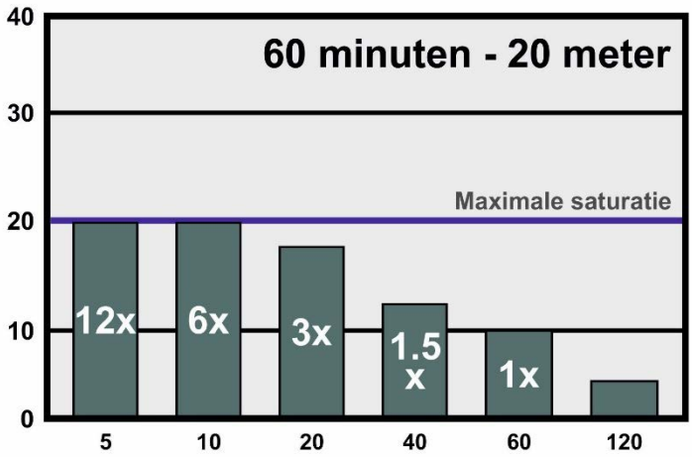
Volgens Haldane wordt een verschil in stikstofdruk tussen een compartiment en de omgeving in één “periode” gereduceerd tot de helft van wat het voorheen was. Een “periode” is in dit geval de naam van het compartiment. Wanneer je afdaalt naar een diepte van 20 meter, dan zullen uiteindelijk alle compartimenten stikstof opnemen totdat ze in evenwicht zijn met de stikstofdruk op die diepte. Het 5 minuten compartiment doet dit in een half uur. Dat zijn 6 stappen van 5 minuten. Na vijf minuten is 50% van de opname volbracht (het drukverschil is gehalveerd), na 10 minuten 75% (het “nieuwe” drukverschil is tot de helft gereduceerd), na 15 minuten 87,5%, na 20 minuten 93,7%, na 25 minuten 96,9% en na een half uur 98,4%. We kunnen nu natuurlijk verder rekenen met 99,2%, 99,6%, 99,8% enzovoort, maar dat doen we niet. Het is algemeen geaccepteerd dat we na zes stappen (98,4%) zo dicht bij een evenwicht zijn dat we 98,4% als volledige saturatie (100%) mogen beschouwen.

De modellen achter duiktabellen en duikcomputers berekenen de opname van stikstof dus in 6 stappen. Wanneer we dezelfde stappen voor het 60 minuten compartiment volgen, dan duurt het 6 uur voordat in dit compartiment een nieuw evenwicht ontstaat (6 keer een uur).

Om de volgende voorbeelden te vereenvoudigen zullen we niet meer in partiële stikstofdruk rekenen. We geven de opname van stikstof als equivalent van de stikstofdruk op een bepaalde diepte. De aangegeven diepte staat voor de stikstofdruk die lucht op die diepte heeft. We beginnen dus met 0 meter. Dat betekent niet dat het lichaam aan de oppervlakte geen stikstof bevat. Het betekent dat de stikstofdruk in het lichaam gelijk is aan die welke in lucht op 0 meter diepte heerst (dus eigenlijk 0,8 bar).



Met deze afspraak kunnen we de opname in de diverse compartimenten voor iedere diepte en op ieder moment van een duik berekenen. Het eerste voorbeeld is een duik van 20 minuten op 20 meter diepte. Het 5 minuten compartiment heeft 4 perioden afgerond (20 gedeeld door 5). Net als alle anderen werkt het 5 minuten compartiment in de richting van een evenwicht (de stikstofdruk op een diepte van 20 meter). In vier stappen loopt de saturatie van 10, 15 en 17,5 naar een stikstofdruk van 18,75 meter. Het 10 minuten compartiment heeft 2 perioden afgerond en staat dus op 15 meter. Het 20 minuten compartiment 1 periode, wat het op de stikstofdruk voor 10 meter brengt. Zoveel te langzamer het compartiment, zoveel te minder stikstof het op dit moment in de duik heeft opgenomen.



Wanneer we de situatie na 60 minuten op 20 meter diepte bekijken, dan zien we een interessant aspect van de decompressietheorie. Het 5 minuten compartiment heeft 12 perioden (60 gedeeld door 5 minuten) afgerond. Zoals we eerder aangegeven hebben stopt de berekening na 6 perioden. Dat wordt als evenwicht gezien. Dit betekent dat de opname van stikstof in het 5 minuten compartiment na 30 minuten voltooid was. In de laatste 30 minuten is geen stikstof meer opgenomen. We zien dat het 10 minuten compartiment net op dit moment in de duik tot een evenwicht gekomen is. De andere compartimenten zijn nog steeds “op weg” aan het opnemen. Wanneer we deze logica doortrekken, dan kunnen we zien dat het hele lichaam volgens dit model na 12 uur gesatureerd is. 12 uur is de tijd die nodig is om het 120 minuten compartiment tot een nieuw evenwicht te laten komen.

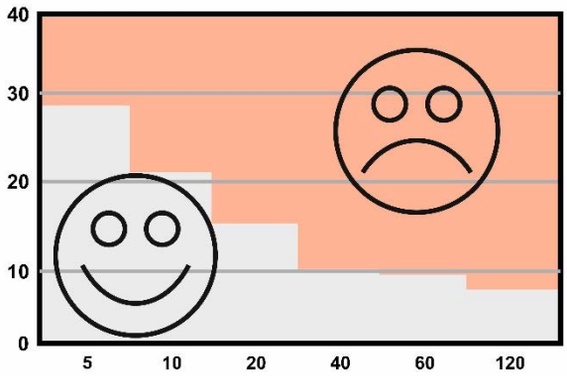
Dit verklaart hoe we de opname van stikstof berekenen, maar geeft nog niet aan of het veilig is om aan de oppervlakte terug te keren. Wat we weten is de hoeveelheid stikstof door ieder van de compartimenten moet worden afgegeven. We weten niet of dit op een gecontroleerde manier mogelijk is. Dit betekent dat we de tolerantie die ieder compartiment voor stikstof heeft in de berekening moeten opnemen. Dat is het maximum aan stikstof dat een compartiment op een gecontroleerde manier kan elimineren.

M-waarden

De tolerantie van een compartiment voor een overschot aan stikstof wordt M-waarde (maximum waarde) genoemd. Zoveel te sneller het compartiment, zoveel te groter de tolerantie. De gebruikte M-waarden worden ook M_0-waarden genoemd. Dit om aan te geven dat het de maximale waarden zijn voor een terugkeer naar een diepte van 0 meter. Dat is de oppervlakte op zeeniveau. Voor de terugkeer naar een andere omgeving dan de oppervlakte op zeeniveau is dus een andere set M-waarden van toepassing.

In publicaties, worden M-waarden vaak gegeven in de eenheid msw (meters of sea water). Als duiker zijn we beter vertrouwd met de eenheid bar, die we hier zullen gebruiken. De US Navy geeft voor het 5 minuten compartiment een maximale partiële stikstofdruk van 3,17 bar, terwijl voor het 120 minuten compartiment een maximum van 1,58 bar aangegeven is. M-waarden zijn niet gestandaardiseerd. Verschillende tabellen en computers gebruiken verschillende sets van M-waarden. Ze zijn dus moeilijk te vergelijken.

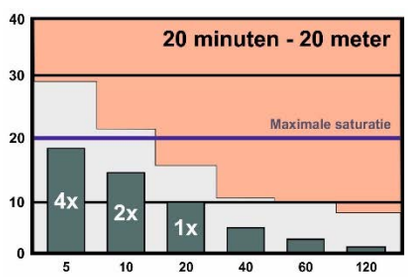
US Navy compartimenten	5	10	20	40	120
M_0-waarden	3,17 bar	2,68 bar	2,19 bar	1,7 bar	1,58 bar

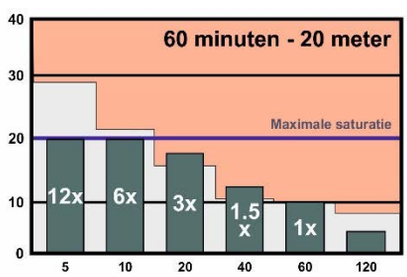


De waarden in de tabel zijn omgerekend van fsw en dan afgerond. In de grafieken hierna, worden de M-waarden aangegeven als diepte in meter (de diepte waar de stikstofdruk van de M-waarde heerst). Voor het 5 minuten compartiment is dit ongeveer 28 meter (voor een 80/20 mengsel en een M-waarde van 3,04 bar). De M-waarden die in dit boek gebruikt worden zijn uitsluitend bedoeld voor uitleg over decompressieziekte en zijn niet getest.

