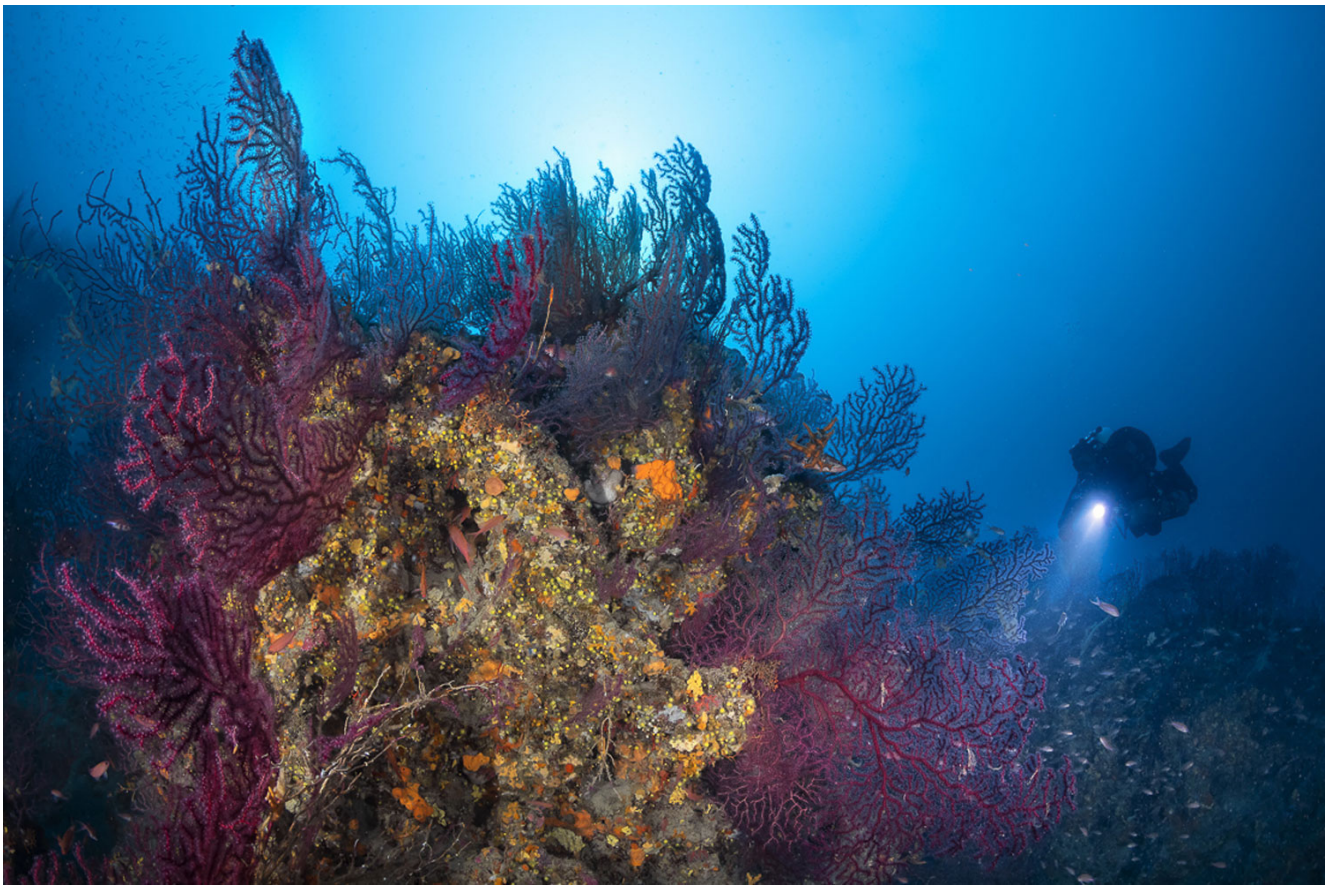
# Inertin kaasun aiheuttaman narkoosin mittaaminen

Jacques Cousteau on kuvannut inertin (reagoimattoman) kaasun (IGN) aiheuttamaa narkoosia runollisesti syvyyden hurmioksi. Jo pitkään on tiedetty se, että tämä tila on merkittävä sukellusturvallisuuteen vaikuttava riskitekijä, vaikka ymmärryksemme sen mekanismeista ja vaikutuksista lisääntyykin yhä edelleen. Urheilusukeltajien suhteen tilanne todella onkin se, että heidän kohdalleen osuu paljon suuremmalla todennäköisyydellä IGN kuin sukellussairaus (DCI). Vaikka on voitu osoittaa, että sukeltajille ei kehity sietokykyä narkoosia kohtaan, he voivat kuitenkin oppia tulemaan toimeen sen kanssa vaihtelevassa määrin.

Laitesukelluksen alkuaikoina typpinarkoosi oli merkittävin 30-40 metriä syvempiä sukelluksia rajoittava tekijä. Sukeltajat olivat itse vastuussa toimintakykynsä heikkenemisen seurauksista, kun he uskaltautuvat sukeltamaan syvemmälle. Nykyään inertin kaasun aiheuttaman narkoosin toiminnallisia riskejä voidaan helposti vähentää hyödyntämällä seoskaasujen teknologiaa.



