

Järven lämpötilasta

DI Antti Järvenpää FM Pertti Niemi

24.5.2025



Tiivistelmä: Artikkelissa on kuvattu Kinnaslammen lämpötilan kehittyminen eri syvyyksillä kesän 2024 aikana ja mittausmenetelmät sekä -järjestelyt.

Avainsanat: kasvihuoneilmiö, järven lämpeneminen, veden absorptio spektri

I JOHDANTO JÄRVEN LÄMPÖTILAN MITTAUKSEEN

Kokeen taustalla on useampi asia. Ensinnäkin se, että 2010 luvulla alkoi ilmestymään kaupallisia lämpötilaloggereita, joita pystyi upottamaan paineenalaisiin olosuhteisiin. Toiseksi törmäsimme Vesijärvisäätiön raporttiin¹, jossa oli tehty lämpötilamittaus järven eri syvyyksillä. Kolmanneksi Horrace de Saussuresta tehtyjä kirjoituksia ja kirjoja luettaessa, kerrottiin niissä kiehtovasti, kuinka 1700 luvulla pystyttiin kekseliäästi mittaamaan Alppi järvien pohjien lämpötila ja kuinka hän näiden mittausten perusteella päätteli, että jokaisen Alppi järven pohjan lämpötila on lähellä 4°C. Menetelmänä Horrace de Saussurella oli kaksinkertaiset lasiastiat, jonka uloimman vesitilavuus oli niin suuri, ettei se lämmennyt merkittävästi kun rakennelma nostettiin syvyydessä vedenpintaan ja näin sisemmän astian vesi säilyi jotakuinkin sen lämpöisenä kuin se oli järven pohjassa ja tässä sisemmässä astiassa oli lämpömittari.

Järvien ja merien pohjan lämpötilan mittaaminen ei siis ole aivan uusi asia, vaan sitä on kyetty tekemään aiemminkin, mutta menetelmät ovat olleet hitaita ja työläitä. Puolijohdeteknologian kehittyminen on mahdollistanut erittäin pienikokoiset anturit, joiden virrankulutus on pieni, jolloin ne voidaan upottaa järveen parhaimmillaan vaikkapa talven yli. Rajoittavana tekijänä on lähinnä laitteen muistin koko ja se aikaväli, kuinka usein anturin muisti on tyhjennettävä.

Loggereita on useilla eri valmistajilla ja niiden hinta haarukka menee noin 50 eurosta useampaan sataan euroon, riippuen anturin ominaisuuksista, suojauksesta ja muistista. Loggereiden mittatarkkuus on $\pm 0,1^\circ\text{C}$ luokkaa, jonka sisälle vesihäuteessä kokeessammekin käytetyt anturit menivät. Teimme kuitenkin antureilla varsin laajasti kokeita, selvittääksemme kuinka tarkasti lämpötilaa voi erilaisissa olosuhteissa mitata.

Kaikki, jotka ovat joskus opintojensa vaiheessa suorittaneet fysiikan laboratoriokokeita, muistavat varmaan opettajan ohjeet. Esimerkiksi sen, että mittausten keskiarvoa ei saa, eikä voi ilmasta tarkemmin kuin yksittäistä mittausta. Tarkkuus ei voi siis lisääntyä matematiikalla. Toiseksi mieleen on varmaankin jäänyt, että mittauksiin liittyy aina erilaisia virhelähteitä. Osa tulee mittalaitteesta, osa liittyy olosuhteisiin, osa itse mittausapahtumaan ja nykyisillä sähköisillä mittareilla on syytä arvioida myös sitä, voiko jokin seikka häiritä sähköisesti tai muuten mittausta.

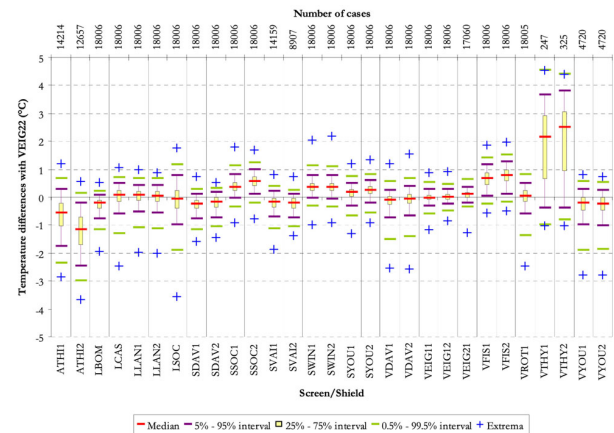
II TEORIAA

Ensimmäisen lämpömittarin teki ilmeisesti Galileo Galilei 1592, ja Jean Ray keksi ensimmäisen nestelämpömittarin 1632 ja suljettu nestelämpömittari, johon ei vaikuttanut ilmanpaine muutokset kehitettiin 1644. Asteikot pyrittiin luomaan kahden pisteen välille ja Newtonin (1642-1724) lämpömittarissa sulavan jään arvo oli 0 astetta

ja 12 oli ruumiin lämpötila. Olof Romerin (1644-1710) asteikossa jää-suolaseos oli 0 astetta ja veden kiehuminen 60 astetta, jolloin veden jäätymislämpötilaksi tuli 8 astetta. Daniel Gabriel Farenheitin (1686-1736) asteikossa jää-suolaseos oli 32 astetta ja veden kiehuminen 212 astetta ja kehon lämpötila 98 astetta. Anders Celsiusen (1701-1744) veden kiehumispiste määriteltiin 100 asteeksi ja veden jäätyminen 0 asteeksi. Vuonna 1848 William Thomsson (myöhemmin Lordi Kelvin) (1824-1927) ehdotti termodynaamista lämpötilaa, joka skaalattiin Carnotin ihanteellisen lämpömoottorin hyötysuhteen perusteella. Tässä absoluuttinen nolla oli OK ja veden jäätymispiste 273,15K ja veden kiehumispiste 373,15K².

Mittarit olivat pitkään nestelämpömittareita, kunnes 1970-luvulla esim Suomen ilmatieteen laitokselle tuli ensimmäiset elektroniset mittarit. Ne eivät kuitenkaan korvanneet ilman lämpötilan mittauksessa nestelämpömittareita kuin vasta 1990-luvulla ja 2010 lähes kaikki mittausasemat oli muutettu elektronisille platinavastus antureille. Teollisuudessa sen sijaan elektroninen lämpötilanmittaus mahdollisti automaation jo varsin varhain³. Nykyinen puolijohde elektroniikka on tuonut sitten edulliset puolijohde anturit, joista yhtä on käytetty tässä tutkimuksessa.

Oleellista on, että määrittelystä johtuen lämpötilan mittaus nesteessä on lähtökohtaisesti parhaiten määritelty ja aika eksakti, vaikka iso osa mittausmenetelmistä ei ole lineaarisia 0 - 100°C välillä. Vesi tiheänä aiheena ympäröi tehokkaasti anturin, jolloin edellytykset tarkalle mittaaukselle on olemassa. On kuitenkin mahdollista, että vedessä on virtauksia tai molekyylitason muutoksia, jotka vaikuttavat mittaustulokseen.



Kuva 1 Lämpötilapoikkeamat eri säteilysuojilla kirkkaana päivänä, kun tuulen nopeus oli alle 2 m/s WMO:n säteilysuojatestissä Ghardaïassa, Algeriassa marraskuu 2008 ja lokakuu 2009 välillä⁴.

He, jotka ovat testanneet puolijohde antureita, eivät ole voineet olla huomaamatta, että ilmassa anturien arvot hakevat kovasti arvoa, mihin asettua. Syynä ilmeisesti on, että ilma on kaoottinen harva aine ja että ilmassa anturit ovat ilman lämpötilan lisäksi jatkuvassa fotoni pommituksessa, jolloin suoran tai epäsuoran auringonsäteilyn alaiset anturit kohisevat voimakkaasti. Kaikenlaisen säteilylämmön

¹ Mirva Ketola; Vähä-Tiilijärven tila ja hoitosuunnitelma; Päijät-Hämeen Vesijärvisäätiö 2021

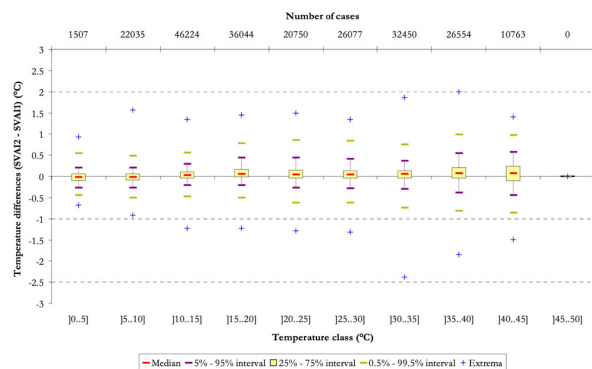
² David A Katz, Temperature; lähde: 18.11.2024 https://www.academia.edu/40509358/TEMPERATURE_A_BRIEF_HISTORY_OF_TEMPERATURE_MEASUREMENT?email_work_card=title

³ Tekniikan historia 5/2017; sivut 54-57; Alma Talent Oy; ISSN 2341-8192

⁴ M. Lacombe, D. Bousri, M. Leroy and M. Mezred; WMO field Intercomparison of thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments Ghardaïa, Algeria from November 2008 to October 2009; Instruments and observing methods report N:0 106; WHO 2011

estämiseksi pyritään vaikkapa ilmatieteellisissä mittauksissa estämään säteilylämmön osuminen suoraan mittavaan anturiin nk. säteilysuojilla.