De meeste specialisten zijn het eens over de manier waarop de opname en de afgifte van stikstof berekend dienen te worden. De meningen over M-waarden (en procedures voor de opstijging) lopen uiteen. Deels is dit te verklaren aan de hand van het doel waarvoor een bepaald model ontwikkeld is. De Navy heeft getest op welk moment symptomen van decompressieziekte ontstaan. Spencer heeft met behulp van Doppler gemeten op welk moment zich bellen in de aders vormen. Niet alle bellen veroorzaken symptomen van decompressieziekte. Met verschillende “normen” komen ook verschillende resultaten. Een verschil in M-waarden is de belangrijkste oorzaak van het verschil in resterende nultijd, dat door verschillende computers gegeven wordt.

In de meeste duikcomputers is de M-waarde een vaste waarde. Er bestaan echter modellen die een duiker voor bepaalde gedragingen “straffen”. Dit wordt gedaan door over te schakelen op een conservatievere M-waarde (jojoduiken, snelle opstijgingen, et cetera). Wanneer de duiker gedrag vertoont dat niet aan te bevelen is, dan wordt de toelaatbare stikstofdruk in de compartimenten gereduceerd. Het aantal gedragingen dat in zo’n model in de berekening meegenomen kan worden is echter beperkt. Factoren zoals temperatuur en het duikprofiel kunnen wel meegerekend worden, maar factoren zoals uitdroging, vermoeidheid, ziekte en anderen niet. Een luchtgeïntegreerde computer, zou een plotselinge toename in het luchtverbruik kunnen meten. De aanname is dan dat de duiker zich inspant. Die voorziening zou ook reageren wanneer een hefballon gevuld wordt, of wanneer je lucht afstaat aan een andere duiker (buddy-breathing of een octopus).





Ongeacht de filosofie en de testprotocollen die achter een mathematisch model staan, er is altijd een set van M-waarden waarmee de duik vergeleken wordt. Zolang de stikstofopname binnen deze grenzen blijft, is een directe opstijging naar de oppervlakte toegestaan. Wanneer je over deze grenzen heengaat,

dan wordt een decompressie verplicht alvorens aan de oppervlakte terug te keren. Een decompressie-stop is bedoeld om de hoeveelheid stikstof in de compartimenten weer onder de grens te brengen.

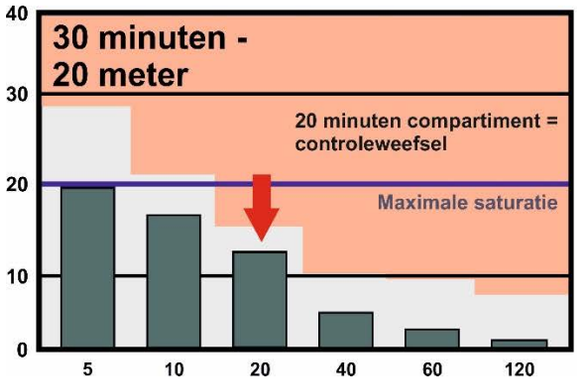
Wanneer we de twee voorgaande voorbeelden vergelijken, dan zien we dat de duik van 20 minuten op 20 meter binnen de nultijd is. Voor 60 minuten is een decompressiestop vereist.

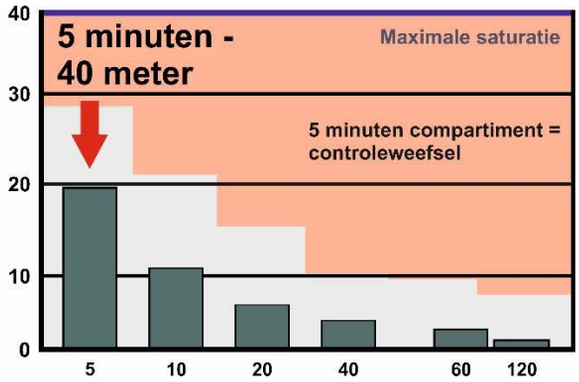
Controleweefsel (of compartiment)

Een computer geeft niet alleen aan of een directe opstijging naar de oppervlakte mogelijk is. Deze informeert je ook over de resterende nultijd voor een huidige diepte. Voor het geven van deze informatie baseert de computer zich op het "controleweefsel". Het controleweefsel is niet voor iedere duik dezelfde. Duiken op verschillende diepte hebben verschillende controleweefsels. In grote lijnen werkt de computer als volgt: de computer "vraagt" aan alle compartimenten hoe lang het duurt om op de huidige diepte de M-waarde te bereiken. De computer kiest dan het kortste antwoord en plaatst dit op de display als resterende duiktijd.

Wanneer we een duik op een diepte van 40 meter bekijken, dan zien we dat het 5 minuten compartiment relatief snel stikstof opneemt (in vergelijking met de andere compartimenten). Het is duidelijk dat dit compartiment het kortste antwoord geeft op de vraag, hoeveel minuten nog over zijn voordat de M-waarde bereikt wordt. In dit geval is het 5 minuten compartiment controleweefsel.

Wanneer we ook een duik op een diepte van 20 meter bekijken, dan is de situatie anders. Dit omdat het 5 minuten compartiment nu niet het controleweefsel kán zijn. Zelfs wanneer het 5 minuten compartiment op 20 meter diepte volledig verzadigd is (wat na 30 minuten het geval is), zal dit nog steeds ver van de M-waarde voor dit compartiment zijn. Voor duiken op een geringere diepte dan de M-waarde van een compartiment, speelt dat compartiment geen rol in de berekeningen. Wanneer dit compartiment de vraag krijgt hoeveel tijd resteert voordat de M-waarde bereikt is, dan zal het antwoord zijn dat deze tijd oneindig is. Dat is duidelijk niet het kortste antwoord. Ondiepe duiken worden gecontroleerd door langzame compartimenten.





Wat betekent dit concept voor duiken op variërende diepten? Deze maken voor de verschillende diepten, in dezelfde duik, gebruik van verschillende controleweefsels. Dit is wat we multi-levelduiken noemen. Daarbij is het aanbevolen dat de duik op de grootste diepte begint en dat je aansluitend naar steeds geringere diepten opstijgt. Er is discussie gaande, waarin geargumenteerd wordt dat "omgekeerde" profielen acceptabel zijn. De aanbeveling is echter altijd nog om, wanneer dat mogelijk is, zo'n duik op het diepste punt te beginnen. Op het diepste punt van de duik zal een snel compartiment het controleweefsel zijn. Wanneer je naar geringere diepten opstijgt, dan zal hij op een bepaald moment een diepte bereikt worden die geringer is dan de M-waarde van het compartiment dat als controleweefsel gefunctioneerd heeft. Vanaf dat moment geeft dit compartiment "oneindig" als antwoord op de

vraag over de resterende tijd. Het naast-langzamere compartiment zal nu het kortste antwoord geeft. Dit volgende compartiment wordt nu het nieuwe controleweefsel. Het moment waarop de computer wisselt van het ene controlecompartiment naar het andere is soms op de display van de computer te zien. De resterende nultijd maakt dan plotseling een sprong van meerdere minuten.

Het is deze overgang van snellere naar langzamere controleweefsels, die zoveel meer duiktijd geeft bij het gebruik van een computer in vergelijking met een duiktabel. De tabel gaat ervan uit dat de gehele duik gedaan is op de maximale diepte. Dit is de som van de duiktijd en de resterende nultijd die je op de grootste diepte van de duik op de computer afleest, wanneer de tabel en de computer op hetzelfde mathematisch model gebaseerd zijn. De tabel houdt er geen rekening mee dat het verdere verloop van de duik op een geringere diepte gemaakt wordt.

Er zijn tabellen die ook gebruik maken van het concept van multi-level duiken. Wanneer je naar een geringere diepte opstijgt, dan is er een punt waarop de verdere duik met een ander controleweefsel berekend kan worden (de horizontale lijnen in de tekening). De diepte waar dit gedaan mag worden staan aangegeven op de tabel. Zo'n tabel vertelt je van tevoren op welke diepte je naar een ander controleweefsel wisselt. Zo komt een langere nultijd ter beschikking. De computer geeft niet van tevoren aan op welke diepte meer tijd beschikbaar komt. Aanvullende resterende nultijd wordt door een computer als "verrassing" gegeven. Een computer met vaste M-waarden zal altijd op dezelfde diepte overschakelen naar een ander controleweefsel. Dat is het punt waar de diepte geringer wordt dan de M-waarde van het controleweefsel dat tot dan toe de resterende nultijd bepaald heeft. Dit betekent dat je een test zou kunnen doen, om uit te zoeken op welke diepten jouw computer overschakelt. De gevonden waarden zijn van toepassing op alle toekomstige duiken met die computer Zo weet je altijd vooraf hoe ver je moet opstijgen om van extra duiktijd te kunnen profiteren.

