

*Juhani Niinimäki • Kari Penttinen*

# VESIENHOIDON EKOLOGIAA

Ravintoverkkokunnostus



## Esipuhe

Kirjoittajilla on takanaan pitkä työura vesistötutkimusten ja kalatalouden alalla. Jotta hankittua tietoa ja kokemusta siirtyisi myös tuleville vesistöasiantuntijoille ja erityisesti vesistökuunnostajille, katsoimme, että tämä kirja, joka käsittelee vesistöjen ravintoverkkoja, tulee tarpeeseen. Toivomme kirjan virittävän kriittistä keskustelua menetelmistä, joilla järvien kunnostamista edistetään.

Haluamme kiittää kirjan mahdollistamisesta Suomen Tietokirjailijat ry:tä heidän myöntämästä apurahasta. Kirjan tekemiseen innoitti lukemattomat hoitokalastuksia koskevat keskustelut, jotka käytiin Kari Kinnusen kanssa. Muita henkilöitä, joita haluamme kiittää, ovat Juha Keto ja Paula Böhling kommentteista ja kielen tarkistamisesta.

# Sisällysluettelo

## 1 Johdanto

## 2 Perustuotanto

### 2.1 Valo

### 2.2 Hiili

### 2.3 Happi ja lämpötila

### 2.4 Ravinteet

#### 2.4.1 Fosfori

##### 2.4.1.1 Fosforin esiintyminen luonnossa

##### 2.4.1.2 Fosforikuormitus ja -tase

##### 2.4.1.3 Fosfori vedessä ja sedimentissä

#### 2.4.2 Typpi

#### 2.4.3 Fosfori ja typpi minimiravinteina

#### 2.4.4 Muut ravinteet ja ravinteiden tarve kasveilla ja levillä

#### 2.4.5 Hiilen ja typen sekä hiilen ja fosforin suhde

### 2.5 Yhteyttäminen

## 3 Ravintoverkkojen koostumuksesta

### 3.1 Tuottajat, kuluttajat ja hajottajat

### 3.2 Ravintoverkko

#### 3.2.1 Ravintoverkon säätelymekanismit

#### 3.2.2 Ravintoverkon tasot

##### 3.2.2.1 Kaskadivaikutus

- 3.2.2.2 Bottom-up, top-down
- 3.2.3 Järvien ravintoverkoista
- 3.3 Bakteerit ja levät
  - 3.3.1 Bakteerit
  - 3.3.2 Levät
- 3.4 Eläinplankton
- 3.5 Pohjaeläimet ja muut vesieläimet
- 3.6 Kalat
  - 3.6.1 Kutu ja lisääntyminen
  - 3.6.2 Vesistön rehevöitymisen vaikutus kalastoon
  - 3.6.3 Ravinnon käyttö
    - 3.6.3.1 Kasvinsyöjät
    - 3.6.3.2 Eläinplanktonin syöjät
    - 3.6.3.3 Pohjaeläinsyöjät
    - 3.6.3.4 Petokalat
    - 3.6.3.5 Moniravintoiset
- 3.7 Vesikasvit

## 4 Ravinteiden kierto vesistöissä

- 4.1 Sisään ja ulos
- 4.2 Fosforitase
- 4.3 Sedimentin ja vesimassan välillä
- 4.4 Ravinteet ravintoverkon eri osissa
  - 4.4.1 Kasveissa ja levissä
  - 4.4.2 Eliöissä
  - 4.4.3 Kaloissa
  - 4.4.4 Vesiekosysteemissä yleensä

## 5 Hiilen kierto

## 6 Suomalaisten vesistöjen tyypittelyperusteet

### 6.1 Käyttökelpoisuusluokittelu

### 6.2 Vesipuitedirektiivin mukainen laatuluokittelu

#### 6.2.1 Jokien tilan luokittelu

##### 6.2.1.1 Jokien vedenlaatuluokittelu

##### 6.2.1.2 Jokien biologinen luokittelu

##### 6.2.1.3 Jokien hydrologis-morfologinen luokittelu

#### 6.2.2 Järvien luokittelu

##### 6.2.2.1 Järvien vedenlaatuluokittelu

##### 6.2.2.2 Järvien kasviplankton- ja vesikasvuluokittelut

##### 6.2.2.3 Järvien pohjaeläinluokittelu

##### 6.2.2.4 Järvien kalastoluokittelu

#### 6.2.3 Rannikkovesien tilan arviointi

#### 6.2.4 Voimakkaasti muutettujen vesimuodostelmien arviointi

## 7 Ravintoketjut erilaisissa vesistöissä

### 7.1 Matala kerrostumaton järvi

### 7.2 Kerrostuva järvi

### 7.3 Oligotrofinen järvi

### 7.4 Dystrofinen järvi

### 7.5 Eutrofinen järvi

### 7.6 Hypereutrofinen järvi

### 7.7 Matalien järvien kaksi tasapainotilaa

## 8 Vesistöjen ravintoverkkojen hallinta

### 8.1 Ulkoiseen kuormitukseen vaikuttaminen

- 8.2 Sisäisen kuormituksen hillitseminen
- 8.3 Selvitys vesialueen tilasta ja kalastuksesta
  - 8.3.1 Kalastuksen säätely
  - 8.3.2 Kalakantojen vahvistaminen
  - 8.3.3 Hoitokalastus ja sen tarpeen selvittäminen
    - 8.3.3.1 Rehevöitymisaste
    - 8.3.3.2 Kalaston koostumuksen selvittäminen
      - 8.3.3.2.1 Koeverkkopyynti*
      - 8.3.3.2.2 Koeluontoinen hoitokalastus*
      - 8.3.3.2.3 Kalaparvien kaikuluotaus*
    - 8.3.3.3 Muut selvitystarpeet ja -menetelmät