Kuva 1 kertoo, että vaikka erilaiset säteilysuojat antavat keskimäärin hyvinkin samanlaisia tuloksia, niin hetkittäin ne voivat näyttää hyvin erilaisia lämpötiloja. Kuvassa on 25-75%, 5-95% ja 0,5-99,5% rajat ja ääriarvot, jotka yleensä asettuvat n. 3 keskihajonnan paikoille normaali-jakautuneissa suureissa. Nämä jakaumat ovat hyvin kaukana itse anturien suorituskyvystä, jotka voivat olla vesihauteissa $\pm 0,1^\circ\text{C}$ pienempiä. Kuva 1 kertoo, että satunnaisten mittausten suhteen kaksi eri säteilysuojaa voivat antaa useita asteita erilaisia lukemia.



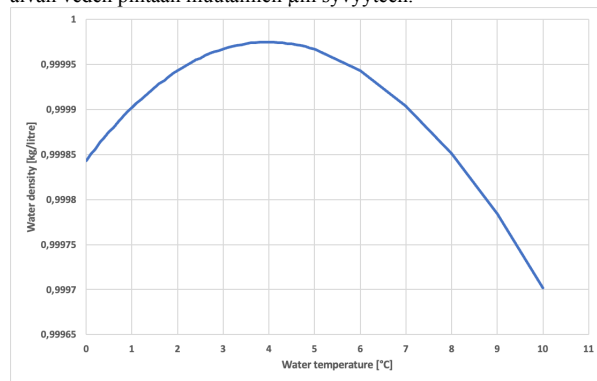
Kuva 2 Vaisalan kahden samanlaisen säteilysuojan vaihtelu samassa WMO tutkimuksessa.

Kun kahden samanlaisen säteilysuojan (kuva 2) välillä on myös merkittävää vaihtelua, voidaan hyvällä syyllä uskoa, että ilmasta lämpötilaa mitattaessa on sellaista mittaustapahtumaan liittyvää kohinaa, joka ylittää reilusti itse mittaussanturien tarkkuuden.

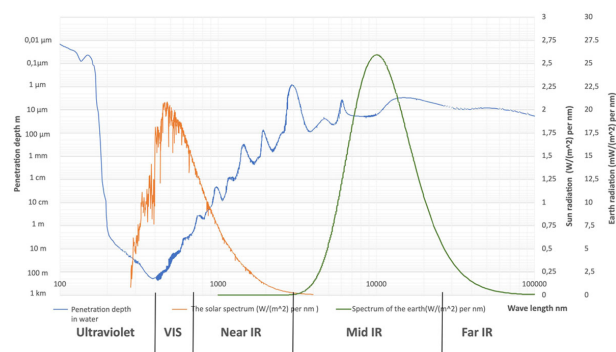
Vesi kerrostuu niin, että raskain vesi painuu pohjaa kohti ja kevyin vesi nousee pintaa kohti ja tämä kerrostuminen säilyy, mikäli vesi ei menetä energiaansa haihtumalla tai johtumalla. Siis esimerkiksi absoluuttisesti eristetyssä astiassa tai vaikkapa järvessä, missä auringon säteily tuo jatkuvasti lisää energiaa haihtumisen ja muilla mekanismeilla tapahtuneen energian menetyksen tilalle.

Säteilyn penetroituminen veteen 0,1 μm - 100 μm aallonpituuksilla on selvitetty melko kattavasti kokeellisesti, josta on koostettu kuva 4. Kuva koskee kirkasta puhdasta vettä, jota järvivesi harvoin on. Kuvasta käy esille, että auringonsäteily menee hyvin syvälle veteen UV-valon ja näkyvän valon rajamailla ja toisaalta pidempiaaltoisella IR alueella lämpösäteily absorboituu muutamien μm matkalla. Näin ollen auringon säteilyllä on edellytykset lämmittää vettä syvältäkin,

milloin olosuhteet ovat sopivia, mutta ilmakehän IR säteily pysähtyy aivan veden pintaan muutamien μm syvyyteen.



Kuva 3 Vedestä tiedetään kokeellisesti, että se kerrostuu voimakkaasti tiheyden mukaan⁵.



Kuva 4 Säteilyn absorptioituminen veteen⁶

Toisaalta tiedetään, että avaruudesta tuleva kosminen säteily myös absorboituu muutamien metrien matkalla veteen, mutta sen intensiteetti on niin pientä, että se ei kykene lämmittämään vettä, vaikka yksittäiset fotonit ovat hyvin energettisiä 4GeV. Tällaisia fotoneja voi osua noin yksi neliösenttimetrille minuutissa, josta tulee tehoa noin 110 nW/m².

Lämpösäteilyä voidaan mitata IR lämpömittareilla ja koko taivaan tai maanpinnan säteilyä voidaan mitata pyranometrillä ja pyrgeometrillä. Tässä tutkimuksessa lämpösäteilyn arvoa on käytetty Hyttiälän SMEAR mittausaseman arvoja. Omia mittauksia ei ole tehty. Lisäksi on käytetty myös Petäjäveden sähkölaitoksen lämpötilan mittausaseman arvoja sekä sademäärä Jyväskylän

⁵ lähde 17.11.2024 https://www.internetchemistry.com/chemical-data/water-density-table.php#google_vignette

⁶ Lähteet löytyvät Scott Prahl www.sivustolta Optical Absorption of Water Compendium (<https://omlc.org/spectra/water/abs/index.html> 2023-03-26); 1929 Becquerel and Rosignol, 1940 Dorsey Properties of the Ordinary Water Substance in all Its Phases, 1963 Sullivan Experimental study of the absorption in distilled water, artificial sea water, and heavy water in the visible region of the spectrum, 1968 Irvine and Pollack Infrared optical properties of water and ice spheres, 1969 Zolotarev et al. Dispersion and absorption of liquid water in the infrared and radio regions of the spectrum, 1973 Hale and Querry Optical constants of water in the 200nm to 200 μm wavelength region, 1974 Palmer and Williams Optical properties of water in the near infrared, 1976 Austin and Halikas The index of refraction of seawater, 1976 Kopelevich Optical properties of pure water in the 250-600nm range, 1977 Morel and Prieur Analysis of variations in ocean color, 1978 Querry, Cary, and Waring Split-pulse laser method for measuring attenuation coefficients of transparent liquids: application to deionized filtered water in the visible region, 1979 Tam and Patel Optical absorption of light and heavy water by laser optoacoustic spectroscopy, 1980 Quickenden and Irvin The ultraviolet absorption spectrum of liquid water, 1981 Prieur and Sathyendranath An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments dissolved organic matter, and other particulate materials, 1981 Segelstein The complex refractive index of water, 1981 Smith and Baker Optical properties of the clearest natural waters (200-800nm), 1982 Baker and Smith Bio-optical classification and model of natural waters 1984 Warren Optical Constants of Ice from the Ultraviolet to the Microwave, 1986 Boivan et al. Determination of the attenuation coefficients of visible and ultraviolet radiation in heavy water, 1988 Shifrin Physical Optics of Ocean Water, 1989 Wieliczka, Weng, and Querry Wedge shaped cell for highly absorbent liquids: infrared optical constants of water, 1990 Schiebener et al. Refractive index of water and steam as function of wavelength, temperature and density, 1991 Perovich and Govoni Absorption Coefficients of Ice from 250 to 400nm, 1991 Querry, Wieliczka, and Segelstein Water (H₂O), 1991 Sogandares The spectral absorption of pure water, 1992 Fry, Kattawar, and Pope Integrating cavity absorption meter, 1993 Aly and Esmail Refractive index of salt water: effect of temperature, 1993 Kou Refractive indices of water and ice in the 0.65-2.5 μm spectral range, 1993 Kou, Labrie, and Chylek Refractive indices of water and ice in the 0.65-2.5 μm spectral range, 1993 Pope Optical absorption of pure water and sea water using the integrating cavity absorption meter, 1994 Buiteveld, Hakvoort, and Donze The optical properties of pure water, 1995 Bricaud et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization, 1995 Quan and Fry Empirical equation for the index of refraction of seawater, 1995 Zelsmann Temperature dependence of the optical constants for liquid H₂O and D₂O in the far IR region, 1997 Pope and Fry Absorption spectrum (380-700nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements, 1997 Sogandares and Fry Absorption spectrum (340-640nm) of pure water. I. Photothermal Measurements

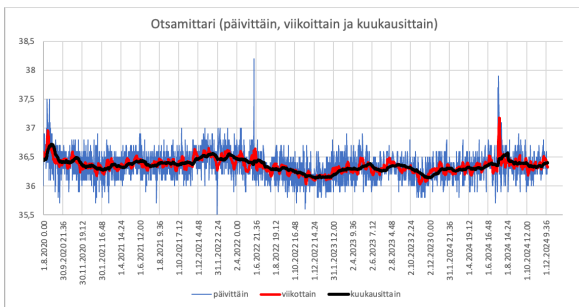
Mannillassa olevalta yksityiseltä sääasemalta.

