Hiilidioksidi – pelätty vihollinen (osa 2)

Tämä on toinen artikkeli kolmiosaisesta sarjasta, jossa käsitellään hiilidioksidia. Hiilidioksidi on yksi yleisimmistä sukellusonnettomuuksien aiheuttajista. Ensimmäisen artikkelin löydät täältä. Kolmas artikkeli julkaistaan Alert Diver -lehden tulevassa numerossa.

Miksi suuri hiilidioksidipitoisuus on vaarallista?

Lääketieteessä kutsutaan hyperkapniaksi tilaa, jossa elimistön hiilidioksidipitoisuus on normaalia suurempi. Hyperkapnia vaikuttaa monin tavoin elimistöön. Nämä vaikutukset lisääntyvät vähitellen pitoisuuden lisääntymisen myötä alkaen neurologisten toimintojen lievästä heikkenemisestä. Tämä heikkeneminen vaikuttaa tietoisuuteen ja motoriikkaan. Henkilö itse joko havaitsee nämä vaikutukset tai sitten ei.

CO_2 on aineena 20 kertaa huumaavampi kuin typpi. Veren liiallisella hiilidioksidipitoisuudella on voimakas vaikutus henkilön henkiseen tilaan. Pitoisuuden noususta seuraa sekavaa ja irrationaalista käyttäytymistä. Hyperkapnia voi myös laukaista ahdistus- tai paniikkikohtauksen tai aiheuttaa ärtyneisyyttä. Se voi myös synnyttää taistele tai pakene -reaktion. Suoraan sanottuna hyperkapnia tekee sinusta yhtä aikaa sekä tyhmän että pelokkaan. Tämä on aika valitettava yhdistelmä. Vaikean hyperkapnian seurauksena henkilön voimat loppuvat ja hän menee lopulta tajuttomaksi.

Hyperkapnia aiheuttaa myös *verisuonten laajenemista* (vasodilataatio). Pään sisällä on paljon verisuonia, ja kallostamme puuttuu kyky laajentua samaan tahtiin niiden kanssa. Tämän seurauksena lisääntynyt verenvirtaus aiheuttaa kallonsisäisen paineen nousua. Jos sinulla on päänsärkyä sukelluksen jälkeen, kannattaa miettiä, onko syynä mahdollisesti hiilidioksidin liiallinen kertyminen elimistöön. Lisääntynyt verenvirtaus aivoihin ja keskushermostoon tarkoittaa myös sitä, että näihin elimiin syötetään enemmän happea. Sukeltaja altistuu tällöin keskushermoston happimyrkytykselle.

Koska hiilidioksidi laukaisee hengitysrefleksin, ei pitäisi tulla yllätyksenä, että *hengenahdistus* (dyspnea) on yleinen hyperkapnian oire. Eri yksilöiden herkkyydessä on kuitenkin suuria yksilöllisiä eroja tämän suhteen. Hengenahdistuksen puuttuminen ei siis takaa, etteikö voisi esiintyä muita vaikutuksia, esimerkiksi kognitiivisten toimintojen heikkenemistä.

Kun hyperkapnia alkaa, sen vaikutukset lievissä tapauksissa jatkuvat yleensä vähintään muutaman minuutin ajan. Vakavammissa tapauksissa ne voivat kestää useita tunteja.

Veden alla oleskelu tekee ongelmista vieläkin hankalampia

Sanomattakin on selvää, että kaikki edellä mainitut oireet aiheuttavat enemmän ongelmia ja ovat entistä vähemmän toivottuja, kun ollaan veden alla verrattuna kuivalla maalla oleskeluun. Tajuttomuuteen liittyy tietysti suuri hukkumisriski, kun taas häiriöt kognitiivisissa toiminnoissa ja muut psykologiset vaikutukset, kuten ahdistus tai paniikki, voivat johtaa huonoon ja impulsiiviseen päätöksentekoon. Suhteellisen lieväkin hengenahdistus sekä siitä johtuva hengityksen raskaus voivat aiheuttaa sen, että sukeltajan kaasunsaanti ei toimi lainkaan. Hengenahdistuksella on myös muita seurauksia, joita käsittelemme alla. Ihmisen taistele tai pakene -reaktio on erittäin haitallinen kaikissa mahdollisissa sukellusskenaarioissa.