## 9 Kalojen käyttäytyminen ja ravintoketjukurkunnostus

- 9.1 Nuoruusvaihe ja aikuiset kalat
  - 9.1.1 Särki
  - 9.1.2 Salakka
  - 9.1.3 Lahna
  - 9.1.4 Pasuri
  - 9.1.5 Ahven
  - 9.1.6 Kiiski
- 9.2 Suojautuminen vihollisilta
- 9.3 Kalojen vaellukset
- 9.4 Käyttäytyminen erilaisissa vesissä
- 9.5 Kalojen ravinto ja sen saanti vaihtelevat
- 9.6 Kalojen keskinäinen säätely ja siihen vaikuttaminen

## 10 Laskentamallit vesistökurkunnostusten apuna

- 10.1 Virtaamamallit

- 10.2 Kuormituslaskentamallit
- 10.3 Virtaama-vedenlaatumallit
- 10.4 Kuormituksen sieto

## 11 Ravintoketjukurinnotusmenetelmät

- 11.1.1 Hoitokalastusmenetelmät
  - 11.1.1.1 Nuottapyynti
  - 11.1.1.2 Avovesinuottaus
  - 11.1.1.3 Talvinuottaus
  - 11.1.1.4 Kurenuotta
  - 11.1.1.5 Rysäpyynti
  - 11.1.1.6 Katiskapyynti
- 11.1.2 Hoitopyyntiin valmistautuminen
  - 11.1.2.1 Pyyntimenetelmän valitseminen
- 11.1.3 Hoitokalastus usean vuoden hanke
  - 11.1.3.1 Tilaajan ja vesialueen omistajan mukanaolo
  - 11.1.3.2 Varautuminen saaliiden jatkokäsittelyyn
  - 11.1.3.3 Hoitokalastussaaliiden koostumuksen selvittäminen
  - 11.1.3.4 Vesillelasku- ja lastauspaikka
- 11.1.4 Tulosten raportointi
- 11.1.5 Hoitokalastettavat kalalajit
- 11.1.6 Hoitokalastuksen jatkaminen
- 11.1.7 Kustannukset ja rahoitusmahdollisuudet
  - 11.1.7.1 Kustannusten arviointi
  - 11.1.7.2 Kustannukset ja hyödyt
- 11.1.8 Hoitokalastuksen riskit
  - 11.1.8.1 Ravintoverkon vaikea hallinta

- 11.1.8.2 Varovaisuus kannattaa
- 11.1.9 Hoitokalastajan koulutus ja kokemuksen hankkiminen
- 11.1.10 Pyynti ja itsenäinen päätöksenteko
- 11.2 Hapetus
- 11.3 Sedimentin käsittely
  - 11.3.1 Pintasedimentin ruoppaus
- 11.4 Kemikaalien käyttö
- 11.5 Järven kuivattaminen
- 11.6 Vesikasvustojen poisto
- 11.7 Esimerkkejä järvikunnostuksista
  - 11.7.1 Enäjärvi, Vihti
  - 11.7.2 Finjasjön, Ruotsi
  - 11.7.3 Köyliönjärvi
  - 11.7.4 Lappajärvi
  - 11.7.5 Pyhäjärvi, Säskylä
  - 11.7.6 Tuusulanjärvi, Järvenpää ja Tuusula
  - 11.7.7 Ulemistenjärvi (Lake Ulemiste), Tallinna, Viro
  - 11.7.8 Vesijärvi, Lahti
- 11.8 Hoitokalastuksen mahdollisuudet onnistua tai epäonnistua.

## 12 Itämeren rannikovesien ravintoverkoista

- 12.1 Suolapitoisuus ja vedenvaihtuminen
- 12.2 Kuormittajat ja vedenlaatu
- 12.3 Levien ravinnekierto
- 12.4 Eliöstö
- 12.5 Rannikovesien tila ja kunnostus



- 12.6 Vedenalainen maisema ja luonto
- 12.7 Suojelualueet ja -sopimukset

## 13 Lopuksi

Lähteet

Linkkejä [www-sivuille](#)

Sanasto

Suomen ympäristökeskuksen ympäristöalan  
menetelmästandardit

Kunnostussuunnitelman ohjeellinen sisältörunkomalli

Hoitokalastussaaliin ja saalisotannan kirjaaminen

# 1 JOHDANTO

Vesistöt ja niiden valuma-alueet poikkeavat toisistaan. Yhteinen piirre järvillemme on talvinen jääpeite, joka estää valon ja hapen pääsyn ilmasta veteen kuukausiksi. Avovesiaikana järvet ovat lämpötilaltaan joko kerrostuvia, ajoittain kerrostuvia tai kerrostumattomia sen mukaan, millainen niiden morfologia on. Savisilla seuduilla vesistöt ovat luonnostaan savisameita ja suoperäisillä alueilla humuspitoisia. Savisameus ja humus rajoittavat valon pääsyä veteen.