Järven lämpöasetta voitaisiin kuvata matemaattisesti, mutta tässä tutkimuksessa on lähinnä kiinnostuttu siitä, miten järven lämpötila kehittyi kesän kuluessa. Järveä lämmittää lähinnä auringonsäteily, joka kuvan 4 mukaan voi penetreritua hyvinkin eri syvyyksille. IR säteily sen sijaan voi vaikuttaa lähinnä vain joidenkin mikrometrien syvyyteen. Järveä jäädyttää pääsääntöisesti haihtuminen ja johtuminen veden pinnalta. Fotonien absorptioituminen ja emittoituminen vesimolekyyliä aiheuttaa niiden lämpenemistä ja jäähtymistä ja sitä kautta molekyylien tilavuus muuttuu, joka on perimmäisenä syynä veden kerrostumiseen lämpötilan mukaan. Järven lämpötilakehitys ei ole siten suora seuraus siitä, millä syvyydellä fotonit absorboituvat veteen, koska molekyylit etsivät tiheyttä vastaavan syvyyden, jolle ne kerrostuvat.

Vaikka vesi on merkittävä elämän lähde ja sitä esiintyy mittavasti, niin veden käyttäytyminen ja olemus on osittain mysteeri. Yksi mysteereistä on veden vetysidokset ja kuinka vesi käyttäytyy isompana kokonaisuutena. Emeritus professori Martin Chaplinilla⁷ on www-sivuillaan varsin laaja esitys veden klustereista. Viimeisen sadan vuoden aikana asiasta on esitetty useita malleja ja viimeisin tieto on, että vesi klusteroituu satojen tai jopa tuhannen molekyylin klustereiksi.

Vaikka lammen lämpötilojen mittauksessa emme ole kiinnostuneita absoluuttisista lämpötiloista, on paikallaan kiinnittää huomio lämpömittarien kalibrointiin ja tarkkuuteen. Historiallisesti lämpömittareita on kalibroitu 0°C ja 100°C ja ihmisen ruumiin lämpötilaan. Veden jäätymis- ja kiehumispiste on fysikaalisesti määriteltyjä, mutta ei kovin helposti kontrolloitavia lämpötiloja, joten ne vaativat hyvät järjestelmät ja olosuhteet.

Ihmisen ruumiinlämpötila on historiallisesti kiinnostava asia. Ruumiin normaalilämpötilan oletettiin olevan saman niin eri ihmisillä kuin yksilöllä ajan suhteen, kunnes havaittiin, että näin ei ole.



Kuva 5 Tutkijan ruumiinlämpötila useamman vuoden ajalta päivittäin mitattuna otsalämpömittarilla (Wittings)

Otsalämpömittarilla mitattuna pitkän ajan keskiarvo on ollut 36,4°C ja keskihajonta 0,3°C, jolloin 2 keskihajonnan perusteella kuumen raja olisi 37°C. Valmistaja lupaa mittarille $\pm 0,2^\circ\text{C}$ tarkkuuden, joka luultavasti sisältää sekä mittarin että mittaustapahtuman epävarmuuden. Kuvasta 5 havaitaan, että ruumiinlämpötila ei ole kovin vakaa. Sen lisäksi, että mittauksissa on kohinaa, niin pitkän ajan mittausarjoissa ruumiinlämpö liikkuu jonkin verran ylös ja alas. Kuva on tärkeä sen vuoksi, että monet luonnonilmiöt eivät ole lainkaan niin vakaita lämpötilan suhteen kuin uskomme.

Nykyisin lämpömittareita voidaan kalibroida joko fysikaalisten ilmiöiden mukaan, kolmoispisteet, jäätymiset tai vertaamalla korkean tarkkuuden omaavaan mittariin. Lisäksi lämpömittari usein nykyisin muodostuu 3 osasta: mittavasta elementistä, muunnosmenetelmästä (suure muutetaan lämpötilaksi), ja näytöstä. Vanhassa lasisessa lämpömittarissa nämä kaikki olivat yksi ja sama kokonaisuus, mutta nykyisissä sähköisissä mittalaitteissa nämä kaikki voivat olla eri elementtejä. Tällöin kalibrointi voi koskea järjestelmän yksittäisiä elementtejä tai kokonaisuutta. Käytännössä vaikkapa tässä kokeessa käytettyjen anturien tarkkuus perustuu oletettavasti valmistusprosessin laadunvalvontaa, eikä näin ollen yksittäisiä mittalaitteita ole oletettavasti kalibroitu erikseen.

Kuten kuvista 1 ja 2 voidaan päätellä, niin lämpömittarien kalibrointi koskee olosuhteita, joissa ne on kalibroitu. Kun lämpömittari viedään toiseen olosuhteeseen, vaikkapa ilmaan nesteen sijasta, niin olosuhde kasvattaa mittausvirhettä melkoisesti. Ylipäättensä sähkömagneettinen säteily vaikuttaa voimakkaasti lämpömittareihin. Jos siis pidämme antureita auringonsäteilyn vaikutusalueella, on kohina voimakasta, mutta myös ilman kaoottiset virtaukset vaikuttavat voimakkaasti lämpötila-arvoihin. Kokeen yhteydessä testasimme näitä asioita, koska meillä oli 12 samanlaista anturia käytössä, joka antaa hyvän lähtökohdan tällaiseen vertailuun.

III MITTAUKSET

Mittalaitteet

Mittalaitteeksi valitsimme RuuviTag Pro BT (2 in 1) sensorin, jonka lämpötila-anturina on Texas Instruments TMP117AIDRVR siru. Anturin vesitiiveys oli IP68 & IP69K ja anturille oli luvattu 50m tiiveys hetkellisesti. Käytimme siis antureita pitkäaikaisesti omalla vastuullamme läpi kesän eri syvyyksissä järvestä, josta ne suoritutvat hyvin. Anturin kotelon materiaali oli Wonderlite® PC-110 polykarbonaatti. Valmistajan ilmoittama mittatarkkuus anturille on $\pm 0,1^\circ\text{C}$ (alueella $-20...+50^\circ\text{C}$). Anturi tallentaa tehdasvalmiina lämpötiladataa 5 min välein loggerina ja BT (bluetooth) yhteyden ollessa aktiivisena sekunnin kahden välein.



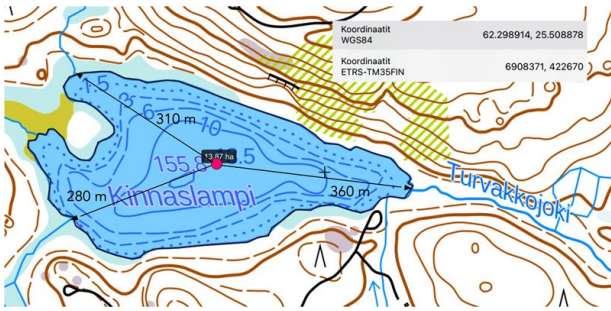
Kuva 6 RuuviTag Pro BT (2 in 1) sensorin hajotuskuva⁸



Kuva 7 Näkymä missä mittaukset suoritettiin

⁷ Lähde 26.1.2025 Martin Chaplin https://water.lsbu.ac.uk/water/water_structure_science.html

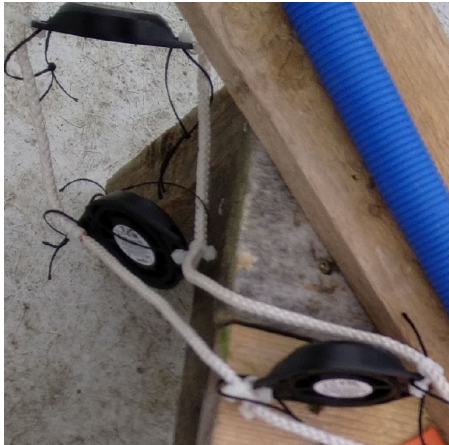
⁸ Lähde 21.11.2024 <https://ruuvi.com/fi/ruuvitag-pro/>



Kuva 8 Mittauspaikka

Mittauspaikka oli Jyväskylässä sijaitseva Kinnaslampi, jonka maksimi syvyys on 13,5 metriä, jonka syvyyden laidalta mittaukset tehtiin. Lammen pinta-ala on noin 14 hehtaaria. Lampi on pisimmillään 660 metriä ja leveimmillään 330 metriä. Ankkurointipaikka oli keskellä lampea, josta oli etäisyyttä n. 300 m laskeviin puroihin ja lähtöjokeen.

