

**Pro gradu -tutkielma**

**Valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien  
vaikutus järvien tummumiseen**

**Venla Valjakka**



**Jyväskylän yliopisto**

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

29.4.2023

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta  
Bio- ja ympäristötieteiden laitos  
Ympäristötieteen maisteriohjelma

Valjakka Venla Valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien  
vaikutus järvien tummumiseen  
Pro gradu tutkielma: 57 s., 5 liitettä (16 s.)  
Filosofian maisteri Taina Ihaksi, yliopistonlehtori  
Työn ohjaajat: Anssi Vähätalo, yliopistonlehtori Anssi Lensu ja  
väitöskirjatutkija Salla Ahonen  
Tarkastajat: Yliopistonlehtori Anssi Vähätalo ja filosofian tohtori  
Minna Hiltunen

Huhtikuu 2023

---

Hakusanat: ojitus, maatalous, metsätalous, turvemaat, väriluku

Viime vuosikymmenten aikana pohjoisen pallonpuoliskon pintavesissä on ollut havaittavissa tummumista. Tummuminen johtuu lisääntyneestä orgaanisen aineksen ja -hiilen kuormituksesta. Veden värin kasvu kantaa juurensa teollisuuden ilmansaasteiden kontrollointiin ja hapanlaskeuman vähentymiseen. Ilmastonmuutoksen on myös tunnistettu olevan nousevien värilukutrendien taustalla kasvaneiden lämpötilojen ja lisääntyneen sadannan sekä valunnan takia. Viime aikoina myös valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien on havaittu vaikuttavan vesistöjen tummumiseen. Erityisesti ojituksen, etenkin turvemaiden, ja muiden metsätalouden toimenpiteiden on tunnistettu lisäävän vesistöjen humuskuormaa ja siten veden väriä. Vesistöjen tummumisella on haitallisia vaikutuksia pintavesien tilaan, vesiekosysteemeihin sekä juomaveden puhdistukseen. Tässä tutkielmassa tarkasteltiin valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien vaikutusta järvien tummumiseen 24 järven valuma-alueella. Tutkielmassa tarkasteltiin veden väriluvun (mg/l Pt) trendiä vuosien 1990–2022 välillä sekä tehtiin paikkatietoanalyysjä, joissa tarkasteltiin valuma-alueen kokoa, vesialaa, metsäalaa, peltoalaa, ojitusintensiteettiä, metsän ikää tapahtuneiden hakkuiden mittarina, metsien kuusipuuvallaisuutta, turvemaita sekä pohjavesialueita. Paikkatietoanalyysien tuloksia tarkasteltiin suhteessa veden värin muutokseen ja lisäksi tarkasteltiin eroja tummuneiden ja tummumattomien järvien valuma-alueiden välillä. Tutkielmassa huomattiin pienen vesialan omaavien valuma-alueiden järvien tummuvan voimakkaammin. Tutkimuksessa havaittiin myös turvemaiden ja suuremman ojitusintensiteetin voimistavan järvien tummumista. Tutkimuksessa havaittiin tummuneiden järvien valuma-alueilla tapahtuneen enemmän hakkuita, kuin tummumattomien järvien valuma-alueilla. Tulokset vahvistivat aiemmassa tutkimuksessa tehtyjä havaintoja ja herättävät huolta pintavesien tilasta ja nostavat kysymyksiä tarvittavista toimista humuskuormituksen vähentämiseksi pintavesissä. Maankäytön tunnistaminen merkittävänä tekijänä pintavesien tummumiseen tarkoittaa, että maanpeitteen hallinta on tärkeä tapa torjua tummumista.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Mathematics and Science  
Department of Biological and Environmental Science  
Master's Degree Programme in Environmental Science

Valjakka Venla The effect of catchment area land use and properties  
on browning of lakes

MSci Thesis 57 p., 5 appendices (15 p.)

Supervisors: Master of Science Taina Ihaksi, Senior Lecturer  
Anssi Vähätalo, Senior Lecturer Anssi Lensu and  
Doctoral Researcher Salla Ahonen

Inspectors: Senior Lecturer Anssi Vähätalo and Doctor of  
Philosophy Minna Hiltunen

April 2023

---

Keywords: agriculture, drainage, forestry, peatlands, watercolor

Over the past decades, brownification in surface waters in the Northern Hemisphere has been noticeable. Brownification is caused by an increased load of organic matter and carbon. The increase in watercolor is a result of controlling industrial air pollution and the reduction of acid deposition. Climate change has also been identified as being a root cause of rising watercolor trends through increased temperature, precipitation, and runoff. Recently, catchment area land use and properties have also been found to affect brownification. Drainage, especially in peatlands, and other forestry actions have been found to increase the humus load of water bodies and thus increase brownification. Brownification has harmful effects on the condition of surface waters, water ecosystems and the purification of drinking water. This study examined the effect of land use and properties of the catchment area on the brownification of lakes in 24 lakes' catchment areas. The study looked at the trend of watercolor (mg/l Pt) in the study lakes between 1990 and 2022 and carried out geospatial data analyses, which looked at catchment area's size, water area, land area, forest area, field area, drainage intensity, age of the forest as a measure of felling intensity, the proportion of spruce in the forests, peatlands, and groundwater forming areas. The results of the spatial data analyses were examined in relation to the change in watercolor and, in addition, the differences between the catchment areas of browned and non-browned lakes were examined. The study found that lakes in catchment areas with a small water area experienced more browning. The study also found that peatlands and higher drainage intensity strengthen the browning of the lakes. The study also found that more tree felling took place in the catchment areas of browned lakes than in the catchment areas of non-browned lakes. The results confirmed observations made in previous studies and raised concern about the state of surface waters and questions about the necessary actions to reduce humus load into surface waters. Recognizing land use as a significant factor in surface water browning means that land cover management is an important way to manage browning.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>TUTKIMUKSEN TAUSTA</b> .....	<b>3</b>
2.1	Veden väri.....	3
2.2	Valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien vaikutus veden väriin.....	4
2.3	Tummumisen vaikutukset .....	6
2.3.1	Järvien tummumisen vaikutukset ekosysteemitasolla.....	6
2.3.2	Järvien tummumisen vaikutukset ihmisiin.....	8
<b>3</b>	<b>AINEISTO JA MENETELMÄT</b> .....	<b>9</b>
3.1	Aineisto .....	9
3.1.1	Tutkimusjärvien valinta .....	9
3.1.2	Käytetyt paikkatietoaineistot .....	12
3.2	Tutkimusasetelma ja menetelmät.....	13
3.2.1	Tummumisen tarkastelu .....	13
3.2.2	Valuma-alueiden maankäytön ja ominaisuuksien tarkastelu	14
3.2.3	Ojituksen tarkastelu .....	14
3.2.4	Hakkuiden tarkastelu .....	14
3.2.5	Kuusipuuvaltaisuuden tarkastelu .....	15
3.2.6	Turvemaan, peltoalan, vesialan ja maa-alan tarkastelu .....	16
3.2.7	Pohjaveden muodostumisalueiden tarkastelu .....	16
3.2.8	Valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien tilastollinen tarkastelu .....	17
<b>4</b>	<b>TULOKSET</b> .....	<b>18</b>
4.1	Veden väri ja järvien tummuminen .....	18
4.2	Tummumista selittävät tekijät .....	21
4.2.1	Valuma-alueen ala .....	21
4.2.2	Valuma-alueen metsäala .....	23
4.2.3	Valuma-alueen peltoala .....	25
4.2.4	Valuma-alueen vesiala .....	26
4.2.5	Ojitus .....	28
4.2.6	Hakkuut.....	31
4.2.7	Kuusipuuvaltaisuus.....	40
4.2.8	Turvemaat .....	46
4.2.9	Pohjaveden muodostumisalueet.....	49
<b>5</b>	<b>TULOSTEN TARKASTELU</b> .....	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>55</b>
	<b>LIITE 1 Tutkimusjärvien väriluvut</b> .....	<b>62</b>