Simuleer in een drukkamer een duik naar 40 meter diepte. Stijg op in stappen van 1 of 2 meter en noteer zowel de duiktijd, als de resterende nultijd. Na de "duik" tel je voor iedere diepte de duiktijd en de resterende nultijd bij elkaar op. Aansluitend voer je de diepten en de bijbehorende som van duiktijd en resterende nultijd in een grafisch programma op je PC in. De grafische indruk van de gegevens laat je zien dat de totale duiktijd (duiktijd + resterende nultijd) toeneemt wanneer je naar geringere diepte gaat. Dit kan ten dele verklaard worden door de langzamere opname van stikstof op geringere diepte. Op bepaalde punten neemt de toename in duiktijd in tempo toe. Dit zijn punten waar de computer naar een langzamer controleweefsel omschakelt.

Je moet relatief snel te werk gaan om binnen de nultijd van de computer te blijven. Dit gaat het beste met z'n tweeën. Deze test kan ook tijdens een gewone duik gedaan worden. Noteer dan de gegevens tijdens de opstijging op een leitje.

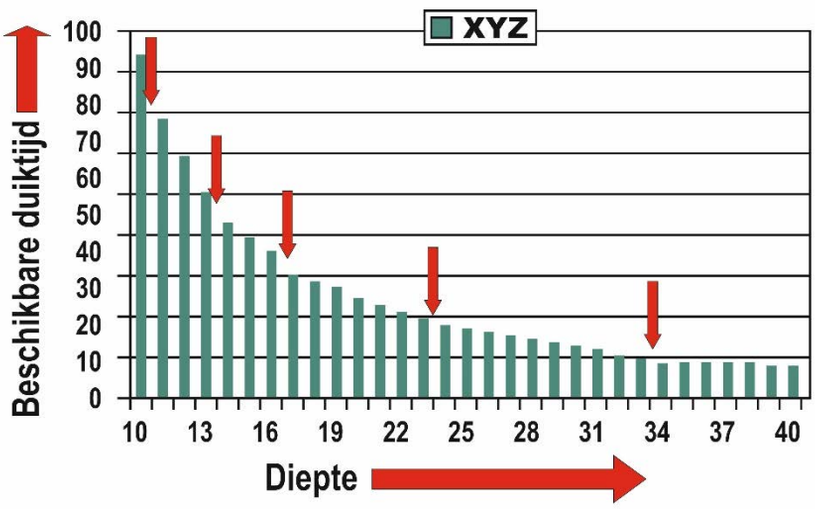
Op de volgende pagina zijn de gegevens ingevuld van een duik die gemaakt is om de M-waarden te zoeken. Het lege formulier kan gebruikt worden om je eigen computer te testen.

M-waarde identificatie voor duikcomputers

Computer 1:				Computer 2:			
Diepte in meter	Duiktijd	Resterende duiktijd	Totaal	Diepte in meter	Duiktijd	Resterende duiktijd	Totaal
10				10			
11				11			
12				12			
13				13			
14				14			
15				15			
16				16			
17				17			
18				18			
19				19			
20				20			
21				21			
22				22			
23				23			
24				24			
25				25			
26				26			
27				27			
28				28			
29				29			
30				30			
31				31			
32				32			
33				33			
34				34			
35				35			
36				36			
37				37			
38				38			
39				39			
40				40			

M-waarde identificatie voor duikcomputers

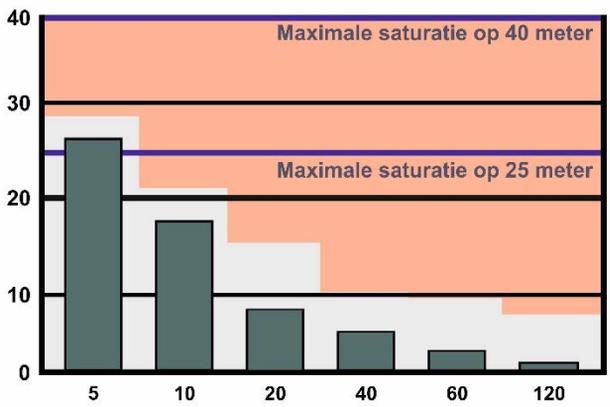
Computer 1: XYZ				Computer 2: DC11			
Diepte in meter	Duiktijd	Resterende duiktijd	Totaal	Diepte in meter	Duiktijd	Resterende duiktijd	Totaal
10	18	76	94	10	11	89	100
11	18	58	76	11	10	63	73
12	17	49	66	12	10	49	59
13	17	39	56	13	9	38	47
14	16	32	48	14	9	35	44
15	16	28	44	15	8	31	39
16	15	25	40	16	8	23	31
17	14	20	34	17	7	18	25
18	13	19	32	18	7	14	21
19	13	17	30	19	7	5	12
20	12	16	28	20	6	5	11
21	12	14	26	21	6	5	11
22	11	13	24	22	6	5	11
23	11	11	22	23	5	5	10
24	10	10	20	24	5	5	10
25	10	9	19	25	4	5	9
26	9	9	18	26	4	5	9
27	8	9	17	27	4	5	9
28	8	8	16	28	3	5	8
29	7	8	15	29	3	5	8
30	7	7	14	30	3	5	8
31	6	7	13	31	2	5	7
32	5	7	12	32	2	5	7
33	5	6	11	33	2	5	7
34	4	6	10	34	2	5	7
35	4	6	10	35	1	5	6
36	3	7	10	36	1	5	6
37	3	7	10	37	1	5	6
38	3	7	10	38	1	5	6
39	2	7	9	39	1	5	6
40	1	8	9	40	0	5	6



De rode pijlen geven aan, op welk moment de resterende nultijd sneller toeneemt dan voorheen. Dit zijn de punten waar de computer overschakelt naar een berekening met een langzamer controleweefsel. Om beter te zien waar de verandering plaats heeft, kun je een liniaal langs de bovenkant van de staafjes leggen. De geleidelijke tijdstoename tussen deze punten is het gevolg van een langzamere opname van stikstof op geringere diepte. In dit geval wordt nog steeds met hetzelfde compartiment gerekend. Door de geringere diepte is het drukverschil echter kleiner en daarmee de opname van stikstof langzamer. Het gevolg is een iets langere resterende nultijd.

Na een verblijf op 40 meter diepte stijgt een duiker op naar geringere diepte. Op 25 meter diepte (de tweede diepte) geeft het 5 minuten compartiment aan, dat het eeuwig op deze diepte zou kunnen blijven (op 40 meter gaf dit compartiment nog een waarde van slechts enkele minuten).

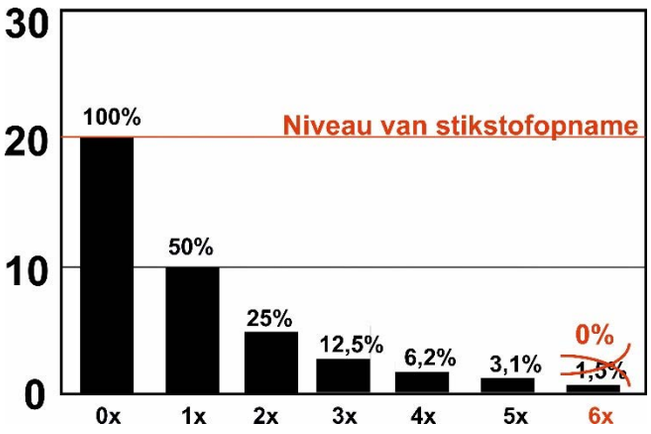
De plotselinge toename in de resterende duiktijd is dus het gevolg van het overschakelen op een langzamer controleweefsel. Sommige duikers denken dat de afgifte van stikstof tijdens het opstijgen naar geringere diepte de oorzaak is. Dat is niet het geval. Natuurlijk kan er sprake zijn van afgifte van stikstof. Dit komt echter niet tot uiting in de resterende nultijd. Wanneer sprake is van afgifte van stikstof, dan zal dit in de snelle compartimenten gebeuren. Dat zijn de enigen waarin de stikstofdruk hoger is dan de stikstofdruk op de diepte waar de duiker zich bevindt. Op geringer diepte zijn dit echter niet de compartimenten die als controleweefsel optreden. Ze geven altijd aan dat ze eindeloos op deze diepte zouden kunnen blijven. De waarde op het display van de computer is uitsluitend gebaseerd op het compartiment dat de kortste tijd aangeeft (die nog blijft voor het bereiken van de M-waarde). De kortste tijd kan alleen gegeven worden door een compartiment dat nog stikstof aan het opnemen is. Dat is een compartiment dat nog niet verzadigd is én de M-waarde nog niet bereikt heeft.