Monien Suomen vesistöjen luonnontila on muuttunut, koska valuma-alueilla tai itse vesistöissä on tehty luonnontilaa muuttaneita toimenpiteitä. Vesien käyttökelpoisuus eri tarkoituksiin on usein heikentynyt. Vesi ei ehkä enää sovellu juoma- ja talousvedeksi, uiminen on epämiellyttävää tai jopa kiellettyä ja kalastus tuottaa arvokalojen sijaan vähempiarvoisia särkikaloja.

Euroopan unionin vesipuitedirektiivin (2000) ja valtakunnallisen vesienhoidon tavoitteena on saattaa huonokuntoiset vesistömme kullekin vesistötyypille ominaiseen hyvään ekologiseen tilaan. Tämä on haasteellinen tavoite. Taloudellisesti merkittävät järvimatkailu ja matkailukalastus ovat olleet kasvussa, mutta myönteinen kehitys edellyttää uima- ja kalastuskelpoisia vesiä.

Vesistöjä on pyritty kunnostamaan monella tapaa. Usein ensimmäiseksi on pyritty estämään tai rajoittamaan ravinteiden ja muiden haitallisten aineiden pääsyä vesistöön, jotta tuleva kuormitus ei ylittäisi vesistön kykyä ottaa vastaan ravinteita. Tässä ei ole aina onnistuttu kovin

hyvin, vaikkakin pistekuormitusta on saatu merkittävästi pienennettyä.

Vesikasvillisuuden liiallista leviämistä on estetty niitoin ja ruoppauksin. Hapetuksella ja ilmastuksella on yritetty pitää järven alusvesi hapellisena, jotta sedimentistä ei vapautuisi ravinteita vesimassaan, kuten hapettomissa olosuhteissa tapahtuu. Tavoitteena on näin välttää täydellinen hapettomuus ja kalakuolemat. Sedimentin ravinteita, lähinnä fosforia, on pyritty sitomaan sedimenttiin erilaisin kemikaalikäsittelyin.

Vesistöjen entistä parempaa kuntoa on tavoiteltu myös muilla keinoin. Yhtenä järvien kunnostusmenetelmänä on käytetty ravintoverkkokunnostukseen liittyvää hoitokalastusta eli vähempiarvoisten kalojen poistopyyntiä. Menetelmää kutsutaan myös biomanipulaatioksi. Manipuloimalla eli muuttamalla järven eliöstöä voidaan joissakin tapauksissa vähentää leväesiintymiä. Kun eläinplanktonia syöviä kaloja vähennetään, suurikokoisten vesikirppujen määrä lisääntyy. Vesikirput syövät eli laiduntavat kasviplanktonia, mikä voi rajoittaa kasviplanktonilajien esiintymistä ja planktonmääriä - vähentäen näin levien aiheuttamaa veden samentumista. Planktonsyöjäkaloja voidaan vähentää lisäämällä petokalojen määrää tai pyytämällä tehokkaasti planktonsyöjäkaloja.

Vuorovaikutukset avoveden ravintoverkoissa - tasoilla kalat, eläinplankton, levät - eivät ole ainoa biomanipulaatioon liittyvä mekanismi. Pohjasyöjäkalat, jotka irrottavat sedimenttiä veteen, ovat myös keskeisiä vaikuttajia. Lisäksi ulkoista kuormitusta tulee pyrkiä vähentämään alle vesialueen sietorajan, mikä se sitten onkaan, sillä silloin hoitokalastuksella voidaan saavuttaa pitempikestoisia vaikutuksia.

Tässä kirjassa tarkastelemme vesistöjen ravintoverkkojen ja ravintoketjujen toimintaa sekä niihin vaikuttavia tekijöitä Suomen olosuhteissa. Tarkastelemme myös sitä, miten

vesistöjemme tilaa voidaan parantaa ravintoverkkoja säätelemällä.

Kirja on tarkoitettu ensisijaisesti vesistökuunnostusta opiskeleville sekä kunnostuksia toteuttaville henkilöille ja yhteisöille. Kirja on jatkoa teokselle "Vesiensuojelun perusteet ja vesistöjen kunnostus" (Penttinen & Niinimäki 2010), joka tehtiin luonto- ja ympäristöalan sekä kalatalouden ammatillisen koulutuksen tarpeisiin Opetushallituksen kustantamana.

Tiedot perustuvat tutkimuksiin ja selvityksiin, mutta myös tekijöiden ja kunnostuksia toteuttaneiden henkilöiden kokemuksiin ja havaintoihin.

Seuraavassa aiheeseen liittyvää kirjallisuutta:

- Vesistökuunnostukset: Ilmavirta (1990), Airaksinen (2004), Ulvi&Lakso (2005), Väisänen (2005), Eloranta (2010), Penttinen & Niinimäki (2010), Sarvilinna & Sammalkorpi (2010).
- Biomanipulaation vaikutukset vesistöissä: Shapiro ym. (1975), Jeppesen ym. (1990), Demelo ym. (1992), Meijer ym. (1994), Hansson ym. (1998), Dremer & Hambright (1999), Wetzel (2001), Brönmark & Hansson (2010).
- Hoitokalastusten vaikutuksia Suomessa: Sarvala ym. (2000), Vakkilainen (2005), Olin (2006), Tarvainen (2007), Syväranta (2008), Keto ym. (2010).

Julkaisujen tarkemmat tiedot löytyvät lähdeluettelosta.