<b>LIITE 2 Väriluvun trendikuvaajat tutkimusjärvissä.....</b>	<b>63</b>
<b>LIITE 3 Valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien tunnusluvut koko aineistossa .....</b>	<b>72</b>
<b>LIITE 4 Valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien ja veden värin muutoksen välisen yhteyden regressioanalyysin tulokset .....</b>	<b>74</b>
<b>LIITE 5 Valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien tunnusluvut tummuneiden ja tummumattomien järvien valuma-alueilla .....</b>	<b>76</b>

## LYHENTEET

DOM	Liuennut orgaaninen aine (eng. <i>dissolved organic matter</i> )
DOC	Liuennut orgaaninen hiili (eng. <i>dissolved organic carbon</i> )

# 1 JOHDANTO

Viime vuosikymmenten aikana pohjoisen pallonpuoliskon pintavesien liuenneen orgaanisen aineen (DOM, eng. *dissolved organic matter*) ja liuenneen orgaanisen hiilen (DOC, eng. *dissolved organic carbon*) pitoisuudet ovat kasvaneet. Tämä on johtanut pintavesien tummumiseen (Kritzberg ja Ekström 2012, Blanchet ym. 2022). Myös raudan pitoisuuksien on havaittu kasvaneen vesistöissä viime vuosikymmenten aikana ja osaltaan lisäävän veden väriä (Blanchet ym. 2022). Tämä tummumiseksi tai ruskettumiseksi (eng. *browning* tai *brownification*) kutsuttu ilmiö on havaittavissa niin järvissä kuin virtavesissäkin (Klante ym. 2021). Tunnistettuja syitä pintavesien tummumiselle ovat vähentynyt hapanlaskeuma, ilmastonmuutos ja muutokset maankäytössä sekä näiden tekijöiden väliset monimutkaiset vuorovaikutussuhteet (Eklöf ym. 2015, Lepistö ym. 2021, Anderson ym. 2022).

Hapanlaskeuman vähentymisen ja siitä seuranneen happamoitumisesta toipumisen on havaittu olevan yksi tärkein pintavesien tummumiseen vaikuttava tekijä (de Wit ym. 2016, Anderson ym. 2022). Teollisuuden ilmansaasteiden, rikkidioksidin (SO<sub>2</sub>) ja typenoksidien (NO<sub>x</sub>), kontrollointi on vähentänyt ilmakehän hapanlaskeumaa ja johtanut vesistöjen pH-arvojen nousuun. Orgaanisen aineen liukoisuus lisääntyy pH:n noustessa, kun karboksyylihapot dissosioituvat karboksylaatti-ryhmiksi. Karboksylaattiryhmät myös sitovat heikosti liukenevaa rautaa itseensä liukoiseen muotoon, jolloin liukoinen rauta kasvaa vesistöissä ja lisää osaltaan veden väriä (Curtin ym. 2016). Vähentynyt hapanlaskeuma ei kuitenkaan yksinään riitä selittämään pitkäaikaista tummumista (Škerlep ym. 2020).

Ilmastonmuutoksen myötä sateet ja sitä kautta valunta vesistöihin on kasvanut, mikä lisää veden väriä, kun orgaanista ainesta ja rautaa päätyy enemmän vesistöihin. Ilmastonmuutoksen myötä myös lämpötilan nousu lisää pohjoisella pallonpuoliskolla valuntaa (Weyhenmeyer ja Karlsson 2009, Meyer-Jacob ym. 2019).

Myös valuma-alueen maankäytön, erityisesti metsätalouden ja ojituksen, on havaittu vaikuttavan vesistöjen tummumiseen (Holopainen ja Lehikoinen 2022). Maankäytön vaikutusta tummumiseen on lähivuosina tutkittu jonkin verran esimerkiksi Suomessa ja Ruotsissa. Valuma-alueen maankäytön vaikutusta ei kuitenkaan kovin kattavasti ole vielä tutkittu, sillä ilmiö on tuore (Mayer-Jacob ym. 2019).

Tummumista ei ole havaittavissa kaikissa vesistöissä ja tämän voidaan olettaa johtuvan vesistöjen tai niiden valuma-alueiden ominaisuuksista. Tässä tutkimuksessa oli tarkoitus vertailla tummuneiden ja tummumattomien järvien valuma-alueiden ominaisuuksia ja maankäytön eroja. Tutkimus rajattiin Kymenlaakson, Etelä-Karjalan, Etelä-Savon ja Päijät-Hämeen järviin. Tutkimusjärvet sijaitsevat maantieteellisesti suhteellisen lähellä toisiaan, eli voidaan olettaa, että happamoitumisesta toipuminen ja ilmastonmuutos vaikuttavat kaikkiin tutkimusjärviin yhtä lailla, jolloin selitys tummumisen eroille voisi löytyä valuma-alueen maankäytössä tai muissa ominaisuuksissa.

Tummumista tarkasteltiin käyttäen veden värilukuja (mg/l Pt) 1990-luvulta lähtien. Valuma-alueen maankäytön muutoksia tarkasteltiin 2000-luvulta lähtien helppokäyttöisessä muodossa olevan paikkatietoaineiston saatavuuden takia. Tutkimuksessa vertailtiin tummumistrendin suhdetta valuma-alueen maankäyttöön ja ominaisuuksiin sekä tummuneiden ja tummumattomien järvien valuma-alueiden maankäytön ja ominaisuuksien eroja. Tutkielman tarkoituksena oli selvittää miten valuma-alueen maankäyttö ja ominaisuudet vaikuttavat järvien tummumiseen. Tämä pyrittiin selvittämään vastaamalla tutkimuskysymyksiin:

1. Vaikuttaako järven luontainen tummuus tummumiseen?
2. Onko valuma-alueen koolla merkitystä tummumiseen?
3. Onko valuma-alueen metsä-, pelto- tai vesialalla merkitystä tummumiseen?
4. Vaikuttaako valuma-alueen ojitus tummumiseen?
5. Vaikuttavatko valuma-alueella tapahtuneet hakkuut tummumiseen?
6. Onko valuma-alueen kuusipuuvallaisuudella vaikutusta tummumiseen?
7. Vaikuttaako valuma-alueen turvemaan osuus tummumiseen?
8. Vaikuttavatko pohjaveden muodostumisalueet järvien tummumiseen?



Tutkimushypoteesina oletettiin, että valuma-alueen maankäyttö ja ominaisuudet vaikuttavat järvien tummumiseen ja, että tummuneiden ja tummumattomien järvien valuma-alueiden maankäytössä ja ominaisuuksissa on eroja. Nollahypoteesina oli, ettei valuma-alueen maankäyttö ja ominaisuudet vaikuta järvien tummumiseen ja, ettei valuma-alueiden maankäytössä tai ominaisuuksissa ole eroa tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä. Tutkimushypoteesina oli, että luontaisesti tummat järvet tummuvat kirkkaita vesistöjä voimakkaammin ja, että suuren valuma-alueen omaavat järvet tummuvat herkemmin. Tutkimushypoteesina oli myös, että järvet, joiden valuma-alueilla on paljon metsä- tai peltoalaa tummuvat voimakkaammin. Suuren vesialan puolestaan oletettiin suojaavan järviä tummumiselta. Ojituksen, hakkuiden, runsaan kuusipuuvaltaisuuden sekä turvemaa-alan oletettiin lisäävän järvien tummumista. Pohjaveden muodostumisalueiden oletettiin suojaavan järviä tummumiselta.

## 2 TUTKIMUKSEN TAUSTA

### 2.1 Veden väri

Veden ruskea väri tulee ympäröivästä maaperästä peräisin olevasta hajoavasta orgaanisesta materiaalista ja raudasta (Škerlep 2021). Humuspitoisuus on isoin veden väriin vaikuttava tekijä. Humuspitoisuus mitataan DOC:n tai orgaanisen kokonaishiilen (TOC eng. *total organic carbon*) avulla (Aroviita ym. 2019). Veden väri on tärkeä indikaattori järvien vedenlaadusta ja ekosysteemin toiminnasta (Estlander ym. 2021).