Erimielisyyttä on kuitenkin edelleen siitä, kuinka paljon narkoosia voi olla, että sukeltaminen on järkevää ja että tilanne pysyy hallinnassa. Samoin esiintyy erimielisyyttä siitä, lisääkö myös happi sukeltajan hengityskaasun narkoottista vaikutusta. Tästä johtuen **käytäntö vaihtelee laajasti urheilusukeltajien keskuudessa**.

Merkittävin haaste inertin kaasun aiheuttamaa narkoosia tutkittaessa on ollut objektiivisen ja luotettavan mittausmenetelmän puute, jotta voitaisiin ilmaista määrällisesti narkoosin alkaminen ja vakavuus. Sukeltajat ovat osoittautuneet epäluotettaviksi subjektiivisten oireiden itsearvioinnissa ja perinteistä psykologista testausta voi olla vaikea toteuttaa veden alla.

DAN Europen tutkijat ovat kuitenkin viimeisen vuosikymmenen aikana julkaisseet sarjan tutkimuksia, joissa he ovat arvioineet uuden mittausvälineen tehokkuutta. Tämän uuden välineen avulla on tarkoitus arvioida erästä sukeltajan kognitiivista toimintoa, jota kutsutaan suurimmaksi yksilön näkemäksi valon välkyntätaajuudeksi (Critical Flicker Fusion Frequency, CFFF). Nyt on siis toiveita siitä, että tämä voisi olla inertin kaasun aiheuttaman narkoosin objektiivinen mittausmenetelmä, joka on helppo toteuttaa käytännössä.

Tämä artikkeli keskittyy kahteen tutkimukseen, jotka tarjoavat joitakin uusia yllättäviä oivalluksia IGN:ää koskien. Ensimmäinen tutkimus on julkaistu vuonna 2016, ja se on nimeltään Do Environmental Conditions Contribute to Narcosis Onset and Symptom Severity?. Tässä tutkimuksessa on perehdytty siihen, miten erilaiset ylipaineiset ympäristöt vaikuttavat inertin kaasun aiheuttaman narkoosiin. Johtopäätöksenä oli, että paine ja kaasu saattavat olla ainoita ulkoisia tekijöitä, jotka vaikuttavat narkoosiin. Tutkimuksessa myös havaittiin, että IGN alkaa sen jälkeen kun henkinen tarkkaavaisuus on ensin kohonnut vähäksi aikaa laskeutumisen aikana. Narkoosin vaikutus jatkuu vähintään 30 minuuttia sukelluksen jälkeen.

Toinen tutkimus on nimeltään Early detection of diving-related cognitive impairment of different nitrogen-oxygen gas mixtures using critical flicker fusion frequency. Siinä on verrattu IGN:n kehittymistä ilmalla sukellettaessa niihin sukelluksiin, jotka tehdään nitroksilla. Testauksessa on käytetty sekä CFFF-menetelmää että perinteisiä psykologisia testejä. Johtopäätöksenä oli, että nitroksissa olevan hapen kohonneet osapaineet voivat tehokkaasti muuttaa inertin kaasun aiheuttaman narkoosin vaikutuksia.

## Tarkempaa tietoa välkyntätaajuudesta

Suurin yksilön näkemä valon välkyntätaajuus (CFFF) on se taajuus, jossa välkkyvä valo hahmotetaan jatkuvana ja tasaisena. 1900-luvun alkupuolella CFFF kehitettiin ensiksi näön fysiologian tutkimista varten, ja myöhemmin siitä on tullut tärkeä väline henkisen tarkkaavaisuuden ja valppauden mittaamiseen olosuhteissa, jotka liittyvät patologiaan, anestesiaan ja työperäiseen altistumiseen ilmailussa.