## 2 PERUSTUOTANTO

Perustuotanto (*primary production*) tarkoittaa vihreiden kasvien yhteyttämisen kautta sitomaa energiamäärää tai kasvien valmistamaa orgaanista ainesta. Perustuotanto jaetaan brutto- ja nettoperustuotantoon. Kasviin osuvasta auringon säteilyenergiasta vain 9 prosenttia muuttuu varastoiduksi energiaksi. Tämä määrä - kaikkien tuottajien yhteyttämässä sitoma energia - on ekosysteemin bruttoperustuotanto.

Yleensä bruttoperustuotanto ilmaistaan sitoutuneen orgaanisen hiilen määränä neliometriä kohti vuodessa ( $\text{g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). Hiilen määrä kuvaa orgaanisiin yhdisteisiin varastoitunutta kemiallista energiaa, jonka ekosysteemin eliöt voivat myöhemmin käyttää hyödykseen.

Kun bruttoperustuotannosta vähennetään kasvin omiin elintoimintoihin kuuluva energia, jää jäljelle nettoperustuotanto. Nettoperustuotannon energiasisältö on noin 5 prosenttia kasviin osuvasta auringon säteilyenergiasta. Se energiamäärä jää seuraavalle trofiatasolle kuuluvien eliöiden eli systeemin kuluttajien käyttöön. Nettoperustuotanto on siis bruttoperustuotanto, josta on vähennetty tuottajan itsensä käyttämä energia.

---

Perustuotantoa voidaan mitata paikan päällä tutkittavassa vesistössä (in situ). Toinen tapa on ottaa vesistöstä vesinäyte ja mitata veden perustuotantokyky laboratoriossa (in vitro), vakioituissa valaistusoloissa ja lämpötiloissa. Perustuotantomittauksessa määritetään radioaktiivisen hiilen C-14-aktiivisuus.

---

---

Perustuotanto voidaan ilmoittaa seuraavina suureina:

- biomassan tuorepaino
- biomassan kuivapaino eli tuotetun biomassan vedetön paino
- biomassan tuhkaton kuivapaino
- biomassan hiilen määrä, joka on yleensä 45 % kuivapainosta
- biomassan hiilidioksidin määrä, 1 kg hiiltä vastaa 2,7 kg CO<sub>2</sub>.

Eläimillä energiasisältö on kuivapainogrammaa kohti suuruusluokkaa 21 joulea (J) ja kasveilla 17,7 joulea.

Vesiekosysteemin energiavirrat voidaan kuvata kaaviona seuraavasti:

Ravinnon energia  $C = P + G + R + U + F$  eli

Tuotanto (kasvu)  $P = C - R - U - F - G$ , jossa

$C$  = ravinnon energia

$P$  = tuotanto (kasvu)

$G$  = sukusolut

$R$  = hengitys

$U$  = eritteet

$F$  = ulosteet

Vesiekosysteemin energiakaaviot ovat aina yksinkertaistuksia. Kaavioista tulee hyvin monimutkaisia, jos niihin otetaan mukaan kaikki vesiekosysteemin osat (litoraali, profundaali, pelagiaali) ja osatekijät (mm. kasviplankton, eläinplankton, pohjaeläimet, kalat).

Vesialueiden perustuotantoa voidaan mitata paitsi hiilen, myös Klorofylli-*a*:n eli lehtivihreän määränä. Klorofylli-*a* on orgaaninen molekyyli, jonka avulla kasvit yhteyttävät. Kehittyneemmällä kasveilla lehtivihreä on viherhiukkasissa (kloroplasteissa), bakteereilla kalvojen rakenneosina.

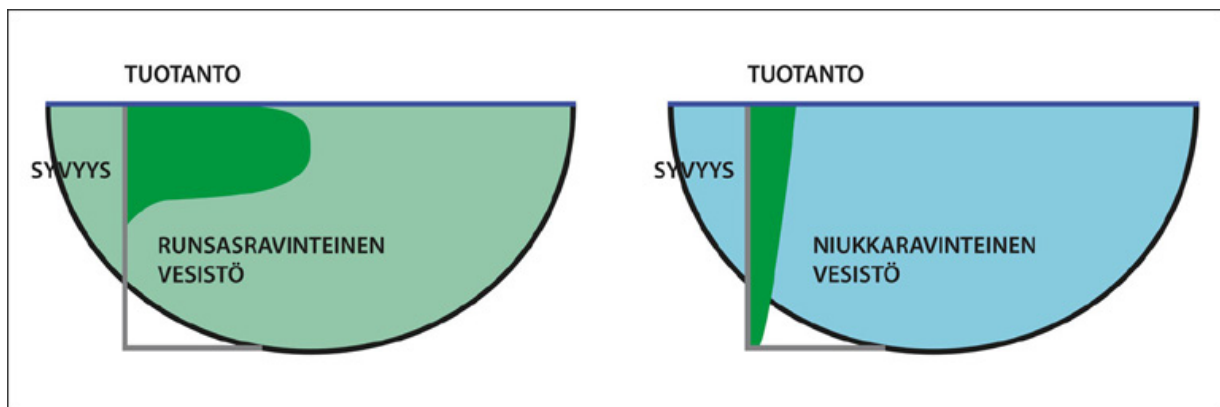
Viherhiukkasia on runsaasti lähestulkoon kaikissa kasvin maanpäällisissä osissa, ja ne aiheuttavat pääasiassa kasvien

vihreän värin. Klorofyllimolekyylit absorboivat hyvin valon sinisiä ja punaisia aallonpituuksia, mutta huonosti vihreitä. Vihreitä aallonpituuksia ne heijastavat ja näkyvät siksi vihreinä.