Pintavesien tummuminen johtuu orgaanisen aineksen (OM, eng. *organic matter*) pitoisuuden kasvusta vesistöissä (Lepistö ym. 2021). Tummumiskehitystä voidaan mitata veden värin (mg/l Pt) ja orgaanisen hiilen (OC, eng. *organic carbon*) avulla (Eklöf ym. 2015). Veden väriluvulla (mg/l Pt) kuvataan veteen liuenneiden värillisten aineiden määrää, tärkeimpiä näistä värillisistä aineista ovat humus ja rauta. Yleisiä tummumista kuvaavia parametrejä ovat myös DOC:n ja orgaaninen kokonaishiili (TOC) (Aroviita ym. 2019, Lepistö ym. 2021).

DOC:n pitoisuuksien mittaaminen yksin ei kuvasta veden värin muutoksia ja onkin havaittu, että muutokset veden värissä voivat olla voimakkaampia kuin muutokset pelkästään hiilen pitoisuuksissa. Tämä johtuu siitä, että myös raudan konsentraatiot ovat nousseet, ja myös raudan on havaittu lisäävän veden väriä (Sarkkola ym. 2013). DOM:n lisääntyneet pitoisuudet aiheuttavat muutoksia myös raudan liukoisuuteen ja liikkuvuuteen. Raudan pitoisuuksien kasvun uskotaan johtuvan muuttuneista redox-olosuhteista ja sitä kautta lisääntyneistä liukoisen raudan pitoisuuksista (Sarkkola ym. 2013). Myös lisääntyneet orgaanisen aineksen (OM) pitoisuudet tuovat lisää rautaa pintavesiin, sillä rauta ja hiili ovat sitoutuneet toisiinsa maaperässä (Škerlep 2021). Lisäksi lisääntyneet sateet ja kasvaneet lämpötilat, erityisesti syystalvella, lisäävät raudan pitoisuuksia pintavesissä lisääntyneen humuksen hajoamisen ja huuhtoutumisen vuoksi (Sarkkola ym. 2013).

## **2.2 Valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien vaikutus veden väriin**

Erityisesti valuma-alueella tapahtuvan ojituksen on havaittu kasvattavan DOC:n, raudan (Estlander ym. 2021) ja orgaanisen kokonaishiilen (TOC) (Nieminen ym. 2021) pitoisuuksia ja siten lisäävän veden väriä. Etenkin luonnostaan vähärautaiset järvet ovat herkkiä valuma-alueen ojituksen veden väriä nostattavalle vaikutukselle. Ojitus vaikuttaa veden väriin voimakkaimmin turvemaavaltaisilla valuma-alueilla, sillä turvemaidella orgaanisen hiilen ja raudan pitoisuudet ovat suuria (Estlander ym. 2021). Metsien ojitus heikentää vesistöjen ekologista tilaa lisäämällä kerrostuneisuutta ja tummentamalla vesiä. Ojapituuden on havaittu lisäävän veden väriä (Holopainen ja Lehikoinen 2021).

Myös metsätaloudella on havaittu olevan kielteinen vaikutus pintavesien tilaan (Drinan ym. 2013, Hughes ja Quinn 2019, Nieminen ym. 2021, Härkönen ym. 2023). Tutkimuksessa on osoitettu metsätalouden selkeä, haitallinen vaikutus erityisesti metsitetyillä turvemaidella pintaveden laatuun (Drinan ym. 2013). Puiden poistaminen myös heikentää maan imukykyä ja näin lisää valuntaa vesistöihin (Duffy ym. 2020).

Metsän hakkuilla on havaittu olevan vesistöjen liukoista hiiltä ja rautaa lisäävä vaikutus. Erityisesti avohakkuiden on todettu vaikuttavan pintavesien laatuun ja lisäävän veden väriä. Turvemaat ja hakkuutähteen kertyminen pintavesiin sekä kaadettujen alueiden suotovesi lisäävät liukoisen hiilen pitoisuuksia lähivesistöissä. Myös lisääntynyt turvemaan häiriö hakkuiden aikana todennäköisesti pahentaa valuntaa järviin (Drinan ym. 2013, Härkönen ym. 2023). Lisäksi puuntuotannon tehostaminen ja metsittäminen edesauttaa vesistöjen tummumista (Nieminen ym. 2021). Kuusten määrän kasvun valuma-alueilla on huomattu selittävän maankäytön merkitystä pintavesien tummumisen taustalla (Hughes ja Quinn 2019, Škerlep ym. 2020). Metsätalouden haitallinen vaikutus pintaveden laatuun on selkeimmin nähtävissä metsitetyillä turvemaidella ja erityisesti turvemaavaltaiset valuma-alueet omaavat järvet ovatkin tummuneet (Drinan ym. 2013).

Metsänhoidon toimenpiteiden, kuten hakkuiden ja ojituksen, vaikutukset eivät aina näy pintavedessä heti (Schmidt ym. 2021). Ojitus ja muut metsätalouden toimenpiteet näkyvät vesistöissä usein voimakkaimmin vasta vuosien, jopa vuosikymmenten jälkeen (Škerlep 2021). On todettu, että metsätalous, erityisesti ojitus ja hakkuut sekä metsitys voivat aiheuttaa tahattomia ympäristönsuojellisia kompromisseja, jotka voivat haitata EU:n vesipolitiikan puitedirektiivin tavoitteiden saavuttamista (Duffy ym. 2020). Metsittämisellä pyritään muun muassa hillitsemään ilmastonmuutosta, mutta tutkimus on osoittanut, että tällä voi samaan aikaan olla haitallisia vaikutuksia pintaveden laatuun, esimerkiksi metsityksen edellyttäessä ojitusta.

Maaperällä on huomattu olevan vaikutusta järvien tummumiseen. Borealisella vyöhykkeellä kosteita turvemaita on runsaasti, ja ne ovat merkittäviä orgaanisen hiilen (OC) lähteitä vesistöille. Turvemaiden osuuden valuma-alueella on havaittu lisäävän orgaanisen aineen (OM) ja orgaanisen hiilen (OC) pitoisuuksia pintavesissä (Arvola ym. 2017). Erityisesti turvemaita ojitetaan metsätuotannon parantamiseksi (Sikström ja Hökkä 2016), jolloin valunta ja orgaanisen aineen kuormitus kasvaa vesistöissä.

Metsätalouden lisäksi myös maatalouden on havaittu olevan kytköksissä pintavesien tummumiseen (Škerlep ym. 2020, Klante ym. 2021, Holopainen ja Lehikoinen 2022). Peltoviljely lisää veden väriä, pH:ta ja ravinnekuormaa erityisesti fosforin ja typen osalta.

Myös valuma-alueen muut ominaisuudet vaikuttavat järvien tummumiseen. Pienillä valuma-alueilla tummumisen on havaittu olevan voimakkaampaa kuin suurilla (de Wit ym. 2016). Lisäksi toisten vesistöjen sijaitseminen valuma-alueella voi vaikuttaa tummumiseen. Erityisen herkkiä tummumiselle ovat vesistöt, joiden valuma-alueilla ei sijaitse muita vesistöjä, jotka toimisivat puskurina kuormitukselle (Arvola ym. 2017). Pohjavesivirtauksien on puolestaan havaittu vähentävän DOM:n pitoisuuksia vesistöissä (Chapelle ym. 2016). Pohjavesialueiden sijaitsemisen valuma-alueella voisi siis ajatella suojaavan vesistöjä tummumiselta lähteiden kirkastavan vaikutuksen ansiosta.

## **2.3 Tummumisen vaikutukset**

### **2.3.1 Järvien tummumisen vaikutukset ekosysteemitasolla**

Tummuminen on yhä kasvava uhka vesiekosysteemeille (Eklöf ym. 2015, Lepistö ym. 2021). Biologinen monimuotoisuus on boreaalisissa järviekosysteemeissä vähäistä verrattuna useimpiin muihin vesiekosysteemeihin, mikä tekee niistä erityisen herkkiä häiriöille (Arzel ym. 2020). Järvien tummuminen vaikuttaa negatiivisesti ekosysteemien ravintoverkkoihin ja perustuotantoon (Williamson ym. 2015, Senar ym. 2021, Blanchet ym. 2022). Tummumisen negatiivisen vaikutuksen ravintoverkkoihin on havaittu olevan erityisen voimakasta luontaisesti kirkasvetisissä järvissä (Williamson ym. 2015).

