# Sydämen sykkeen vaihtelu ja dekompression aiheuttama fysiologinen stressi

*Toimittajan alustus: Esittelemme tässä erään kirjoittajan analyysin tuoreesta ja paljon keskustelua herättäneestä aiheesta, joka valottaa tutkimusta, jossa myös DAN Europen tutkijat ovat mukana. Artikkelissa tarkastellaan sydämen sykevaihtelun (HRV) ja dekompressiostressin välistä monimutkaista yhteyttä.*

---

Sukeltajien mielestä mikään ei ole niin hienoa kuin saada nipistettyä viisi minuuttia pois dekompressiopysähdyksiin käytetystä ajasta. Perusteluna tälle voi olla yhtä hyvin niin pinnalla odottava maukas välipala kuin myös tähän aiheeseen liittyvä merkittävä tutkimustieto.

Pian saattaa kuitenkin olla mahdollista muuttaa etappisukellusten suunnittelua merkittävästi. Tästä voimme kiittää brasilialaisista ja italialaisista tutkijoista koostuvan ryhmän viimeaikaista tutkimustyötä ja myös nopeasti lisääntyvää tietämystä sukellussairauteen liittyen. Tuoreessa projektissa on pyritty kehittämään työkalu, jonka avulla voimme paremmin määrittää sukeltajien dekompressiostressin määrän. Näin on onnistuttu luomaan korrelaatio sydän- ja verisuonitautien hoidossa perinteisesti käytetyn mittausmenetelmän ja dekompressiostressin tuntomerkkien välillä. Nämä molemmat tekijät on nyt otettu huomioon, kun sukellussairautta on alettu lähestyä aivan uudesta näkökulmasta. Tämän uuden näkemyksen mukaan sukellussairaus ei siis ole vain muutaman villin kuplan aiheuttamana tila, vaan kyseessä on moniulotteinen sairaus, jonka laukaisevat meille ennestään tutut tekijät ja jota pitävät yllä fysiologiset vasteet näihin laukaiseviin tekijöihin.

