



Rahma Nur

Vesistöjen kerrostumien fysikaalis-kemiallisten ominaisuuksien mittaaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

15.5.2025

Tiivistelmä

Tekijä(t):	Rahma Nur
Otsikko:	Vesistöjen kerrostumien fysikaalis-kemiallisten ominaisuuksien mittaaminen
Sivumäärä:	28 sivua
Aika:	16.5.2025
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto:	Ympäristötekniikka
Ohjaaja(t):	Lehtori Tomi Hämäläinen Lehtori Kari Salmi

Tämä opinnäytetyö keskittyy vesistöjen fysikaalis-kemiallisten ominaisuuksien mittaamiseen, erityisesti lämpötilan, suolapitoisuuden (saliniteetin) ja happipitoisuuden osalta. Nämä muuttujat ovat keskeisiä vesiekosysteemien toiminnan ja vedenlaadun kannalta. Työn tavoitteena oli arvioida erilaisten mittausmenetelmien ja laitteiden tarkkuutta, käytettävyyttä ja kustannuksia sekä kehittää itse rakennettu, termopareihin perustuva lämpötilamittausjärjestelmä.

Kirjallisuuskatsauksessa käsiteltiin veden kerrostuneisuuden dynamiikkaa, happikadon vaikutuksia ja saliniteetin ekologista merkitystä. Mittauslaitteiden osalta työssä vertailtiin erityisesti YSI-sarjan kenttälaitteita ja jatkuvatoimisia mittausratkaisuja. Käytännön osuudessa suunniteltiin ja arvioitiin Arduino-pohjainen järjestelmä lämpötilan mittaamiseen T-tyyppin termopareilla. Järjestelmä osoittautui edulliseksi ja monipuoliseksi vaihtoehdoksi, vaikka se vaatii teknistä osaamista ja kotelointia kenttäkäyttöä varten.

Työn johtopäätöksenä esitetään, että kaupalliset mittalaitteet tarjoavat tarkkuutta ja käyttövalmiutta, mutta niiden korkea hinta rajoittaa käyttöä erityisesti pienemmissä tutkimusprojekteissa. Itse rakennettu järjestelmä mahdollistaa kustannustehokkaan ja muokattavan ratkaisun vesistöjen seurannan tarpeisiin.

Avainsanat: saliniteetti, lämpötilakerrostuneisuus, mittausmenetelmät, termoparit

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author(s): Rahma Nur
Title: Measurement of Physicochemical Properties in Stratified Water Systems
Number of Pages: 28 pages
Date: 16 May 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and Environmental Technology
Specialisation option: Environmental Technology
Instructor(s): Tomi Hämäläinen, Senior Lecturer
Kari Salmi, Senior Lecturer

This thesis focuses on measuring the physicochemical properties of aquatic environments, particularly temperature, salinity, and dissolved oxygen concentration. These variables are essential for understanding the functioning of aquatic ecosystems and for assessing water quality. The aim of the thesis was to evaluate the accuracy, usability, and cost of various measurement methods and instruments, as well as to develop a custom-built temperature measurement system based on thermocouples.

The literature review covers the dynamics of thermal stratification, the effects of oxygen depletion, and the ecological significance of salinity. In addition, it compares YSI field instruments and continuous monitoring systems. In the practical part, an Arduino-based system was designed and evaluated for measuring temperature using Type T thermocouples. The system proved to be a cost-effective and versatile alternative, although it requires technical knowledge and an appropriate enclosure for field use.

The thesis concludes that commercial measurement devices offer high accuracy and readiness for use but their high cost can limit accessibility, especially in smaller research projects. The custom-built system provides a cost-efficient and adaptable solution for water monitoring applications.

Keywords: salinity, thermal stratification, measurement methods, thermocouples

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Veden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet	2
2.1	Fysikaaliset ominaisuudet	2
2.2	Kemialliset ominaisuudet	3
3	Lämpötila	3
3.1	Talvinen lämpötilakerrostuneisuus	4
3.2	Kevättalvi ja kevätkierto	4
3.3	Kesäinen lämpötilakerrostuneisuus	4
3.4	Syyskierto ja lämpötilan tasoittuminen	4
3.5	Lämpötilan vaikutus vesistöjen tilaan ja seurannan merkitys	5
4	Saliniteetti	5
4.1	Happipitoisuuden vaikutus vesistöihin	6
4.2	Hapen lähteet ja kulutus vesistöissä	7
4.3	Happikadon seuraukset	7
4.4	Happitilanteen hallinta ja parantaminen	8
5	Mittausten suunnittelu ja toteutus	8
5.1	Mittausten tavoitteet ja suunnittelu	8
5.2	Materiaalivalinnat vesitutkimuslaitteissa	9
5.3	Mittauksen toteutus	10
5.4	Mittausdatan analysointi ja tulosten tulkinta	10
6	Mittausmenetelmät ja laitteet	11
7	Lämpötilan mittaamisen haasteet	11
7.1	Digitaaliset lämpömittarit	12
7.2	Kalibrointi ja mittaustarkkuus	12
7.3	Jatkuvatoimiset lämpömittausmenetelmät	13
7.4	YSI EXO2 -moniparametritutkimuslaite ja kustannusarvio	13
7.5	Syvyyksien lämpötilan mittaaminen	14
7.6	YSI CastAway CTD -sondi ja kustannusarvio	14
8	Saliniteetin mittausmenetelmät ja laitteet	15

8.1	Sähköjohtavuusmittarit	16
8.2	YSI Pro30 ja kustannukset	17
9	Happipitoisuuden mittausmenetelmät ja laitteet	18
9.1	Optiset ja sähkökemialliset happimittarit	18
9.2	Happimittareiden kustannusarvio	18
10	Lämpötilan mittaaminen termoparilla	20
10.1	Termoparin toimintaperiaate ja Seebeckin ilmiö	20
10.2	Termoparityypit ja niiden ominaisuudet	21
10.3	T-typin termopari vesistömittauksissa	22
11	Johdon pituuden valinta	23
11.1	Termoparijohdon resistanssi vaikutus mittaustarkkuuteen	23
11.2	Termoparin vajoaminen vesistömittauksissa	24
12	Laboratorihankintaehdotus termoparimittausjärjestelmälle	25
13	Yhteenveto	27
	Lähteet	29

1 Johdanto

Vesistöjen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet vaikuttavat suoraan veden laatuun ja eliöstön hyvinvointiin. Saliniteetti, happipitoisuus ja lämpötila ovat keskeisiä muuttujia, joiden seuranta antaa tärkeää tietoa vesiekosysteemien tilasta. Nämä kolme tekijää on valittu tutkimuskohteiksi, koska ne vaikuttavat monin tavoin vesistöjen toimintaan: lämpötila säätelee lajien elinvoimaisuutta ja biologisia prosesseja, happipitoisuus määrittää veden kyvyn ylläpitää elämää, ja saliniteetti vaikuttaa veden tiheyteen, kerrostuneisuuteen sekä eliöiden osmoottiseen tasapainoon.

Näiden muuttujien tarkkailu on erityisen tärkeää rehevöitymisen arvioinnissa, vedenlaadun pitkäaikaisessa seurannassa sekä kalastusolosuhteiden ymmärtämisessä ja kehittämisessä. Työ alkaa kirjallisuuskatsauksella, jossa perehdytään veden fysikaalis-kemiallisiin ominaisuuksiin ja niiden vaikutuksiin. Tämän jälkeen esitellään nykyisin käytössä olevia mittausmenetelmiä ja laitteita eri vesikerrostumien tutkimiseen sekä arvioidaan niiden tarkkuutta ja kustannustehokkuutta. Lisäksi työssä kehitetään edullinen ja riittävän tarkka lämpötilan mittausratkaisu itse rakennetulla laitteistolla, jossa hyödynnetään termoparitekniikkaa.

Tässä opinnäytetyössä pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin.

- Mitkä ovat tarkimmat menetelmät veden saliniteetin, happipitoisuuden ja lämpötilan mittaamiseen?
- Miten voidaan toteuttaa edullinen ja riittävän tarkka lämpötilan mittausjärjestelmä itse suunnitellulla laitteistolla?

Lopuksi arvioidaan sekä kaupallisten mittausmenetelmien että itse rakennetun termoparipohjaisen järjestelmän soveltuvuutta vedenlaadun seurantaan. Tulosten perusteella pohditaan, kuinka mittaustekniikoita voidaan hyödyntää vesistöjen tilan arvioinnissa, veden laadun parantamisessa ja kalastuksen tukemisessa.