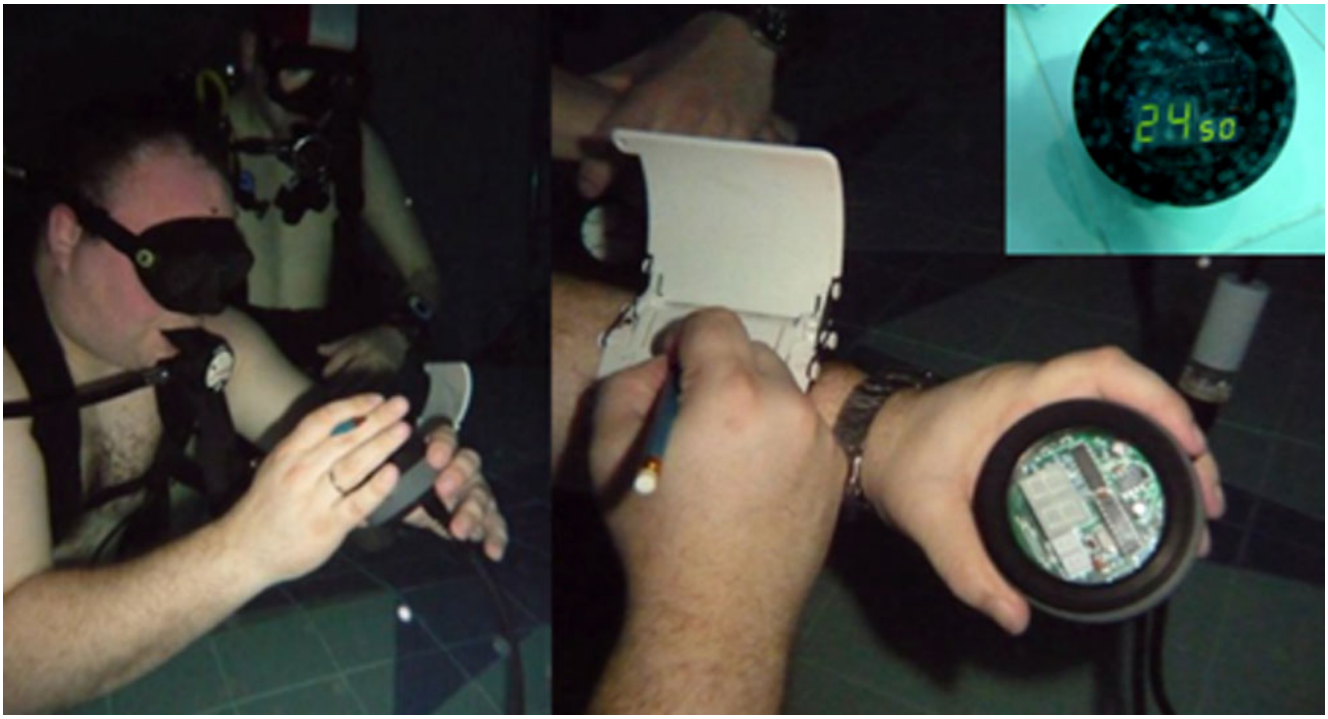
Kun koehenkilöiden kognitiiviset toiminnot ovat heikentyneet tai alentuneet, taajuus, jossa he havaitsevat välkynnän lakkaavan, laskee. Tämä on niin sanottu fuusiotaajuus. Päinvastainen tilanne on se, kun henkinen valppaus lisääntyy. Tällöin fuusiotaajuus nousee. Koska yksilöt havaitsevat erilaisia taajuuksia, koehenkilön lähtötilanteen fuusiotaajuuden katsotaan olevan 100 % ja CFFF mitataan prosenttiosuutena lähtötilanteesta.

DAN USA:n perustaja tohtori Peter Bennett raportoi vuonna 1960 ensimmäisenä yhteydestä sukeltajien henkisen tilan, CFFF:n ja aivosähkökäyrän (EEG) välillä. Myöhemmässä tutkimuksessa havaittiin, että CFFF-muutokset saturaatiosukelluksen aikana heliox-seoksella sukellettaessa vastasivat suurin piirtein EEG:ssä esiin tulleita muutoksia. Seuraavat tutkijat eivät kuitenkaan kyenneet toistamaan tuloksia, ja CFFF:n käyttö hylättiin.

Viime vuosien aikana DANin tutkijat ovat perehtyneet epäselväksi jääneeseen menetelmään ja ovat esitelleet lupaavia tuloksia. He ovat osoittaneet, että CFFF-testit antavat luotettavia mittaustuloksia veden alla (2012) ja ovat kehittäneet sukeltajan kognitiivisen toiminnan arviointimallin, kun hengitetään ilmaa ja happea ilmakehän paineessa (2014). Arviointimalli on samanlainen kuin jotkin PEBL:n (Psychology Experiment Building Language) testit.

CFFF-testit ovat PEBL-testeihin verrattuna tavallisesti helpompia suorittaa veden alla, ja koehenkilön mahdollisuus vaikuttaa testin tuloksiin on luultavasti vähäisempi. Testit suoritetaan pienen lieriömäisen laitteen avulla, jossa käytetään sinistä LED-valoa ja pyörivää rengasta, joka muuttaa välkyntätaajuutta. Testin aikana sukeltaja katsoo suoraan LED-valoon ja testin suorittaja nostaa tai laskee välkyntätaajuutta. Kun sukeltaja sitten näkee LED-valon välkynnän muuttuvan tasaiseksi valoksi, testaus lopetetaan ja tämä valon yhdistymistaajuus kirjataan ylös. Tuloksia verrataan sen jälkeen testattavien henkilöiden sukeltamista edeltävään CFFF-arvoon, joka toimii vertailukohtana. Tässä tilanteessa nousu yhdistymistaajuudessa merkitsi siis lisääntynyttä kognitiivista toimintakykyä, kun taas arvon laskun voitiin

katsoa tarkoittavan inertin kaasun aiheuttamaa narkoosia.