Tummempi pintavesi heikentää valon läpäisyä ja vaikuttaa näin vesiekosysteemien perustuotantoon. Tämä johtaa selkeämpään ja pysyvämpään lämpötilakerrostuneisuuteen ja siten vähähappisuuden kasvuun, joka rajoittaa elinympäristöjä (de Wit ym. 2016, Stetler ym. 2021). Kasvaneen DOC pitoisuuden on havaittu edistävän happikatoa ja rajoittavan perustuotantoa erityisesti alusvesikerroksessa muuttuneiden valo-olosuhteiden vuoksi (Brothers ym. 2014).

Pintavesien tummuminen johtaa muutoksiin vesiympäristöjen ravintoverkkorakenteissa, ravinteiden saatavuudessa, pH:ssa ja metallien pitoisuuksissa (Eklöf ym. 2015). Tummuminen voi johtaa myös biologisen monimuotoisuuden vähenemiseen (Arzel ym. 2020, Senar ym.2021, Zheng ym. 2022). Muun muassa selkärangattomien vähenemisen ja tummumisen välillä on havaittu olevan yhteys. Negatiivisella vaikutuksella selkärangattomiin voi olla merkittäviä seurauksia koko boreaalisten vesiekosysteemien toiminnalle, sillä ne toimivat monien petojen, kuten petokalojen ja vesilintujen tärkeänä ravinnonlähteenä (Arzel ym. 2020).

Tummumisen on havaittu vaikuttavan myös kasviplanktoniyhteisön rakenteeseen järvissä. Järvien tummuessa kasviplankton, joka selviää ja menestyy tummemmissa vesissä, runsastuu. Kirkkaammassa vesistöissä tummumisen on havaittu korvaavan piileviä syanobakteereilla ja tummemmissa syanobakteereilta tilaa valtaavat mikсотrofiset lajit (Senar ym.2020). Tummuminen vähentää myös mikrobiyhteisön lajirikkautta ja kasvattaa tyyppeä kierrättävien mikro-organismien kasvua. Mikrobiomilla on elintärkeä rooli materiaalikierrossa ja ravintoverkoston rakentamisessa. Tummuminen vaikuttaa hiilen lähteisiin ja muuttaa vedenalaisia valo-olosuhteita ja näiden yhteisvaikutus on havaittu mikrobiomissa (Zheng ym. 2022).

Maaperällä on merkittävä rooli globaalissa hiilen kierrossa (Raza ym. 2021, Li ym. 2023). Metsänhoitokäytäntöjen muutosten on havaittu johtaneen maaperän orgaanisen hiilen merkittävään vähenemiseen lisääntyneen soiden kuivatuksen myötä. Kuivatuksen myötä hiiltä vapautuu ilmakehään hiilidioksidina ja valuu vesistöihin tummentaan niitä (Li ym. 2021, Wang ym. 2021). Maaperän hiilen vähenemisellä on negatiivinen vaikutus maaperän kasvukuntoon ja siten haitallinen vaikutus myös maa- ja metsätalouden tuottavuudelle (Raza ym. 2021).

Hiilen lisäksi maa- ja metsätalousmaiden kuivatuksen on havaittu poistavan maaperästä fosforia, joka osaltaan uhkaa vesien tilaa (Mattila ja Ezzati 2022). Kuivatus lisää maaperästä myös orgaanisen typen valuntaa vesistöihin ja typpidioksidin päästöjä ilmakehään (Hussain ym. 2020). Metsätalouden

kuivatuksen on havaittu yli kaksinkertaistavan maaperän typpidioksidipäästöjä boreaalisilla ravinteikkailla turvemaidilla (Minkkinen ym. 2020).

### 2.3.2 Järvien tummumisen vaikutukset ihmisiin

Pintaveden tummuminen vaikuttaa vesiekosysteemien ekosysteemipalveluihin, kuten kalantuotantoon, virkistyspalveluihin ja juomaveden laatuun (Blanchet ym. 2022). DOM:n on havaittu olevan sidoksissa raudan lisäksi myös muiden metallien, kuten alumiinin, elohopean ja lyijyn kanssa ja lisääntynyt DOM-kuormitus voi lisätä metallien kulkeutumista vesistöihin. Lisääntyneet metallipitoisuudet vaikuttavat kielteisesti niin eliöstöön kuin ihmisten juomaveden laatuun (Kaal ym. 2022).

Kasvaneilla orgaanisen aineen (OM) pitoisuuksilla on negatiivinen vaikutus juomaveden käsittelyyn. Tummempi pintavesi on hankalampaa puhdistaa mikä nostaa myös vedenpuhdistuksen kustannuksia (Eklöf ym. 2015, de Wit. ym 2016, Klante ym. 2021). Pintavesien tummuessa veden puhdistamiseksi kemikaaleja pitää käyttää enemmän, eikä suodattaminen toimi yhtä hyvin. Lisäksi desinfiointista muodostuu haitallisia sivutuotteita ja tarvitaan investointeja suurempaan puhdistuskapasiteettiin tai uusiin käsittelytekniikoihin (de Wit. ym 2016). Kaikki vedenpuhdistuslaitokset eivät pysty teknisesti sopeutumaan tällaisiin muutoksiin (Anderson ym. 2022).

Vesien tummuessa korkeat elohopeapitoisuudet kaloissa voivat lisääntyä, sillä elohopeapitoisuudet ovat korkeita etenkin humusvesissä. Ravintoverkkojen lisäksi tämä vaikuttaa myös ihmisravinnon laatuun (de Wit. ym 2016). Järvien tummuminen voi myös vähentää kalojen rasvahappopitoisuuksia ja näin heikentää kalan ravitsemuksellista laatua (Taipale ym. 2016).

## 3 AINEISTO JA MENETELMÄT

### 3.1 Aineisto

#### 3.1.1 Tutkimusjärvien valinta

Työ aloitettiin keräämällä tietoa pintavesien tilasta ja mittaustuloksista ympäristöhallinnon Hertta-järjestelmästä. Järjestelmään koottua pitkäaikaisdataa veden värin kehityksestä käytettiin selvittämään järvien tummumista vuosien 1990 ja 2022 välillä. Aluksi kartoitettiin Kymenlaakson, Etelä-Karjalan, Etelä-Savon ja Päijät-Hämeen alueelta järviä, joista on 1990–2022 vähintään kymmenen talvinäytteenottokertaa (otettu välillä 15.2.–10.4.), ja joilla on mitattu veden väriluku (mg/l Pt).

Järvien veden väri voi vaihdella vuoden sisällä huomattavasti, minkä vuoksi tutkimuksessa käytetään vain kevättalvella jään pinnan alta otettuja näytteitä. Kevättalven väriarvoista saadaan luotettavin käsitys järven pitkäaikaisesta tummumiskehityksestä, sillä talvella järviin kohdistuva veden väriä lisäävä valunta on suhteellisen pientä ja vakaata sekä vettä haalistavat biologinen ja valokemiallinen hajoaminen alhaista.

Järvijoukosta jätettiin pois matalat (keskisyvyys < 3 m), lyhytviipymäiset (vesimassa vaihtuu useammin kuin kerran viikossa) ja suurikokoiset (pinta-ala > 40 km<sup>2</sup>) järviyypit. Suurikokoiset järviyypit rajattiin pois, sillä niihin voi kohdistua runsaasti erilaista pistekuormitusta, ja suurten järvien eri järvialtaissa mittaustulokset voivat vaihdella suuresti keskenään. Järvijoukosta jätettiin pois myös runsasravinteiset ja runsaskalkkiset järvet, sillä näiden huomattiin olevan savisameita. Savisameus aiheuttaa haasteita väriluvun määrittämisessä suuren turbiditeetin vuoksi ja kuormittava valunta vesistöihin alkaa keväällä jo aiemmin kuin pääasiassa humuskuormittuneilla vesistöillä.