## 2.1 Valo

Perustuotannon määrä vesialueilla vaihtelee vuoden- ja vuorokaudenaikojen mukaan, koska valaistus vaihtelee.

Vesialueilla perustuotantoa tapahtuu niin syvälle, kuin valoa riittää ja esiintyy yhteyttäviä vesikasvustoja, leviä ja bakteereja. Lisäksi perustuotannon määrään vaikuttavat esimerkiksi valon läpäisevyys (veden sameus ja väri) ja lämpötila. Jos pintavedessä on runsaasti levää, valon läpäisevyys vähenee, mikä saattaa rajoittaa tuotantoa (kuva 1).



**Kuva 1.** Rehevässä vesistössä tuotanto rajoittuu pintaosiin, koska kasviplanktonin aiheuttama sameus estää valon tunkeutumisen syvälle. Karussa vesistössä valo saattaa tunkeutua pohjaan asti ja koko vesimassassa tapahtuu tuotantoa. Kokonaistuotanto on kuitenkin rehevässä vesistössä paljon suurempi kuin karussa.

Veteen kohdistuva valomäärä vaihtelee muun muassa vuorokaudenajan, vuodenajan ja pilvisyyden mukaan. Valomäärä on veden pinnalla 100 prosenttia. Riippuen veden valoa sitovien partikkelien määrästä, se vähenee

syvemmälle mentäessä ja on 0 prosenttia, kun valoa ei ole lainkaan.

Valon voimakkuutta eri syvyyksissä voidaan mitata luksimittarilla. Yleisempi mutta karkeampi tapa on näkösyvyyden mittaaminen. Näkösyvyys kertoo, kuinka syväle valkolevy näkyy ihmissilmällä. Jos näkösyvyys on esimerkiksi 2,0 metriä, valoa voi riittää noin 3,5–4,0 metrin syvyyteen. Toisin sanoen, valo loppuu syvyydessä, joka on kaksi kertaa näkösyvyys. Tämä johtuu siitä, että katsottaessa valkolevyä veden läpi valo kulkee pinnalta valkolevyyn ja takaisin.

Ultraviolettisäteily (UV-säteily) on sähkömagneettista säteilyä. Sen aallonpituus on lyhyempi kuin näkyvän valon. Lyhyt aallonpituus merkitsee sitä, että ultraviolettisäteilyn taajuus on suuri. Suurina kerta-annoksina, usein ja pitkään altistettaessa ultraviolettisäteily on haitallista eliöille. Ultraviolettisäteily myös tuhoaa soluja. Ultraviolettisäteilyllä on mahdollista tappaa bakteereja, minkä vuoksi sitä käytetään muun muassa juomaveden puhdistamiseen.

UV-säteily ehkäisee muun muassa vesieliöiden kasvua ja kehitystä. Eliöillä on havaittu myös erilaisia korjaus- ja suojausmekanismeja. UV-säteilyn vaimeneminen vaihtelee eri vesistöissä, mikä johtuu etenkin liukoisesta humusaineesta. Vähän humusta sisältävissä kirkkaissa järvissä UV-säteily tunkeutuu selvästi syvemmälle kuin tummissa humusjärvissä. Suorien vaikutusten lisäksi UV-säteily voi vaikuttaa eliöihin epäsuorasti. Se voi lisätä esimerkiksi eräiden kemikaalien myrkyllisyyttä.

Eräissä tutkimuksissa todettiin, että UV-B-säteily lisää lievästi PAH-tyyppisen yhdisteen, reteenin, myrkyllisyyttä vesikirpuille. Tätä yhdistettä esiintyy esimerkiksi paperi- ja selluteollisuuden alapuolisten vesistöjen sedimenteissä (Huovinen 2000).



---

Valo on sähkömagneettisen spektrin ihmissilmällä nähtävä osa. Näkyvä valo asettuu noin aallonpituuksille 350–700 nanometriä (nm) ja taajuuksille 380–750 terahertsiä (THz). Valoa lyhytaaltoisempaa säteilyä kutsutaan ultraviolettiksi ja pitempiaaltoista infrapunaiseksi.

Valoaaltojen kolme perusominaisuutta ovat kirkkaus (amplitudi), väri (aallonpituus) ja polarisaatio (värähtelykulma). Valolla on sekä hiukkasten että aaltojen ominaisuudet, ja valo etenee valokvantteina eli fotoneina. Näkyvän valon fotonin energia on noin 1,5–3,1 elektronivoltia (eV).

Vesinäytteiden oton yhteydessä voidaan mitata myös valon absorptio aallonpituuksilla 400 ja 700 nanometriä.

---

## 2.2 Hiili

Hiili (C) on alkuaine, jota esiintyy kaikkialla, missä on elämää ja orgaanisia yhdisteitä. Hiilen kiertokulku on yksi elämälle keskeisistä luonnon kiertokuluista. Hiiliatomeilla on myös kemiallisesti mielenkiintoinen kyky sitoutua toisiinsa muodostaen pitkiä ketjuja ja renkaita. Ne sitoutuvat monin muodoin myös muihin alkuaineisiin ja muodostavat lähes 10 miljoonaa yhdistettä.