Kuollut tila

Varsinainen hapen ja hiilidioksidin vaihto veren ja hengitetyn kaasun välillä tapahtuu *keuhkorakkuloissa*, jotka ovat ikään kuin pieniä pusseja keuhkojen ilmateiden päissä. Hiilidioksidi on tarpeen eliminoida elimistöstämme kokonaan. Sen on kuitenkin poistuttava ensin keuhkorakkuloista ja kuljettava keuhkoputkien, henkitorven ja pään onteloiden läpi, ennen kuin se voidaan hengittää ulos.

Näitä väliosia kutsutaan yhteisesti *kuolleeksi tilaksi*. Ne eivät osallistu kaasujenvaihtoon, ja uloshengityksen jälkeen näihin väliosiin jäänyt kaasumäärä, mukaan lukien hiilidioksidi, hengitetään uudelleen sisään seuraavassa hengityssyklissä. Keskivertoihmisen anatomisen kuolleen tilan tilavuus on noin 150 millilitraa, kun taas keuhkojen keskimääräinen *normaali hengitystilavuus* levossa (eli keuhkoihin sisään ja ulos hengitetty ilmamäärä hengityssykliä kohti) on 500 millilitraa. Tämä tarkoittaa, että hengitämme uudelleen noin 30 % vanhentuneesta, hiilidioksidipitoisesta ilmasta, joka tulee keuhkorakkuloistamme. Kun hengitetään voimakkaammin, joko tarkoituksellisesti tai rasituksen vuoksi, tämä luku on pienempi.

Sukellettaessa kuolleen tilan tilavuus kasvaa suukappaleen ja annostimen säiliön tai rebreather-laitteen suukappaleen myötä. Tämä ylimääräinen kuollut tila vähentää tehokkaasti poistamamme hiilidioksidin määrää kutakin hengityssykliä kohti.

Hengityslihasten työ, kaasun tiheys ja dynaaminen hengitysteiden paine

Toinen ja vielä tärkeämpi tekijä, joka ilmenee veden alla oltaessa, on hengityslihasten työ. *Hengitystyö* (work of breathing, WOB) tarkoittaa sitä työn määrää, joka lihastemme on suoritettava, kun ne siirtävät kaasua keuhkoihin ja niistä pois.

Tämä työ on *kaasun massavirran* funktio eli kyseessä on hengitysteiden läpi kulkevien kaasumolekyylien fysikaalisesta massasta aikayksikköä kohti. Tämä massavirta puolestaan on kolmen muun suureen funktio: *hengitysnopeuden* (kuinka nopeasti hengitämme), *normaalin hengitystilavuuden* (vaihdetun kaasun määrä hengityssykliä kohden) ja *kaasun tiheyden* (kaasun massa tilavuutta kohti).

Palleamme suoriutuu tästä työstä vaikeuksitta tavallisissa olosuhteissa, kun hengitämme ilmaa ilman esteitä ja normaalissa ilmanpaineessa. Sydämen tavoin palleakin on lihas, joka on tarkoitettu nimenomaan tehokkuutta ja kestävyyttä vaativaan työhön. Se tuottaa hyvin vähän hiilidioksidipäästöjä ja pystyy työskentelemään jatkuvasti koko eliniän ilman lepoa. Tämä erottaa sen useimmista muista lihasryhmistä. Mehän emme voi esimerkiksi kävellä tai tehdä punnerruksia loputtomasti.

Ilman hengittäminen normaalissa ilmanpaineessa ei kuitenkaan ole sitä, mitä teemme sukeltaessamme. Ympäristön paine kasvaa syvyyden myötä, samoin kuin kaasun tiheys. Suurempi tiheys tarkoittaa lisääntynyttä massavirtaa, mikä tarkoittaa suurempaa hengitystyötä. Kun hengitystyö ylittää palleamme