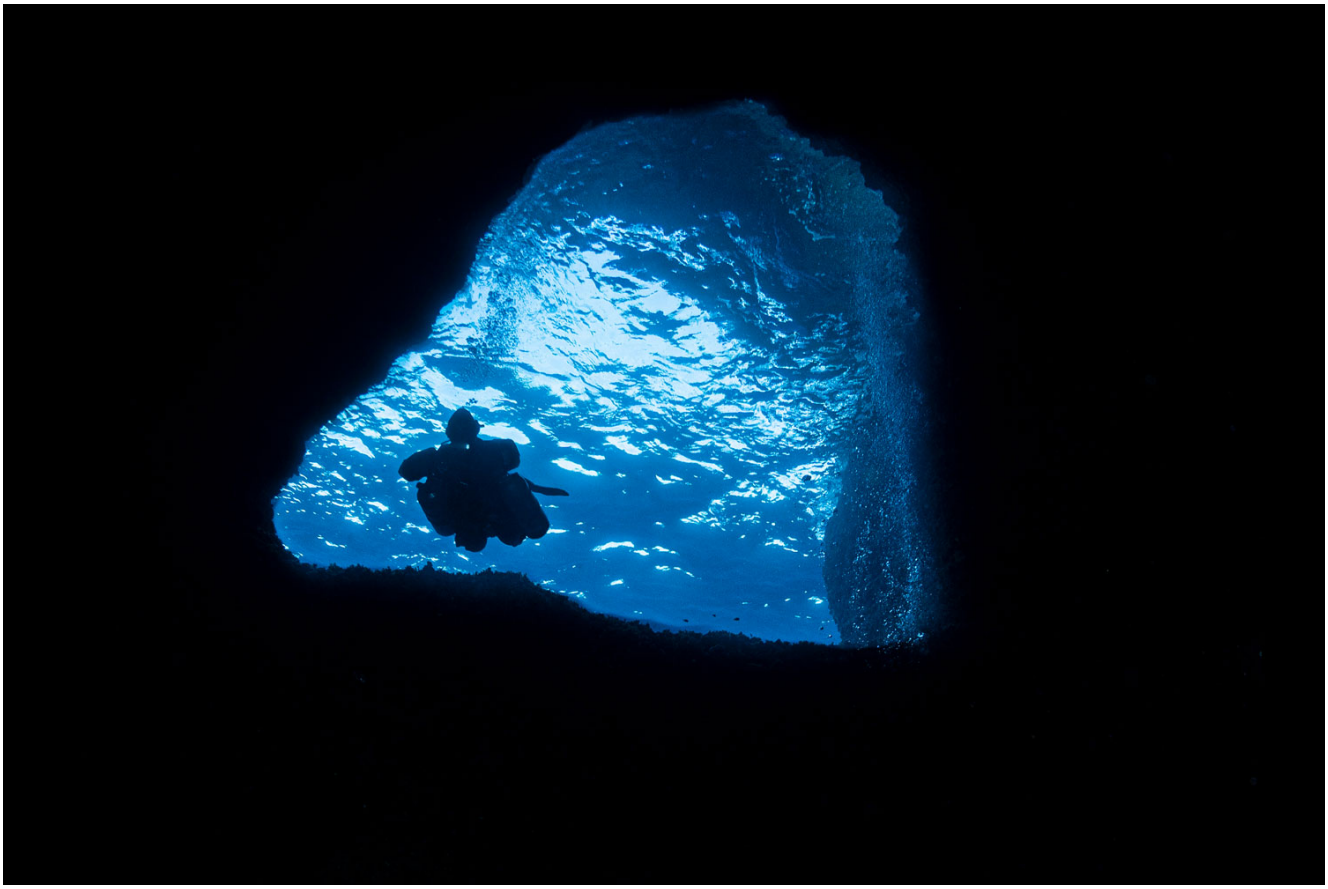


Kyse ei siis ole siitä, että kuplat eivät enää olisi olennainen osa sukellussairauden kehittymistä. Asia on enemminkin niin, että kyse ei ole *vain* kuplista. Viime vuosikymmenellä uuden tutkimuksen vetäjä on havainnollistanut asiaa sukellussairaudesta luodun mallin avulla. Tämä malli nojaa jatkuvasti kasvavaan joukkoon fysiologisia vasteita ja yhä monimutkaisempiin biokemiallisiin mekanismeihin. Tässä ymmärryksen muutoksessa on katalysaattorina toiminut ensisijaisesti sukellussairauden parissa tehdyt tutkimukset, jotka koskevat endoteelin toimintahäiriöitä. Endoteelisolujen aiheuttamat reaktiot ja niiden vasteet on voitu yhdistää lukuisiin sairausprosesseihin. Näihin prosesseihin kohdistuva mielenkiinto on ollut valtavaa. Samoin erittäin ison kiinnostuksen kohteena on ollut tulehdusprosessien vaikutus tunnettuihin sairauksiin. Endoteelin toimintahäiriöt ovat monimutkaisia, ja niiden parissa tehtävä tutkimustyö on edelleen kesken. Tärkeää on kuitenkin ymmärtää, kuinka nykyaikaiset tutkimukset ovat osoittaneet, että nekin sairaudet, joita luulemme ymmärtävämme hyvin, eivät ehkä olekaan vain yhden haitallisen tekijän aiheuttamia. Nämä sairaudet ovat pikemminkin tietyn laukaisevan tekijän ja elimistön omien vasteiden muodostama yhdistelmä. Joissakin tapauksissa sairaus johtuu kokonaan elimistön omasta reagoinnista laukaisevaan tekijään.

Valitettavasti tämä tarkoittaa sitä, että emme voi enää pitää sukellussairautta ainoastaan verenkierrossa kiertävien kuplien aiheuttamana tautina. Tosielämässä on osoitettu, että laskimoiden ilmaemboliat (todelliset kuplat veressä) ovat huono sukellussairauden indikaattori. Niiden esiintyvyys vaihtelee suuresti eri sukeltajien välillä. Sen sijaan endoteelin toimintahäiriöt korreloivat ylipainealtistuksen kanssa. Endoteelin toimintahäiriöihin liittyen tutkijoiden on ollut tarpeen pureutua syvälle tulehdusprosesseihin sekä paneutua lisää siihen kysymykseen, mikä suoritettujen sukellusten ja niitä mahdollisesti seuraavan sukellussairauden välinen yhteys todella on.