Hiilen ja vedyn (H) yhdisteitä ovat hiilivedyt, joista tärkeät fossiiliset polttoaineet, maaöljy ja maakaasu, pääasiassa koostuvat. Kun hiili palaessaan yhdistyy happeen, muodostuu hiilidioksidia, jota kasvit käyttävät hiilen lähteenä. Jos hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>) on ilmakehässä liikaa, se aiheuttaa osaltaan ilmaston lämpiämistä. Elävissä olennoissa esiintyy lukemattomia muitakin hiilen yhdisteitä, joista monet sisältävät myös muita alkuaineita, esimerkiksi

tyypeä (N) tai fosforia (P). Hiili siis osaltaan muodostaa elämän perustan.

---

Kokonaishiilellä (TC) tarkoitetaan vesinäytteessä olevaa orgaanisen, epäorgaanisen ja alkuainehiilen summaa. Orgaanisella kokonaishiilellä (TOC, total organic carbon) tarkoitetaan vesinäytteeseen jäävää hiiltä, kun epäorgaaninen hiili poistetaan hapottamalla ja kuplittamalla. Mikäli näytteet on suodatettu, tulos sisältää ainoastaan liunneen ja partikkelikooltaan alle 0,22 mikrometrin ( $\mu\text{m}$ ) hiilen. Tällöin TC:n sijaan määritetään liuennut kokonaishiili (DC, dissolved carbon) ja TOC:n sijaan liuennut orgaaninen kokonaishiili (DOC). TC/TOC/DC/DOC määritetään standardimenetelmällä SFS-EN-1484. Orgaaninen kokonaishiili (TOC) sisältää eri lähteistä peräisin olevan liunneen ja partikkelimaisen orgaanisen hiilen. Se kuvaa siten veden sisältämän orgaanisen aineen määrää hiilipitoisuutena.

---

Suomen vesissä orgaanisen hiilen kokonaismäärästä noin 94 prosenttia on liunneessa muodossa, joten käytännössä orgaaninen kokonaishiili ja liuennut orgaaninen hiili ovat lähes sama asia. Orgaaninen kokonaishiili korreloi vahvasti veden väriluvun kanssa.

Hiiltä kulkeutuu vesiin ympäröiviltä maa-alueilta. Suuria hiilen lähteitä ovat suot ja metsät. Järvisedimenteissä on myös suuri hiilivarasto, jonka on arveltu olevan samaa suuruusluokkaa kuin puustoon sitoutunut hiilimäärä. Muita orgaanisen hiilen lähteitä ovat muun muassa vedessä oleva kasviperäinen aines, plankton, bakteerit, hajoava tai kuollut

orgaaninen aines ja pienimolekyyliset orgaaniset yhdisteet. Lisäksi orgaanista ainesta tulee vesistöihin käsiteltyjen jätevesien mukana sekä valumavesien mukana metsistä ja pelloilta. Hajotessaan orgaaninen aines kuluttaa happea (Niemi 2011).

Vuosina 1967–2008 jokien orgaanisen hiilen pitoisuudet olivat Pohjanmaan jokivesistöissä pääosin tasolla 10–30 mg C l<sup>-1</sup> ja Lapin joissa alle 5 mg C l<sup>-1</sup>. Etelän joissa pitoisuudet vaihtelivat paljon, mutta olivat yleisesti välillä 10–20 mg C l<sup>-1</sup> (Niemi 2011).

Suomen järvien orgaanisen hiilen pitoisuus on keskimäärin 12 mg C l<sup>-1</sup>, mutta yli 90 prosentissa Etelä- ja Keski-Suomen järviä pitoisuus on alle 5 mg l<sup>-1</sup>. Tärkein orgaanisen hiilen pitoisuuteen vaikuttava tekijä on soiden osuus valuma-alueen pinta-alasta. Runsashumuksisissa järvissä, jotka ovat yleensä pieniä (alle 1 km<sup>2</sup>), orgaanisen hiilen pitoisuus on korkea, 10–12 mg C l<sup>-1</sup>.

Järvisedimenttien hiilivarastojen tutkimuksessa (Ojala 2007) saatiin järvisedimenttien keskimääräiseksi hiilivarastoksi 19 kiloa neliömetrille (kg m<sup>-2</sup>) ja keskimääräiseksi hiilen varastoitumisnopeudeksi 2,0 grammaa neliömetrille vuodessa (g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>). Varastot ja varastoitumisnopeudet vaihtelevat järvittäin, hiilivarastot välillä 2–80 kg m<sup>-2</sup> ja hiilen varastoitumisnopeudet välillä 0,2–8,0 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. Yleisesti sedimentin hiilivarastot olivat pienissä järvissä suurempia kuin isommissa järvissä.

Humusjärville on tyypillistä veden ruskea väri. Koska tumma vesi absorboi keväällä auringon valoa tehokkaasti, pintavesi lämpenee kirkkaita vesiä nopeammin ja kesäaikainen lämpötilakerrostuneisuus muodostuu aikaisemmin. Orgaanisen hiilen hajotus kuluttaa happea. Humushapot laskevat veden pH-arvoa, yleensä se on noin pH 6–6,5. Humusjärvien hapettomassa sedimentissä ja alusvedessä muodostuu runsaasti metaania ja hiilidioksidia.

Veden väri ei kuitenkaan suoraan vaikuta kasviplanktontuotannon suuruuteen.