Tekoälyä on hyödynnetty opinnäytetyön suunnittelussa, rakenteen jäsentelyssä ja otsikoinnissa. Työssä on käytetty OpenAI:n ChatGPT-versiota 3.5. Lisäksi samaa ohjelmaa on käytetty tekstin kieliasun viimeistelyyn. Opinnäytetyön tekijä on vastuussa kaikesta opinnäytetyön sisällöstä ja muotoilusta.

2 Veden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet

Veden fysikaaliset ominaisuudet, kuten lämpötila, tiheys ja virtaus, vaikuttavat veden liikkeisiin ja määrittävät aineiden, kuten hapen ja ravinteiden, kulkeutumisen vesistöissä. Näiden tekijöiden muutokset säätelevät veden kerrostuneisuutta ja sekoittumista, mikä voi joko edistää tai estää biologisten ja kemiallisten prosessien toimintaa. [1, s. 121.] Kemialliset ominaisuudet, kuten suolapitoisuus, happipitoisuus ja ravinnepitoisuudet, määrittävät veden laadulliset ominaisuudet sekä sen kyvyn ylläpitää biologista tuotantoa ja ylläpitää ekologista tasapainoa. [2.]

2.1 Fysikaaliset ominaisuudet

Lämpötila vaikuttaa veden kerrostuneisuuteen ja hapen jakautumiseen eri syvyyksiin. Esimerkiksi kesällä lämmin pintavesi estää veden sekoittumista ja rajoittaa hapen kulkeutumista syvempiin vesikerroksiin, mikä voi johtaa hapen vähenemiseen eli happikatoon. Lisäksi lämpötila määrittää veden tiheyden. Lämmin vesi on kevyempää kuin kylmä, mikä ylläpitää kerrostuneisuutta. Suolapitoisuus ja lämpötila vaikuttavat yhdessä veden tiheyteen, mikä puolestaan ohjaa virtausten syntyä vesistöissä. Virtaukset levittävät happea ja ravinteita, mutta voivat myös kuljettaa epäpuhtauksia ja sedimenttejä. Äkilliset lämpötilan muutokset voivat olla haitallisia vesieläöille. Esimerkiksi kalojen lisääntyminen ja ravinnonhankinta voivat häiriintyä, jos lämpötila muuttuu liian nopeasti [3.].

2.2 Kemialliset ominaisuudet

Happipitoisuus on yksi tärkeimmistä vesistön elinkelpoisuuteen vaikuttavista tekijöistä. Riittämätön hapen määrä voi aiheuttaa happikadon, mikä vaarantaa erityisesti kalojen ja muiden aerobisesta hengityksestä riippuvaisten eliöiden selviytymisen. Veden pH-arvo vaikuttaa puolestaan kemiallisiin reaktioihin sekä eliöiden elinmahdollisuuksiin. [2.]

Ravinteet, kuten typpi ja fosfori, ovat elintärkeitä planktonin ja levien kasvulle. Liiallinen ravinnekuormitus johtaa kuitenkin rehevöitymiseen, mikä voi aiheuttaa esimerkiksi leväkukintoja. Ne vähentävät valon pääsyä syvempiin vesikerroksiin ja kuluttavat suuria määriä happea hajotessaan, mikä edelleen pahentaa happikatoa. [2.]

Ravinnekuormitus johtuu pääasiassa ihmistoiminnasta, kuten maatalouden lannoitekäytöstä, jätevesien päästöistä, haja-asutuksesta sekä metsätaloudesta. Näissä tilanteissa ravinteita, erityisesti typpeä ja fosforia, kulkeutuu vesistöihin sadevesien ja valumien mukana. Tämä kiihdyttää rehevöitymisprosessia ja heikentää vesiekosysteemin tasapainoa. [2.]

3 Lämpötila

Veden lämpötila on yksi tärkeimmistä mittauskohteista vesistöjen seurannassa, ja se mitataan yleensä vesinäytteiden oton yhteydessä. Lämpötilamittauksilla on useita käyttötarkoituksia, kuten happikyllästysasteen laskeminen, sillä veden lämpötila vaikuttaa siihen, kuinka paljon happea vesi pystyy sitomaan. Lisäksi lämpötila on tärkeä tekijä vesistöjen kerrostuneisuuden ja happitalouden arvioinnissa. [4.]

3.1 Talvinen lämpötilakerrostuneisuus

Talvella järvet jäätyvät, ja veden lämpötilakerrostuneisuus on käänteinen. Talvella pintavesi on kylmempää kuin pohjavesi, koska vesi on raskainta lämpötilassa +4 °C. Tämä tarkoittaa, että järven pohjalle jää suhteellisen lämmin ja vaakaana pysyvä vesikerros, kun taas pinnalla jääpeite eristää vesistön ja estää lämpötilan vaihtelua. [4.]

3.2 Kevättalvi ja kevätkierto

Kevään koittaessa ja jään sulaessa aurinko lämmittää pintavettä, mikä vähitellen tasoittaa lämpötilaeroja vesistössä. Kun pintavesi saavuttaa alusveden lämpötilan, tuulet alkavat sekoittaa koko vesimassaa, jolloin tapahtuu kevätkierto. Tämä prosessi mahdollistaa hapen kulkeutumisen syvempiin kerroksiin, mikä on tärkeää, jos talven aikana alusveteen on muodostunut happivajetta. [4.]

3.3 Kesäinen lämpötilakerrostuneisuus

Kesällä järvien lämpötilakerrostuneisuus on selvemmin havaittavissa. Lämpimin pintavesi (15–20 °C) erottuu kylmemmästä alusvedestä (5–10 °C). Näiden kahden vesikerroksen välissä on termokliini, jossa lämpötila muuttuu jyrkästi lyhyellä syvyysvälillä. Tämä estää hapen ja ravinteiden liikkumista syvempiin kerroksiin, mikä voi johtaa hapen vähentymiseen pohjavesissä. [4.]

Happipitoisuuden väheneminen kesäaikana riippuu järven rehevyydestä ja muista fysikaalisista ominaisuuksista, kuten järven syvyydestä, muodosta ja syvänteiden koosta. Syvät ja suuret järvet voivat ylläpitää lämpötilakerrostuneisuutta pidempään, mikä voi pahentaa happikatoa. [4.]

3.4 Syyskierto ja lämpötilan tasoittuminen

Kesäkerrostuneisuus päättyy, kun pintavesi alkaa syksyllä jäähtyä. Kun pintaveden ja alusveden lämpötilaerot pienenevät, tuulet alkavat sekoittaa vesimassaa,

ja syyskierto käynnistyy. Tämä prosessi tapahtuu yleensä elokuun lopusta syyskuun loppuun, mutta suuremmissa järvissä se voi tapahtua myöhemmin. Syyskierto on usein tehokkaampi kuin kevätkierto, sillä se kestää pidempään ja voi sekoittaa vesimassaa syvemmin. [4.]

3.5 Lämpötilan vaikutus vesistöjen tilaan ja seurannan merkitys

Veden lämpötilan seuranta on tärkeää vesistöjen tilan arvioinnissa, sillä se vaikuttaa hapen liukoisuuteen, eliöiden aineenvaihduntaan ja ravinteiden liikkumiseen. Lämpötilan vaihtelut voivat johtaa esimerkiksi happikatoon, rehevöitymiseen ja leväkukintoihin, jotka heikentävät vesiekosysteemin tasapainoa. [5, s. 22.]

Lämpötilan jatkuvatoiminen seuranta auttaa tunnistamaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia sekä vesistöjen pitkän aikavälin kehitystä. Se antaa myös tietoa järvien ja jokien tilasta, jonka perusteella voidaan tehdä päätöksiä vedenlaadun parantamiseksi ja rehevöitymisen torjumiseksi. [5, s. 22.]

4 Saliniteetti

Saliniteetti eli veden suolapitoisuus kuvaa vedessä olevien liuenneiden suolojen määrää. Suolapitoisuus viittaa liuenneiden suolojen, kuten natriumkloridin (NaCl), magnesiumsulfaatin ($MgSO_4$) ja kaliumkloridin (KCl), konsentraatioon vedessä. Suolapitoisuus vaihtelee eri vesistöissä: makeassa vedessä suolaa on hyvin vähän, ja merivedessä sitä on paljon enemmän. Taulukko 1 käsittelee, mitä suolapitoisuus on, mistä se johtuu, miten sitä mitataan ja miten se vaikuttaa ympäristöön ja eliöihin. [6.]

Taulukko 1. Eri vesityyppien suolapitoisuudet prosentteina (%) ja promilleina (ppt) [6].