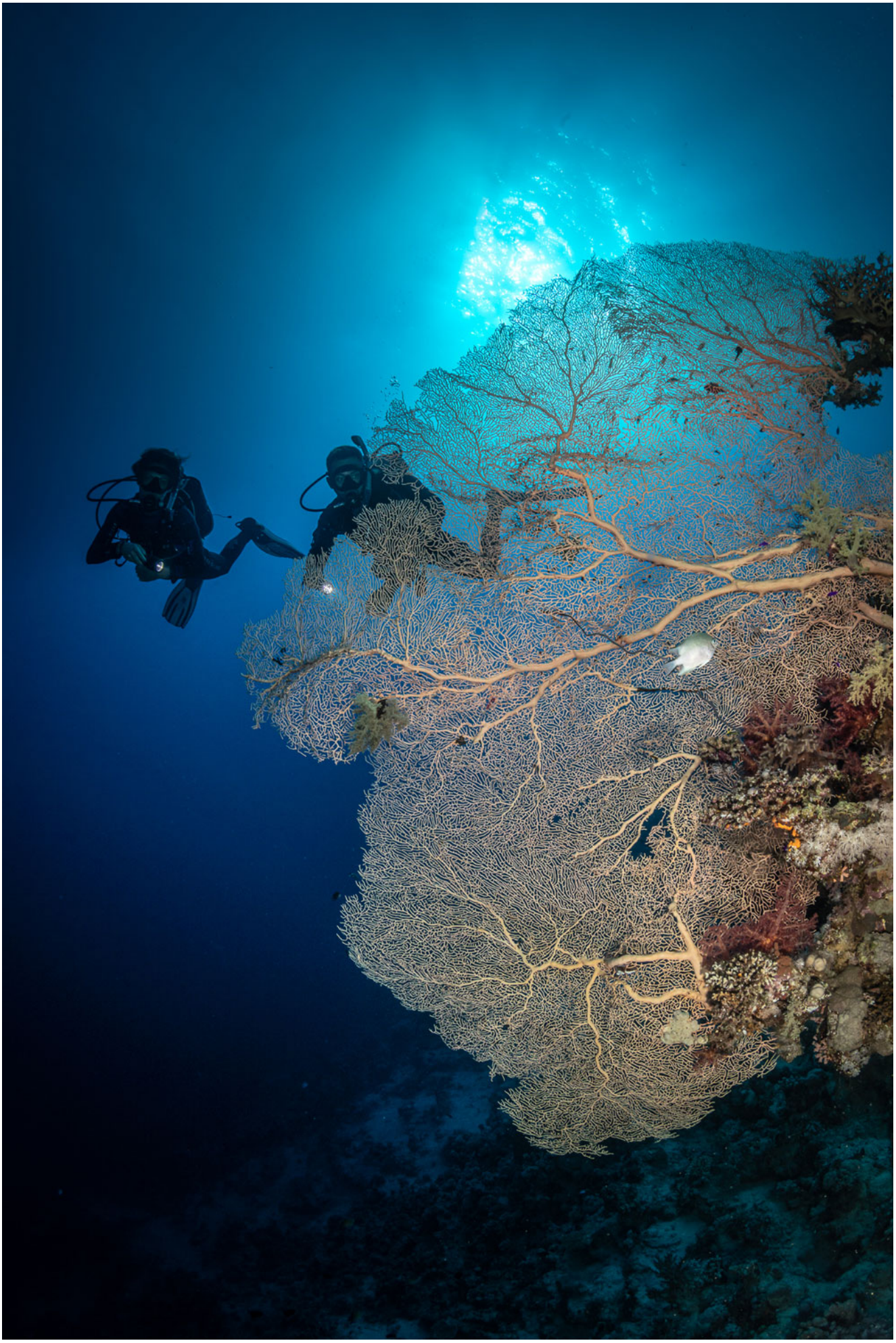



## Kuinka paljon ympäristö vaikuttaa?

Koska sukeltajat sopeutuvat veden alla olemiseen, on tiedostettu hyvin se tosiasia, että ympäristö itsessään vaikuttaa todennäköisesti toimintakykyyn eri tekijöiden kautta. Samoin on tuotu esiin niitä monia tekijöitä, jotka saattavat edistää IGN:ia ja sen vaikeusastetta.

Tärkeimmäksi epäilyn kohteeksi nousee hiilidioksidin kohonnut osapaine ($pCO_2$), joka johtuu työskentelyn, raskaan uinnin ja myös hengitystyön aiheuttamasta rasituksesta. Kohonneen $pCO_2$-arvojen oletetaan laajentavan aivoverisuonia, mikä johtaa korkeampiin typpitasoihin aivoissa. Kylmyys on myös yksi todennäköinen tekijä, koska se aiheuttaa ääreisverisuonten supistumista. Koska aivoverisuonet eivät voi supistua, seuraa typen runsaampaa kertymistä aivoihin.

Muita tekijöitä, joiden oletetaan edistävän narkoosin kehittymistä, ovat alkoholin ja/tai huumeiden käyttö, krapula tai väsymys, ahdistuneisuus, kuormittuneisuus, stressi, huono näkyvyys, laskeutumisnopeus, huimaus ja huono orientoituminen ympäristöön. Tieteellisestä näkökulmasta katsottuna ei narkoosin todennäköisyys ole kuitenkaan ollut erityisen suuri näiden tekijöiden kohdalla, ja asiasta tarvitaankin lisää tietoa. Tästä syystä tämä ensimmäinen tutkimus keskittyi juuri sukellusympäristöön.