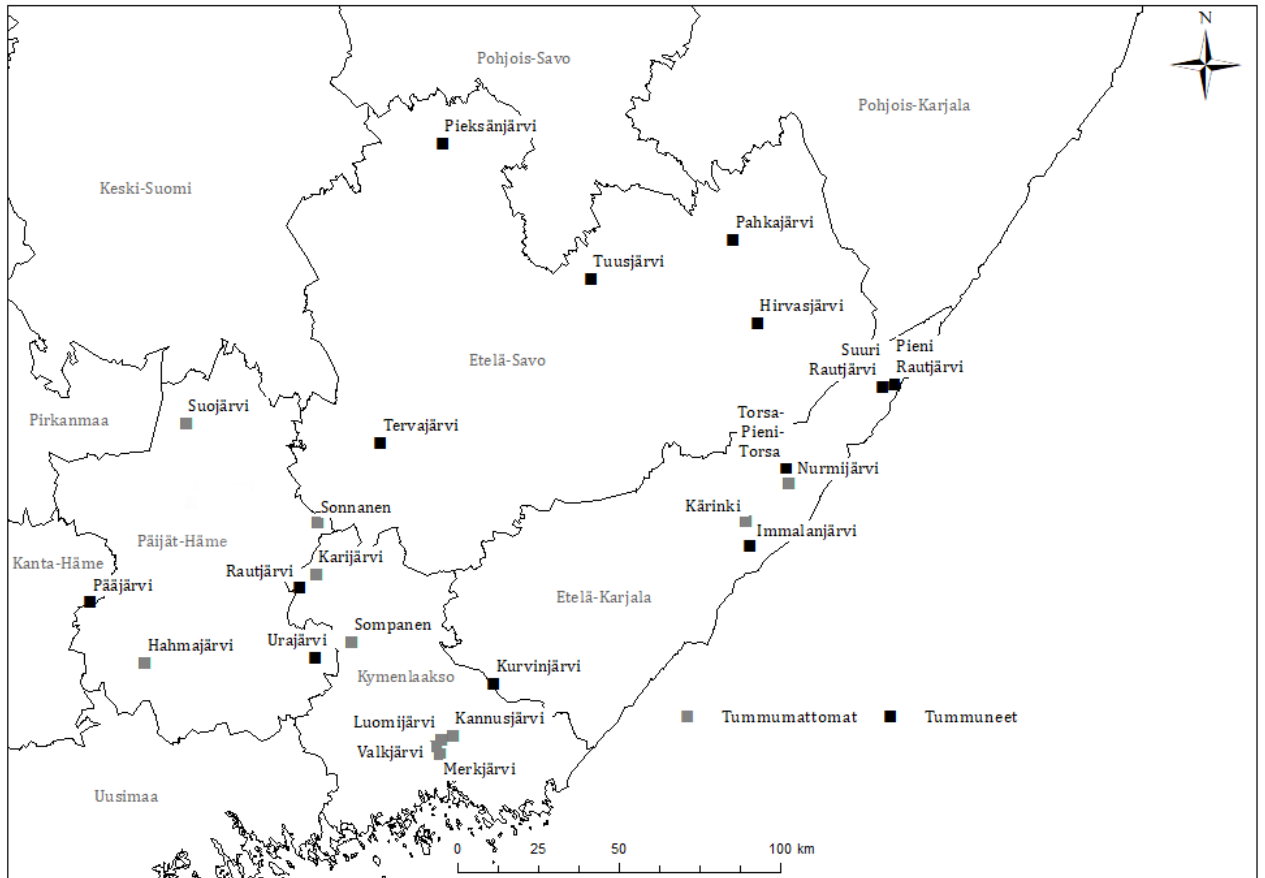
Tutkimukseen valittiin tarkasteltavaksi pääasiassa latvajärviä, sillä ne ovat erityisen herkkiä muun muassa metsätalouden ja turvetuotannon vaikutuksille. Etenkin latvavesistöissä on havaittu tummumista (Kaakkois-Suomen vesienhoidon toimenpideohjelma vuosille 2022–2027).

Maanmittauslaitoksen VALUE-palvelusta ladattiin tutkimusjärvien valuma-alueiden rajaukset. Järvijoukon rajauksessa valittiin tutkittavaksi vain alle 300 km<sup>2</sup> kokoisia valuma-alueita, jotta voitiin vähentää pistekuormituksen vaikutusta. Pienillä valuma-alueilla maankäyttö eroaa enemmän eri valuma-alueiden välillä, jolloin oletettavasti myös tummumiskehitys voi olla vaihtelevaa ja sen pystyy mahdollisesti selittämään eroilla maankäytössä.

Tarkasteluun otettiin myös kaksi järveä, Valkjärvi ja Merkjärvi, joilla muut kriteerit täyttyivät, mutta kriteerit täyttäviä näytteenotokertoja oli alle kymmenen valitulla aikavälillä. Kyseiset järvet haluttiin kuitenkin ottaa tarkasteluun, sillä ne ovat vesienhoidon suunnittelussa määritelty kirkasvetisinä latvavesistöinä erityisen herkiksi ja niiden välillä on havaittu epätasaista tummumiskehitystä, vaikka niiden valuma-alueet ovat rinnakkain. Valkjärvi myös kuuluu Merkjärven valuma-alueeseen. Näiden kahden järven vieressä sijaitsee myös kolmas tutkimusjärvi Luomijärvi.

Järviä valikoitui tutkimukseen 24 (Kuva 1, Taulukko 1). Rautjärvi ja sen valuma-alue kuuluvat osaksi Karijärven valuma-alueita ja kuten yllä mainittu, Valkjärvi ja sen valuma-alue kuuluu osaksi Merkjärven valuma-alueita. Muut tutkimusjärvien valuma-alueet eivät ole päällekkäisiä, eivätkä sisällä muita isompia järviä.





Kuva 1. Kartta tutkimusjärvistä.

Taulukko 1. Tutkimusjärvet ja niiden perustiedot.

Järvi	Kunta	Pintavesityypin lyhenne*	Valuma-alueen pinta-ala (km <sup>2</sup> )
Hahmajärvi	Hollola	Ph	39
Hirvasjärvi	Savonlinna	Vh	4
Immаланjärvi	Imatra	Vh	66
Kannusjärvi	Hamina	Ph	32
Karijärvi	Kouvola	Vh	200
Kurvinjärvi	Luumäki	Rh	33
Kärinki	Ruokolahti	Vh	44
Luomijärvi	Hamina	Vh	6
Merkjärvi	Hamina	Vh	9
Nurmijärvi	Rautjärvi	Vh	45
Pahkajärvi	Enonkoski	Ph	11
Pieksänjärvi	Pieksämäki	Mh	170
Pieni Rautjärvi	Parikkala	Ph	71
Pääjärvi	Hollola	Kh	224
Rautjärvi	Kouvola	Vh	43
Sompanen	Kouvola	Ph	13
Sonnanen	Heinola	Vh	4
Suojärvi	Sysmä	Vh	9
Suuri Rautjärvi	Parikkala	Mh	27
Tervajärvi	Mäntyharju	Mh	37
Torsa-Pieni-Torsa	Rautjärvi	Kh	226
Tuusjärvi	Rantasalmi	Kh	195
Urajärvi	Iitti	Vh	52
Valkjärvi	Miehikkälä	Vh	5

\*Pintavesityyppien lyhenteet: Ph = Pienet humusjärvet, Vh = Pienet ja keskikokoiset vähähumuksiset järvet, Rh = Runsashumuksiset järvet, Mh = Matalat humusjärvet, Kh = Keskikokoiset humusjärvet

Tutkimusjärvet ovat luontaisesti tummuudeltaan erilaisia keskenään. Tutkimusjärvistä on tarkasteluaikana otettu myös eri määrä näytteitä, joissa veden väriluku on määritetty (Liite 1).

### 3.1.2 Käytetyt paikkatietoaineistot

Tutkimuksessa hyödynnettiin Metsäkeskuksen avoimia metsävara-aineistoja valuma-alueiden metsäalojen selvittämiseen. Metsäkeskuksen metsävaratiedoista poimitun metsäalan avulla voitiin tarkastella metsäalan osuutta valuma-alueesta sekä ojitussuhteita, hakkuita, turvemaita ja kuusipuuvaltaisuutta suhteessa metsäalaan. Metsäkeskuksen avoimia aineistoja hyödynnettiin myös metsän iän ja metsien kuusipuuvaltaisuuden selvittämiseen.