## Sydämen sykkeen vaihtelun (HRV) merkitys

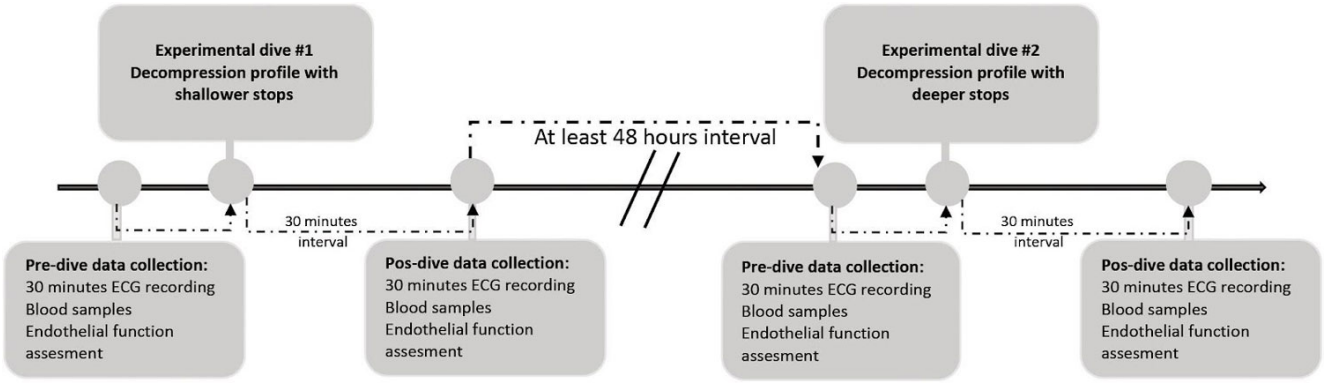
Sydämen sykkeen vaihtelun seuraamista käytetään mahdollisena nopeana tapana mitata tiettyjä tulehdusvasteita. Sen on voitu osoittaa korreloivan eri tautitilojen kanssa alkaen diabeteksesta aina sydän- ja verisuonisairauksiin asti. On voitu myös osoittaa, että sydämen syke vaihtelee sukellettaessa. Tässä kohtaan tämä uusin tutkimus astuu mukaan kuvaan. Veressä olevien mikropartikkelien (MP) on osoitettu olevan yhteydessä tulehdusreaktioon. Sydämen sykkeen vaihtelu on tutkimusten mukaan tyypillistä sukellettaessa ja liittyy myös tulehdusreaktioihin. Mikropartikkelien on puolestaan osoitettu lisääntyvän, kun altistutaan inerteille kaasuille kovassa paineessa. Näin ollen on mahdollista, että sydämen sykkeen vaihtelua voitaisiin käyttää sopivana keinona mitata tulehdusvasteita sukeltajilla. Näin voitaisiin myös mahdollisesti arvioida sukellussairauden riskiä. Tämä saattaa kuulostaa kunnianhimoiselta, ja sitä se tietysti onkin. Jos kuitenkin sydämen sykkeen vaihtelun ja dekompression aiheuttaman fysiologisen stressin välinen korrelaatio voitaisiin osoittaa todeksi, käytössämme olisi tällöin todella tehokas keino ymmärtää sitä, kuinka ja miksi sukeltajat sairastuvat sukellussairauteen. Samoin ymmärtäisimme, mitä fysiologisia reaktioita dekompressiostressi aiheuttaa. Näin saataisiin myös käyttöön menetelmä, jonka avulla voitaisiin arvioida sairastumisen riskiä tosielämässä. Näihin tavoitteisiin ei ole vielä päästy, mutta kyseessä on kuitenkin jännittävä ensimmäinen askel ja sellaiset tulevaisuuden näkymät, joista asiaan intohimoisesti suhtautuvat jo kovasti unelmoivat.