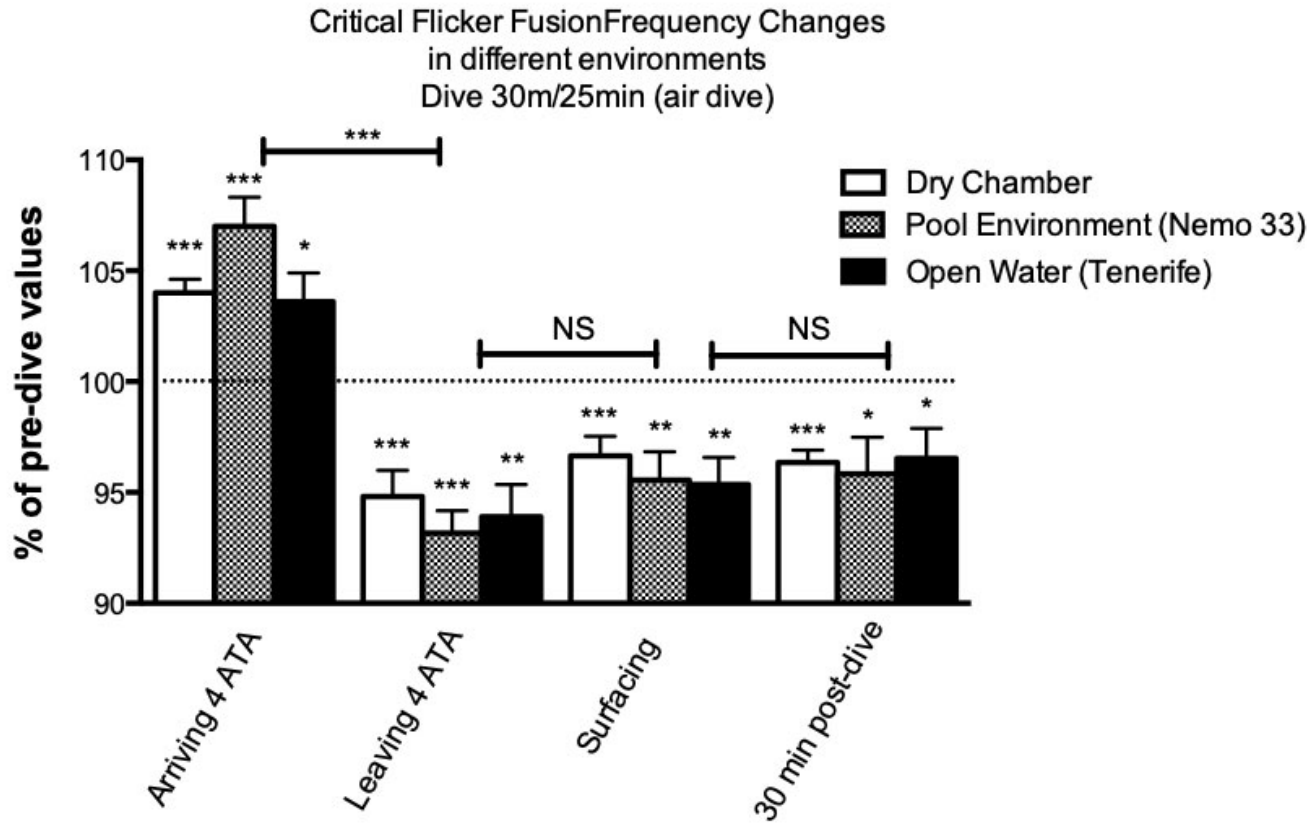
Tutkijat värväsivät yhtenäisen ryhmän, joka koostui 40 tupakoimattomasta miespuolisesta sukeltajasta, jotka olivat iältään 30 – 40 vuotta. Ryhmän jäsenet harrastivat liikuntaa säännöllisesti, ja heidän painoindeksinsä (BMI) oli 20-25. Sukeltajat pidättäytyivät alkoholin käytöstä 72 tuntia ennen tutkimusta.

Koesukellukset tehtiin 30 metriin, ja pohja-ajat olivat 20 minuuttia. Ympäristöjä oli kolme erilaista: ylipainekammio, syvä Nemo 33 -allas ja avovesisukellus. Veden lämpötila altaassa oli 33 °C, eikä tällöin tarvittu mitään lämpösuojausta. Meriveden lämpötila oli 19 °C, ja sukeltajilla oli päällään asianmukainen märkäpuku.

Jokaisen sukelluksen kohdalla tehtiin viisi eri CFFF-mittaussarjaa. Mittaukset olivat seuraavat:

- ennen sukellusta, jotta saatiin asetettua vertailuarvot sukeltajille
- saavutettaessa 30 metrin syvyyteen
- viisi minuuttia ennen pintaan nousua
- pintaan nousun aikana
- kolmekymmentä minuuttia sukelluksen jälkeen.

Tutkimuksen tekijöiden mukaan tämä oli ensimmäinen kerta, kun IGN:n vaikutuksia mitattiin vakioväestön keskuudessa erilaisissa ympäristöolosuhteissa. Toisin sanoen kyseessä olivat seuraavat erot olosuhteissa: kuiva vastaan märkä, suojapuku vastaan ei suojapukua, allas vastaan avovesi ilman syvyysviittauksia. Tutkimustulokset olivat yllättäviä.




Kuten kuvasta 1 näkyy, CFFF-tulokset olivat huomattavan yhdenmukaisia jokaisessa kolmessa ympäristössä. Ensinnäkin sukeltajien CFFF-arvot nousivat syvälle saavuttaessa. Tämä siis kertoi siitä, että mitattu kognitiivinen toiminto vahvistui. Tätä seurasi 15 minuuttia myöhemmin ilmoitettu lasku CFFF-arvoissa, joka kertoi kognitiivisesta heikkenemisestä, kun IGN alkoi luultavasti vaikuttaa. Yllättäen tämä heikkeneminen säilyi pintaan nousun aikana ja myös 30 minuuttia sukelluksen jälkeen.

Koska tämä narkoositila vaikuttaa siis säilyvän jonkin aikaa, ei vanha neuvo nousta joitakin metrejä ylöspäin, ole todennäköisesti tehokas. Yllättävää tuloksissa oli myös CFFF-arvojen alussa tapahtuva nousu saavuttaessa syvälle, koska se on merkki henkisen aktiivisuuden lisääntymisestä.