Maanmittauslaitoksen maastotietokantaa käytettiin kunkin järven valuma-alueiden sisältämien virtavesiviivojen poimintaan ojitusmäärän laskemiseksi. Maastotietokannan virtavesiviivat sisältävät kaikki 2–5 m leveät ja metsämaalla myös alle 2 m leveät joet, purot ja ojat.

CORINE maanpeite 2018 rasteriaineistoa (erotuskyky 20 \* 20 m) hyödynnettiin valuma-alueiden turvemaa- ja peltomaa-alojen selvittämiseen sekä valuma-alueiden vesi- ja maa-alojen laskemiseen.

Suomen Ympäristökeskuksen avoimista aineistoista haettiin myös pohjaveden muodostumisalueet. Aineistossa pohjavesialueen muodostumisalue on määritelty alueeksi, jolla maakerrokset ovat hyvin vettä johtavia, ja jolla maaperä mahdollistaa veden merkittävän imeytymisen pohjavedeksi sekä pohjavesialueen osat, jotka lisäävät olennaisesti pohjavesimuodostuman pohjaveden määrää.

## **3.2 Tutkimusasetelma ja menetelmät**

### **3.2.1 Tummumisen tarkastelu**

Veden värilukuarvot vuosien 1990 ja 2022 välillä taulukoitiin Microsoft Excel -ohjelmaan (versio 16.41). Excelissä tehtiin kuvaajat järvien tummumistrendistä (Liite 2). Kuvaajien avulla voitiin visuaalisesti tarkastella tummumistrendiä.

Veden värin trendejä tarkasteltiin vertaamalla väriluvun (mg/l Pt) arvoja eri aikapisteiden välillä. Tummumista tarkasteltiin regressioanalyysin ( $Y = bX + a$ ) avulla. Regressioanalyysissä  $Y$  = väriluku,  $X$  = vuosi,  $a$  = veden väri vuonna nolla ja  $b$ :n arvo eli regressiokerroin kuvastaa veden tummumistrendiä. Regressioanalyysin avulla pystyttiin myös vähentämään vedenvärin vuosikohtaisten erojen vaikutus tummumistrendiin.

Veden värin muutoksen tilastollinen analysointi tehtiin IBM SPSS Statistics -tilasto-ohjelmalla (versio 26). Tilastolliseen testaamiseen käytettiin lineaarista regressioanalyysiä. Lineaarilla regressiolla haluttiin selvittää tummumisen tilastollinen merkitsevyys ja suuruus. Tulosta pidettiin tilastollisesti merkitseväenä, mikäli se alitti raja-arvon 0,05.

### 3.2.2 Valuma-alueiden maankäytön ja ominaisuuksien tarkastelu

Valuma-alueiden maankäyttöä tarkasteltiin ArcGIS (ArcMap Advanced 10.8.1) ja QGIS (versio 71912) paikkatieto-ohjelmilla. Aluksi ArcGIS-ohjelmassa luotiin taso, joka sisälsi tutkimusjärvien valuma-alueiden rajaukset, jotka oli ladattu Maanmittauslaitoksen VALUE-palvelusta. Tämän tason avulla voitiin tarkastella maankäyttöä nimenomaan valituilla valuma-alueilla eri aineistoista.

### 3.2.3 Ojituksen tarkastelu

Valuma-alueiden ojitusmääriä tarkasteltiin maastotietokannan virtavesiviivojen avulla. ArcGIS paikkatieto-ohjelmalla laskettiin virtavesiviivojen metrimäärät kullakin valuma-alueella. Tämä tehtiin leikkaamalla *Clip*-työkalulla maastotietokannan virtavesiviivat luodulla valuma-alueiden rajat sisältävällä kerroksella ja yhdistämällä valuma-alueiden spatiaalinen tieto uuteen luotuun leikattuun tasoon *Join*-työkalun avulla. Taso koostettiin yhteen *Dissolve*-työkalulla käyttäen järven nimeä yhdistävänä tekijänä. Tämän jälkeen attribuuttitaulukossa laskettiin *Calculate Geometry* -toiminnolla kunkin valuma-alueen sisältämät virtavesiviivat metreinä (m).

### 3.2.4 Hakkuiden tarkastelu

Valuma-alueilla tapahtuneita hakkuita tarkasteltiin käyttämällä puuston ikää mittarina valuma-alueilla tapahtuneille hakkuille. Valuma-alueiden puuston ikää tarkasteltiin Metsäkeskuksen metsävara-aineiston avulla. Muuttujaksi valittiin hakkuutietojen sijaan puuston ikä, sillä metsänkäsittelyilmoitukset eivät kaikilta osin vastaa alueilla todellisuudessa tapahtuneita metsänkäsittelytoimia. Iän avulla päästiin myös helpommin käsiksi hakkuiden ajankohtaan. Puuston ikään voi hakkuiden lisäksi vaikuttaa esimerkiksi metsäpalot, mutta pääosin taustalla on hakkuut, joten tietoa puuston iästä voidaan pitää riittävänä luotettavana mittarina hakkuille. Tarkasteltaviksi ikäkuvioiksi valikoitui 32 v tai alle, 62 v tai alle ja 82 v tai alle. Näin saatiin selville, oliko valuma-alueilla tapahtunut hakkuita tarkastelujaksolla 1990–2022, 1960–2022 tai 1940–2022.

Puuston iän tarkastelu aloitettiin lataamalla Metsäkeskuksen avoimista aineistoista metsävara-aineistot tutkimusjärvien valuma-alueiden sijaintimaakunnista paikkatietoaineistona. ArcGIS-ohjelmassa metsävara-aineistojen päätasot (*main.stand*) maakunnittain muunnettiin *Export data*-valinnan avulla SHP-tiedostoiksi. SHP-tiedostoista leikattiin *Clip*-työkalulla vain tutkimusjärvien valuma-alueet sisältävä taso, johon yhdistettiin *join*-työkalun avulla valuma-alueiden tiedot sijainnin perusteella. Metsävaratiedoista poimittiin valittujen maakuntien aineistoista *main.treestand*-taulusta *type 2* eli nykyhetkeen laskettu puusto ja yhdistettiin sen sisältämä tieto *Join*-työkalun avulla luotun SHP-tiedostoon käyttäen *standid*-tunnusta yhdistävänä tekijänä. Samaan tiedostoon yhdistettiin *Join*-työkalun avulla vielä maakunnittain *main.streestandssummary*-taulun sisältämä tieto *treestandid*-tiedon avulla. Näistä luotiin *Export data* -toiminnon avulla maakunnittain uudet tasot. Samat vaiheet toistettiin kaikille maakunnille, joiden alueilla tutkimusjärvien valuma-alueet sijaitsevat.

Kaikista maakunnista luodut tasot yhdistettiin *Merge*-työkalun avulla yhdeksi tasoksi, josta eri ikäiset metsäkuviot pomittiin *Field calculator* -toiminnolla. Seuraavaksi *Dissolve*-työkalun avulla järven nimen ja edellisessä vaiheessa luodun uuden sarakkeen perusteella tiedot koostettiin yhteen, jonka jälkeen attribuuttitaulukossa voitiin *Calculate Geometry* -työkalun avulla laskea kokonaispinta-alat (m<sup>2</sup>) valitun ikäisille metsäaloille valuma-alueittain.

### 3.2.5 Kuusipuuvaltaisuuden tarkastelu

Valuma-alueiden metsäkuvioiden kuusipuuvaltaisuutta tarkasteltiin Metsäkeskuksen avoimen metsätiedon metsävarakuvioiden WFS-rajapinnan avulla. QGIS-paikkatieto-ohjelmalla suodatettiin rajapinta-aineistosta metsäkuviot, joilla kuusen osuus oli yli 80 % ja metsäkuviot, joilla kuusen osuus oli yli 50 %. Tämä toteutettiin *Build a query*-valinnan avulla. Aineistot muunnettiin *Export data* -valinnan avulla GPKG-muotoon jatkokäsittelyä varten. GPKG-muotoon muunnetut aineistot leikattiin sisältämään vain tutkimusjärvien valuma-alueet *Clip*-työkalun avulla. Leikkaus tehtiin valuma-alueajoja hieman suuremmalla

alalla. Aineistot muutettiin SHP-tiedostoiksi ja siirrettiin ArcGIS-paikkatieto-ohjelmaan.