Tämä perustavaa laatua oleva tutkimus on jossain määrin monimutkainen. Tutkimuksen ytimessä on kuitenkin se, että sydämen sykkeen vaihtelun ja sukellussairauteen liittyvien tulehduksesta kertovien markkerien välillä saattaa olla yhteys. Näin ollen näitä markkereja voidaan käyttää suoraan sukellussairauden riskin mittaamiseen. Tutkimusryhmä tarkasteli erityisesti verinäytteistä ja EKG-käyrästä saatua tietoa pyrkiessään löytämään yhtäläisyyttä sydämen sykkeen vaihtelun ja tulehduksesta kertovien markkerien välillä. 28 vapaaehtoista teki kaksi sukellusta eri sukellusprofiileilla yhdessä kolmesta eri paikasta, jotka oli valittu tätä tarkoitusta varten. Sukellusprofiilit olivat yhdenmukaisia dekompressiota

koskevan kokonaisajan ja kaasun kokonaissupersaturaation suhteen. Vaihtelua oli kuitenkin dekompressiopysähdysten syvyyden suhteen, jotta tutkimukseen saatiin sisällytettyä variaatiota.

Tutkijat yhdistivät kahden sukellusprofiilin väliset tiedot, niin että niitä voitiin analysoida yhtenä yhtenäisenä tietojoukkona. Koepaikasta riippuen osallistujat käyttivät joko suljetun kierron laitteita, painekammion tuottamaa hengityskaasua tai avoimen kierron laitteita. Ennen ja jälkeen sukellusten otettiin verinäytteet ja EKG-käyrät. Näytteet otettiin aina 30 minuuttia ennen ja jälkeen sukelluksen. Eri sukellusten välillä oli myös oltava aina vähintään 48 tuntia. Tämän tarkoituksena oli estää tietojen vääristyminen, jota aikaisemman altistumisen pitkittyneet vaikutukset olisivat saattaneet aiheuttaa.




Kuva: Tutkimusprosessia kuvaava vuokaavio – *Sydämen sykkeen vaihtelun ja dekompression aiheuttaman fysiologisen stressin välinen yhteys*

Tekijät ovat itse parhaiten kuvanneen saatujen tulosten analysointia. Tuloksia hyödynnettiin analysoinnin jälkeen teoreettisen mallin luomisessa, jonka avulla voitiin tehdä päätelmiä suhteellisen pieneltä koeryhmältä otettujen näytteiden perusteella. Tulokset mallinnettiin 1 000 sukellusta sisältävään tietokantaan. Analyysin jälkeiseen dataan sisältyy monia mielenkiintoisia jatkoreittejä. Kun kuitenkin keskitymme sydämen sykkeen vaihtelun ja tulehduksesta kertovien markkerien väliseen yhteyteen, näemme tilastollisesti merkittävän muutoksen, joka saattaa olla hyvinkin lupaava.

Data voi olla ällistyttävääkin, mutta pääasialliset trendit ovat nähtävissä HF:n ja SDNN:n sekä Annexin ja MP:n välisissä suhteissa. Samoin on nähtävissä positiivinen korrelaatio, kun kyseessä on LF ja CD66b + ja CD31 + MPs. Nämä lyhenteet voivat tietysti saada pään pyörälle. Pohjimmiltaan kyse on kuitenkin siitä, että moninkertaiset dataan liittyvät korrelaatiot näyttäisivät osoittavan samaan suuntaan tavalla, joka tarjoaa tilastollisesti pätevää todistusaineistoa tutkijoiden hypoteeseille.