Vesi	Suolapitoisuus (%)	Suolapitoisuus (ppt)
Merivesi (valtameret)	3,50 %	35 ppt
Merivesi (Itämeri)	0,3–0,7 %	3–7 ppt
Makea vesi	0 %	0 ppt

Suolapitoisuus ilmaistaan yleensä promilleina (‰) tai osuuksina tuhannessa (ppt, *parts per thousand*). Tämä tarkoittaa, kuinka monta grammaa suolaa on liuenneena yhteen litraan vettä. Esimerkiksi meriveden suolapitoisuus on keskimäärin noin 35 ‰, eli litrassa merivettä on noin 35 grammaa suoloja. Tämä korkea suolapitoisuus johtuu liuenneiden mineraalien, kuten natriumkloridin (NaCl), magnesiumin, kalsiumin ja muiden ionien runsaasta määrästä merivedessä. Makean veden suolapitoisuus sen sijaan on huomattavasti alhaisempi, yleensä alle 0,5 ‰, mikä tekee makeasta vedestä vähemmän johtavan ja täysin erilaisen ekosysteemien elinympäristön. Itämeren suolapitoisuus on huomattavasti alhaisempi kuin valtamerten, vaihdellen alueittain 0–10 ‰. Pohjanlahdella ja Suomenlahdella suolapitoisuus on lähes makean veden tasolla, noin 0–3 ‰, kun taas eteläisillä alueilla, kuten Bornholmin altaalla, se voi nousta 7–10 ‰:iin. Tämä alhainen suolapitoisuus johtuu jokien tuomasta makean veden suuresta määrästä sekä vähäisestä veden vaihtuvuudesta Atlantin kanssa. [6.]

4.1 Happipitoisuuden vaikutus vesistöihin

Happipitoisuus on tärkeää vesieliöille, kuten kaloille, selkärangattomille ja mikro-organismeille, jotka tarvitsevat sitä hengitykseen ja aineenvaihduntaansa. Happipitoisuus vaihtelee luonnollisesti vesistöissä ja riippuu useista tekijöistä, kuten lämpötilasta, virtausolosuhteista, fotosynteesistä ja orgaanisen aineksen hajoamisesta. [7.]

Kylmä vesi pystyy sitomaan enemmän happea kuin lämmin vesi, mikä tarkoittaa, että happipitoisuus on yleensä korkeampi talvella ja matalampi kesällä.

Lämpimissä vesissä hapen liukoisuus laskee, mikä voi johtaa happivajeeseen etenkin syvissä ja kerrostuneissa vesistöissä. Tämä voi aiheuttaa ongelmia kaloille ja muille vesieliöille, jotka ovat riippuvaisia riittävästä happimäärästä selviytyäkseen. [7.]

4.2 Hapen lähteet ja kulutus vesistöissä

Vesistöjen happitasapaino määräytyy hapen tuotannon ja kulutuksen mukaan. Pääasialliset hapen lähteet ovat fotosynteesi, jossa vesikasvit ja levät tuottavat happea auringonvalon avulla. Tuulet ja virtaavat vedet sekoittuvat tehokkaammin, jolloin veteen liukenee enemmän happea. [7.]

Hapen kulutus tapahtuu eliöiden hengityksen ja orgaanisen aineksen hajoamisen seurauksena. Rehevöityneissä vesissä liiallinen levien ja planktonin kasvu voi johtaa hapen nopeaan kulutukseen, kun kuollut biomassa vajoaa pohjaan ja sen hajoaminen kuluttaa happea. Tämä voi johtaa happikatoon, joka on erityisen ongelmallinen syvissä järvissä ja merialueilla, joissa veden sekoittuminen on vähäistä. [7.]

4.3 Happikadon seuraukset

Jos happipitoisuus laskee alle 5 mg/l, monet kalalajit alkavat kärsiä hapenpuutteesta, ja alle 2 mg/l pitoisuuksissa monet vesieliöt eivät enää selviydy. Äärimäinen hapenpuute voi aiheuttaa laajoja kalakuolemia ja vaikuttaa koko vesiekosysteemin tasapainoon. Lisäksi happikato voi johtaa sisäiseen kuormitukseen, jossa pohjasedimenteistä vapautuu fosforia ja muita ravinteita takaisin veteen, mikä kiihdyttää rehevöitymistä entisestään. [7.]

Happikato voi myös muuttaa vesistön kemiallista tasapainoa. Kun happea ei ole riittävästi, hapettomat mikrobit alkavat hajottaa orgaanista ainesta, mikä voi johtaa haitallisten aineiden, kuten rikkivedyn, muodostumiseen. Tämä voi tehdä vedestä myrkyllistä ja entistä elinkelvottomampaa useille lajeille. [7.]

4.4 Happitilanteen hallinta ja parantaminen

Kun happipitoisuuden seurannassa havaitaan ongelmia, vesistöjen tilaa voidaan parantaa erilaisilla toimenpiteillä. Hapetuspumput ja diffuusorijärjestelmät voivat lisätä syvien vesikerrosten happipitoisuutta ja estää happikadon haittavaikutuksia. Tämä menetelmä on erityisen hyödyllinen järvissä, joissa syvänteiden happitilanne heikkenee kesän aikana. [8.]

Vesistöjen happitilanteen parantamiseen voidaan vaikuttaa myös epäsuorasti vähentämällä rehevöitymistä, esimerkiksi rajoittamalla maatalouden ravinnepäästöjä ja vähentämällä orgaanisen aineksen kertymistä vesistöihin. Myös luonnonmukaisten kunnostustoimenpiteiden, kuten kosteikkojen ja suojavyojhykkeiden, avulla voidaan hidastaa rehevöitymisprosessia ja parantaa vesistön happitasapainoa pitkällä aikavälillä. [8.]

5 Mittausten suunnittelu ja toteutus

Veden mittaaminen edellyttää huolellista suunnittelua, jotta saadut tulokset ovat tarkkoja, luotettavia ja vertailukelpoisia. Mittausten suunnittelussa otetaan huomioon useita tekijöitä, kuten mittauspaikan valinta, käytettävät laitteet, mittausten aikaväli ja olosuhteet, joissa mittaukset suoritetaan. Hyvin suunniteltu mittausprosessi mahdollistaa veden laadun pitkäaikaisen seurannan sekä auttaa tunnistamaan ympäristössä tapahtuvia muutoksia. [9.]

5.1 Mittausten tavoitteet ja suunnittelu

Ensimmäinen vaihe mittausprosessissa on tavoitteiden määrittely. On tärkeää selvittää, mitä veden laatua kuvaavia muuttujia mitataan ja miksi. Mittauskohdeet voivat liittyä esimerkiksi vesistön lämpötilakerrostumien analysointiin, happipitoisuuden vaihteluihin, veden suolapitoisuuteen tai veden laadun yleiseen arviointiin. Tavoitteiden pohjalta valitaan sopivat mittausmenetelmät ja laitteet. [9.]

Seuraavaksi suunnitellaan mittauspaikat ja -ajankohdat. Mittauspaikkojen tulee olla sellaisia, että ne edustavat mahdollisimman hyvin tutkittavaa vesistöä. Järvissä ja merialueilla on tärkeää mitata veden ominaisuuksia eri syvyyksillä, koska lämpötila, happipitoisuus ja muut muuttujat voivat vaihdella huomattavasti vesipatsaassa. Ajankohdan valintaan vaikuttavat muun muassa vuodenaikojen vaihtelut ja tutkittavien ilmiöiden ajallinen dynamiikka. Esimerkiksi kevättalvella ja kesällä veden lämpötilakerrostumat eroavat merkittävästi, joten mittausten ajoitus vaikuttaa tulosten tulkintaan. [9.]

5.2 Materiaalivalinnat vesitutkimuslaitteissa

Materiaalivalinnat vaikuttavat suuresti vesistötutkimuslaitteiden kestävyys-, toimivuus- ja mittaustarkkuuteen. Eri vesistöympäristöt, kuten järvet ja meret, asettavat laitteille erilaisia vaatimuksia. Nämä erot on otettava huomioon jo suunnitteluvaiheessa, jotta laitteet toimivat luotettavasti kaikissa olosuhteissa.

Järvivedessä korroosion riski on yleensä pieni. Tämä johtuu veden alhaisesta suolapitoisuudesta ja vähäisestä elektrolyyttimäärästä. Tällöin voidaan käyttää edullisempia materiaaleja, kuten alumiiniseoksia, tietyntyyppisiä ruostumattomia teräksiä ja kestumuoveja. Usein lisäsuojauksia ei tarvita, ja materiaalit kestävät hyvin järviolosuhteissa. [10.]

Merivedessä tilanne on toisenlainen. Suolapitoisuus on korkea, mikä tekee vedestä voimakkaasti korroosoivan. Laitteet altistuvat myös suuremmalle mekaaniselle rasitukselle ja biologiselle likaantumiselle eli biofoulingille. Näistä syistä merivedessä suositetaan erikoismateriaaleja, kuten titaania, austeniittisiä ruostumattomia teräksiä. Nämä materiaalit kestävät hyvin sekä suolaa että biologista kasvustoa. Oikein valitut materiaalit pidentävät laitteiden käyttöikää ja parantavat mittaustulosten luotettavuutta. [10.]

