

# Kooldioxide - de gevreesde vijand (deel 2)

*Dit is het tweede deel van een driedelige serie over kooldioxide, een van de meest voorkomende oorzaken van duiknoodsituaties. Deel twee vind je [hier](#). Deel drie zal in een volgend nummer van Alert Diver worden gepubliceerd.*

## Waarom is overmatige kooldioxide gevaarlijk?

De technische term voor abnormaal hoge niveaus van kooldioxide is *hypercapnie*. Hypercapnie veroorzaakt een reeks escalerende effecten, te beginnen met milde neurologische stoornissen die cognitie en motorische controle beïnvloeden, effecten die al dan niet merkbaar zijn voor de proefpersoon.

CO<sub>2</sub> werkt [20 keer verdoevender dan stikstof](#). Overmatige concentraties in de bloedbaan hebben een krachtige psychologische impact en veroorzaken verwarring en irrationeel gedrag. Hypercapnie kan ook angst, prikkelbaarheid, de vecht-of-vluchtreactie of paniek veroorzaken. Om het niet al te scherp te stellen, hypercapnie maakt je tegelijkertijd dom en angstig – een nogal ongelukkige combinatie. Ernstige hypercapnie is slopend en zal uiteindelijk leiden tot bewustzijnsverlies.

Hypercapnie veroorzaakt ook *vasodilatatie* of uitzetting van de bloedvaten. Er bevinden zich veel bloedvaten in het hoofd en onze schedel mist het vermogen om mee uit te zetten. Als gevolg hiervan zal een verhoogde bloedstroom ervoor zorgen dat de intracraniale druk stijgt. Als je hoofdpijn hebt na het duiken, kun je een teveel aan kooldioxide als een mogelijke boosdoener beschouwen. Een verhoogde bloedtoevoer naar de hersenen en het centrale zenuwstelsel betekent ook dat er meer zuurstof naar deze organen wordt gevoerd, waardoor een duiker vatbaarder wordt voor zuurstofvergiftiging in het CZS.

Aangezien de ademhalingsreflex wordt geactiveerd door kooldioxide, zou het geen verrassing moeten zijn dat *dyspneu* (kortademigheid) een veel voorkomend symptoom is van hypercapnie. Er zijn echter grote individuele verschillen met betrekking tot de gevoeligheid voor dit effect, zodat de afwezigheid ervan geen garantie is dat andere effecten, zoals cognitieve stoornissen, niet zullen optreden.

Zodra hypercapnie optreedt, houden de effecten ervan in milde gevallen meestal minstens een paar minuten aan en kunnen ze in ernstigere gevallen enkele uren duren.



## Dingen onder water meenemen houdt extra complicaties in

Onnodig te zeggen dat alle bovenstaande symptomen meer gevolgen hebben en zelfs minder wenselijk zijn onderwater dan op het droge. Bewusteloos raken brengt uiteraard een hoog risico op verdrinking met zich mee, terwijl cognitieve stoornissen en andere psychologische effecten, zoals angst of paniek, kunnen leiden tot slechte, impulsieve besluitvorming. Dyspneu, kan zelfs als het relatief mild is met de daaruit voortvloeiende zware ademhaling, absoluut schade aanrichten aan de gasvoorraad van een duiker, naast andere gevolgen die we hieronder gaan bespreken. En onze vecht-of-vluchtreactie is uiterst contraproductief in elk duikscenario.

## Dode lucht ruimte

De daadwerkelijke uitwisseling van zuurstof en kooldioxide tussen bloed en ademgas vindt plaats in de *alveoli*, kleine zakjes in de verre uithoeken van onze longen. Om echter volledig uit ons systeem te worden geëlimineerd, moet de CO<sub>2</sub> van de alveoli de bronchiën, de luchtpijp en de holle ruimtes in ons hoofd passeren, voordat het wordt uitgeademd.

Deze tussenliggende delen worden gezamenlijk aangeduid als *dode lucht ruimte*. Ze dragen niet bij aan de gasuitwisseling en de hoeveelheid gas die na het uitademen in deze ruimtes achterblijft, waaronder kooldioxide, wordt in de volgende ademhalingscyclus opnieuw ingeademd. Het [volume van de anatomische dode lucht ruimte van de gemiddelde persoon](#) is ongeveer 150 milliliter, terwijl het gemiddelde *longgetijdvolume* in rust (d.w.z. het volume lucht dat per ademhalingscyclus in en uit onze longen gaat) 500 milliliter is. Dit betekent dat we ongeveer 30% van de mufte, kooldioxiderijke lucht die onze longblaasjes verlaat, opnieuw inademen. Bij dieper ademen, opzettelijk of door inspanning, is dat minder.

Tijdens het duiken wordt het volume van de dode lucht ruimte vergroot door het mondstuk en de ruimte van de tweede trap of rebreather. Deze extra ruimte voor dode lucht vermindert de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die we effectief per ademcyclus uitscheiden.