Tutkijoiden mukaan nämä havainnot ovat yhtenäisiä narkoosin proteiiniteorian kanssa. Tästä teoriasta on viime aikoina tullut suositumpi kuin vanhemmasta Meyer-Overtonin teoriasta, ja sen esittämä mekanismi on nyt hallitseva. Meyer-Overtonin teoriassa on kyse anestesiasta, joka perustuu lipidien liukoisuuteen. Molemmat mekanismit kuitenkin todennäköisesti vaikuttavat tilanteeseen. IGN:n ja anestesian uskotaan todellisuudessa jakavan samat mekanismit.

Tutkimuksen tekijöiden oletuksena on, että havaittu aivojen aktivoituminen ja sitä seurannut aktivaation heikkeneminen ovat seurausta siitä tasapainosta, joka on typen ja hapen GABA-reseptoreihin kohdistuvien suorien "lääkevaikutusten" ja näiden vuorovaikutusten farmakokinetiikan välillä. Happi vaikuttaa aktivoivasti hermoston välittäjäaineisiin, kun taas typellä on estävä vaikutus (Katso Rostain et al. 2011; Balestra et al. 2018).

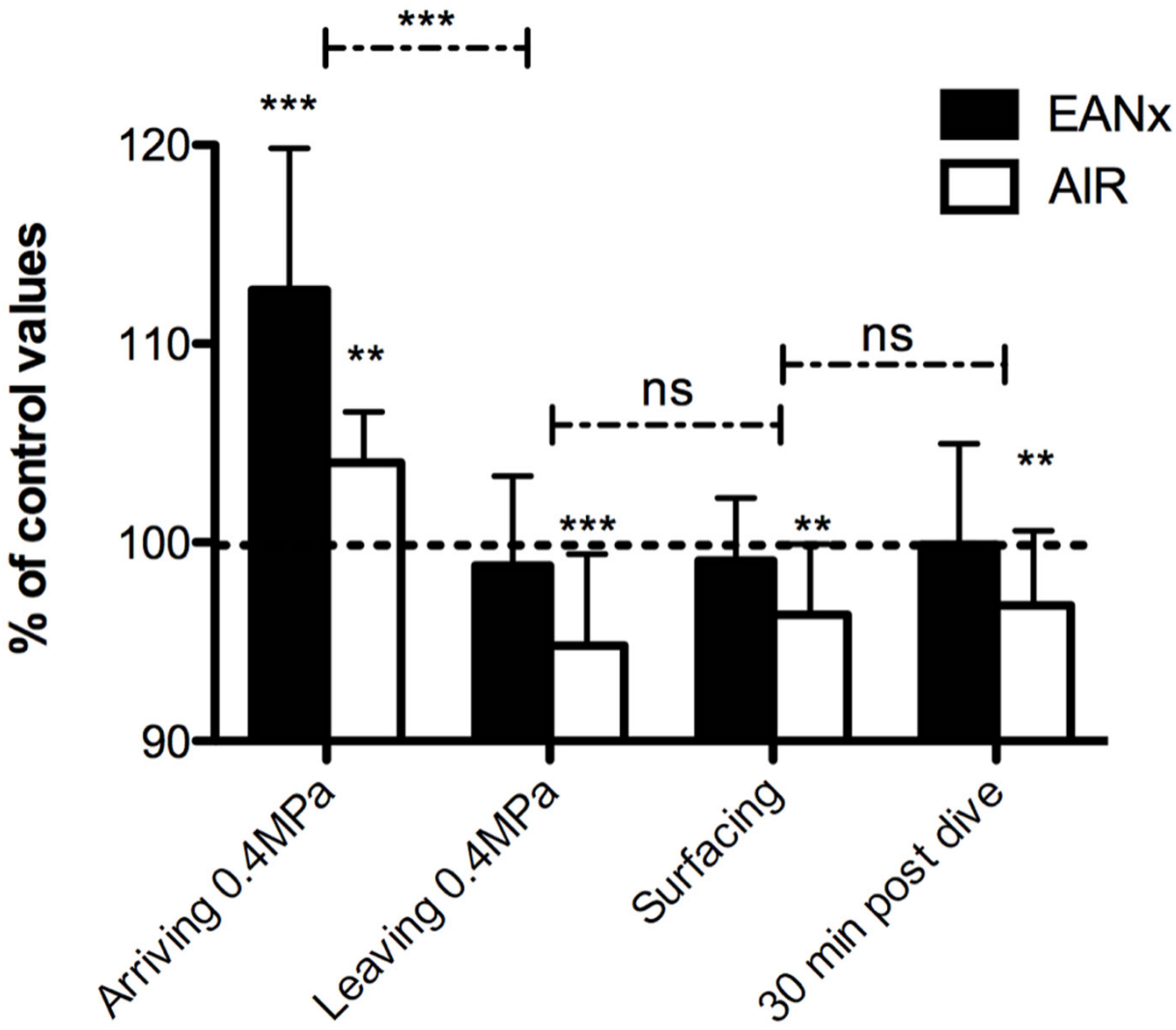
Tekijöiden johtopäätöksenä oli, että objektiivisesti mitattuna paine ja kaasu voivat olla ainoat ulkoiset tekijät, jotka vaikuttavat reagoimattoman kaasun aiheuttaman narkoosin kehittymiseen. Tutkimusta ei kuitenkaan kontrolloitu rasituksen suhteen (toisin sanoen kohonneiden $pCO_2$-arvojen suhteen). Tämä saattaa siis myös olla, ja todennäköisesti onkin, kriittinen tekijä.