ArcGIS-paikkatieto-ohjelmassa tiedostot leikattiin *Clip*-työkalun avulla sisältämään tarkasti vain tutkimusjärvien valuma-alueiden osalta tiedot. Tasoon yhdistettiin *Join*-työkalun avulla valuma-alueiden spatiaalinen tieto. Taso koostettiin yhteen *Dissolve*-työkalun avulla käyttäen järven nimeä yhdistävänä tekijänä. Tämän jälkeen attribuuttitaulukossa voitiin laskea kunkin valuma-alueen sisältämät metsäalat (m<sup>2</sup>), joilla kuusipuuston osuus on yli 50 % ja yli 80 %.

### 3.2.6 Turvemaan, peltoalan, vesialan ja maa-alan tarkastelu

Tutkimusjärvien valuma-alueiden turvema-, pelto, vesi ja maa-aloja tarkasteltiin CORINE maanpeiteaineiston avulla. Suomen Ympäristökeskuksen avoimista aineistoista ladattiin CORINE Land Cover 2018 rasteriaineisto (erotuskyky 20 \* 20 m). Aineisto muunnettiin rasterimuodosta polygonmuotoon *Raster to polygon* -työkalulla käyttäen *Simplify polygons* -valintaa. Luotu polygontaso leikattiin *Clip*-työkalulla tutkimusjärvien valuma-alueiden rajat sisältävällä kerroksella ja yhdistettiin valuma-alueiden spatiaalinen tieto uuteen luotuun leikattuun tasoon *Join*-työkalun avulla. Taso koostettiin yhteen *Dissolve*-työkalun avulla käyttäen järven nimeä yhdistävänä tekijänä. Tämän jälkeen attribuuttitaulukossa voitiin laskea kunkin valuma-alueen sisältämät maankäyttömuodot ja maanpeitetyypit sekä niiden alat (m<sup>2</sup>).

Alat (m<sup>2</sup>) koottiin Exceliin ja pivot-tilaukoinnin avulla laskettiin yhteen halutut tiedot. Turvemaiksi laskettiin avosoiden, turvemaalla sijaitsevien metsien ja turvetuotantoalueiden alat. Pelloiksi laskettiin peltojen ja maataloustukijärjestelmän ulkopuolisten maatalousmaiden alat. Vesialueiksi laskettiin yhteen järvien, jokien ja kosteikoiden alat. Vesialan avulla laskettiin myös valuma-alueiden maa-alat (valuma-alueen ala (km<sup>2</sup>) - valuma-alueen vesiala (km<sup>2</sup>)).

### 3.2.7 Pohjaveden muodostumisalueiden tarkastelu

Pohjaveden muodostumisalueiden tarkastelu tehtiin ArcGIS-paikkatieto-ohjelmalla. Suomen Ympäristökeskuksen avoimista aineistoista haettiin

pohjaveden muodostumisalueet ja leikattiin ne *Clip*-työkalulla tutkimusjärvien valuma-alueiden rajat sisältävällä kerroksella ja yhdistettiin valuma-alueiden spatiaalinen tieto uuteen luotuun leikattuun tasoon *Join*-työkalun avulla. Taso koostettiin yhteen *Dissolve*-työkalun avulla käyttäen järven nimeä yhdistävänä tekijänä. Tämän jälkeen attribuuttitaulukossa voitiin laskea kunkin valuma-alueen sisältämien pohjaveden muodostumisalueiden alat ( $m^2$ ).

### 3.2.8 Valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien tilastollinen tarkastelu

Paikkatietoanalyseistä kootut tiedot koottiin Exceliin, jossa muunnettiin pituudet kilometreiksi (km) ja pinta-alat neliökilometreiksi ( $km^2$ ). Excelissä laskettiin eri muuttujien osuudet suhteessa valuma-alueen pinta-alaan (ala ( $km^2$ ) / valuma-alueen pinta-ala ( $km^2$ )) sekä ojitusintensiteetin, hakkuiden, turvemaiden ja kuusipuuvaltaisuuden suhde valuma-alueen metsäalaan (ala ( $km^2$ ) / valuma-alueen metsäala ( $km^2$ )). Muuttujia haluttiin tarkastella suhteellisina osuuksina valuma-alueesta ja metsäalasta luotettavampien tulosten saamiseksi, sillä valuma-alueet olivat keskenään eri kokoisia.

Excelissä piirrettiin kaaviot regressiokertoimen ja eri muuttujien suhteista sekä kuvaajat muuttujista tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueilla suhteessa valuma-alueen pinta-alaan ja metsäalaan.

Valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien tulosten tilastollinen testaaminen tehtiin SPSS-tilasto-ohjelmalla käyttäen regressioanalyysia väriluvun muutoksen regressiokertoimen ja valuma-alueen ominaisuuden yhteydestä. Tulosta pidettiin tilastollisesti merkitseväenä, mikäli se alitti raja-arvon 0,05.

Valuma-alueiden ominaisuuksien eroja tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä haluttiin myös verrata keskenään, jotta voitiin, nähdä eroavatko ominaisuudet näiden kahden ryhmän välillä. Tämä tehtiin SPSS tilasto-ohjelmassa normaalijakautuneiden muuttujien kohdalla riippumattomalla kahden muuttujan t-testillä ja normaalijakautumattomien muuttujien kohdalla parametrittömällä Mann-Whitneyn U -testillä vertaamalla tummuneiden ja tummumattomien järvien

valuma-alueiden paikkatietoanalyysien tulosten keskiarvoja keskenään. Tulosta pidettiin tilastollisesti merkitseväenä, mikäli se alitti raja-arvon 0,05.

## **4 TULOKSET**

### **4.1 Veden väri ja järvien tummuminen**

Tutkimusjärvissä veden väriluvun keskiarvo vaihteli järvien välillä paljon. Keskimäärin veden väriluku oli 45 mg/l Pt. Keskihajonta oli kuitenkin 42 mg/l Pt ja pienin veden väriluvun keskiarvo oli 3 mg/l Pt, ja suurin 178 mg/l Pt (Liite 3).

Tarkastelluista 24 tutkimusjärvestä 13:ssa oli havaittavissa tilastollisesti merkitsevää tummumista ja taas 11:ssä ei. Regressiokertoimen positiiviset arvot merkitsivät veden tummumista ja negatiiviset arvot veden kirkastumista. Kaikissa tutkimusjärvissä tilastollisesti merkitsevää muutosta veden värissä ei ollut tapahtunut. Regressioanalyysin tuloksista voidaan nähdä järvien tummumistrendin tilastollinen merkitsevyys ja suunta (Taulukko 2).

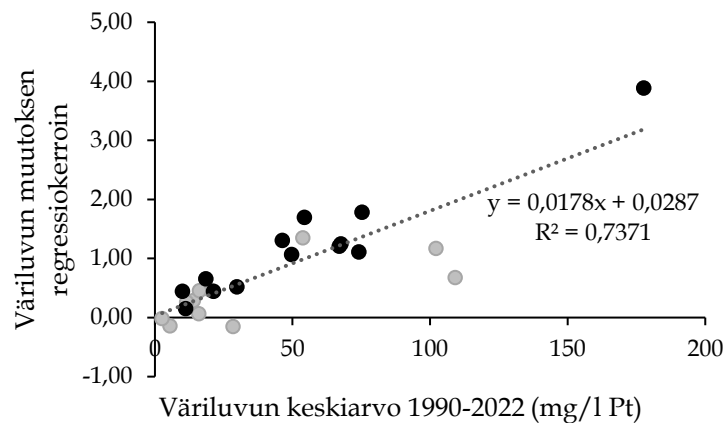


Taulukko 2. Tutkimusjärvien regressioanalyysin tulokset väriluvun kehityksestä 1990–2022 välillä. Tilastollisesti merkitsevät arvot tummennettu.