## Werken van ademhaling, gasdichtheid en dynamische luchtwegcompressie

Een tweede en belangrijkere factor die onderwater een rol speelt, is *het werken van de ademhaling (WA)*. Het werken van de ademhaling is de hoeveelheid werk die onze spieren moeten verrichten om gas in en uit onze longen te verplaatsen.

Dit werk is een functie van de *massastroom van gas* - de fysieke massa van de gasmoleculen die per tijdseenheid door een dwarsdoorsnede van onze luchtwegen gaat. Deze massastroom is op zijn beurt een functie van drie andere grootheden: de *ademhalingsfrequentie* (hoe snel we ademen), het *teugvolume* (het volume gas dat per ademcyclus wordt uitgewisseld) en de *gasdichtheid* (de massa gas per volume).

Onder normale omstandigheden - ongehinderd ademen van lucht en bij atmosferische druk - kan ons middenrif dit werk zonder problemen aan. Net als ons hart is het een spier die is geoptimaliseerd voor efficiëntie en uithoudingsvermogen, zeer weinig CO<sub>2</sub> produceert en in staat is om een heel leven onafgebroken te werken zonder te hoeven rusten. Dit onderscheidt het van de meeste andere spiergroepen: we kunnen bijvoorbeeld niet een onbepaalde tijd lopen of push-ups doen.

Het inademen van lucht bij atmosferische druk is echter niet wat we doen tijdens het duiken. De omgevingsdruk neemt toe met de diepte, en dat geldt ook voor de gasdichtheid. Een grotere dichtheid betekent een grotere massastroom, wat een hogere ademhalingsinspanning betekent. Zodra het

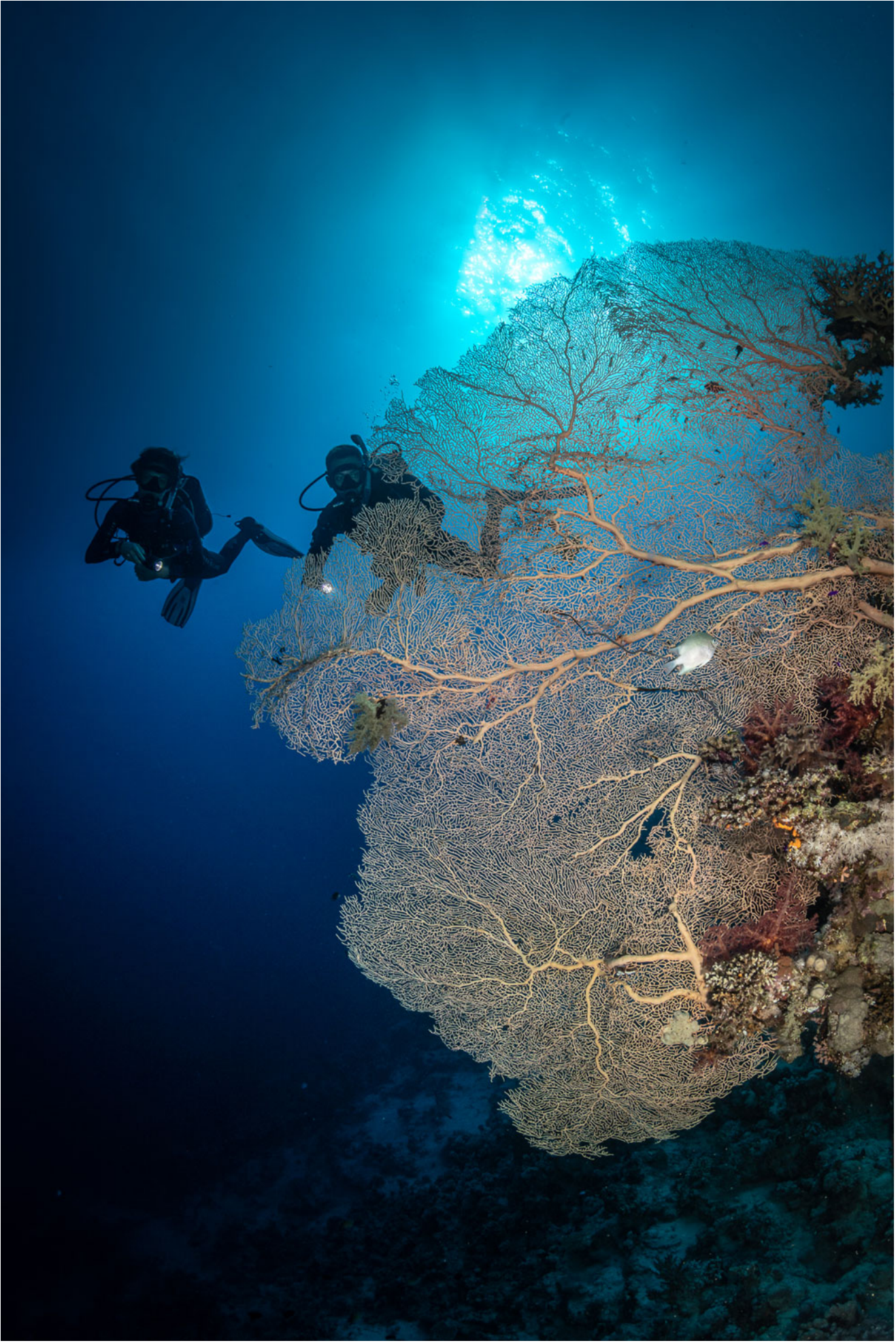
ademhalingswerk het niveau overschrijdt waarvoor ons middenrif is geoptimaliseerd, neemt de CO<sub>2</sub> productie, en daarmee het risico op hypercapnie, dramatisch toe.