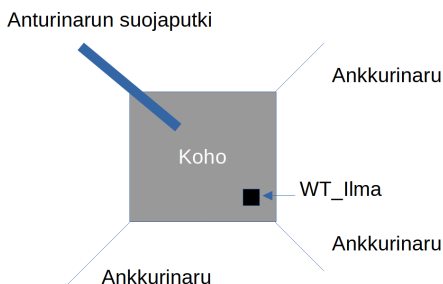
Mittauslaitteisto muodostui puurakenteisesta kohosta, jossa oli polyuretaani kelluke. Koho oli ankkuroitu 3 ankkurilla paikalleen. Lämpötila-anturit oli kiinnitetty nippusiteillä kahteen naruun, siten että anturit voitiin nostaa kohon päälle lukemista varten. Narujen päässä oli painot, että anturit asettuivat suoraan alaspäin. Kuvassa 9 näkyy lämpötila-anturien kiinnitys kahteen naruun. Anturit olivat vaakasuorassa ollessaan vedessä.



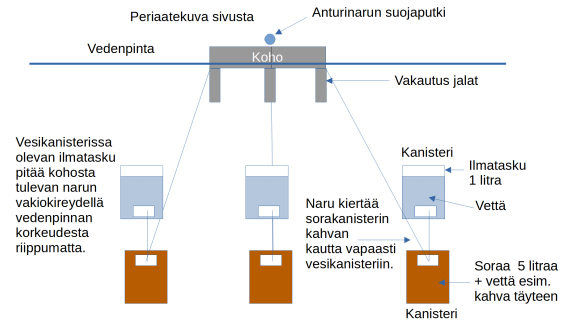
Kuva 9 Lämpötila-anturien kiinnitys kahteen naruun. Anturit olivat vaakasuorassa ollessaan vedessä.

Anturit asetettiin eri syvyyksille 10 cm syvyydestä 9 metriin ja yksi antureista sijoitettiin kohon päälle (WT-ilma) mittaamaan ilman lämpötilaa. Viisi ensimmäistä anturia oli 1 metrin alueella 0,1 m, 0,2 m, 0,4 m, 0,7 m ja 1 metrin syvyyteen ja seuraavat 6 anturia oli 2m, 3m, 4m, 5m, 7m ja 9 m syvyydessä. Kohon mekanismi oli suunniteltu niin, että aallokosta ja järvenpinnan vaihtelusta huolimatta anturien syvyys seuraisi veden pintaa. Anturien merkintä WTxx tarkoittaa sitä, että xx on anturin syvyys metreinä veden pinnasta alaspäin.

Periaatekuva ylhäältä



Kuva 10a Kohon periaate



Kuva 10b Kohon ankkurointi

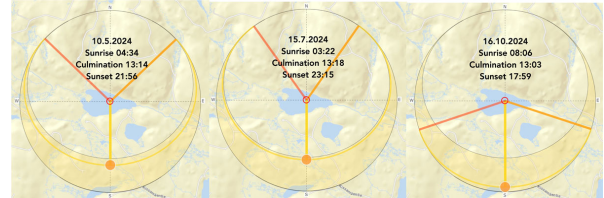
Ankkurointi tehtiin niin, että anturinarun suojaputki osoitti suuntaan 144 astetta, jossa aurinko oli korkeimmillaan ja kolmella ankkurilla varmistettiin, että suunta säilyi läpi kesän näin. Kohon päällä olevan laudan ja suojaputken tarkoitus on viedä anturit pois kohon varjosta.



Kuva 11 Mittauslaitteisto

Anturinarut värjäytyivät ruskeaksi 2-3 metrin syvyyteen asti. Nostojen välillä jouduttiin myös pesemään antureita limoittumisen takia. Tämä kertonee jotakin siitä, mihin syvyyteen asti fotosynteesi toimi lammessa. Syvemmällä anturinarut pysyivät jotakuinkin puhtaina.

Ankkureina käytettiin 5 litran muovikanistereita, joista varsinaiset ankkurit täytettiin hiekalla ja ankkurien kiristys kanisterit sisälsivät 4 litraa vettä ja 1 litran ilmaa. Mekanismin avulla varmistettiin, että koho pysyy aallokossa paikallaan. Kuvasta 14 nähdään, että värjäytymisen perusteella ankkurit olivat painautuneet lammen pohjan lietteeseen.



Kuva 12 Auringon asema koepaikalla



Kuva 13. Anturit kokeen jälkeen.



Kuva 14 Ankkurit ja kiristyskanisterit kokeen jälkeen

Mittaukset

Vaikka mittarien absoluuttisella tarkkuudella ei ole järven lämpötilan mittauksen kannalta merkitystä, niin testasimme antureiden tarkkuutta erilaisissa olosuhteissa.



Kuva 15a Anturien tarkkuus Faradayn häkissä. Anturit on numeroitu juoksevalle numerolla

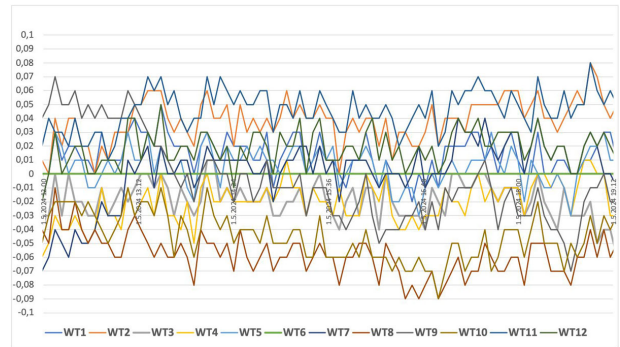
Kuvan 15a ja b mittauksen mukainen Faradayn häkki oli Euroshieldin 1996 valmistama häkki, jonka oven spesifikaatiot löytyvät tyyppille RFD-60. RuuviTag Pro BT (2 in 1) sensorien tarkkuus on Faradayn häkissä $\pm 0,04^{\circ}\text{C}$ luokkaa, joka on aika paljon parempi kuin valmistajan lupaama $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.



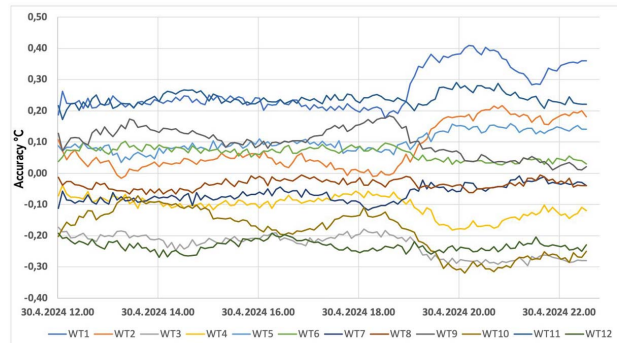
Kuva 15 b Anturien tarkkuus Faradayn häkissä. Yksittäisten sensorien kohina

Jos tarkastelemme yksittäisiä sensoreita, niin niiden kohina on alle $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$ Faradayn häkissä. Häiriöttömissä olosuhteissa ruuvit anturit täyttävät hyvin valmistajan lupaaman valmistustarkkuuden.

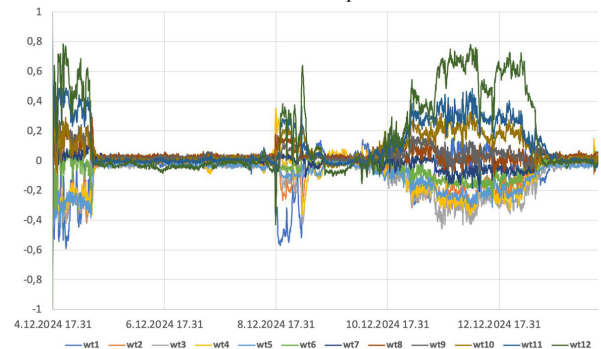
Vesihautteessa antureille saadaan noin $\pm 0,07^{\circ}\text{C}$ tarkkuus ja näin ollen anturit toimivat myös vedessä valmistajan lupaamalla tavalla. Kuitenkin vedessä on jonkin verran enemmän kohinaa, verrattuna Faradayn häkkiin, jossa valtaosa sähkömagneettisesta säteilystä on poissa.