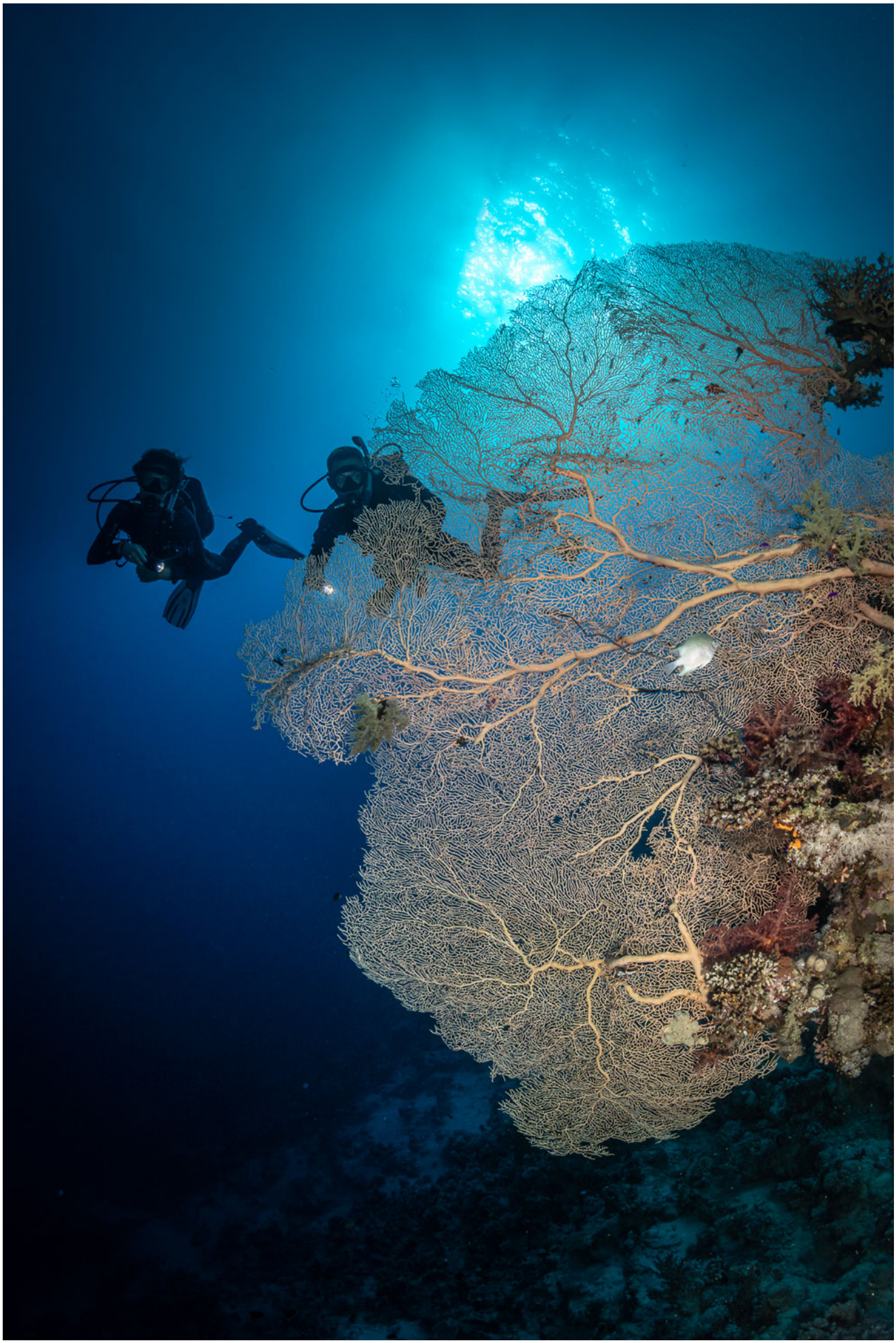
optimaalisen tason, hiilidioksidin tuotanto lisääntyy dramaattisesti. Tämän myötä lisääntyy myös hyperkapnian riski.

Tätä vaikutusta pahentaa edelleen niin kutsuttu *dynaaminen hengitysteiden paine*. Hengitystiemme eivät ole jäykkiä putkia, vaan mieluummin hieman kuin velttoja letkuja. Hengitysteiden seinämien kitkan vuoksi kaasun lisääntynyt massavirta luo paine-eron, joka puolestaan saa putket puristumaan ja rajoittamaan virtausta. Kyseessä on samanlainen tilanne kuin astmakohtauksen aikana. Vuonna 2003 tutkijat Enrico Camporesi ja Gerardo Bosco osoittivat, että keuhkotuuletuksen enimmäismäärä koskien sitä ilman määrää, jonka ihminen voi saavuttaa 30 metrissä, on noin puolet siitä enimmäismäärästä, joka saavutetaan oltaessa alttiina pinnalla olevalle paineelle.