Wanneer de snellere compartimenten tijdens de duik stikstof afgeven, dan gaat dit langzaam. De regel dat het drukverschil tussen een compartiment en de omgeving periodisch gehalveerd wordt, is nog steeds van toepassing. Wanneer een weefsel verzadigd is tot 30 meter diepte en de duiker zich op een diepte van 20 meter bevindt, dan gaat de afgifte van stikstof niet zo snel als aan de oppervlakte. Het is het drukverschil tussen 30 en 20 meter, dat gehalveerd wordt. Niet het drukverschil tussen 30 en 0 meter. Vergeet echter niet, dat het niet relevant is of wel of geen stikstof afgegeven wordt. De weefsels die eventueel stikstof afgeven vallen buiten de

berekening van de resterende nultijd. Dit omdat deze aangeven, dat ze oneindig lang op de nieuwe diepte kunnen blijven (dit is waar voor alle duiken binnen de nultijd).

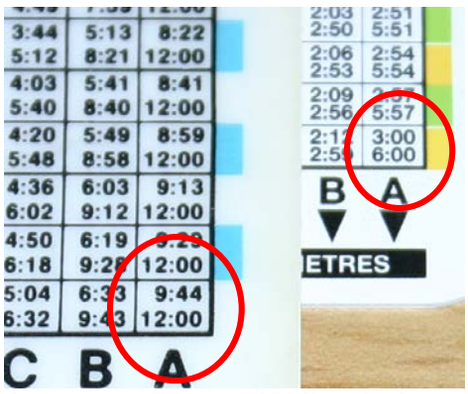
Oppervlakte-interval



Vroeger moesten duikers voor een tweede duik op een dag de twee duiktijden bij elkaar optellen. Ze rekenden deze als een enkele duik, op de grootste diepte van de twee duiken. Er bestond nog geen procedure om rekening te houden met de afgifte van stikstof gedurende een oppervlakte-interval. Dit is veranderd met de tweede versie van de US Navy tabel van 1956. De US Navy koos het 120 minuten compartiment als controleweefsel voor het oppervlakte-interval. Er werd een systeem met letters opgesteld (A-N), om aan te geven hoeveel stikstof in het 120 minuten compartiment was opgenomen. De drukgroepen voor herhalingsduiken.

Het werd aangenomen dat de afgifte van stikstof net zo functioneerde als de opname van stikstof. Een drukverschil tussen een compartiment en de omgeving wordt in één periode tot de helft gereduceerd. De keuze van het 120 minuten compartiment betekent dus dat de afgifte van stikstof in 12 uur voltooid is (6 keer 120 minuten). Snellere compartimenten geven hun stikstof sneller af dan het 120 minuten compartiment. Door te kiezen voor een langzaam compartiment, wordt dus ook rekening gehouden met de afgifte in de snellere compartimenten. Compartimenten die langzamer zijn dan 120 minuten, kunnen eventueel een probleem zijn. Dit omdat de afgifte van stikstof in deze compartimenten niet afgedekt wordt door een berekening op basis van het 120 minuten compartiment.

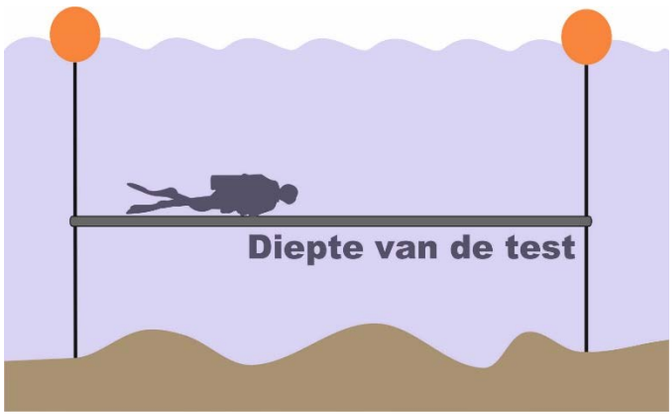
Buhlmann heeft later het EE (exponentieel – exponentieel) model geïntroduceerd. Hij ging ervanuit dat de afgifte van stikstof in ieder compartiment net zo gaat als de opname van stikstof in dat compartiment. Een 5 minuten compartiment zou in 30 minuten volledig verzadigd zijn. Dat compartiment zou de afgifte van stikstof dus ook in 30 minuten afronden. De theorie gaat ervanuit, dat het controleweefsel van de duik ook het controleweefsel van het oppervlakte-interval dient te zijn.



Bij duiktabellen is het gemakkelijk te bepalen welk compartiment gebruikt wordt voor het berekenen van het oppervlakte-interval. Het is voldoende om in het laatste vakje van de tabel voor het oppervlakte-interval te kijken. Wanneer hier 12 uur staat, dan is het 120 minuten compartiment het controleweefsel (12 gedeeld door 6 stappen = 2 uur of 120 minuten). Wanneer hier 6 uur staat, dan is het controleweefsel voor het oppervlakte-interval het 60 minuten compartiment (6 uur gedeeld door 6 stappen = 1 uur of 60 minuten).

Er is kritiek geweest op zowel de US Navy als het Buhlmann model voor het berekenen van het oppervlakte-interval. Op basis daarvan zijn nieuwe modellen ontwikkelt. Een groot probleem voor die ontwikkeling, is dat er nauwelijks testgegevens beschikbaar zijn over de gevolgen van meerdere duiken gedurende meerdere dagen. De belangrijkste kritiek op het US Navy model was dat het 120 minuten compartiment onnodig "streng" was voor de duikprofielen die voor sportduikers gebruikelijk zijn. De kritiek op Buhlmann was

dat het model duiken toeliet waarvan in testduiken was aangetoond dat deze decompressieziekte veroorzaakten. In het bijzonder voor korte, maar diepe, duiken.

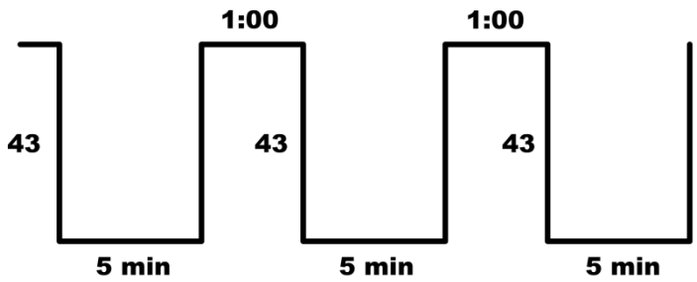


Het testen van tabellen is geen aangenaame taak. Je kunt niet gewoon een "leuke" duik maken en dan getest worden met een Doppler of op symptomen. Ten eerste weten we dat kou en inspanning een negatieve invloed op decompressieziekte hebben. De duik mag dus niet te ontspannen zijn en moet in koud water gedaan worden. In de meeste gevallen moet de duik een van te voren bepaald profiel volgen. De bodem, met het interessante onderwaterleven, is hiervoor vanwege dieptevariaties niet geschikt. Om op dezelfde duikplaats duiken op meerdere diepten te kunnen testen wordt meestal gebruik gemaakt van een balk. Deze wordt op een bepaalde diepte tussen twee boeien gespannen. De duikers zwemmen rondom de balk, totdat het tijd is om via een lijn aan de opstijging te beginnen. Stel je voor dat je gekozen bent om de nultijd voor een duik op een diepte van 10 meter te testen. In dat geval zwem je meerdere uren (in koud water) langs een in het water hangende balk.

Jaren later heeft Spencer het 60 minuten compartiment, voor het berekenen van het oppervlakteinterval, geïntroduceerd. Dit zou beter bij de behoefte van sportduikers passen. Het 60 minuten compartiment functioneert alleen voor dit doel, wanneer we afzien van extreem lange duiken en wanneer we alleen duiken binnen de nultijd maken. Omdat beiden voor sportduikers ongebruikelijk zijn, werd dit niet als een probleem gezien. Je kunt dus zeggen dat de tabel lange duiken dient te verbieden, om de mogelijkheid te creëren gebruik te maken van een sneller controleweefsel voor het oppervlakteinterval. Voor de meeste duiken zou het 40 minuten compartiment zelfs afdoende zijn. Dit zou de toegestane duiktijd voor duiken op geringe diepte echter nog verder beperken.

Herhalingsduiken en het maken van meerdere duiken gedurende meerdere dagen, zijn altijd al de zorgenkindjes van de decompressietheorie geweest. Duikcomputers en duiktabellen hebben hun beperkingen als het op intensief duiken aankomt. Er zijn diverse procedures en aanbevelingen om duikers te motiveren hun blootstelling aan stikstof binnen grenzen te houden. De meeste van deze procedures worden niet meegenomen in de berekeningen van de computer of tabel. Het wordt dus van de duiker verwacht om zelf verstandige beslissingen te nemen.

In het bijzonder duikinstructeurs en onderwaterfotografen hebben een verhoogd risico. Beiden tenderen ertoe een groot deel van de dag onder water te blijven. Vanwege hun blijven ze vaak op geringe diepte. Ze maken meerdere duiken op een dag, of minder duiken maar met een lange duiktijd.