Bakteerit käyttävät ravinnokseen humusta ja eläinplankton jossain määrin bakteereja. Pienessä humusjärvessä enimmillään 30–60 prosenttia hiilestä on peräisin mikrobiravintoketjusta (Paula Kankaala. Humuksen vaikutus järvien hiilenkiertoon ja ravintoverkkoihin. Esitys Itä-Suomen yliopisto, Biologian laitos).

Yksi tapa tarkastella ravintoverkkoja ja -ketjuja on mitata hiilen määriä ja kulkeutumista ravintoketjuissa esimerkiksi luonnon vakaiden isotooppien, kuten hiilen ( $^{13}\text{C}$ ), analysointiin perustuvan tekniikan avulla. Menetelmä sopii mainiosti järviökosysteemien tutkimiseen ja ravintoketjukurinostusten vaikutusten selvittämiseen perinteisten menetelmien rinnalla (Syväranta 2008).

## 2.3 Happi ja lämpötila

Happi on tärkeä ainesosa ilmakehässä, jossa sitä on 21 prosenttia. Luonnossa sitä on runsaasti myös yhdisteinä, kuten vetenä, joka on vedyn ja hapen yhdiste ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Vapaa happi reagoi herkästi monien muiden aineiden kanssa. Se ylläpitää palamista, ja se on myös useimpien eliöiden elämälle välttämätön. Sitä vapautuu kasvien yhteyttämisessä ja kuluu eläinten soluhengityksessä sekä orgaanisen aineen hajoamisessa. Happimolekyyli ( $\text{O}_2$ ) muodostuu kahden happiatomin liitoksesta, ja se esiintyy huoneenlämpötilassa kaasumaisena. Nestehappi ja kiinteä happi ovat väriltään vaaleansinisiä.

Vedessä on happea paitsi vesimolekyyleissä, myös liuenneena kaasuna. Happea liukenee ilmasta suoraan vesimassaan, ja sitä liukenee myös yhteyttämis seurauksena. Juuri tämä liuennut happi on elintärkeää monille vesieliöille, kuten kaloille. Tullakseen toimeen kalat tarvitsevat tietyn happipitoisuuden ( $\text{mg l}^{-1}$ ), joka vaihtelee

lajin mukaan. Hapen liukenemisaste veteen riippuu lämpötilasta. Esimerkiksi 0 asteessa ( $^{\circ}\text{C}$ ) veden kyllästyshapen pitoisuus on  $14,6 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ , 10 asteessa pitoisuus on  $11,3 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$  ja 20 asteessa  $9,1 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ . Kyllästysaste saattaa ylittää 100 prosenttia esimerkiksi voimakkaan yhteyttämisen aikana päivällä.

Lumi ja jääpeite eristävät tehokkaasti sekä yhteytystoiminnan että hapen liukenemisen ilmasta veteen. Eristyksen aikana kalojen ja muiden vesieliöiden täytyy tulla toimeen sillä happivarannolla, joka vedessä tai sedimentissä kulloinkin vallitsee, ellei lisähapeta tule pinta- ja pohjavesien valumien kautta. Mitä pitempi on eristyksen aika, sitä vähemmäksi happivarannot hupenevat. Ne saattavat jopa loppua sellaisista järvistä, joissa hapeta kuluu runsaasti. Happi voi loppua, jos eristävä jää ja lumipeite tulevat ennen kuin vesi on ehtinyt kunnolla jäähtyä ja ne pysyvät pitkään.

Veden lämmitessä eliöiden hapen tarve kasvaa, koska soluhengitys kiihtyy. Siten lämpimässä vedessä esimerkiksi kalat tarvitsevat ja kuluttavat biomassaa kohti suhteellisesti enemmän liuennutta hapeta kuin viileässä. Koska kalat ovat vaihtolämpöisiä, niiden elintoiminnot hidastuvat veden viilentyessä ja kiihtyvät veden lämmitessä. Jos vesi lämpenee liikaa, kalat lakkaavat syömästä, jotta energiaa ei kulu muuhun kuin hengitykseen eli hapenottoon. Eri kalalajit viihtyvät ja säilyvät hengissä erilaisissa lämpötiloissa ja happipitoisuuksissa (taulukot 1 ja 2). Mädin ja vastakuoriutuneiden kalojen ympäristövaatimukset ovat suuremmat kuin aikuisten: niiden viihtyvyys- ja eloonjäämisalue on lämpötilan ja happipitoisuuden osalta kapeampi.

Hengittäessään kalat kuluttavat hapeta ja palamistuotteena on hiilidioksidi, jota syntyy  $1,38$  grammaa jokaista kulutettua happigrammaa kohti.

---

Veden happipitoisuus voidaan määrittää milligrammoina litrassa ( $\text{mg l}^{-1}$ ) tai kyllästysprosenttina käyttäen titrimenetelmää tai elektrokemiallista happimittaria.

Titrimenetelmä tunnetaan Winklerin menetelmänä. Näytteeseen lisätään mangaani-ioneja (Mn) (II), ja liuos tehdään alkaliseksi natriumhydroksidilla (NaOH), joka sisältää natriumjodidia (NaI) ja natriumatsidia ( $\text{NaN}_3$ ). Näytteeseen liuennut happi hapettaa muodostuneen valkoisen mangaanihydroksidisakan ( $\text{Mn(OH)}_2$ ) mangaani (IV) oksidihydroksidiksi ( $\text{MnO(OH)}_2$ ). Sakan väri muuttuu ruskeaksi. Kun näyte tehdään happamaksi, sakka liukenee ja mangaani muuttuu kahden arvoiseksi. Samalla näytteeseen vapautuu liuennutta happea vastaava ekvivalenttimäärä jodia, joka titrataan tiosulfaatilla.