## Ilma vastaan nitroksi

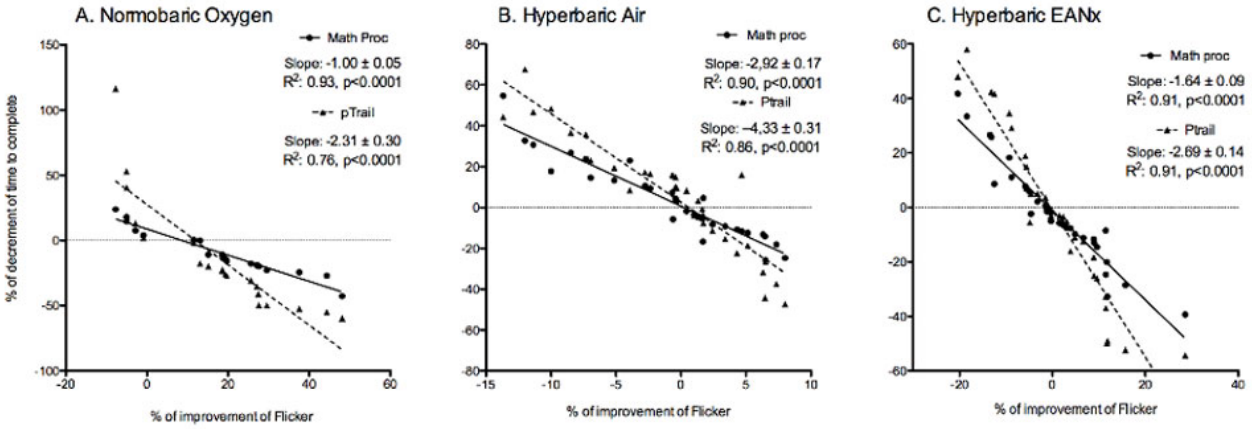
Joitakin vertailevia tutkimuksia on tehty siitä, mitkä ovat hengitysilman ja nitroksin (EAN) vaikutukset reagoimattoman kaasun aiheuttamaan narkoosiin. Joissakin tutkimuksissa on raportoitu huonommasta psykomotorisesta suorituskyvystä hengitettäessä happea tai rikastettua ilmaa. Toisissa tutkimuksissa on taas tultu siihen tulokseen, että narkoottinen toimintakyvyn heikkeneminen on sama molemmilla, vaikka sukeltajat saattavat kokea sen toisin. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli parantaa kognitiivista suorituskykyä vaihtelemalla hapen osapaineita ja tehostamalla CFFF-testin käyttöä mittausvälineenä.

Tutkimusta varten tutkijat valitsivat kahdeksan miespuolista sukeltajaa, jotka olivat 30 – 40 vuotiaita ja joiden painoindeksit olivat 20 – 25. Koesukellukset tehtiin ilmalla tai 40 prosenttisella nitroksilla satunnaisessa järjestyksessä kuivassa kammiossa, jossa kaasut hengitettiin kasvomaskien kautta. Sukellusprofiili oli suunniteltu niin, että seurauksena oli narkoosi. Sukellusprofiili oli seuraava: 30 metriä tai 4 ATA:a pohja-ajan ollessa 22 minuuttia ja 12 minuutin lineaarinen dekompressio 3 metriä minuutissa, siten että 3 metrissä on 3 minuutin turvapysähdys.

Sukeltajien kognitiivista suorituskykyä arvioitiin sukellusten aikana. Tässä käytettiin sekä CFFF-testauslaitetta että tietokoneistettua PEBL-testisarjaa, joka koostui matemaattisesta prosessoinnista, Trail Making -testistä ja havainnointia ja valppautta mittaavasta testistä. Aikaisemman tutkimuksen tavoin sukeltajia arvioitiin ennen sukellusta, saavuttaessa 4 ATA:an, sieltä lähdettäessä, nousun aikana ja 30 minuutin kuluttua sukelluksen jälkeen.




Kuten kuvasta 2 näkyy, CFFF-arvojen arviointi sekä ilmaa että nitroksia koskien tuotti samanlaisen mallin kuin ensimmäisen tutkimuksen kohdalla. Kun hengitettiin ilmaa, CFFF-arvot nousivat saavuttaessa 4 ATA:an, ja tätä seurasi 15 minuutin päästä arvojen lasku. Toimintakyvyn lasku säilyi nousun aikana ja 30 minuuttia sukelluksen jälkeen. Kun hengitettiin nitroksia, CFFF-arvot nousivat syvälle tultaessa ja laskivat sitten 15 minuutin päästä. Laskua seurasi kuitenkin paluu lähtötilanteen arvoihin. Vain ensimmäinen mittaus erottui tilastollisesti selvästi lähtötilanteesta.