In 1982 hebben Leitch en Barnard gepubliceerd, dat ze na een serie van testen symptomen van decompressieziekte gevonden hebben. Bij één duiker na de tweede duik en bij meerdere duikers na de derde duik

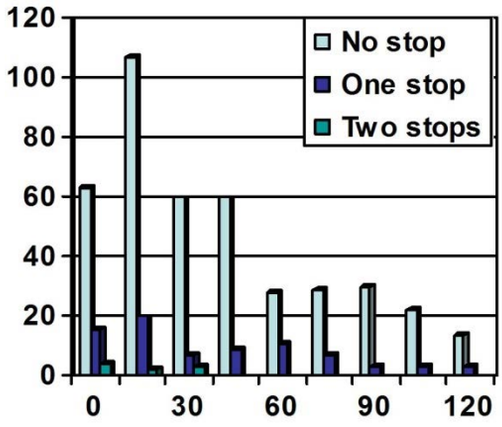
van een testprotocol van 3 duiken. Alle duiken werden op een diepte van ongeveer 43 meter gemaakt met een duiktijd van 5 minuten. Tussen deze duiken werd een oppervlakte-interval van een uur aangehouden. We dienen ook te weten dat ze extra voorzorgen voor het voorkomen van decompressieziekte namen (die niet door de tabel voorgeschreven waren). Bijvoorbeeld het beperken van het stikstofaandeel in het ademgas en het maken van een extra decompressiestop. Wanneer we deze duiken simuleren met een computer met het oorspronkelijke EE model, dan zullen we zien dat zulke computers alle drie duiken accepteren. Je zou daarbij zelfs het oppervlakte-interval kunnen beperken tot 36 minuten (6 keer 6 minuten, wat vaak het snelste compartiment is, dat in dit soort computers gebruikt wordt) en het zou nog steeds toegestaan worden. Een duik op die diepte wordt gecontroleerd door het snelste compartiment. Wanneer datzelfde compartiment gebruikt wordt voor het berekenen van het oppervlakte-interval, dan zal de computer relatief snel toestaan om eenzelfde duik te herhalen. Met het oude EE model "vergeet" een computer snel een voorheen gemaakte diepe duik. De meeste computers met een EE model die tegenwoordig verkocht worden, hebben een veranderd protocol voor het berekenen van het oppervlakte-interval. Dit is gedaan om dit soort diepe herhalingsduiken uit te sluiten.

Opstijgen

Het deel van de decompressietheorie waarover het meeste verschil van mening bestaat, is de opstijging. Dit gaat zover dat sommige computers aanbevelingen geven die precies het omgekeerde zijn van wat anderen aanbevelen. Sommige geven aan dat je op grotere diepte sneller kunt opstijgen, om dan op geringere diepte langzamer te gaan. Andere willen dat je op grotere diepte langzamer gaat en zelfs een "diepe stop" maakt.

Vroeger werd aanbevelen zo snel mogelijk de diepte te verlaten, om verdere opname van stikstof te beperken. Wanneer we ons beperken tot de theorie voor de opname en afgifte van stikstof in relatie tot M-waarden, dan is dit een logische aanbeveling. Zoveel te korter de tijd op diepte, zoveel te minder stikstof in het lichaam. Deze theorie gaat er echter vanuit dat de stikstof tijdens de duik en tijdens de opstijging in oplossing is en dat het dus de taak van de computer is om het ontstaan van bellen te voorkomen.

Later is vastgesteld dat zich ook bellen vormen wanneer duikers binnen de nultijden van hun tabel of computer duiken. In de meeste gevallen ontwikkelen zich geen symptomen van decompressieziekte. Een logische volgende stap was dus het te voorkomen dat zich bellen ontwikkelen (of dit te beperken). In eerste instantie werd voor dit doel de nadruk gelegd op langzame stijgsnelheden in geringere diepte en op het maken van een veiligheidsstop. Dit resulteerde in de aanbeveling om altijd een veiligheidsstop te maken en in een vereiste om dit voor bepaalde duikprofielen te doen.



In testduiken is getoond dat het maken van een veiligheidsstop, bij duiken binnen de nultijd, het aantal bellen sterk beperkt. De stop in de test met 1 stop was op 3 meter gedurende 2 minuten. Bij 2 keer stoppen was de eerste 1 minuut op 6 meter en dan 4 minuten op 3 meter.

Critici noemen de procedure om sneller op te stijgen op grotere diepte en dan langzamer bij het naderen van de oppervlakte "bend and mend". Die uitspraak klinkt leuk en wordt dus ook te pas en te onpas gebruikt. Het geeft uitdrukking aan de mening dat de oorzaak van decompressieziekte op grotere diepte te zoeken is en dat we het probleem bij de oorsprong moeten aanpakken, alvorens op te stijgen naar geringere diepte. Voor geen van de geuite meningen bestaat sluitend bewijs (2006). We vinden dan ook computers die de "verlaat de diepte" benadering volgen naast computers die de "diepe stop" theorie gebruiken.

Het grootste deel van het onderzoek naar het concept van de diepe stop, is begonnen vanwege berichten van een bioloog. Deze gaf aan, dat hij zich beter voelde na een duik waarin hij vissen had gezocht, dan na een duik waarin hij alleen observeerde. Het verschil tussen deze duiken was de noodzaak om bij het omhoog brengen van vissen regelmatig te stoppen, om de zwemblaas van de verzamelde vissen te puncteren. Voor een stop op grotere diepte wordt (voor computers voor het sportduiken) het meest gesproken over het werk van Dr. Bruce Wienke (RGBM).

De gedachte achter RGBM (Reduced Gradient Bubble Model) en vergelijkbare modellen, is dat het niet mogelijk is om de vorming van bellen te voorkomen. Dit omdat je al microbellen in je lichaam hebt voordat je aan een duik begint. Deze microbellen zijn te klein om met een Dopplerdetector gemeten te worden. Voor een Doppler dienen bellen groter te zijn dan ongeveer 10 micron. De gedachte achter deze modellen is nog wel het voorkomen van nieuwe bellen, door het volgen van het concept van saturatie, stikstofafgifte en M-waarden. Het toegevoegde kenmerk is het klein houden van bestaande bellen, dankzij een procedure voor de opstijging waarbij op grotere diepte een stop gemaakt wordt.

Zoals de naam aangeeft, gaat het bij deze modellen om het drukverschil tussen een bel en de omgeving (pressure gradient). Stel je voor dat je twee ballonnen verbindt met een stukje pijp dat van een kraan voorzien is. Stel je voor dat de kraan gesloten is en dat aan iedere kant een opgeblazen ballon is vastgemaakt. Aan de ene kant een volle ballon, aan de andere kant een bijna lege. Wat gebeurt wanneer je de verbindingskraan opendraait? De eerste gedachte is vaak dat een evenwicht ontstaat. Dat beide ballonnen even groot worden. Na een beetje nadenken kom je waarschijnlijk op het juiste antwoord. De kleine ballon wordt kleiner en de grote groter. Eigenlijk weet je dat al. Het opblazen van een ballon gaat eerst moeilijk en wordt dan steeds gemakkelijker. De oppervlaktespanning van de ballon wordt kleiner naarmate de ballon groter wordt.

Vergelijkbaar met een ballon is de oppervlaktespanning van een bel groter, naarmate deze kleiner is. Kleine bellen hebben een interne druk die hoger is dan de omgevingsdruk. (wanneer de bel klein genoeg is, dan kan de druk in de bel wel 0,5 bar hoger zijn dan de druk in de omgeving). Zolang de bel dus klein genoeg blijft om de interne druk te handhaven, zal deze geen stikstof uit de omgeving opnemen. De bel wordt dus niet groter. Het kleine belletje zal door de gunstige drukverhouding zelfs stikstof afgeven, dat in de bloedbaan in oplossing gaat.

Het probleem dat bij de opstijging ontstaat, is een combinatie van twee factoren. Ten eerste het onmiddellijke effect dat de drukafname (Boyle) op het volume van de bel heeft. Ten tweede het vertraagde effect van de afgifte van stikstof uit de bloedbaan. Wanneer we opstijgen naar een geringere diepte, dan neemt de druk af. Hierdoor zal volgens de wet van Boyle een bel groter worden. De bel zet echter verder uit dan normaal, doordat de oppervlaktespanning afneemt naarmate de bel groter wordt. De bel was vanwege de oppervlaktespanning kleiner, dan volgens de wet van Boyle het geval zou moeten zijn. Die oppervlaktespanning neemt af wanneer de bel groter wordt. De bel wordt dus groter door de afname in de omgevingsdruk én door afname van het drukverschil in de bel en de omgeving.