Happimittareiden toiminta perustuu optiikkaan.

---

**Taulukko 1.** Eri kalalajien optimi- ja eloonjäämislämpötilat (Lehtonen 2006).

Kalalaji	Optimilämpötila $^{\circ}\text{C}$	Tappava lämpötila $^{\circ}\text{C}$
Ahven	13-22	26-34
Ankerias, kiiski, lahna, mutu, pasuri, sorva, särki, toutain, turpa, törö	19	28-30
Harjus, kivennuoliainen, kolmipiikki, kymmenpiikki, made, nahkiainen, pikkunahkiainen, seipi, simput, säyne	12-19	> 28
Karppi, suutari, ruutana	22-28	> 33
Kivisimppu, lohi, muikku, siika, taimen	7-18	> 24
Kuha	18-28	34-39
Nieriä	4-15	22-27

**Taulukko 2.** Eri kalalajien optimi- ja eloonjäämishappipitoisuudet (Lehtonen 2006).

Kalalaji	Normaali hapen tarve mg l <sup>-1</sup>	Hapen tappava raja mg l <sup>-1</sup>
Ahven, harjus, kuha, made, toutain, turpa, törö	7-10	< 2
Ankerias, karpپی, lahna, pasuri, ruutana, suutari,	1-4	< 1
Hauki, kiiski, sorva, särki	3-7	< 2
Kivenuoliainen, kivisimppu, lohi, muikku, muttu, nieria, siika, taimen	10-16	< 3

Perinteisen käsityksen mukaan hapen pitoisuus vaikuttaa ratkaisevasti fosforin liikkeisiin vesistöissä. Hapekkaassa ympäristössä fosfori saostuu sedimenttiin ja hapettomassa liukenee veteen. Esimerkiksi fosforin ja raudan saostumis- ja liukenemisreaktiot ovat tiiviisti kytköksissä toisiinsa. Fosfori sitoutuu löyhästi rautahydroksidikomplekseihin, joista se irtautuu pelkistävässä olosuhteissa.

Tämä "Mortimerin malli" on asetettu 2000-luvulla osittain kyseenalaiseksi. Ainakaan järvissä hapetushoito ei vähentänyt fosforin sisäkuormitusta ja veden fosforipitoisuus oli riippumaton alusveden happitilanteesta. Hapetusta voitiin perustella vain kalojen elinympäristön laajentamisella (Hupfer & Lewadowski 2008, Sarvala 2010).

## 2.4 Ravinteet

### 2.4.1 Fosfori

#### 2.4.1.1 Fosforin esiintyminen luonnossa

Fosforilla (P) on tärkeä tehtävä kasvin energia-aineenvaihdunnassa. Fosfori on tärkeä osa ATP:ssa eli adenosinitrifosfaatissa, joka toimii solujen välittömänä energianlähteenä. ATP hajoaa solun energiaa vaativissa tapahtumissa, jolloin se luovuttaa energiaa kasvin

kehitykseen ja kasvuun. Jos fosforia on saatavilla liian vähän, se ilmenee heikentyneenä kasvuna.

Fosforia esiintyy luonnossa liukoisena fosfaattifosforina ja kiintoaineeseen sitoutuneena partikkelimaisena fosforina, jotka yhdessä muodostavat kokonaisfosforin. Lisäksi kokonaisfosforipitoisuuteen sisällytetään näytteeseen mukaan tulevien levien ja eläinplanktonin sisältämä fosfori.

Epäorgaanista fosforia kutsutaan fosfaatiksi ( $\text{PO}_4$ ). Fosfori voi esiintyä vedessä ja sedimentissä erilaisissa kemiallisissa muodoissa, kuten ortofosfaattina ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), fosfaattikomplekseina (polyfosfaatti) tai orgaanisesti sitoutuneena fosforina. Polyfosfaatti on useasta fosforihappotähteestä muodostunut suurikokoinen molekyyli, jonka sidoksissa on huomattava määrä energiaa ja metafosfaatti ( $\text{PO}^{3-}$ ).

Tavallisimpia fosfaattilannoitteita ovat superfosfaatti, tuomaskuona ja luujauho. Fosfaatteja käytetään muun muassa pesuaineissa ja hammastahnoissa. Liuennut ja kiintoaineeseen sitoutunut fosfaatti erotetaan suodattamalla.

Liukoinen fosfori eli fosfaattifosfori on leville suoraan käyttökelpoisessa muodossa. Liukoisen fosforin määrä on riippuvainen kokonaisfosforin määrästä. Fosfaattifosfori on alhaisimmillaan kasvukaudella, jolloin levät ja uposlehtiset vesikasvit hyödyntävät sitä tehokkaasti kasvuun.

Vedessä fosfori voi olla liunneena fosfaattifosforina ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ), joka on suoraan levien käytettävissä. Se voi myös olla sitoutuneena esimerkiksi leviin, rautaan, alumiiniin, kalsiumiin ja savihiukkasiin. Myös sedimentin fosfori voi olla eri muodoissa ja sidoksissa muihin aineisiin.

Fosfori esiintyy vedessä eri muodoissa, kuten

- helppoliukoisena
- rautaan ja alumiiniin sitoutuneena
- kalsiumiin sitoutuneena (vaikealiukoinen)