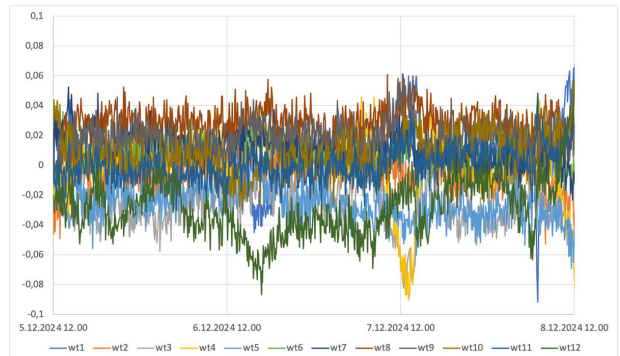
Kuva 16 Anturien tarkkuus vesihautteessa



Kuva 17 Anturien tarkkuus ulkona kesäpäivänä



Kuva 18 Anturien tarkkuus ulkona talvella kirkkaalla ja pilvisellä taivaalla



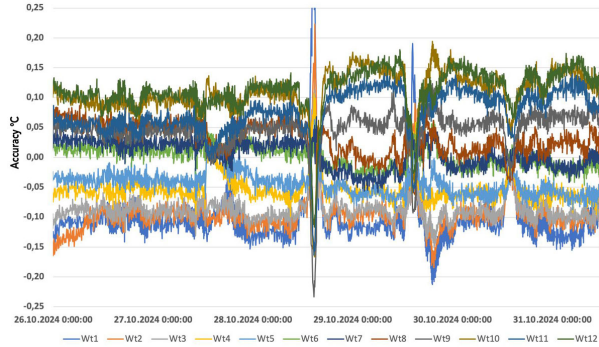
Kuva 19 Tarkkuus ulkona talvella pilvinen taivas

Kokeilimme antureita myös ulkoilmassa erilaisissa olosuhteissa. Anturit reagoivat ulkoilman lämpösäteilyyn hyvin herkästi ja mikäli ulkoilman lämpösäteilyä ei oltu estetty, anturien mitta-arvojen hajonta laajeni ja silloin mittauksen vaihteluväli oli pikemminkin asteiden kuin kymmenesosa asteiden luokkaa. Anturit reagoivat niin kirkkaan yötaivaan kuin auringon säteilyyn. Jos oli pilvinen olosuhde, niin tarkkuus oli hyvin samankaltainen kuin Faradayn häkissä.

Tehdyistä kokeista voi päätellä, että mittauksen vaihteluväliin vaikuttaa anturin varsinaisen mittatarkkuuden lisäksi voimakkaasti mittausolosuhteet ja mitattavan väliaineen ominaisuudet. Vesihautte, joka on sisätiloissa, tuottaa melko lähelle samankaltaisia tuloksia kuin Faradayn häkissä olevat anturit. Ulkoilmassa, jossa voi olla olosuhteista riippuen hyvinkin erilaista fotonin säteilyä, kohina voi

olla voimakasta. Oletettavasti myös ilman liikkeet vaikuttavat mittasten vaihteluväliin.

Emme tutkineet erilaisten säteilysuojien vaikutusta, koska niillä ei ollut järven lämpötilamittauksen kannalta merkitystä. Säteilysuojilla voidaan estää suoraa ja/tai epäsuoraa fotonien vaikutusta, mutta ne kuitenkin lämmittävät säteilysuojaa, joka voi välillisesti vaikuttaa mittaustuloksiin. Muista kokeistamme tiedämme, että lasi tai muovi anturin suojana vähentää kohinaa, josta voisi päätellä, että kohina on voimakkaampaa UV alueella, jonka UV-alueen lasi ja tavallisimmat muovit suodattavat pois.



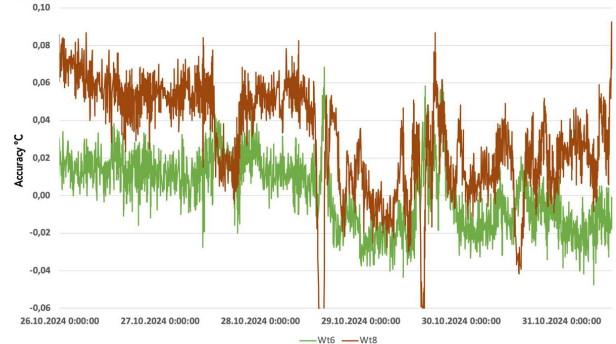
Kuva 20a Tarkkuus pimeässä huoneessa

Pimeässä huoneessa ilmassa anturien tarkkuus on $\pm 0,15 \dots 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja yksittäisten anturien kohina on $\pm 0,04^{\circ}\text{C}$ luokkaa.

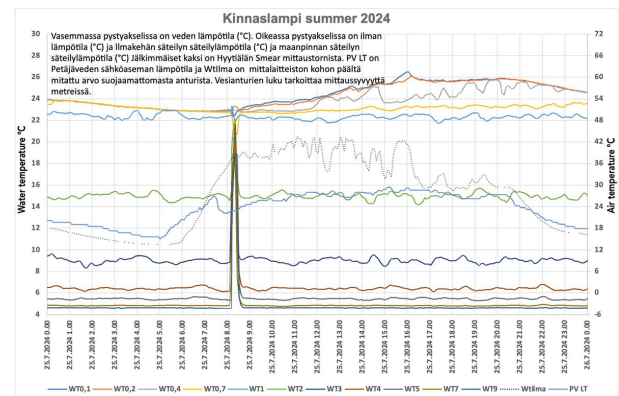
Järvikokeen aikana anturit nostettiin lukemista varten 21 kertaa (kuva 21). Koe alkoi 10.5.2024 klo 10:00 ja päättyi 16.10.2024 13:49. Keskimäärin anturien luku vei 23 min. Minimissä lukemiseen meni 12 min ja maksimissaan 34 min. Anturien lukuväli oli keskimäärin 8 päivää.

Käytännössä vene soudettiin kohon luokse ja anturinaru nostettiin ylös kohon päälle ja anturit luettiin yksittellen bluetooth (BT) yhteydellä mobiililaitteeseen. Kun lukeminen oli tehty, anturit tarvittaessa

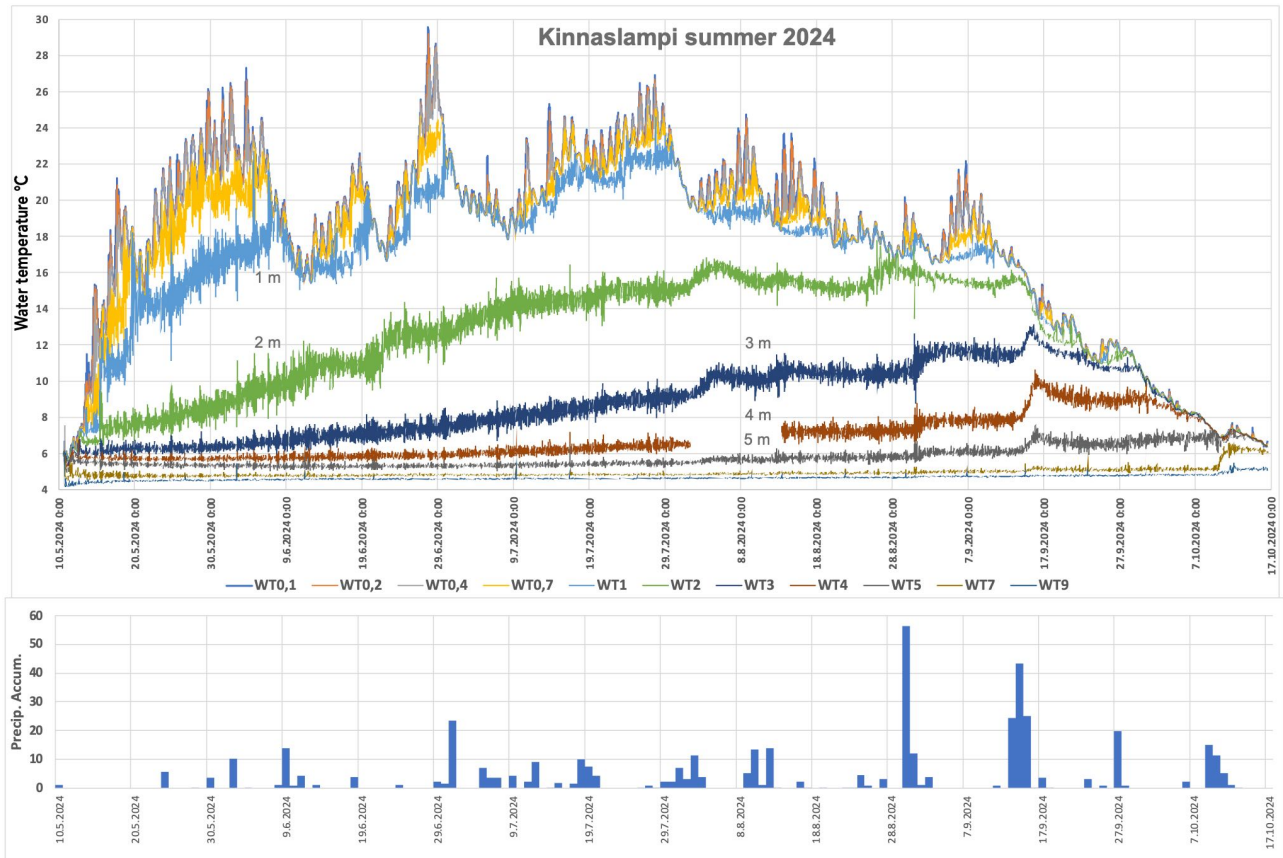
puhdistettiin ja anturinaru laskettiin takaisin alas. Ruuvien sovelluksesta tiedot siirrettiin csv-tiedostona tietokoneelle analysointia varten. Anturien luku joudutaan tekemään tällä tavoin, koska antureihin voi tallentaa maksimissaan noin 10 päivän datan 5 min tarkkuudella ja BT yhteys ei toimi vedessä niissä syvyyksissä, joissa anturit olivat.