De tweede factor is de vertraging bij de afgifte van stikstof uit de bloedbaan. De partiële stikstofdruk in de bloedbaan staat niet direct in relatie tot de diepte waar je bent. Deze staat in relatie tot de partiële

stikstofdruk op de diepte waar je de laatste ademteug genomen hebt. Alleen tijdens het ademen is sprake van opname en afgifte van grotere hoeveelheden gassen. Tijdens een opstijging is het mogelijk dat de laatste ademteug meerdere meters dieper genomen is, dan de diepte waar de duiker nu is.

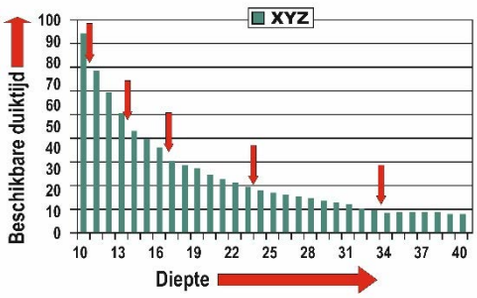
Zonder te beginnen aan eindeloze berekeningen, kunnen we ons voorstellen wat er gebeurd. Een kleine bel met een hoge interne druk (en dus de tendens stikstof af te geven), wordt groter en verliest de interne druk. De partiële stikstofdruk binnen de bel neemt dus ook af. Op hetzelfde moment zal de partiele druk van stikstof in het bloed hoger zijn dan "normaal is" voor die diepte. Dit omdat deze in relatie staat tot een ademteug op grotere diepte. Op een bepaald moment zal de stikstofdruk in het bloed dus hoger zijn dan de stikstofdruk in de bel. De bel kan dan stikstof opnemen en groter te worden.

De bedoeling van een diepte stop is dus in een moment te voorzien waarin de partiële stikstofdruk in het bloed zich kan aanpassen aan de partiële stikstofdruk die "normaal is voor die diepte". Dit staat de bel toe de stikstof die het heeft opgenomen weer af te geven. Daardoor kan de bel klein genoeg blijven (of weer te worden) om een interne druk te handhaven, die groot genoeg is om verdere opname van stikstof te voorkomen.

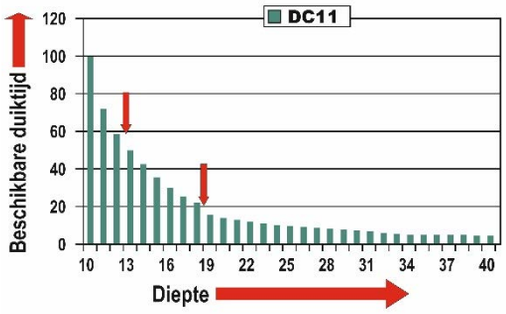
Vergeet niet dat deze theorie geen zorgen met zich meebrengt voor de meeste duiken die sportduikers maken. We tenderen ertoe aan het einde van iedere duik de glooiing van de bodem of het rif te volgen. Alleen voor het laatste stukje wordt een directe opstijging naar de oppervlakte gemaakt. Deze "opstijgingen" langs het rif zijn langzaam, omdat we nog steeds "duiken". We stoppen om het onderwaterleven te bekijken, we volgen de meest interessante dieptelijn, et cetera. Een directe opstijging vanaf grotere diepte wordt niet vaak gemaakt (bij een wrakduik is dat vaak wel het geval).

Daarnaast hebben de meeste duiken die we voor het plezier maken een geringere diepte dan de diepte waarop een diepte stop gemaakt zou worden. Sportduikers zijn minder betroffen door de mechanismen achter de vorming van bellen dan beroepsduikers of "technical divers". Natuurlijk dient ook een sportduiker aandacht te besteden aan aanbevelingen voor opstijgingen en de problemen die hieraan gerelateerd zijn. Voor een sportduiker is het verstandig om tenminste zoveel aandacht te besteden aan de problemen die gerelateerd zijn aan ondiepe herhalingsduiken.

Wat gebeurt er wanneer we meer compartimenten aan een model toevoegen?



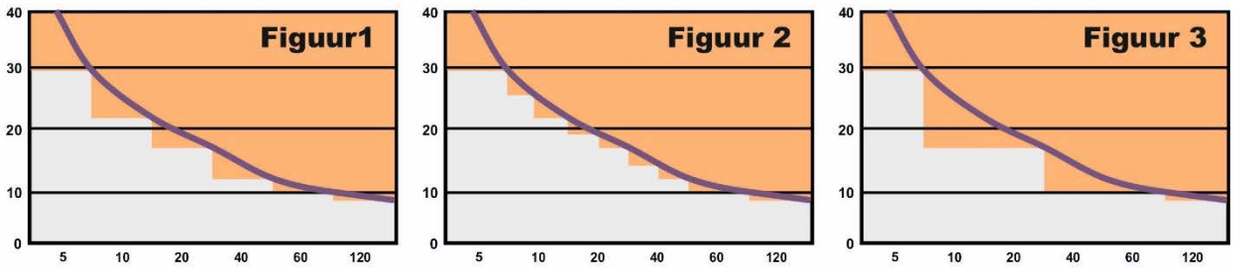
Zoals we in het deel over M-waarden gezien hebben schakelt een duikcomputer over op een langzamer controleweefsel, wanneer we naar geringere diepte opstijgen. Zoveel te meer compartimenten in een model opgenomen zijn, zoveel te vaker zal de computer omschakelen. Wanneer een model minder compartimenten heeft (in het scala van compartimenten dat als controleweefsel voor een duik kan functioneren), zullen we minder realistische waarden op de display van de computer aflezen. Dat was het geval bij de DC11 waarvan de waarden voorheen aangegeven zijn (deze computer wordt al lang niet meer verkocht).



Compartimenten die langzamer zijn dan het controleweefsel voor het oppervlakte-interval zijn niet relevant voor het berekenen van de duiktijd. Wanneer compartimenten meegenomen worden bij de berekening van de duik, dan moeten ze ook meegenomen worden voor het oppervlakte-interval.

Zulke langzame compartimenten zijn wel in het model opgenomen, omdat ze nodig zijn voor het berekenen van series van meerdere duiken, voor de totale desaturatietijd en voor het vliegen na het duiken. In de meeste gevallen spelen alleen compartimenten met waarden tussen 1 en 60 minuten een rol voor de duik (de DC11 had 6 compartimenten, maar die liepen van 6 tot 600 minuten).

We kunnen ons voorstellen dat de "echte" M-waarden een curve vormen. Bij een model met honderden M-waarden ontstaat een lijn, zoals de blauwe lijn in de tekening. Wanneer we het aantal compartimenten beperken, dan zal de nultijd in stappen toenemen. Natuurlijk wel aan de "veilige" kant.



Je zou kunnen argumenteren dat een model met minder compartimenten veiliger is. Je bent dan vaak verder van de eigenlijke lijn weg. Dat is echter niet het geval. Er zijn altijd punten waarop de stappen de "werkelijke lijn" raken. Je weet nooit op welke diepte een extra marge beschikbaar is en op welke diepte niet.

Bij een groot aantal compartimenten welke sneller dan 60 minuten zijn, zal de M-waarde altijd dicht bij de "echte" curve liggen. Je marge zal altijd min of meer gelijk zijn. Dit betekent dat er een duidelijke basis is om extra voorzichtigheid in te bouwen. Je weet dat de marge waarin de computer voorziet, ongeacht de diepte, altijd min of meer gelijk is.

Een klein aantal compartimenten resulteert in grote sprongen. Dat was te zien in de test van de DC11. De resterende nultijd neemt lange tijd nauwelijks toe bij het opstijgen naar geringere diepte en geeft dan plotseling vele minuten extra op het moment dat het volgende compartiment de controle overneemt. Een compartiment dat veel langzamer is.

Veel computers geven zulke "grote" sprongen wanneer je de oppervlakte nadert. Computers die dit ook doen op diepten van ongeveer 20 meter zijn, voor zover ons bekend, niet meer te koop.

De keuze van duiktabellen en duikcomputers

De vraag waarom sommige mensen gevoeliger zijn voor decompressieziekte dan anderen, is nog niet beantwoord. Het is niet realistisch in de naaste toekomst een antwoord op deze vraag te verwachten. Dit geeft ruimte voor discussie over verschillende standpunten. Het verschil in standpunten heeft geresulteerd in verschillende rekenmodellen als basis voor de diverse tabellen en computers. Op dit moment is het niet mogelijk te zeggen welke van deze modellen "het beste is". Er is domweg niet voldoende informatie beschikbaar, om één van de modellen als beter of slechter aan te wijzen. Wanneer zulke informatie zou bestaan, dan zouden diverse modellen van de markt verdwijnen en niet meer te koop zijn.