5.3 Mittauksen toteutus

Kun mittaukset toteutetaan, on tärkeää noudattaa ennalta suunniteltua mittausprosessia ja varmistaa mittausten luotettavuus. Ennen varsinaista mittausta laitteiden kalibrointi on välttämätöntä, jotta mittaustulokset ovat tarkkoja ja vertailukelpoisia. Esimerkiksi happimittarit ja sähkönjohtavuusmittarit vaativat säännöllistä kalibrointia, jotta ne toimivat luotettavasti eri ympäristöolosuhteissa. [10.]

Mittauksen aikana otetaan huomioon ympäristöolosuhteet, kuten veden virtaus, lämpötilan vaihtelut ja sääolosuhteet. Esimerkiksi sähkökemialliset happimittarit voivat antaa virheellisiä tuloksia matalavirtauksisissa vesissä, koska ne kuluttavat happea mittauksen aikana. Tällaisissa tilanteissa on varmistettava, että vesi sekoittuu riittävästi mittauspisteessä. [10.]

Mittauspaikoilta kerätyt tiedot kirjataan huolellisesti ja tallennetaan analysointia varten. Automaattiset mittalaitteet voivat siirtää tiedot langattomasti tietokoneelle tai pilvipalveluun, mikä helpottaa mittaustulosten seuranta ja analyysiä. [10.]

5.4 Mittausdatan analysointi ja tulosten tulkinta

Mittauksen jälkeen kerätty data analysoidaan, ja sen perusteella tehdään johtopäätöksiä veden laadusta ja mahdollisista muutoksista vesistössä. Tiedot voidaan esittää taulukkoina, graafeina tai karttapohjaisina visualisointeina, jotka helpottavat ilmiöiden hahmottamista. Esimerkiksi pitkäaikaisella lämpötilaseurannalla voidaan tunnistaa järven lämpötilakerrostuneisuuden muutokset, jotka voivat liittyä ilmastonmuutokseen tai rehevöitymiseen. [9.]

Tulosten perusteella voidaan myös arvioida vesistöön liittyviä riskejä, kuten happikadon syntymistä, leväkukintoja tai vedenlaadun heikkenemistä. Tämä auttaa viranomaisia ja tutkijoita tekemään päätöksiä vesistön suojelelun ja mahdollisten toimenpiteiden tarpeesta. [9.]

6 Mittausmenetelmät ja laitteet

Veden laadun mittauksia käytetään laajasti eri aloilla, kuten ympäristötutkimuksessa, vesistöjen seurannassa, kalataloudessa ja teollisuudessa. Ympäristötutkimuksessa veden fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia analysoidaan esimerkiksi ilmastonmuutoksen vaikutusten arvioimiseksi ja vesiekosysteemien toiminnan ymmärtämiseksi. Vesistöjen seuranta on tärkeää järvien, jokien ja merialueiden terveydentilan arvioimisessa sekä rehevöitymisen ja saasteiden leviämisen estämisessä. Kalastuksessa veden laatu vaikuttaa suoraan kalakantojen hyvinvointiin, ja säännöllinen seuranta auttaa ennakoimaan muutoksia kalojen lisääntymisessä ja kasvussa. Teollisuudessa veden laatu on ratkaisevassa roolissa esimerkiksi elintarviketuotannossa, kemianteollisuudessa ja voimalaitoksissa, joissa veden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet vaikuttavat tuotantoprosessien tehokkuuteen ja laitteiden kestävyYTEEN. [10.]

Mittausmenetelmät voidaan jakaa manuaalisiin ja jatkuvatoimisiin järjestelmiin. Manuaaliset mittaukset perustuvat näytteenottoon, jossa vesinäytteitä analysoidaan joko paikan päällä tai laboratoriossa tarkempia analyysyjä varten. Näitä menetelmiä käytetään erityisesti silloin, kun tarvitaan tarkkaa kemiallista analyysiä tai kun mittauspisteitä on harvassa. Jatkuvatoimiset mittausjärjestelmät, kuten automaattiset vedenlaatusensorit ja moniparametriasemat, mahdollistavat reaaliaikaisen seurannan ja tarjoavat jatkuvaa tietoa veden laadusta ilman tarvetta manuaaliselle näytteenotolle. Nämä menetelmät ovat hyödyllisiä, kun halutaan seurata vedenlaadun muutoksia pitkällä aikavälillä tai havaita nopeasti tapahtuvat ympäristömuutokset, kuten hapen väheneminen tai lämpötilan nousu. [10.]

7 Lämpötilan mittaamisen haasteet

Lämpötilan mittaamiseen liittyy useita haasteita, jotka on otettava huomioon tarkkojen ja luotettavien tulosten saavuttamiseksi. Yksi haasteista on lämpötilan

nopeat vaihtelut, joita voivat aiheuttaa auringon säteilyn vaikutus ja vesimassojen liikkeet. Mittauslaitteiden tulee olla riittävän herkkiä tallentamaan nämä muutokset reaaliajassa. Syvyys tuo myös omat haasteensa, sillä lämpötila voi vaihdella merkittävästi eri vesikerroksissa. Lämpötilan mittausmenetelmät voidaan jakaa kahteen pääryhmään: manuaalisiin mittareihin ja jatkuvatoimisiin mittalaitteisiin. [10.]

7.1 Digitaaliset lämpömittarit

Digitaaliset lämpömittarit ovat edullisia ja kehittyneempi ratkaisu veden lämpötilan mittaamiseen. Ne toimivat sähköisten antureiden avulla, jotka muuttavat lämpötilan numeeriseksi arvoksi ja esittävät sen näytöllä. Digitaaliset lämpömittarit ovat yleistyneet laajasti tutkimus- ja ympäristöseurannassa, koska ne tarjoavat tarkemman ja nopeamman mittauksen kuin analogiset lämpömittarit. [11.]

Digitaalisten lämpömittareiden tärkeimpiä etuja ovat:

- Tarkkuus ja nopeus: Useimmat digitaaliset lämpömittarit tarjoavat $\pm 0,1$ °C tarkkuuden ja näyttävät tuloksen sekunneissa.
- Helppokäyttöisyys: Laitteet ovat käyttäjäystävällisiä, ja tulokset näkyvät selkeästi digitaalinenäytöllä.
- Mahdollisuus tiedon tallentamiseen: Osa laitteista voi tallentaa mitaustulokset ja siirtää ne tietokoneelle jatkokäsittelyä varten.
- Kestävyys: Digitaaliset lämpömittarit ovat usein vesitiiviitä ja kestävät erilaisia ympäristöolosuhteita. [11.]

7.2 Kalibrointi ja mittaustarkkuus

Digitaalisten lämpömittareiden luotettava toiminta edellyttää säännöllistä kalibrointia. Kalibrointi suoritetaan tyypillisesti vertaamalla mittaria tunnettuun referenssilämpötilaan tai käyttämällä kalibrointiliuoksia. Ympäristömittauksissa käytettävät digitaaliset lämpömittarit tulisi kalibroida 6–12 kuukauden välein tai valmistajan ohjeiden mukaisesti. Kalibroinnissa noudatetaan usein kansallisia tai kansainvälisiä standardeja, kuten SFS-EN 13005 tai ISO/IEC 17025. [11.]

7.3 Jatkuvatoiniset lämpömittausmenetelmät

Jatkuvatoiniset mittarit ovat hyödyllisiä silloin, kun vedenlaadussa tapahtuu nopeita ja suuria muutoksia. Perinteinen vesinäytteenotto ei aina pysty tallentamaan lyhytaikaisia vaihteluita, koska näytteet otetaan tietyin aikaväleihin, mikä voi jättää tärkeää tietoa huomaamatta. Sen sijaan jatkuvatoiniset mittarit mahdollistavat reaaliaikaisen seurannan, jolloin veden laadun vaihteluihin voidaan reagoida nopeasti ja tarkasti. [12.]

Jatkuvatoinisten mittareiden etuna on myös mittaustyön automatisointi, mikä vähentää manuaalisen työn määrää ja mahdollistaa mittausten tekemisen vaikeapääsyisissä tai syrjäisissä kohteissa. Tietojen automaattinen tallennus ja siirto mahdollistavat myös hälytysrajojen asettamisen, jolloin poikkeuksellisiin tilanteisiin voidaan reagoida nopeasti. Esimerkiksi happipitoisuuden äkillinen lasku voi indikoida vesistössä tapahtuvaa häiriötä, joka vaatii välittömiä toimenpiteitä. [12.]