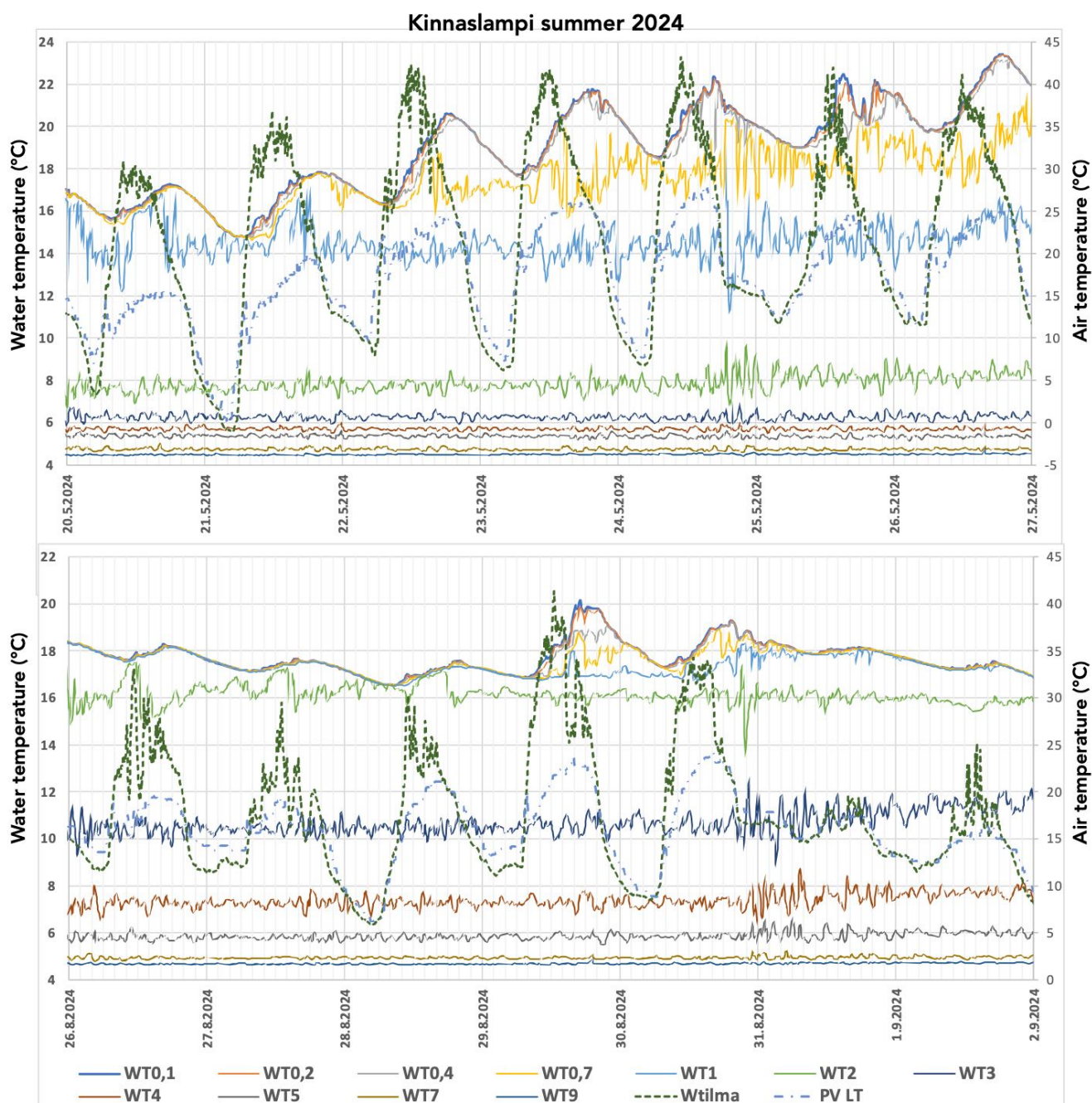
Kuva 20b Tarkkuus pimeässä huoneessa, yksittäiset anturit



Kuva 21 Anturien lukeminen



Kuva 22 Mittaustulokset toukokuusta lokakuuhun ja alemassa kuvassa on vuorokautiset sadekertymät lähiseudulla.



Kuva 23 Viikon 21 ja 35 lämpötilan kehitys

Kuvassa 22 mittaukset on luettu 5 minuutin välein ja anturit on nostettu maksimi 10 päivän välein luettavaksi. Nostohetkien data 12-34 min on poistettu aineistosta, koska anturit ovat osoittaneet silloin ilman lämpötilaa. Kuvassa on yhdistetty sateen määrä Jyväskylän Mannilassa olevalta yksityiseltä sääasemalta.

Kokonaisuutena mittaaminen onnistui hyvin ja jokainen anturi kesti testin painerasitukset. Yhden kerran 4 metrin anturin luku epäonnistui kokeen aikana ja menetimme siltä osin n. 2 viikon datan koska vian havaintohetkellä ei ollut työkaluja mukana paristokannen avaamista varten ja, koska operaattori ei aikataulullisista syistä päässyt palaamaan mittaajajärjestelmän luo aikaisemmin. Varmuuden vuoksi anturin paristo vaihdettiin, vaikka edellisen lukukerran yhteydessä jännite oli lähes aloitushetken lukemissa. Pariston poisto ja sisäänlaitto nolaa mittausdatan ja käynnistää anturin sisäisen ohjelmiston. Tarkkaa syytä lukemisen epäonnistumiseen emme tiedä.