Sommigen zouden zeggen dat de “veiligste” computer de beste is. Wanneer we “veiligste” in dat geval zouden zien als “meest conservatieve”, dan zou het niet zo moeilijk zijn de “beste” te kiezen. Je zou gewoon de nultijden van de beschikbare modellen met elkaar moeten vergelijken. Je zou dan ook zelf een “nog betere” computer kunnen ontwikkelen, door die zo te programmeren dat de nultijden altijd korter zijn dan die van de concurrentie.

Je enige probleem is dan, dat je waarschijnlijk niet lang de “beste” bent. Voordat je het weet brengt iemand anders een computer op de markt die “nog beter”, omdat die nog kortere nultijden geeft. Wanneer dat proces een poosje doorgaat moeten we stoppen met duiken, omdat je in de badkuip al “het risico op decompressieziekte” zou lopen. Computers conservatiever maken is niet de juiste benadering met betrekking tot de veiligheid.

De laatste tijd wordt in de reclame voor duikcomputers vooral de nadruk gelegd op de protocollen voor opstijgingen. Dit varieert van modellen die op grotere diepte een hogere stijgsnelheid toestaan die dan langzamer wordt naarmate je de oppervlakte nadert, terwijl anderen ook op grote diepte een lage stijgsnelheid voorschrijven met een stop op grotere diepte (het tegenovergestelde dus en gebaseerd op RGBM). RGBM theorie in duikcomputers was al beschikbaar is 1991. Het werd in die tijd niet met enthousiasme ontvangen, waardoor het na korte tijd weer verdween, om in recente jaren weer op te duiken. Bij de tweede introductie vond het model wel enthousiasme en afzet. Er is echter nog steeds weinig bewijs dat de voordelen van een diepe stop bevestigt voor het soort duikprofielen die in het sportduiken gebruikelijk zijn.

Om vast te stellen of zoiets als “de beste duikcomputer” of “het beste mathematische model” bestaat, moeten we de factoren bekijken waarvan bekend is, of vermoed wordt, dat ze het risico op decompressieziekte vergroten. We moeten bekijken in hoeverre deze factoren meegewogen worden in de aanbevelingen die de computer geeft. Daarnaast kunnen we kijken of het te verwachten is dat toekomstige duikcomputers meer van deze factoren meerekenen.

Diepte en duiktijd – dit zijn de twee hoofdfactoren waarop mathematische modellen hun voorspellingen baseren. De computer is voorzien van een klok en een druksensor, om deze twee waarden te meten. De opname en afgifte van stikstof wordt op basis van deze gegevens berekend.

Hoogte – voor het duiken op grotere hoogte moet een andere set M-waarden gebruikt worden. De duiker keert terug naar een omgeving met een geringere atmosferische druk. In een omgeving met een lagere druk, kan het lichaam minder stikstof in oplossing houden. Vrijwel alle duikcomputers staan het duiken in bergmeren toe. Sommigen registreren automatisch dat je op hoogte bent en anderen moeten door de duiker ingesteld worden. Er is niet veel onderzoek gedaan naar het duiken op grotere hoogte. Er zijn een aantal bedenkingen. Deze gaan verder dan het aanpassen van de M-waarden. De meeste computers nemen veel van deze bedenkingen niet mee in de berekeningen.

Bij een duik in een bergmeer keer je aan het einde van de duik terug naar een geringere luchtdruk dan die op zeeniveau. Dit betekent dat de partiële druk van zuurstof, net als die van stikstof, geringer is dan die op zeeniveau. Beiden hebben consequenties. Er is niet veel onderzoek gedaan naar de exacte aard. Op het eerste gezicht lijkt het voldoende te zijn om gewoon de M-waarden om te rekenen. In plaats van het gebruik van de “gewone” M_0-waarden, gebruiken we meer conservatieve M-waarden. Deze maken het voor de duiker mogelijk om terug te keren naar een lagere luchtdruk dan die op zeeniveau. Dit is wat de meeste duikcomputers doen. Andere zorgen hebben te maken met de niet-geacclimatiseerde duiker. Dat is een duiker die van zeeniveau de bergen ingaat om daar een duik te maken.

De niet geacclimatiseerde duiker heeft een hoger stikstof gehalte in het lichaam, dan iemand die op de hoogte van het bergmeer leeft. Met betrekking tot stikstofopname is een eerste duik op hoogte dus eigenlijk al een herhalingsduik. Tenzij de duiker lang genoeg op hoogte wacht, alvorens een eerste duik te maken. Dit om overtollige stikstof af te geven. De vraag is of computers dit stikstofoverschot in hun bereke-

ningen opnemen (in het bijzonder wanneer je de computer moet instellen voor de hoogte van het bergmeer). De volgende vraag is of de computer de tijd, die je voor de duik op hoogte hebt doorgebracht, in je voordeel meeneemt in de berekeningen.

Er zijn ook bedenkingen over veranderingen in je bloedcirculatie wanneer je niet geacclimatiseerd bent. Het algemene idee is dat je circulatie op hoogte harder moet werken om je weefsels van voldoende zuurstof te voorzien. Deze veranderde circulatie heeft ook invloed op de opname en afgifte van stikstof. Er is nauwelijks onderzoek gedaan op dit gebied. We kunnen dit verschijnsel dus niet bevestigen, nog ontkennen. Het is dan ook niet waarschijnlijk dat computers dit meenemen in de berekening.

Er zijn vele "aanbevelingen" voor het duiken in bergmeren. Dit op het gebied van de stijgsnelheid, de diepte voor een veiligheidsstop, het aantal duiken per dag en regels welke duik als eerste gemaakt dient te worden. De meeste van deze regels vinden hun basis in ervaringswaarden. Er zijn ook aanbevelingen over het gebruik van Nitrox in bergmeren, maar deze zijn tegenstrijdig. Sommigen vertellen je niet met Nitrox te duiken op hoogte, omdat er geen testgegevens zijn. Anderen vertellen je dat Nitrox een goed hulpmiddel is om de negatieve aspecten van het duiken in bergmeren te compenseren. Hoeveel van deze regels, en welke, worden meegenomen in de aanbevelingen van je duikcomputer?

Stikstofgehalte in het ademgas – vroege duikcomputers waren alleen geschikt voor duiken met lucht. Later kwamen er "speciale" versies, die specifiek voor het duiken met Nitrox gedacht waren. In de huidige modellen is de mogelijkheid om de computer van lucht op Nitrox om te schakelen een standaardkenmerk.

Stikstof van voorgaande duiken – alle duikcomputers slaan gegevens van voorgaande duiken op. Zoals we in voorgaande delen gelezen hebben zijn er verschillende manieren om de afgifte van stikstof aan de oppervlakte in de berekeningen mee te nemen. Ongeacht het model dat je gebruikt, is het aanbevolen dat je iedere paar dagen een pauze houdt, om de langzame compartimenten de tijd te geven alle stikstof af te geven. Er zijn niet veel testgegevens en de meeste computers zijn niet ontworpen voor het berekenen van meerdere duiken per dag gedurende meerdere dagen.

Vliegen na het duiken – de aanbevelingen voor het vliegen na het duiken zijn vaak veranderd. De meeste duikcomputers geven aanbevelingen over de tijd die je moet wachten, alvorens te vliegen. De vraag is of je computer de meest recente aanbevelingen aanhoudt. Een andere vraag is of deze functie van een computer überhaupt nut heeft. De tijd van een vlucht is over het algemeen al vastgelegd, voordat je de laatste duik voor die vlucht maakt. De computer vertelt je echter pas na de duik hoeveel uren je zou moeten wachten. Om praktische redenen houden de meeste duikbasissen algemene regels aan, voor klanten die met een vliegtuig vertrekken. Ze richten zich niet naar duikcomputers. Wat zinvol zou zijn is een optie om de tijd van de vlucht in de computer te programmeren. De computer zou dan rekening moeten houden met deze tijd bij het berekenen van de resterende nultijd. Die optie bestaat nog niet.

Reizen naar grotere hoogte na een duik – er zijn nauwelijks aanbevelingen voor het reizen met de auto naar grotere hoogte, na een duik op zeeniveau. Sommigen geven de aanbeveling om je te houden aan de regels voor het vliegen na het duiken. Anderen vinden dat te conservatief. Duikcomputers hebben meestal geen functie voor deze situatie.

Verwondingen en ziekte – verwonding en ziekte kan de circulatie veranderen en daardoor een invloed hebben op de opname en afgifte van stikstof. Het is aan de duiker om deze factoren in overweging te nemen. Tabellen en duikcomputers kunnen niet weten hoe het met je gezondheid gesteld is.