Jatkuvatoiniset mittarit vaativat säännöllistä kalibrointia ja huoltoa luotettavien tulosten varmistamiseksi. Antureiden likaantuminen, virtalähteiden toimintavarmuus ja datansiirron ongelmat voivat vaikuttaa mittausten luotettavuuteen. Lisäksi jatkuvatoiniset mittalaitteet ovat yleensä kalliimpia kuin perinteiset mittalaitteet, mutta pitkällä aikavälillä ne voivat tuottaa kustannussäästöjä vähentämällä manuaalisen näytteenoton ja laboratorioanalyysien tarvetta. [12.]

7.4 YSI EXO2 -moniparametritutkimuslaite ja kustannusarvio

Esimerkki jatkuvatoinisesta vedenlaadun mittauslaitteesta on kuvassa 1 YSI EXO2 -moniparametritutkimuslaite. Se voi mitata samanaikaisesti useita vedenlaatuun liittyviä muuttujia, kuten lämpötilaa, sameutta, sähkönjohtavuutta, pH:ta ja happipitoisuutta. Laite soveltuu pitkäaikaiseen seurantaan ja sen anturit tarjoavat tarkkoja mittaustuloksia eri ympäristöolosuhteissa. YSI EXO2:n hinta

vaihtelee 10 000–30 000 euron välillä riippuen varustelusta ja lisäantureista. Kyseinen mittalaite on tehokas ja tarkka. Kyseistä laitetta käytetään lähinnä tutkimuslaitoksissa ja viranomaisten seurantaohjelmissa. [13.]



Kuva 1. YSI EXO2 -moniparametritutkimuslaite [13].

7.5 Syvyyksien lämpötilan mittaaminen

Syvyyksien lämpötilaa mitataan erityisesti CTD-luotaimilla, jotka mittaavat samanaikaisesti lämpötilaa, sähkönjohtavuutta (suolapitoisuutta) ja syvyyttä. CTD-luotaimia käytetään erityisesti merentutkimuksessa ja syvien vesistöjen analysoinnissa, koska ne tarjoavat erittäin tarkkoja mittaustuloksia ja voivat mitata useita muuttujia samanaikaisesti. CTD-laitteet lasketaan veden alle kaapelin varassa, tai ne voivat olla itsenäisesti toimivia ja ohjelmoitu mittaamaan tietoja tietyllä aikavälillä. Mittausdata tallennetaan muistiin tai lähetetään reaaliaikaisesti, mikä mahdollistaa välittömät analyysit. [10.]

7.6 YSI CastAway CTD -sondi ja kustannusarvio

Kuvassa 2 on YSI CastAway CTD, kannettava ja erittäin tarkka vedenlaadun mittauslaite, joka on suunniteltu lämpötilan ja sähkönjohtavuuden mittaamiseen vesistöissä. Mittalaite käyttää CTD-tekniikkaa (Conductivity, Temperature, Depth) ja soveltuu monenlaisiin sovelluksiin, kuten hydrografisiin mittauksiin, vesistöjen kartoitukseen ja vedenlaadun seurantaan. [14.]

YSI CastAway CTD -sondi on vedenpitävä ja varustettu sisäänrakennetulla GPS-moduulilla, joka mahdollistaa sijaintitiedon tallentamisen mittausten yhteydessä. Mittaustulokset voidaan siirtää langattomasti tietokoneelle tai mobiililaitteelle analysointia varten. [14.]

YSI CastAway-CTD noudattaa kansainvälisiä vedenlaatumittausstandardeja, kuten ISO 5667-3, joka määrittää veden näytteenoton laatuvaatimukset, sekä PSS-78- ja UNESCO EOS-80 -standardeja, joita käytetään suolapitoisuuden ja veden tiheyden laskennassa. YSI CastAway-CTD hinta vaihtelee 6 000–8 500 euroa riippuen lisävarusteista ja takuupaketista. [14.]



Kuva 2. YSI CASTAWAY - CTD [14].

8 Saliniteetin mittausmenetelmät ja laitteet

Saliniteetin mittaamiseen käytetään useita menetelmiä, joista yleisimpiä ovat sähkönjohtavuusmittarit ja refraktometrit. Näitä laitteita käytetään sekä kenttämittauksissa että laboratoriotutkimuksissa, ja niiden tarkkuus ja toimintaperiaate vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. [10.]

8.1 Sähköjohtavuusmittarit

Sähkönjohtavuusmittarit ovat laitteita, joilla voidaan nopeasti ja luotettavasti määrittää veden kyky johtaa sähköä. Ne perustuvat siihen, että vedessä olevat liuenneet ionit mahdollistavat sähkövirran kulun. Mittari lähettää heikon sähkövirran kahden elektrodin välillä ja mittaa, kuinka hyvin sähkö kulkee veden läpi. Tämä mitattu arvo ilmoitetaan yleensä yksiköissä, kuten mikrosiemensseinä senttimetriä kohti ($\mu\text{S}/\text{cm}$) tai millisiemensseinä metriä kohti (mS/m). Koska lämpötila vaikuttaa sähkönjohtavuuteen, useimmat mittarit sisältävät lämpötilakompensoinnin, joka varmistaa tarkemmat mittaustulokset eri ympäristöissä. [15.]

Sähkönjohtavuusmittarit voidaan jakaa käyttötarkoituksen mukaan:

- Kenttämittarit ovat kevyitä ja kannettavia, ja ne soveltuvat ympäristötutkimuksiin, vesistöjen suolapitoisuuden mittaamiseen ja nopeisiin paikan päällä tehtäviin analyysiin.
- Jatkuvat toimiset kiinteät mittaussysteemit sijoitetaan pysyviin mittauspisteisiin, joissa ne voivat seurata veden sähkönjohtavuutta ja lähettää dataa reaaliajassa valvontajärjestelmiin.
- Laboratoriokäyttöön tarkoitettut mittarit ovat tarkkoja ja suunniteltu tieteellisiin analyysiin, ja ne tarjoavat useita kalibrointivaihtoehtoja sekä mahdollistavat mittaukset erilaisissa nesteissä. [15.]

Sähkönjohtavuusmittareita käytetään monilla eri aloilla. Vesistöjen seurannassa ne auttavat arvioimaan suolapitoisuuden vaihteluita järvissä, joissa ja rannikkoalueilla. Juomaveden käsittelyssä sähkönjohtavuusmittauksia käytetään veden laadun varmistamiseen ja epäpuhtauksien havaitsemiseen. Teollisuudessa, kuten voimalaitoksissa, elintarviketuotannossa ja kemianteollisuudessa, sähkönjohtavuuden mittaaminen on tärkeää tuotantoprosessien tehokkuuden ja laitteiden kestävyuden kannalta. Vesiviljelyssä sähkönjohtavuusmittauksilla seurataan kasvatavesien ravinnepitoisuuksia ja vedenlaatua, sillä suolapitoisuuden

muutokset voivat vaikuttaa eläinten ja kasvien kasvuun. Laboratorioissa sähkönjohtavuusmittauksia käytetään osana tarkkaa kemiallista analyysiä liuenneiden ionien pitoisuuksien tunnistamiseen. [15.]

8.2 YSI Pro30 ja kustannukset

Kuvassa 3 on YSI Pro30 on suunniteltu veden sähkönjohtavuuden, suolapitoisuuden ja lämpötilan mittaamiseen. YSI Pro30 täyttää useita vedenlaatumittauksessa käytettäviä kansainvälisiä standardeja, kuten ISO 7888 (veden sähkönjohtavuuden mittaaminen). Laitteessa on kalibrointitoiminto, jonka ansiosta se voidaan säätää nopeasti tarkkoja mittauksia varten. YSI Pro30:n hinta vaihtelee lisävarusteiden ja kaapelipituuden mukaan. Perusmallin hinta on noin 800–1 800 euroa. [16.]



Kuva 3. YSI Pro30 [16].

9 Happipitoisuuden mittaamenetelmät ja laitteet

Veden happipitoisuuden mittaamiseen on saatavilla useita erilaisia kenttämittareita, joita käytetään laajasti ympäristönäytteenotossa ja vesistöjen seurannassa. Kenttämittarit voivat perustua joko sähkökemialliseen tai optiseen mittaustekniikkaan. [17.]

9.1 Optiset ja sähkökemialliset happimittarit

Sähkökemialliset happianturit toimivat mittaamalla veden ja elektrodien välisiä kemiallisia reaktioita, jotka kuluttavat mittauksen aikana vettä ympäröivää happea. Tämä voi johtaa mittausvirheisiin silloin, kun veden virtaus on heikkoa, sillä se voi aiheuttaa väärän mittau tuloksen. Luotettavien tulosten saamiseksi sähkökemiallisten mittareiden käyttö edellyttää veden sekoittamista mittaushetkellä, mikä voi olla haastavaa tietyissä ympäristöissä. [17.]