Kuva 3 näyttää molempien kaasuseosten kohdalla merkittävän käänteisen korrelaation niiden muutosten välillä, jotka tapahtuvat CFFF-arvoissa ja siinä ajassa, jonka koehenkilöt tarvitsivat suoriutuakseen PEBL-testeistä. Samoin kuin CFFF-arvot myös testien suorittamiseen vaadittu aika osoitti molemmilla kaasuilla suorituskyvyn paranemista syvälle saavuttaessa ja sitten heikkenemistä, kun sukellus jatkui. Testien suorittamiseen vaadittavat ajat siis pitenivät. Heikkeneminen kesti 30 minuuttia sukelluksen jälkeen. Tämä vahvisti CFFF-testin pätevyyden mittausvälineenä ylipaineisissa olosuhteissa. Voidaan siis olettaa, että CFFF antaa PEBL:n kanssa vertailukelpoisia tuloksia.

## Onko paineistettu ilma renkaita varten?

Vaikka sukellusten arviointi tuotti samanlaisen mallin, kahden eri kaasun välillä oli merkittävä ero. Nitroksi yhdistettiin suurempaan aivojen aktivoitumiseen kuin mitä voitiin havaita ilmalla sukellettaessa. Sukelluksen loppupuolella ja sen päättymisen jälkeen esiintyi myös vähemmän toimintakyvyn heikkenemistä. Tämä vastasi niitä tuloksia, joita saatiin ensimmäisessä tutkimuksessa ympäristöolosuhteisiin liittyen.

Tutkijoiden oletus oli, että hengitetyn hapen suuremmalla osapaineella oli edullinen vaikutus aktivoitumiseen ja kognitiiviseen suorituskykyyn. Tämä on osoitettu muissa hapen hengittämistä koskevissa tutkimuksissa. Tämän perusteella voidaan myös olettaa, että IGN-herkät sukeltajat voivat olla herkkiä myös kohonneiden $pO_2$-arvojen aiheuttamille vaikutuksille. Lisäksi aikaisemmassa tutkimuksessa pienikin pN2-arvon alenema johti siihen, että jopa 28 prosenttinen nitroksi vaikutti edullisesti kognitiiviseen toimintakykyyn.

Mikä sitten tästä on tuloksena? Tutkimus tukee GUE-järjestön (Global Underwater Explorers) markkinoimaa meemiä, että "paineistettu ilma on renkaita varten". Sukeltajat kokevat narkoosia todennäköisesti vähemmän sukeltaessaan nitroksilla kuin ilmalla. Nitroksi tarjoaa etuja myös dekompression suhteen.

---

## Keskeiset lähdeviitteet

Rocco M, Pelaia P, Di Benedetto P, Conte G, Maggi L, Fiorelli S, Mercieri M, Balestra C, De Blasi RA & Investigators RP. (2019). Inert gas narcosis in scuba diving, different gases different reactions. *Eur J Appl Physiol* 119, 247-255.

Lafere P, Hemelryck W, Germonpre P, Matity L, Guerrero F & Balestra C. (2019). Early detection of diving-related cognitive impairment of different nitrogen-oxygen gas mixtures using critical flicker fusion frequency. *Diving Hyperb Med* 49, 119-126.

Balestra C, Machado ML, Theunissen S, Balestra A, Cialoni D, Clot C, Besnard S, Kammacher L, Delzenne J, Germonpre P & Lafere P. (2018). Critical Flicker Fusion Frequency: A Marker of Cerebral Arousal During Modified Gravitational Conditions Related to Parabolic Flights. *Front Physiol* 9, 1403.

Lafere P, Balestra C, Hemelryck W, Guerrero F & Germonpre P. (2016). Do Environmental Conditions Contribute to Narcosis Onset and Symptom Severity? *International journal of sports medicine* 37, 1124-1128.

Freiberger JJ, Derrick BJ, Natoli MJ, Akushevich I, Schinazi EA, Parker C, Stolp BW, Bennett PB, Vann RD, Dunworth SA & Moon RE. (2016). Assessment of the interaction of hyperbaric N2, CO2, and O2 on psychomotor performance in divers. *J Appl Physiol (1985)* **121,** 953-964.

Balestra C, Lafere P & Germonpre P. (2012). Persistence of critical flicker fusion frequency impairment after a 33 mfw SCUBA dive: evidence of prolonged nitrogen narcosis? *Eur J Appl Physiol* 112, 4063-4068.

Rostain, J. C., Lavoute, C., Risso, J. J., Vallee, N., and Weiss, M. (2011). A review of recent neurochemical data on inert gas narcosis. *Undersea Hyperb. Med.*38, 49–59.

## Lisätietoa:

*The Science of Diving: Things your instructor never told you* (Sukellustiede: Seikkoja, joita kouluttajasi ei ole koskaan kertonut sinulle) | (DAN Member's link – NON Member's link)

---

## Tietoa artikkelin kirjoittajasta

Michael Menduno on palkittu toimittaja ja tekniikan alan asiantuntija, joka on kirjoittanut sukeltamisesta ja sukellusteknologiasta monen vuosikymmenen ajan. Hän on luonut termin "tekniikkasukellus", ja hänen kirjoituksiaan on julkaistu esimerkiksi seuraavissa lehdissä: Alert Diver, DIVER, Quest, Scientific American, Scuba Times, Sports Diver, Undercurrent, Undersea Journal, WIRED ja X-Ray. Menduno perusti aquaCORPS-lehden ja toimi sen päätoimittajana. Tämä lehti auttoi osaltaan tekniikkasukellusta pääsemään mukaan urheilusukelluksen valtavirtaan. Mendunon ansiota ovat myös ensimmäiset Tek-, EuroTek- ja AsiaTek-konferenssit.