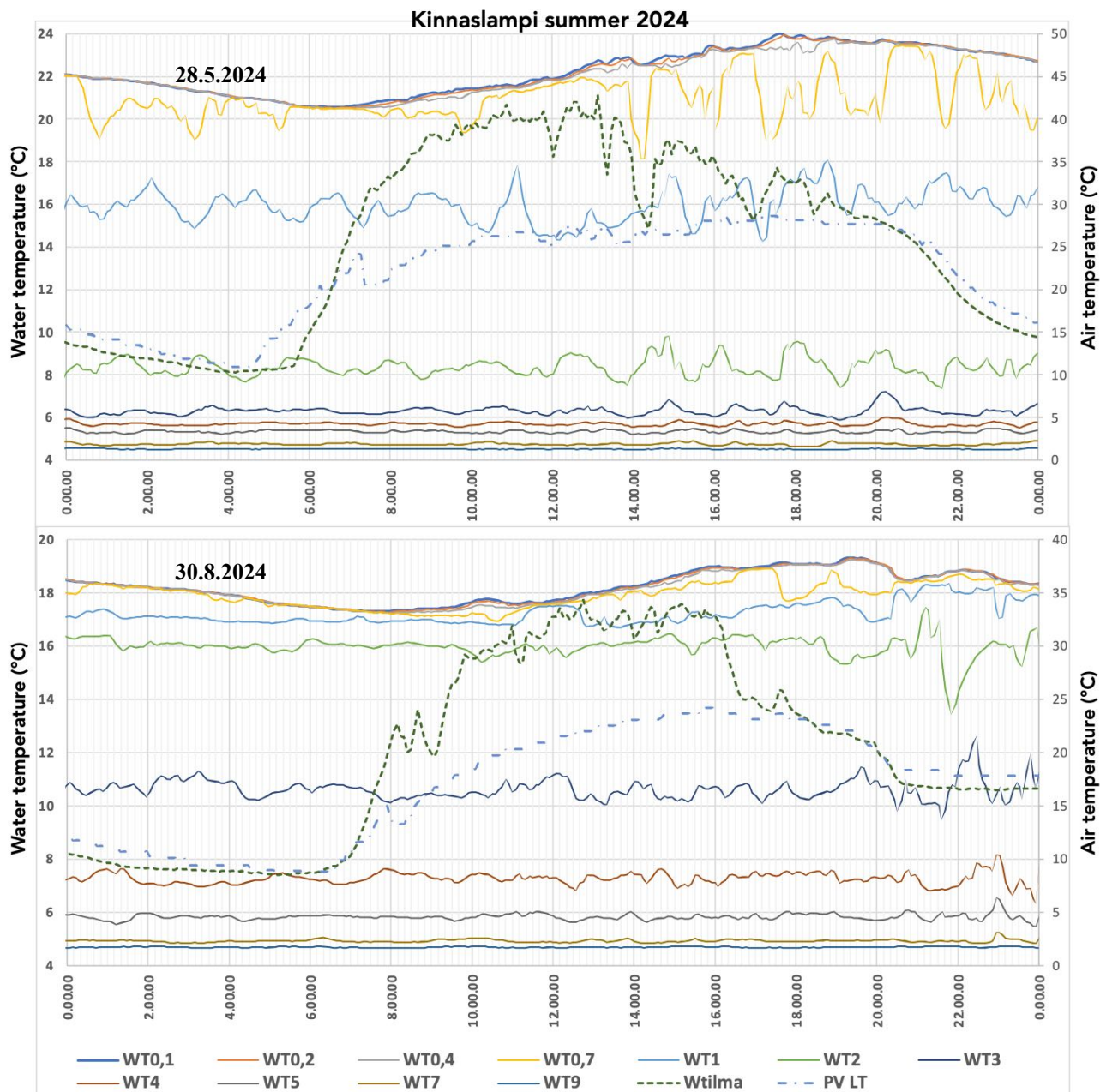
Omien mittaus tulosten lisäksi keräsime läheisten mittausasemien lämpötila- säteily- ja sateisuustietoja vertailuja varten, koska halusimme varmistaa, voisiko kuvissa näkyvä kohina selittyä jostakin

em. tekijästä. Kuvassa 23 on myös hiukan tarkempia kuvia viikolta 21 ja viikolta 35 sekä kuvassa 24 päiväkohtaisesti kahdelta päiväältä, joista näkyy paremmin kohinan ja muutosten luonne.

Mittauksien tulkinta

Kinnaslampi on latvavesistö allas Jyväskylän Vesangassa. Tähän noin 14 ha lampeen laskee 3 puroa pienemmistä lammista ja soilta ja siitä lähtee Turvakkojoki niminen laskujoki. Lampi on syvimmältä kohdaltaan karttojen mukaan 13,5 metriä syvä, jolta kohdalta myös mittaukset tehtiin. Lampi on 155,8 metriä merenpinnan yläpuolella. Lammen virtaukset ovat hyvin pieniä ja on oletettavaa, että niillä ei ole sanottavampaa vaikutusta lammen lämpötaseeseen.

Mittauksien tarkoituksena oli saada tietoa siitä, miten auringonsäteily vaikuttaa tällaiseen vesistöön. Suomessa on tehty muitakin vastaavia tutkimuksia, joissa kuitenkin näytteenotto väli on ollut harvempi. Tavallisesti 2 krt tunnissa läpi vuoden. Tässä tutkimuksessa näytteenotto väli oli 12 krt tunnissa läpi kesän.



Kuva 24 Päivien 28.5.2024 ja 30.8.2024 lämpötilan kehitys

Kuva 4 antaa vihjeitä siitä, mitä tuloksilta voisi odottaa. Karkeasti voidaan sanoa, että auringon spektrin tehosta hiukan yli 50% tulee UV ja näkyvän valon alueelta ja hiukan alle 50% IR-alueelta, jos VIS ja IR alueiden rajana pidetään 700 nm. Käytännössä siis 50% absorptio alueen raja asettuu noin 10 cm syvyydelle veteen. Mikrometrien syvyydelle absorptioituu noin 20%. Jos ja kun näin on, auringon tehosta absorptioituu iso osa mikrometrien syvyyteen, johon energiaa per tilavuus tulee suuri määrä. Syvemmälle menee toki enemmän, mutta tilavuutta kohti huomattavasti vähemmän.

Kesän 2024 kokeissa ensimmäinen anturi oli noin 0,1 m syvyydessä, ja näemme, että sen huippuarvo päivittäin tulee useita tunteja myöhemmin kuin lämpötilahuippu kohon päällä, joten jo 0,1 m syvyydessä on aikavakio ja näin jatkuu aina 0,4 m syvyyteen ja joskus 0,7 m syvyyteen, mutta ei aina enää sillä syvyydellä. Metriä syvemmällä lämpötila ei noudata enää vuorokausirytmä, mutta kylläkin kesän mittaan nousevaa trendiä.

Joitakin vuosia aiemmin tehdystä kokeesta (kuva 25), jossa anturit olivat 0,005 m ... 0,4 m syvyydellä vesisaavissa, nähdään, että aivan veden pinnan lämpeneminen seuraa suoraa auringon säteilyä, mutta jo 0,05 m syvyydellä on aikavakio suoraan auringon säteilyyn nähden. Järveen tai lampeen on mahdotonta rakentaa mittauslaitteisto, joka

kykenisi seuraamaan vedenpintaa vaikkapa 0,005 m syvyydellä, koska suurempi allas ei ole oikein koskaan täysin tyyni.

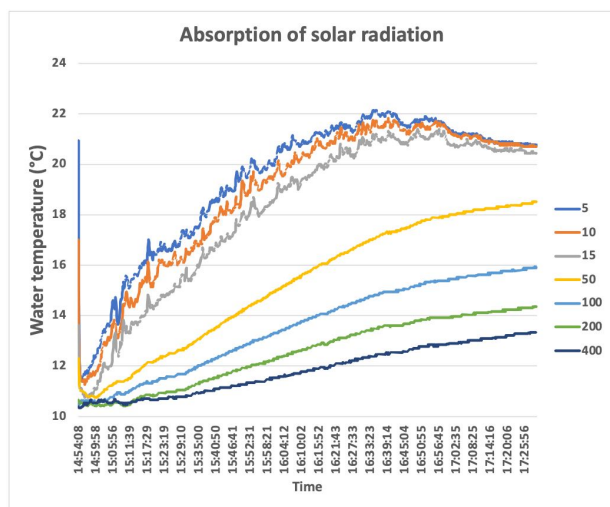
Vaikka vesi lämpiää noin puoleen metriin asti auringon säteilyn ja vuorokausikierron rytmissä, niin sitä syvemmällä näemme trendinomaisen lämpötilan nousun Kinnaslammessa aina 5 metriin asti. 7 ja 9 metrin syvyydessä vesi säilyy jotakuinkin muuttumattomassa lämpötilassa läpi kesän.

Metristä viiteen metriin näemme mittausaineistossa kohinaa, joka oli ainakin meille yllätys. Olemme koittaneet löytää tälle kohinalle syytä ja selitystä, mutta kirjallisuus ei tarjoa mitään järkevää syytä sille. Tiedämme että tämän tapaista kohinaa esiintyy kaikissa pienissä järvissä mitatuissa aineistoissa, mutta tämä aineisto tuo sen paremmin esille 5 min välein tapahtuvan lämpötilan mittauksen takia.

Kohinan huiput toistuvat keskimäärin ehkäpä noin tunnein välein, mutta huiput voivat olla puolesta tunnista pariin tuntiin. Jos näistä laskettaisiin aallonpituus, tultaisiin kymmenien tai satojen kilometrien aallonpituuteen. Tällaisia aallon pituuksia liittyy vaikkapa tsunamihin, gravitaatio- tai muihin kosmisiin aaltoihin.

Lammen lämpötilan kohina on aineistossa paikoitellen 4°C luokkaa mutta tavallisemmin 1-2°C luokkaa ja se jatkuu läpi kesän. Se ei ole

mitenkään säännöllisen näköistä vaan hyvin satunnaista vaihtelua. Keräsimme läheisiltä mittausasemilta ilmakehän IR säteilytietoja ja gammasäteily tietoja, mutta millään näillä ei näyttäisi olevan yhteyttä kohinaan.