Optiset happianturit perustuvat fluoresenssiteknologiaan, jossa mitataan valon emissioon perustuvaa hapen määrää vedessä. Optiset mittarit eivät kuluta happea mittauksen aikana, mikä tekee niistä tarkempia ja luotettavampia pitkäaikaisessa käytössä. Optiset mittarit ovat vakaampia ja soveltuvat paremmin rutini käyttöön kuin sähkökemialliset mittarit. Lisäksi optiset mittarit eivät vaadi jatkuvaa kalvojen tai elektrolyyttien vaihtoa, mikä vähentää huollon tarvetta. [17.]

9.2 Happimittareiden kustannusarvio

Vesistöjen laadun mittaamiseen käytettävät laitteet vaihtelevat suuresti hinnaltaan, tarkkuudeltaan ja huollon tarpeeltaan. Kustannukset riippuvat erityisesti laitteen tarkkuudesta, käytettävyydestä ja mittaamenetelmästä. Seuraava taulukko 2 vertailee kuvan 4:n eri happipitoisuuden mittalaitteita sekä niiden kustannuksia.

Taulukko 2. Kustannus eri happimittareista. YSI Pro 20 [18], YSI Pro ODO [19], YSI Pro DSS [20].

Mittarityyppi	Esimerkki	Hinta-arvio (€)	Mitatut parametrit
1. Sähkökemiallinen happimittari	YSI Pro20	800–1 500 €	Liuennut happi, lämpötila
2. Optinen happimittari	YSI Pro ODO	1 200–2 500 €	Optinen happi, lämpötila
3. Moniparametrimittari	YSI Pro DSS	3 000–5 500 €	Optinen happi, sameus, sähkönjohtavuus, pH, lämpötila.



Kuva 4. YSI Pro 20 [18], YSI Pro ODO [19], YSI Pro DSS [20].

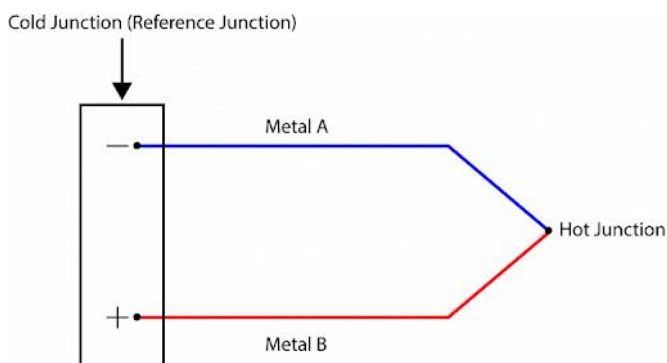
10 Lämpötilan mittaaminen termoparilla

Termoparit ovat kestäviä, tarkkoja ja soveltuvat hyvin pitkäaikaiseen seurantaan vaativissa olosuhteissa, kuten vesistöissä. Erityisesti ne sietävät kosteutta, painetta ja laajoja lämpötilaeroja, mikä tekee niistä käyttökelpoisia kenttämittauksissa. [24.]

Tässä työssä pyritään kehittämään mittausjärjestelmä, joka on sekä toimiva että kustannuksiltaan kilpailukykyinen kaupallisiin vaihtoehtoihin nähden. Tarkkuuden varmistamiseksi käsitellään myös kalibroinnin ja termostandardien merkitystä. Lopuksi verrataan itse rakennettua järjestelmää kaupallisiin lämpötilamittareihin tarkkuuden, hinnan ja käytettävyyden näkökulmasta.

10.1 Termoparin toimintaperiaate ja Seebeckin ilmiö

Termopari, eli termoelementti, on yleinen lämpötila-anturi, jota käytetään laajasti teollisuudessa, tutkimuksessa ja ympäristön seurannassa. Kuvassa 5 termoparin rakenne koostuu kahdesta eri metallista valmistetusta johdosta, jotka liitetään toisiinsa muodostaen kuuman liitoksen (hot junction). Tässä liitospisteessä tapahtuu varsinainen lämpötilan mittaus. Johdinten toiset päät jäävät vapaiksi ja muodostavat kylmän liitoksen (cold junction), joka toimii vertailupisteenä. Näiden kahden pisteen välinen lämpötilaero mahdollistaa sähköisen mittauksen. [21.]



Kuva 5. Termoparin rakenne [22].

Termoparin toiminta perustuu Seebeckin ilmiöön, jonka saksalainen fyysikko Thomas Johann Seebeck havaitsi vuonna 1821. Ilmiön mukaan lämpötilaero kahden eri metallin liitosten välillä synnyttää sähkömotorisen voiman, kun varauksenkuljettajat (kuten elektronit) alkavat liikkua metallissa. Tämän seurauksena kuuman ja kylmän liitoksen välille syntyy jännite-ero, joka on verrannollinen lämpötilaeroon. Tätä ilmiötä kuvataan Seebeckin kertoimella, joka määritellään kaavalla: [23.]

$$S = \Delta V / \Delta T$$

jossa:

- S on Seebeckin kerroin ($\mu\text{V}/\text{K}$),
- ΔV on mitattu jännite-ero (V),
- ΔT on kahden pisteen välinen lämpötilaero (K). [20.]

10.2 Termoparityypit ja niiden ominaisuudet

Termoparin ominaisuudet määräytyvät sen valmistuksessa käytettyjen metallien mukaan. Eri metalliyhdistelmät tuottavat erilaisen jännitevasteen, mikä vaikuttaa anturin herkkyyteen, mittaustarkkuuteen ja lämpötila-alueeseen. Tämän vuoksi termopareja on kehitetty useita eri tyyppisiä, joista jokainen soveltuu parhaiten tietynlaisiin mittaustarpeisiin. Sopivan tyypin valintaan vaikuttavat esimerkiksi käyttöympäristö, vaadittu tarkkuus ja haluttu lämpötila-alue. [21.]

Alla olevassa taulukossa 3 on esitetty yleisimpien termoparityyppien ominaisuuksia, kuten käyttöalueet, Seebeck-kerroin ja käytetyt metalliyhdistelmät. Seebeck-kerroin kuvaa, kuinka paljon jännitettä syntyy tiettyä lämpötilaeroa kohden, ja sen arvo voi vaihdella merkittävästi eri materiaaleilla. Jalometallipohjaiset termoparit, kuten S-, R- ja B-tyypit, soveltuvat hyvin korkeisiin lämpötiloi-

hin, mutta ovat vähemmän herkkiä. T- ja J-tyypit taas tarjoavat paremman herkkyyden ja tarkkuuden matalilla lämpötila-alueilla. Mittausolosuhteet ja vaadittu tarkkuus vaikuttavat siihen, mikä tyyppi on kulloinkin paras valinta. [21.]

Taulukko 3. Termoparityyppien ominaisuuksia [21].

Termopari-tyyppi	Materiaaliyhdistelmä	Lämpötila-alue (°C)	Seebeck-kerroin, $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
B	Platina 6 % Rhodium (PtRh6) / Platina 30 % Rhodium (PtRh30)	0 – 1820	5 – 10
K	Nikkelikromi (NiCr) / Nikkelsilikaatti (NiSi)	-270–1372	41
J	Rauta (Fe) / Konstantaani (CuNi)	-210–1200	50
T	Kupari (Cu) / Konstantaani (CuNi)	-270–400	40
E	Nikkelikromi (NiCr) / Konstantaani (CuNi)	-270–1000	68
S	Platina-Rodium (PtRh10) / Platina (Pt)	-50–1760	10

10.3 T-tyypin termopari vesistömittauksissa

Vesistömittauksissa T-tyypin termoparin edut perustuvat sen tarkkuuteen matalissa lämpötiloissa. Sen mittaustarkkuus ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) on erinomainen juuri vesistöjen lämpötila-alueella, mikä mahdollistaa luotettavat mittaustulokset. Lisäksi termoparin tuottama jännitevaste on lineaarinen vesistöjen lämpötila-alueella, mikä yksinkertaistaa mittausten tulkintaa. [21.]

T-tyypin termoparin materiaalivalinta on erityisen soveltuva vesiympäristöihin. Konstantaani (55 % Cu, 45 % Ni) kestää hyvin korroosiota sekä makeassa että

suolaisessa vedessä, mikä pidentää anturin käyttöikää. Kupariosa vaatii suo-
jausta erityisesti merivedessä, mutta yksinkertainen PTFE- tai PVC-päällyste
riittää usein järvimittauksissa. [21.]