| | SDNN | | LF | | HF | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Estimate | *p*-value | Estimate | *p*-value | Estimate | *p*-value |
| CD16 + | −22.89 | 0.09 | −5.11 | 0.24 | −0.94 | 0.25 |
| MPO (%) | −2.68 | 0.91 | 1.08 | 0.89 | −1.66 | 0.25 |
| MPO (MFI) | 0.44 | 0.01 | 0.07 | 0.23 | 0.01 | 0.28 |
| Annexin + | −125.37 | 0.03 | −25.45 | 0.16 | −7.70 | 0.02 |
| CD66b + | 195.27 | 0.74 | 376.92 | 0.04 | 34.12 | 0.33 |
| CD31 + | 78.87 | 0.72 | 122.34 | 0.08 | 2.00 | 0.88 |
| CD41 + | 3.14 | 0.52 | 1.83 | 0.23 | 0.09 | 0.74 |

Mallintamisen jälkeiset suhteet sydämen sykkeen vaihtelun indikaattorien sekä MPO:n ja MP:n välillä – *Sydämen sykkeen vaihtelun ja dekompression aiheuttaman fysiologisen stressin välinen yhteys*

*Huom. LF ja HF ovat pien- ja suurtaajuisia suodattimia, joita on käytetty EKG-tutkimusten aikana. Ne edustavat eri puolia analysoitaessa sydämen sykkeen vaihtelua sydänsähkökäyrän avulla. Näiden erojen ymmärtäminen ei ole täysin välttämätöntä tähän tutkimukseen perehdyttäessä, mutta lisätietoa on kuitenkin tarjolla aiheesta kiinnostuneille.*

## Johtopäätökset

Tämä kaikki saattaa vaikuttaa vähän liian haastavalta rennoksi iltapäivälukemiseksi, ja sitä se kyllä onkin. On melkein mahdotonta mitata niitä monia muuttujia, jotka vaikuttavat tulehdusprosesseihin, sukellussairauteen ja jopa sydämen sykkeen päivittäiseen vaihteluun samankin tutkimushenkilön kohdalla. Tutustu malleihin riittävästi voidaksesi ymmärtää tutkimusta ja keskity sitten tuloksiin. Tässä tapauksessa ne näyttävät ensisijaisesti ilmaisevan korrelaatiota dekompression jälkeisen sydämen sykkeen vaihtelun ja niiden tekijöiden välillä, jotka ovat merkkinä fysiologisesta tulehdusreaktiosta ja stressistä. Nämä tekijät ovat tutkijoiden valitsemia. Edellä esitetty ei kuitenkaan tarkoita sitä, että sinun pitäisi heti hankkia sydämen sykkeen tarkkailulaite ja supistaa dekompressiopysähdyksiin käyttämäsi aika mahdollisimman lyhyeksi. Kyse on ennemminkin lupaavista tuloksista ja innostavista mahdollisuuksista tulevaisuutta silmällä pitäen. Kannattaa ottaa huomioon, että eläimiä koskevat mallit ovat ristiriidassa tämän tutkimuksen tietojen kanssa ja tulokset saattavat vaihdella niiden eri tutkimushenkilöiden välillä, jotka ovat sairastuneet sukellussairauteen. Mahdollisuudet tulevien tutkimusten suhteen ovat kuitenkin valtavat.

Sukeltajien olisi ehkä mahdollista osoittaa dekompressiomallien laadullinen toimivuus tosielämässä, jos tästä sydämen sykkeen vaihtelun ja dekompressiostressin välisestä suhteesta saadaan lisää tietoa. Tällöin olisi myös mahdollista ymmärtää oikealla tavalla niitä kudosten supersaturaatiota ja sukellussairautta yhdistäviä tekijöitä, jotka ovat meille vielä tuntemattomia. Jos tämä malli osoitetaan todeksi, tulemme ehkä näkemään perustavaa laatua olevia muutoksia niissä tavoissa, jotka liittyvät etappisukellusten suunnitteluun. Tämä sama koskee myös sukellussairauden ymmärtämistä ja hoitoa. Suosittua kuluttajateknologiaa hyödyntämällä voidaan nykyään tunnistaa sydämen rytmihäiriöitä rannekellon avulla. On mahdollista, että saattaisimme joskus tulevaisuudessa nähdä jotain samantyyppistä sydämen sykkeen

vaihtelun mallintamista sukellustietokoneisiin sisällytettynä. Kyse ei ole mistään sellaisesta, minkä pitäisi muuttaa tämänhetkisiä sukellustapojamme. Tavoitteena on kuitenkin tämän tutkimustyön kautta luoda uusia malleja, joiden avulla ymmärretään monipuolisesti sukellussairautta. Siksi näiden tutkimusten tulisi ehdottomasti kiinnostaa jokaista sukeltajaa tulevaisuutta ajatellen.