Kuva 25 Saavikoe, jossa lämpötilan syvyyskäyrät ovat millimetrejä⁹

Kohinan lisäksi 1-5 metriin näkyy lämpötilatason kohtuullisen suuria muutoksia, jotka liittyvät voimakkaisiin sateisiin. Näyttäisi käyvän niin, että kun sateen lämpötila poikkeaa voimakkaasti pintaveden lämpötilasta, on sillä taipumus painua veteen lämpötilansa mukaiselle syvyydelle. Näin tapahtuu joitakin kertoja kesässä ja etenkin syksyllä. Kuitenkin vain osa sateista on niin kylmiä, että ne vajoavat syvälle veteen.

Lammen veden lämpötilan kohinan syytä useiden metrien syvyydessä emme tiedä, eikä se selvinnyt tässä kokeessa. Osa säteilystä menee hyvinkin syvälle veteen, mutta emme tiedä syytä miksi se vaihtelisi voimakkaasti. Jo pelkästään vesisateesta tiedämme, että kylmää vettä voi vajota syvemmälle. Molekyylit tasolla veden höyrystyessä tai haihtuessa, osa vesimolekyyleistä antaa fotoneja höyrystyville tai haihtuville molekyyleille, jolloin luovuttavien molekyyliden lämpötila laskee ja ne tulevat tiheimmiksi ja oletettavasti vajoavat vedessä. Molekyyliden törmäilyä kautta lämpö johtuu jonkin verran, mutta veden kerrostuminen lämpötilan mukaan estää tehokkaasti lämmön valumisen alaspäin veteen. On myös luultavasti mahdollista, että kun tuuli työntää vesimassoja ja aallokkoa, niin paluuvirtaus jossakin veden pinnan alla voi aiheuttaa lämpötilan muutoksia. Myös veden klusterit voisivat olla taustasta syynä lämpötilan kohinaan.

Kun veden lämpötilaa mitataan näin, jää pohtimaan mikä on järven lämpötila, sillä hellepäivinä järven tai lammen pinta vesi voi olla lähellä 30 astetta, mutta jo metrissä se on huomattavasti viileämpää puhumattakaan 2 metrissä, jossa lämpötila ero on vähintään 10°C ja usein enemmän.

Tällainen mittaamamme lämpötilaprofiili tulee pieniin latvavesiin, joissa on pienet veden virtaukset. Suuret vesistöt, joihin laskee suuria jokia ja joiden laskujokien virtaamat ovat suuria, ovat lämpötilan profiililtaan erilaisia.

Kokeet, jossa testasimme anturien tarkkuutta tuo esiin mielenkiintoisia asioita. Kokeissa antureiden tarkkuutta testattiin siten, että laskettiin yksittäisen anturin mittausarvon ero 12 anturin keskiarvoon. Meille tarjoutui myös mahdollisuus testata antureita Faradayn häkissä, joka ei ole kovinkaan tavallista.

Faradayn häkissä yksittäisen anturin tarkkuus oli alle $\pm 0,02^\circ\text{C}$ luokkaa ja kahdentoista anturin mitta-arvot olivat $\pm 0,06^\circ\text{C}$ sisällä tehdastoimituksen jäljiltä. Anturien ohjelmisto sallisi anturien tarkemman kalibroinnin, mutta teimme Faradayn häkin kokeen vasta järvikokeen jälkeen, joten kalibroitua ei testattu.

Kuvasta 18 havaitaan mielenkiintoinen ilmiö. Olosuhteet, joissa on läsnä paljon sähkömagneettisen säteilyn vaihtelua (auringon paisteen tai vaikkapa kirkkaan talvi taivaan fotonien säteily), niin yksittäisten

anturien kohina kasvaa jonkin verran, mutta anturien väliset erot kasvavat sitäkin enemmän. Vaikuttaisi siis siltä, että yksittäiset anturit ovat eri tavoin herkkiä fotoneille, joka kasvattaa anturien välisiä eroja voimakkaissa säteilyolosuhteissa.

Sama ilmiö, jossa anturien väliset erot kasvavat, näkyy myös mitattaessa ilmassa. Näin ollen voimme arvioida, että anturien luvut tarkkuudet koskevat vain optimiolosuhteita. Käytännössä ilman lämpötilaa mitattaessa kapallisilla antureilla ei päästä juurikaan puolta astetta tarkempiin tuloksiin, jos siihenkään. Tämä käy esille myös VMO kokeissa (kuvat 1 ja 2).

Keskustelua

Tutkimuksen lähtökohtana ja motiivina oli selvittää, miten pieni järvi tai lampi lämpiää kesän kuluessa. Edellä oleva grafiikka kertoo sen yhden kesän osalta ja tulokset eivät yllättäneet, sillä vastaavia tutkimuksia on tehty aiemminkin. Veden tiedetään kerrostuvan voimakkaasti lämpötilan mukaan, koska vesi on tiheimmillään kuvan 3 mukaisesti, mutta sitä, mitä vedessä oikeasti tapahtuu molekyyli- tai klusteritasolla, ei olekaan niin selvää. Esimerkiksi kun vesi höyrystyy pinnaltaan, emme tiedä tarkasti, mitä vedessä tapahtuu ja miten molekyylit liikkuvat, kun energiaa siirtyy molekyyliltä toisille.

Tässä mittauksessa näkyy mielenkiintoisesti, että pintalämpötilaa kylmempi sade painuu syvälle veteen, mutta luultavasti vedessä tapahtuu paljon muitakin pystysuuntaista liikettä ja jatkuva auringon ja yleisemmin ilmakehän lämpösäteily pitää yllä sellaista energiaa tuottoa aivan veden pintaa, että veden kerrostuminen säilyy, kunnes syksyllä lämpösäteilyä ei ole riittävästi kerrostumisen ylläpitoon ja kun haihtuminen ja höyrystyminen syö lammen energiaa, niin se jäähtyy, kunnes se tekee täyskierron syksyllä.

Suuri yllätys kokeessa oli selkeästi ilmenevä kohina, jollaiseen ei ole reagoitu muissa tapaamissamme mittauksissa ja jolle ei oikein tuntuisi löytyvät selitykset. Olemme pohtineet kaikenlaista lähtien kalojen liikkeistä tai lähteistä lammen pohjassa. Kaiken kaikkiaan kohina ei liity mitenkään vuorokauden kiertoon, eikä näin ollen auringon tai ilmakehän lämpösäteilyyn. Se ei liity myöskään gammasäteilyyn, jonka tehokaan ei voisi aikaansaada kyseistä ilmiötä.

On hämmentävää, että syvällä vedessä tapahtuu useiden asteiden lämpötilan vaihtelua puolen - kahden tunnin jaksoissa. Joskus aikoinaan 1800 luvulla kasvitieteilijä Robert Brown huomasi siitepölyhiukkasten liikuvan vedessä. Ilmiön syytä ei kuitenkaan ymmärretty ennen kuin Albert Einstein selitti sen vuonna 1905 fotonien avulla. Mielenkiintoista asiassa oli se, että Brownin havainto antoi ensimmäiset merkit molekyyliden olemassaolosta. Brownin liike on kuitenkin hyvin pientä.

Vaikka emme tiedä, mikä saa veden lämpötilan tällä tavoin kohisemaan, voi kuitenkin esittää arvauksen, että fotonien tanssi on varmaankin tämänkin takana, mutta mekanismi ei ole meille selvinnyt.

Tutkijat:

DI Antti Järvenpää; Konepajatalouden ja koneensuunnittelun DI Teknillisestä korkeakoulusta Otaniemestä. Yrittäjä ja liikkeenjohdon konsultti 1990-2017, eläkeläinen, lämpötilojen empiiristä tutkimista vuodesta 2018 alkaen. Tämän tutkimuksen datan käsittely ja raportointi.

FM Pertti Niemi, fyysikko Jyväskylän yliopistosta. Yrittäjänä 1993-2016 konenäköön pohjautuvien mittaus- ja tarkastusjärjestelmien kehittäjänä ja kaupallistajana. 2016-2020 teollisuuden kappalevara-automaatio- ja mm. koskettavien lämpötilamittausten kehitystehtävissä. Eläköitynyt. Tämän tutkimuksen käytännön mittausjärjestelyt, laitteiden rakentaminen ja raportointi.

Tutkijoiden riippumattomuus:

Tutkimus on tehty tutkijoiden henkilökohtaisella rahoituksella, eikä mikään organisaatio tai yritys ole tukenut tutkimusta. Tutkimuksessa käytetyt anturit maksoivat 526,80 euroa. Tutkijat eivät ole saaneet työpanoksestaan mitään palkkaa tai palkkiota.

⁹ Antti Järvenpää; Eräs kertomus kasvihuonekaasuista; 2021; sivustolla <http://antti.jarvenpaa.fidisk.fi/Ilmastonmuutos/index.html>;