11 Johdon pituuden valinta

Termoparin johto siirtää mittaavan anturin tuottaman sähköjännitteen mittalait-
teelle. Jotta mittaus olisi tarkka, johdon täytyy olla sopivan pituinen ja oikean-
laista materiaalia. Esimerkiksi T-typin termopari tarvitsee siihen tarkoitetut T-
tyypin kompensointijohtoa, jotka on valmistettu kuparista ja konstantaanista.
[24.]

Johdon pituuden on oltava riittävä, jotta termoparin kärki ylittää mittauskohtaan ja
toinen pää ylettyy mittalaitteeseen. Liian pitkä johto voi aiheuttaa ongelmia.
Koska termoparin tuottama jännite on hyvin pieni, pitkä johto voi heikentää sig-
naalia tai altistaa sen sähkömagneettisille häiriöille. Siksi johdon pituus kannat-
taa pitää mahdollisimman lyhyenä. [24.]

Yleisesti suositellaan, että johdon pituus olisi enintään noin 30 m. Mikäli tarvi-
taan pidempiä etäisyyksiä, kannattaa käyttää vahvistettuja signaalilähettämiä,
kuten 4–20 mA:n muuntimeen perustuvia ratkaisuja, jotka kestävät paremmin
häiriöitä. [24.]

Johtojen päällysteet eli vaipat valitaan sen mukaan, millaisessa ympäristössä
mittaus tehdään. Jos ympäristössä on korkeaa lämpöä, kosteutta tai kemikaa-
leja, tarvitaan vaippa, joka kestää näitä olosuhteita, kuten teflonia, lasikuitua tai
metallia. [24.]

11.1 Termoparijohdon resistanssi vaikutus mittaustarkkuuteen

Johdon pituuden kasvaessa myös sen resistanssi kasvaa, mikä voi vaikuttaa
mittaustuloksiin. T-typin termoparin kupari-konstantaani-johdinparin resistanssi

on noin 0,06 Ω/m kuparille ja 0,45 Ω/m konstantaanille (20 °C:n lämpötilassa). Esimerkiksi 50 metrin johdolla kokonaisresistanssi olisi noin 25,5 Ω, mikä voi aiheuttaa merkittävää jännitehäviötä pitkissä mittausjohdoissa. [25, s. 36]

Resistanssin vaikutusta voidaan tarkastella seuraavan kaavan avulla:

$$V_{\text{Häviö}} = I \times R_{\text{johto}}$$

jossa:

- $V_{\text{häviö}}$ on jännitehäviö johdossa.
- I on mittausvirta
- R_{johto} on johdon kokonaisresistanssi. [25, s.36.]

Koska termoparin tuottama jännite on vain mikrovolttien luokkaa (n. 40 μV/°C T-tyypillä), pienikin jännitehäviö voi vaikuttaa mittauksen tarkkuuteen. Mikrokontrolliin perustuvan mittausjärjestelmän tapauksessa johdon resistanssi voi aiheuttaa jopa 0,5–1,0 °C:n mittausvirheen 50 metrin johdolla, ellei sitä kompensoida asianmukaisesti. [25, s. 39.]

Tämän vuoksi pitkillä johdinpituuksilla on syytä käyttää korkeaimpedanssisia mittauslaitteita, jotka ottavat hyvin pienen virran, tai johdinresistanssin kompensoivia mittausmenetelmiä. Nykyaikaisten mittalaitteiden tuloimpedanssi on tyyppillisesti vähintään 10 MΩ, mikä minimoi mittausvirran aiheuttaman jännitehäviön. [25, s.39.]

11.2 Termoparin vajoaminen vesistömittauksissa

Termoparin upottamiseksi vedenpinnan alapuolelle siihen kiinnitetään paino, joka vetää sen suoraan alaspäin. Paino kiinnitetään termoparin suoja-putken tai johdon ala osioon. Painon tehtävänä on estää mittausjohdon kelluminen ja sivuttaisliike veden virtauksen vaikutuksesta. Paino voi olla esimerkiksi 200–500

gramman ruostumattomasta teräksestä valmistettu kappale, joka joko ruuvataan kiinni suojaputken päähän tai kiinnitetään lukitusruuveilla johtoon. [26.]

Itse termoparijohto voi toimia myös syvyysmittarina, jos se varustetaan selkeillä etäisyysmerkinnöillä. Tämä onnistuu esimerkiksi tekemällä teippimerkkejä tai käyttämällä värikoodeja metrin välein. Näin voidaan laskea, kuinka paljon johdinta on upotettu veteen ja päätellä mittauspisteen syvyys veden pinnasta. [26.]

12 Laboratorihankintaehdotus termoparimittausjärjestelmälle

Laboratoriossa lämpötilamittaukset voidaan toteuttaa joko itse rakennetulla, ohjelmoitavalla järjestelmällä tai valmiilla kaupallisella mittalaitteella. Seuraavassa vertaillaan kahta vaihtoehtoista ratkaisua. Arduino-mikrokontrolleriin perustuva termoparimittausjärjestelmä sekä Fluke 179 -yleismittari, joka tukee K-tyyppin termopareja.

Arduino-pohjaiset mittausjärjestelmät ovat edullisia vaihtoehtoja termoparimittauksiin. Yhdistämällä Arduino-mikrokontrollerin ja termopari-vahvistinmoduulin, kuten MAX31856, voidaan rakentaa mittausjärjestelmä, joka saavuttaa $\pm 0,3$ °C tarkkuuden. [27.] Esimerkkejä tarvittavista komponenteista on koottu taulukkoon 4.

Tämän järjestelmän etuna on muokattavuus ja monimuotoisuus. Niihin voidaan lisätä tallennustoimintoja (SD-kortti), näyttöjä ja langattomia tiedonsiirtomoduuleja tarpeen mukaan. Järjestelmä voidaan ohjelmoida kompensoimaan johdinresistanssin vaikutukset ja käsittelemään useita termopareja samanaikaisesti. [27.]

Arduino-pohjaisten järjestelmien heikkoutena on, että ne vaativat teknistä osaamista rakentamisessa ja ohjelmoinnissa. Lisäksi niiden vedenkestävyys on varmistettava erikseen sopivalla koteloinnilla kenttäkäyttöä varten. [27.] Arvioitu kokonaiskustannus komponenteille on noin 70–130 euroa.

Taulukko 4. Esimerkkikomponentteja itse rakennettuun järjestelmään.

Komponentti	Tehtävä	Hinta (€)	Kauppa
Arduino Uno	Mikrokontrolleri	25–30	Amazon
MAX31856	Termoparivahvistin	15–25	Amazon
OLED-näyttö	Käyttöliittymä	8–15	Amazon
SD-korttilukija	Datatallennus	5–10	Amazon
Akku/virtalähde	Virransyöttö	10–20	Amazon
Vedenpitävä kotelo	Suojaus	10–30	Amazon
Kokonaishinta		70–130	

Kuvassa 6 esitettynä toinen vaihtoehto on hankkia valmis, teollisuustasoinen lämpötilamittari, kuten Fluke 179, joka tukee K-tyyppin termopareja. Se mittaa lämpötilan lisäksi muun muassa jännitettä, virtaa ja resistanssia. Laite on suunniteltu suoraan kenttä- ja huoltokäyttöön, ja se täyttää sähkötyöturvallisuuden vaatimukset (CAT III 1000 V / CAT IV 600 V). Lämpötilamittaus perustuu K-tyyppin termopariin (80BK-A), ja mittaustarkkuus on $\pm 1,0$ °C. Fluke 179:n etuna on käyttövalmius ja helppokäyttöisyys. Se ei vaadi ohjelmointia, ja sen mittaustoiminnot kattavat useita sähköisiä suureita yhdellä laitteella. Rajoituksena on, että mittaustietojen tallennus ei ole mahdollista ilman erillisiä lisälaitteita, eikä mittari tue muiden termoparityyppien käyttöä ilman muunnoksia. [28.] Valmiin laitteen hankintahinta on noin 600–800 euroa.



Kuva 6. Fluke 179 digitaalinen yleismittari. [28.]

13 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin veden lämpötilan, suolapitoisuuden (saliniteetin) ja happipitoisuuden mittaamenetelmiä sekä arvioitiin kaupallisten ja itse rakennettujen mittaajärjestelmien soveltuvuutta eri käyttötarkoituksiin. Tarkastelun kohteena olivat järjestelmien tarkkuus, luotettavuus, kustannukset ja käyttökelpoisuus vaihtelevissa ympäristöolosuhteissa.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että kaupalliset mittaajärjestelmät ovat usein tarkempia, kestävämpiä ja käyttövalmiita heti hankinnan jälkeen. Niiden laitteistot on tehtaalla kalibroitu ja optimoitu erityisesti pitkäaikaiseen ja tarkkaan mittaukseen, mikä tekee niistä erinomaisia vaihtoehtoja jatkuvaan vedenlaadun seurantaan. Niiden selkeä haittapuoli on kuitenkin korkea hankintahinta, mikä saattaa rajoittaa niiden käyttöä esimerkiksi opetuskäytössä tai pienissä tutkimushankkeissa.