Dehydratie – een typisch probleem van duikers in de tropen, is dat ze niet genoeg water drinken. Van uitdroging weten we dat dit een negatieve invloed op decompressieziekte heeft. Het blijft echter in veel gevallen onopgemerkt. Duiktabellen en computers houden geen rekening met uitdroging. De duiker moet dit dus zelf doen. Twee goede indicatoren zijn urine en huid. Wanneer je urine donker van kleur is, dan ben je uitgedroogd en wanneer je urine helder (als water) is, dan heb je genoeg water gedronken. Om te zien of de vochthuishouding van de huid in orde is, kun je tussen duim en wijsvinger een stukje huid op je (ontspannen) hand omhoog trekken. Wanneer de elasticiteit van de huid voldoende is om onmiddellijk terug te bewegen, dan is het in orde. Wanneer de huid langzaam terug beweegt, dan heb je met dehydratie te doen.

Leeftijd en geslacht – persoonlijke factoren, zoals leeftijd en geslacht, worden over het algemeen door een duikcomputer niet in overweging genomen. In sommige gevallen staan duikcomputers je toe (of bevelen je aan) om de M-waarden aan je leeftijd aan te passen. Dit wordt gedaan door de computer in te stellen voor een duik in een bergmeer (of iets dat daarmee vergelijkbaar is). Door de veranderde M-waarden wordt de computer conservatiever. Deze geeft dan kortere nultijden. Over het algemeen heeft de instelling geen invloed op andere relevante factoren, zoals de stijgsnelheid.

Inspanning tijdens de duik – het is bekend dat inspanning tijdens een duik invloed heeft op decompressieziekte. De meeste duikcomputers houden hier geen rekening mee. Er bestaan modellen die dat wel doen. De modellen die dit doen zijn luchtgeïntegreerde computers (niet alle luchtgeïntegreerde computers doen dit). Wanneer de computer merkt dat het luchtverbruik toeneemt, zonder dat de diepte verandert is, dan gaat deze ervanuit dat het hogere luchtverbruik door inspanning ontstaan is. De computer reageert dan door gebruik te maken van conservatievere M-waarden. Er zijn twee problemen met deze methode verbonden. Een dergelijk systeem reageert ook wanneer je lucht afstaat aan een andere duiker, wanneer je een hefballon vult of wanneer je automaat afblaast. De meeste computers met deze functie geven helaas niet op de display aan, dat ze bemerkt hebben dat je je inspant en dus op een conservatiever rekenschema overschakelen. Wanneer jezelf merkt dat je je inspant en de noodzaak ziet om conservatiever te duiken, dan weet je niet of de computer hier ook al op gereageerd heeft (wanneer je denkt dat dit het geval is, kan het zijn dat geen van beiden voorzichtigheid in bouwt. Wanneer je denkt dat de computer niet gereageerd heeft, kan het zijn dat dubbel rekening gehouden wordt met de inspanning).

Inspanning voor en na de duik – duikcomputers kunnen de situatie voor en na de duik niet in de berekeningen meenemen. Wanneer je weet dat je het water door een sterke branding moet verlaten, of wanneer je na de duik een stevig stuk moet klimmen, dan moet je hier zelf al tijdens de duik rekening mee houden door conservatiever te duiken.

Duiken in koud water – de meeste duikcomputers geven de temperatuur aan, maar deze wordt niet meegenomen in de berekeningen van de nultijd. Er zijn computers die dat wel doen. Deze reageren door het geven van een kortere nultijd. Het grootste probleem is het vastleggen van een temperatuur die als “koud” gezien moet worden. Dit is niet alleen afhankelijk van de watertemperatuur, maar ook van de kleding die de duiker draagt. Het is dus maar de vraag of een computer je kan vertellen of je het

koud hebt. Daarnaast geven computers ook voor deze functie meestal niet aan of ze de temperatuur wel of niet in de berekening hebben meegenomen.

Gedrag van de duiker – er zijn een aantal "regels" met betrekking tot duikprofielen. Het wordt aanbevolen om op het diepste punt te beginnen en dan naar telkens geringere diepte te gaan, om geen jojo profielen te duiken, de diepste duik van de dag als eerste te maken, et cetera. Deze regels worden samengevat onder de term "gedrag van de duiker". Sommige computers reageren op het gedrag van de duiker, door het verkorten van de nultijden. Andere geven een tekentje op de display om op het bedenkelijke gedrag attent te maken. Die modellen laten het aan de duiker over op passende manier te reageren. De meeste duikcomputers reageren helemaal niet op het "gedrag van de duiker".

Verdere factoren – alcohol, medicijnen of verdovende middelen, lichaamsgewicht, vermoeidheid, et cetera. Er is een lange lijst van factoren waarvan wordt aangenomen dat ze een invloed hebben op het ontstaan van decompressieziekte. Duiktabellen en computers houden hier geen rekening mee.

Wanneer we al deze factoren bekijken, dan zal het duidelijk worden dat er geen kans is dat een duikcomputer met alles rekening houdt. Niet de modellen die nu te koop zijn en ook niet de computers die in de toekomst ontwikkeld worden. Dit betekent dat het altijd aan de duiker is om, tot een bepaald niveau, beslissingen te nemen over de veiligheid van een duik. Een beslissing over de eventuele noodzaak om conservatiever te duiken dan de computer op dat moment aangeeft. Dat heet computer geassisteerd duiken. Je neemt de aanbevelingen van de computer in overweging, maar neemt uiteindelijk zelf de beslissing over de duur van de duik.

Voor computer geassisteerd duiken kan het lastig zijn wanneer de computer je "straft" voor factoren zoals een hoger luchtverbruik, kou of gedrag. De computer weet niet wat gebeurd is. Heb je een hefballon gevuld? Duik je in een droogpak? Heb je als instructeur meerdere noodopstijgingen afgenomen? Uiteindelijk beschikt alleen de duiker zelf over de volledige informatie en kan alleen de duiker z'n kennis gebruiken om passende beslissingen te nemen. Wanneer een computer "straft" dan dient dit tenminste op de display aangegeven te zijn. Voor duikers die geen kennis hebben van factoren die het risico op decompressieziekte beïnvloeden, is het natuurlijk goed wanneer de computer op zo veel mogelijk situaties reageert. De ongeïnformeerde duiker zal dit zelf niet doen.

Voor een geïnformeerde duiker is het beter wanneer er een duidelijke basis bestaat. Kennis van wat de computer gedaan heeft en wat deze niet gedaan heeft. Dit staat de duiker toe om beslissingen te nemen op basis van de wetenschap in hoeverre de computer al extra conservatief rekent.

Wanneer we het standpunt innemen dat geen van de mathematische modellen in de hedendaagse duikcomputers "fout" is, dan wordt de keuze van een duikcomputer een kwestie van persoonlijke voorkeur. Een model dat "fout" is zou van de markt verdwijnen (recall), om aanspraken op schadevergoedingen te voorkomen. De merken en modellen van duikcomputers die momenteel te koop zijn, zijn allemaal tot een bepaald niveau "bewezen" in de juistheid van de berekeningen. De keuze van een computer is dus hoofdzakelijk gerelateerd aan je eigen voorkeur en vertrouwen.

.

SCUBA Courses & Publications

Index

-A-
Absorptie 6
Air trapping 36
Atmosferische druk 12

-B-
Bar 12
Barliter 11
Bijholten 37
Bijna-verdrinking 41
Boyle 14
Buhlmann 57

-C-
Carotis-sinus-reflex 39
Charles 18
Compartiment 49
Controleweefsel 52
Convectie 8

-D-
Dalton 20
Decompressiestop 48
Decompressieziekte 27
Dichtheid 16
Doppler 45
Druk en volume 14

-E-
Elektromagnetische straling 3
Emfyseem 34

-F-
Foramen ovale 29

-G-
Geleiding 7

-H-
Haarvaten 25
Hearing 6
Hemoglobine 31
Henry 22
Hitteberoerte 39
Hitte-uitputting 39
Hypercapnie 31
Hyperoxie 24
Hyperventileren 33
Hypocapnie 32
Hypothermie 38
Hypoxie 25

-K-
Kelvin 12
Koolmonoxide 33

-L-
Lichaamswarmte 7
Lichtsnelheid 3

-M-
Multi-levelduiken 52
M-waarde 50

-N-
Narcose 30

-O-
Omgekeerd blok 37
Oor 36
Oppervlakte-interval 57
Oppervlaktespanning 60
Opstijging 59

-P-
Partiële druk 20
Partiële stikstofdruk 47
Pascal 11
Periode 49
Pneumathorax 35

-R-
Radiatie 8
RGBM 60
Ronde venster 37

-S-
Saturatie 47
Skip breathing 32
Stereozicht 6
Stikstofbellen 28
Subcutaan emfyseem 34

-T-
Trommelvlies 36

-V-
Visuele omkeerfenomeen 6

-W-
Warmtegeleider 8
Weefsels 49

-Z-

Zoogdieren-duikreflex.....39