---

## Lähdeaineistoa:


1. Brubakk, A. O., Duplancic, D., Valic, Z., Palada, I., Obad, A., Bakovic, D., et al. (2005). A single air dive reduces arterial endothelial function in man. *J. Physiol.* 566, 901–906. doi: 10.1113/jphysiol.089862
2. Papadopoulou, V., Germonpré, P., Cosgrove, D., Eckersley, R. J., Dayton, P. A., Obeid, G., et al. (2018). Variability in circulating gas emboli after a same scuba diving exposure. *Eur. J. Appl. Physiol.* 118, 1255–1264. doi: 10.1007/s00421-018-3854-7
3. Doolette, D. J. (2016). Venous gas emboli detected by two-dimensional echocardiography are an imperfect surrogate endpoint for decompression sickness. *Diving Hyperb. Med.* 46, 4–10.
4. Cognasse, F., Hamzeh-Cognasse, H., Laradi, S., Chou, M.-L., Seghatchian, J., Burnouf, T., et al. (2015). The role of microparticles in inflammation and transfusion: a concise review. *Transfus. Apher. Sci.* 53, 159–167. doi: 10.1016/j.transci.2015.10.013
5. Noh, Y., Posada-Quintero, H. F., Bai, Y., White, J., Florian, J. P., Brink, P. R., et al. (2018). Effect of shallow and deep SCUBA dives on heart rate variability. *Front. Physiol.* 9:110. doi: 10.3389/fphys.00110
6. Appel, M. L., Berger, R. D., Saul, J. P., Smith, J. M., and Cohen, R. J. (1989). Beat to beat variability in cardiovascular variables: noise or music? *J. Am. Coll. Cardiol.* 14, 1139–1148. doi: 10.1016/0735-1097(89)90408-7
7. von Känel, R., Nelesen, R. A., Mills, P. J., Ziegler, M. G., and Dimsdale, J. E. (2008). Relationship between heart rate variability, interleukin-6, and soluble tissue factor in healthy subjects. *Bone* 23, 1–7. doi: 10.1038/jid.2014.371
8. Schirato SR, El-Dash I, El-Dash V, Bizzarro B, Marroni A, Pieri M, Cialoni D and Chaui-Berlinck JG (2020) Association Between Heart Rate Variability and Decompression-Induced Physiological Stress. Front. Physiol. 11:743. doi: 10.3389/fphys.2020.00743


---

## Tietoa artikkelin kirjoittajasta

Reilly Fogarty on Uudessa-Englannissa toimiva tutkija, joka on erikoistunut tutkimaan sukeltamista suljetun kierron laitteilla. Hän on myös Yhdysvaltain rannikkovartioston kapteeni. Hänen ammatilliseen taustaansa sisältyy kirurgiaa samoin kuin erikoistumista lääketieteellisten hätätilanteiden hoitamiseen erämaaoloissa. Fogarty on osallistunut myös ylipainehappihoitoa koskevaan tutkimustyöhön ja ensiapuohjelmien suunnitteluun ja toteuttamiseen. Samoin hän on ollut mukana toiminnassa, jossa tavoitteena on ollut sukeltamiseen liittyvien riskien vähentäminen laaja-alaisesti. Hän on aikaisemmin työskennellyt Duke Centerin ylipainelääketieteen ja ympäristöfysiologian keskuksella (Duke Center for Hyperbaric Medicine and Environmental Physiology). Kyse on ollut tutkimustyöstä, jossa on tutkittu ääriolosuhteiden vaikutusta ihmisen fysiologiaan. Hän on työskennellyt myös Divers Alert Network -järjestölle riskienhallintaryhmän johtajana.

**Kääntäjä:** Marianna Rantanen