Laitteiden vaikutus

Kun hengitysteissämme liikkuu kaasua, joka on tavallista tiheämpää, aiheuttaa se *sisäistä kuormitusta.* Hengityslihasten tekemään työhön vaikuttaa kuitenkin toinenkin tekijä. Kyseessä on sukelluslaitteiden aiheuttama *ulkoinen kuormitus*. Hengityslihasten tehtävänä ei ole vain kaasun liikuttaminen edestakaisin, vaan ne tuottavat myös energiaa regulaattorin annostimen mekaanisten osien käyttämiseen. Lisäksi suukappale toimii kirjaimellisesti pullonkaulana, sillä ilman hengittäminen pienestä aukosta vaatii enemmän energiaa kuin suuresta. Voit havaita tämän helposti, kun yrität hengittää pillin läpi kävellessäsi.

Kun sukelletaan suljetun kierron laitteella, liikuteltavan kaasun määrä on paljon suurempi kuin avoimen kierron laitetta käytettäessä. Koko hengityskierto on keuhkojemme ja hengitysteidemme lisäksi täynnä kaasua, jota täytyy liikuttaa. CO_2-sieppari tarjoaa lisävastusta, ja sukeltajan keuhkot ovat ainoa saatavilla oleva pumppu. Hengityslihasten työn minimoiminen on keskeisessä roolissa, kun rebreather-sukeltaja määrittelee sukelluksensa tavoitteet. Lisäksi suljetun kierron laitteella sukeltavia neuvotaan olemaan vieläkin konservatiivisempia kaasun tiheyden suhteen kuin avoimen kierron laitteella sukeltavia.



Suositukset kaasun tiheyttä koskien

Kun otetaan huomioon lisääntynyt hengitystyö, Gavin Anthonyn ja Simon Mitchellin tutkimuksessa suositellaan rajaamaan minkä tahansa hengityskaasun tiheyden arvoon 5 g/l. Tiukka raja on 6 g/l. Tämä vastaa 29 metrin enimmäissukellussyvyyttä ilman osalta ja 37 metrin syvyyttä nitroksin osalta. Koulutusjärjestöt eivät kuitenkaan ole vielä hyväksyneet näitä rajoja kaikkialla. Virkistyssukelluksen tavanomainen syvyysraja on 40 metriä, ja useiden koulutusjärjestöjen noudattamat dekompressiosukellusta koskevat koulutusstandardit ulottavat rajan vieläkin syvemmälle eli 55 metriin ilmalla sukellettaessa. Tällöin kaasun tiheys on lähes 8,4 g/l.

Hätätilanteet

Normaalin toiminnan aikana sukeltaja ei välttämättä edes huomaa suurinta osaa yllä mainituista tekijöistä. Joskus joudumme kuitenkin työskentelemään tavallista kovemmin. Näin on esimerkiksi sukeltaessamme syvällä virtauksen mukana tai auttaessamme sukellusparia hätätilanteessa. Tällöin elimistömme aineenvaihdunta vilkastuu. Edellä mainittujen seikkojen vaikutus voikin siis yhtäkkiä voimistua, ja hallinnassa oleva tilanne muuttuu haastavaksi tai vaikeasta tilanteesta tulee vieläkin vaikeampi.

Tähän päättyy pienen artikkelisarjamme toinen osa. Kolmannessa osassa keskitytään vastatoimiin eli niihin taitoihin ja toimintatapoihin, joilla hiilidioksidikuormituksemme pysyy kurissa. Pidä huolta itsestäsi ja pysy kuulolla!

Tietoa artikkelin kirjoittajasta

Tim Blömeke opettaa virkistys- ja tekniikkasukellusta Taiwanissa ja Filippiineillä. Hän on myös freelance-kirjoittaja ja -kääntäjä sekä Alert Diver -verkkolehden toimitusryhmän jäsen. Hän sukeltaa Fathom CCR -järjestelmällä. Kysymyksiä ja kommentteja varten voit olla häneen yhteydessä hänen blogisivunsa kautta tai Instagramissa.

Kääntäjä: Marianna Rantanen