Dit effect wordt nog verergerd door wat bekend staat als *dynamische luchtwegcompressie*. Onze luchtwegen zijn geen starre pijpen, maar eerder enigszins slappe buizen. Als gevolg van wrijving langs de wanden van de luchtwegen creëert een hoge massastroom van gas een drukverschil, dat er op zijn beurt voor zorgt dat de buizen worden samengedrukt en de stroom wordt beperkt, een effect dat vergelijkbaar is met wat er gebeurt tijdens een astma-aanval. In 2003 hebben onderzoekers Enrico Camporesi en Gerardo Bosco [aangetoond](#) dat de maximale ventilatie per volume (voor lucht) die een persoon op 30 meter kan bereiken, ongeveer de helft is van het maximum bij de oppervlaktedruk.

## Het effect van apparatuur

Naast de *interne belasting*, die wordt veroorzaakt door de beweging van dicht gas in onze luchtwegen, is er een andere factor die bijdraagt aan het ademhalingswerk, namelijk de *externe belasting* die door de duikuitrusting wordt gecreëerd. Onze ademhalingspieren moeten niet alleen maar gas heen en weer duwen; ze leveren ook de energie om de mechanische onderdelen van de tweede trap van de automaat te bedienen. Bovendien fungeert het mondstuk letterlijk als een flessenhals - lucht door een kleine opening zuigen kost meer energie dan door een grote. Je kunt dit gemakkelijk bevestigen door te proberen door een rietje te ademen tijdens een wandeling.

Bij het duiken met een rebreather is het volume gas dat wordt verplaatst veel groter dan bij een open circuit: niet alleen onze longen en luchtwegen, maar de hele ademhalingsloop is gevuld met gas dat langs het circuit moet worden geduwd. De scrubber biedt extra weerstand en de longen van de duiker blijven de enige beschikbare pomp. Het minimaliseren van WOB is een belangrijk ontwerpdoel voor rebreathers, en duikers wordt geadviseerd om nog conservatiever te zijn met betrekking tot gasdichtheid dan in een open systeem.



## Aanbevolen gasdichtheidslimieten

Met het oog op de toegenomen inspanning van de ademhaling veroorzaakt door een grotere gasdichtheid en gebaseerd op [onderzoek van Gavin Anthony en Simon Mitchell](#), raadt DAN aan om de dichtheid van ieder ademgas te beperken tot 5 g/l, met een harde limiet van 6 g/l. Dit komt overeen met maximale duikdieptes van respectievelijk 29 en 37 meter voor lucht en nitrox. Deze limieten zijn echter nog niet universeel overgenomen door duikorganisaties. De conventionele dieptelimiet voor recreatief duiken is 40 meter, en de trainingsnormen voor decompressieduiken die door een aantal instanties worden gehandhaafd, houden een nog diepere grens aan, namelijk 55 meter voor lucht, waar de gasdichtheid bijna 8,4 g/l wordt.

## Noodsituaties

Tijdens normale bezigheden kunnen de meeste van de bovenstaande factoren bijna onopgemerkt blijven door een duiker. Wanneer we echter harder moeten werken en de metabolische eisen van ons lichaam toenemen, bijvoorbeeld in een stroming op diepte of bij het assisteren van een teamgenoot in een noodsituatie, kunnen ze plotseling in actie komen en een beheersbare situatie in een moeilijke situatie veranderen, of een moeilijke situatie verergeren.

*Dit is het einde van het tweede deel van onze kleine serie. Deel drie zal zich richten op tegenmaatregelen - vaardigheden en procedures om onze CO<sub>2</sub>-belasting onder controle te houden. Blijf veilig en blijf op de hoogte!*

---

### Over de auteur

Tim Blömeke geeft les in sport- en techduiken in Taiwan en de Filippijnen. Hij is een fervent grot-, wrak- en CCRduiker en daarnaast schrijvend redacteur en vertaler voor Alert Diver. Hij woont in Taipei, Taiwan. Je kunt hem op Instagram volgen via [@timblmk](#).

---

**Vertaler:** Els Knaapen