Itse rakennettu lämpötilan mittaajärjestelmä, esimerkiksi Arduino-pohjainen ratkaisu, tarjoaa kustannustehokkaan ja muokattavan vaihtoehdon. Tällainen järjestelmä mahdollistaa useiden anturien yhdistämisen, tiedon tallennuksen ja langattoman tiedonsiirron, ja se soveltuu hyvin kokeelliseen tutkimukseen sekä opetukseen. Toisaalta järjestelmä vaatii käyttäjältä teknistä osaamista, erityisesti ohjelmoinnissa ja laitteiston suojauksessa. Kalibrointi ja käyttöönotto-

taus ovat välttämättömiä, ja ne vievät aikaa. Lisäksi järjestelmä on alttiimpi ulkoisille häiriöille, kuten kosteudelle ja lämpötilavaihteluille, ellei kotelointia ja suojarakenteita suunnitella huolellisesti.

Jatkokehityksen kannalta keskeistä olisi kehittää tapoja, joilla itserakennetut järjestelmät voidaan suojata paremmin ympäristötekijöiltä. Kalibrointiprosessin yksinkertaistaminen, mittaustarkkuuden parantaminen ja käyttöiän pidentäminen kehittyneempien komponenttien ja materiaalien avulla parantaisivat merkittävästi järjestelmän soveltuvuutta pitkäaikaiseen vedenlaadun seurantaan.

Kaupalliset järjestelmät tarjoavat varman ja vaivattoman ratkaisun, kun taas itse rakennetut mittausjärjestelmät mahdollistavat joustavan ja edullisen vaihtoehdon tutkimuslähtöisiin ja muokattaviin käyttötarkoituksiin. Valinta näiden välillä riippuu pitkälti käytettävissä olevista resursseista, osaamisesta ja käyttötarkoituksen vaatimustasosta.

Lähteet

- 1 Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Vesihuolto I. Helsinki: RIL r.y.: 2003.
- 2 Vuori, K.-M., Mitikka, S. & Vuoristo, H. (toim.) 2009. Pintavesien ekologisen tilan luokittelu. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Verkkoaineisto. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/41785/OH_3_2009.pdf>. Luettu 17.3.2025
- 3 Hanski, M. 2000. Jokien rakenteellisen tilan arviointi: Taustaa EU:n vesipolitiikan puitedirektiivin toimeenpanolle Suomen virtavesissä. Helsinki: Helsingin yliopisto. Verkkoaineisto. <<https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/fc8d1d6e-520e-4a93-94b1-bb121ccabb97/content>>. Luettu 7.1.2025
- 4 Ojavainen, R. 1999. Vesistötulosten tulkinta – opasvihkonen. Tampere: KVVY. Verkkoaineisto. <<https://kvvy.fi/wp-content/uploads/2015/10/opasvihkonen.pdf>>. Luettu 15.1.2025
- 5 Eloranta, P. 2005. Järvien kunnostuksen limnologiset perusteet. Teoksessa: Ulvi, T. ja Lakso, E. (toim.) Järvien kunnostus. Helsinki: Edita Prima Oy. Verkkoaineisto. <<https://core.ac.uk/download/pdf/33736241.pdf>>. Luettu 15.1.2025
- 6 Turun yliopisto, LUMA-keskus. Suureiden merkitys. Verkkoaineisto. <<https://sites.utu.fi/luma/wp-content/uploads/sites/122/2019/05/Suureiden-merkitys-valmis.pdf>>. Luettu 20.1.2025
- 7 Ulvi, T. ja Lakso, E. (toim.) 2005. Järvien kunnostus. Helsinki: Edita ja Suomen ympäristökeskus. Verkkoaineisto. <<https://core.ac.uk/download/pdf/18616436.pdf>>. Luettu 15.1.2025
- 8 Sassi, J. ja Keto, A. 2005. Järvien kunnostuksen menetelmät. Espoo: VTT. Verkkoaineisto. <<https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2005/T2307.pdf>>. Luettu 27.1.2025
- 9 Kettunen, I., Mäkelä, A. ja Heinonen, P. 2008. Vesistö tietoa näyttöönottajille. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, Edita. PDF
- 10 Tarvainen, M., Kotilainen, H. ja Suomela, J. 2015. Uudet menetelmät vesistöjen seurannassa. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Verkkoaineisto. <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/120174/RA%2086_2015_Uudet%20menetelm%C3%A4t%20vesist%C3%B6jen%20seurannassa.pdf?sequence=2>. Luettu 30.1.2025

- 11 Korhonen, J. 2002. Suomen vesistöjen lämpötilaolot 1900-luvulla. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Verkkoaineisto. <<https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/24aabf2d-365b-434c-b73c-924ea51fe921/content>>. Luettu 1.2.2025
- 12 Näykki, T., Kyröläinen, H., Witick, A., Mäkinen, I., Pehkonen, R., Väisänen, T., Sainio, P. ja Luotola, M. 2013. Laatusuositukset ympäristöhallinnon vedenlaaturekistereihin vietävälle tiedolle. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Verkkoaineisto. <<https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/fdc238be-7644-4a28-b446-bef9db992975/content>>. Luettu 1.2.2025
- 13 GWM Engineering. EXO2-moniparametrisondi. Verkkoaineisto. <<https://www.gwm-engineering.fi/fi/tuoteryhmat/vedenlaatu-ja-virtaamamittaukset/pitkaaikaisseuranta/ysi-exo-sarjan-sondit/exo2/>>. Luettu 2.2.2025
- 14 YSI. YSI EXO2s Sonde. Verkkoaineisto. <<https://www.ysi.com/exo2s>>. Luettu 6.2.2025
- 15 Wagner, R.J., Boulger, R.W., Oblinger, C.J. ja Smith, B.A. 2006. Guidelines and standard procedures for continuous water-quality monitors. Reston (VA): U.S. Geological Survey. Verkkoaineisto. <<https://pubs.usgs.gov/tm/2006/tm1D3/>>. Luettu 10.2.2025
- 16 GWM Engineering. YSI Pro30: Johtokyky ja lämpötila. Verkkoaineisto. <https://www.gwm-engineering.fi/files/8514/9632/6996/YSI-Pro30_Johtokyky_ja_lampotila.pdf>. Luettu 10.2.2025
- 17 Korhonen, Ismo. 2019. Kenttämittaukset: Vedenlaadun mittausmenetelmät ja käytännön toteutus. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 18 YSI. Pro20 Dissolved Oxygen Instrument. Verkkoaineisto. <<https://www.ysi.com/pro20>>. Luettu 25.2.2025
- 19 YSI. ProODO Optical Dissolved Oxygen Instrument. Verkkoaineisto. <<https://www.ysi.com/proodo>>. Luettu 25.2.2025
- 20 YSI. ProDSS Multiparameter Water Quality Meter. Verkkoaineisto. <<https://www.ysi.com/prodss>>. Luettu 25.2.2025
- 21 Virtaniemi, Olga. 2021. Vedenlaadun mittausmenetelmät ja -laitteet. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 22 Dubai Sensor. Thermocouples: Where science meets magic in the world of temperature. Verkkoaineisto. <<https://www.dubai-sensor.com/blog/thermocouples-where-science-meets-magic-in-the-world-of-temperature/>>. Luettu 28.2.2025

- 23 Olin, Lauri. 2023. Termoparien käyttö lämpötilan mittauksessa. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 24 Kerlin, T.W. ja Johnson, M. 2012. Practical Thermocouple Thermometry. 2. painos. Research Triangle Park (NC): International Society of Automation. PDF.
- 25 Ahoranta, J. 2016. Sähkötekniikka. 15. painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- 26 Holman, J.P. 2001. Experimental Methods for Engineers. 7. painos. New York (NY): McGraw-Hill. Verkkoaineisto. <https://books.google.fi/books?id=d9GhI4n_y9AC>. Luettu 12.4.2025
- 27 Adafruit Industries. Adafruit Universal Thermocouple Amplifier MAX31856. New York (NY): Adafruit. Verkkoaineisto. <<https://www.adafruit.com/product/3263>>. Luettu 15.4.2025
- 28 Fluke Corporation. Fluke 179 digitaalinen yleismittari. Everett (WA): Fluke Corporation. Verkkoaineisto. <<https://www.fluke.com/fi-fi/tuote/sahkotes-taus/digitaaliset-yleismittarit/fluke-179>>. Luettu 15.4.2025