Järvi	Regressio-kerroin	Keskivirhe	<i>t</i> -arvo	Selitysaste	Tilastollinen merkitsevyys
Hahmajärvi	0,68	0,85	0,80	0,03	0,434
Hirvasjärvi	0,44	0,09	4,80	0,54	<b>&lt;0,001</b>
Immalanjärvi	0,15	0,06	2,47	0,17	<b>0,019</b>
Kannusjärvi	1,17	0,93	1,26	0,11	0,229
Karijärvi	0,29	0,20	1,40	0,13	0,184
Kurvinjärvi	3,89	1,03	3,77	0,56	<b>0,003</b>
Kärinki	0,48	0,23	2,09	0,22	0,053
Luomijärvi	-0,16	0,34	-0,46	0,02	0,656
Merkjärvi	-0,14	0,19	-0,72	0,12	0,509
Nurmijärvi	0,45	0,26	1,76	0,19	0,101
Pahkajärvi	0,52	0,10	5,33	0,74	<b>&lt;0,001</b>
Pieksänjärvi	1,06	0,28	3,86	0,35	<b>&lt;0,001</b>
Pieni Rautjärvi	1,30	0,39	3,36	0,37	<b>0,003</b>
Pääjärvi	1,25	0,21	6,02	0,58	<b>&lt;0,001</b>
Rautjärvi	0,65	0,21	3,14	0,45	<b>0,009</b>
Sompanen	1,35	0,85	1,59	0,20	0,144
Sonnanen	-0,02	0,03	-0,64	0,01	0,528
Suojärvi	0,07	0,14	0,45	0,01	0,656
Suuri Rautjärvi	1,70	0,77	2,19	0,24	<b>0,045</b>
Tervajärvi	1,78	0,38	4,73	0,57	<b>&lt;0,001</b>
Torsa-Pieni-Torsa	1,21	0,43	2,81	0,28	<b>0,011</b>
Tuusjärvi	1,11	0,39	2,87	0,22	<b>0,008</b>
Urajärvi	0,44	0,16	2,78	0,27	<b>0,011</b>
Valkjärvi	0,26	0,31	0,83	0,19	0,467

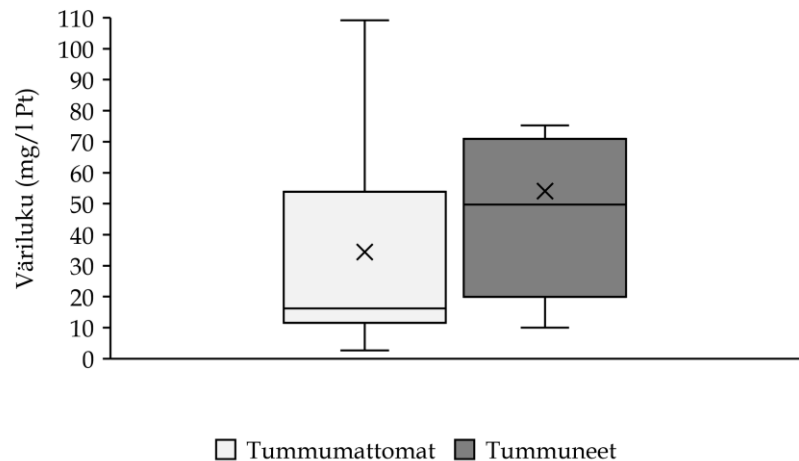
Karijärvi, jonka valuma-alueella sijaitsee myös Rautjärvi, ei ollut tummunut tilastollisesti merkitsevästi, vaikka Rautjärvi oli. Puolestaan Merkjärvi, eikä sen valuma-alueella sijaitseva Valkjärvi olleet tummuneet tilastollisesti merkitsevästi.

Veden väriluvun havaittiin myös vaikuttavan vedenväriluvun muutostrendiin. Regressioanalyysin tulosten (Liite 4) perusteella järvet, joiden väriluku oli korkea, tummuivat voimakkaammin:  $t = 7,86$ ,  $r^2 = 0,74$ ,  $p = 0,0000001$  (Kuva 2).



Kuva 2. Väriluvun keskiarvo 1990–2022 (mg/l Pt) suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,0000001$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

Tilastollisesti merkitsevää eroa väriluvun keskiarvoissa ei havaittu parittaisessa vertailussa tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä (Kuva 3). Tummuneiden järvien väriluvun keskiarvo oli keskimäärin 54 mg/l Pt (keskihajonta 44 mg/l Pt,  $n = 13$ ), ja tummumattomien järvien väriluvun keskiarvo oli keskimäärin 34 mg/l Pt (keskihajonta = 38 mg/l Pt,  $n = 11$ ) (Liite 5). Mann-Whitneyn U -testin mukaan ero ryhmien välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $U = 97, p = 0,150$ .

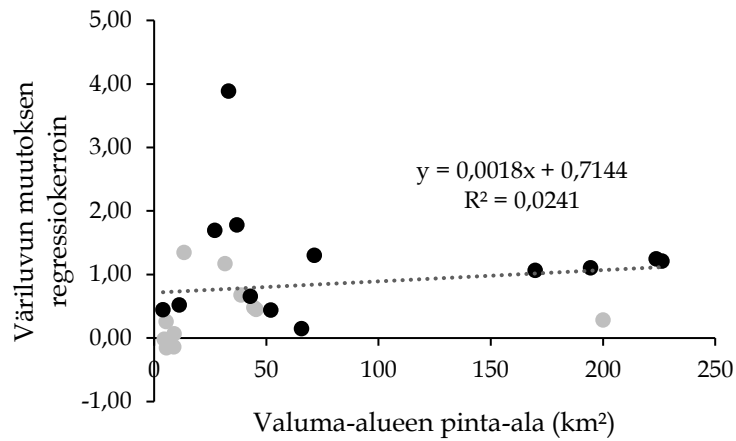


Kuva 3. Väriluvun keskiarvon 1990–2022 ero tummumattomissa ja tummuneissa järvissä ( $p = 0,150$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi. Ympyräsymboli kuvaa poikkeavaa havaintoa.

## 4.2 Tummumista selittävät tekijät

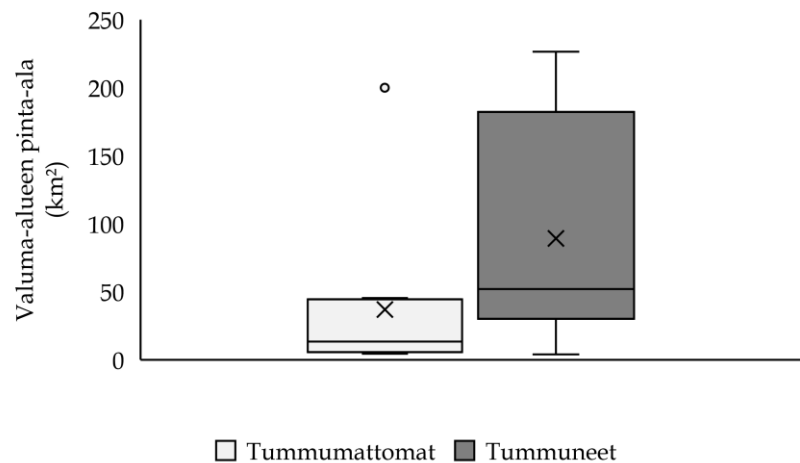
### 4.2.1 Valuma-alueen ala

Tarkastellut valuma-alueet olivat keskenään hyvin eri kokoisia. Pienin tarkasteltu valuma-alue oli alaltaan 4 km<sup>2</sup> ja suurin 226 km<sup>2</sup>. Keskiarvo aineistossa oli 65 km<sup>2</sup> (Liite 3). Valuma-alueen pinta-alan koolla ei havaittu regressioanalyysin tulosten (Liite 4) perusteella olevan vaikutusta järvien tummumiseen:  $t = 0,74$ ,  $r^2 = 0,02$ ,  $p = 0,47$  (Kuva 4).



Kuva 4. Valuma-alueen pinta-ala suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,47$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

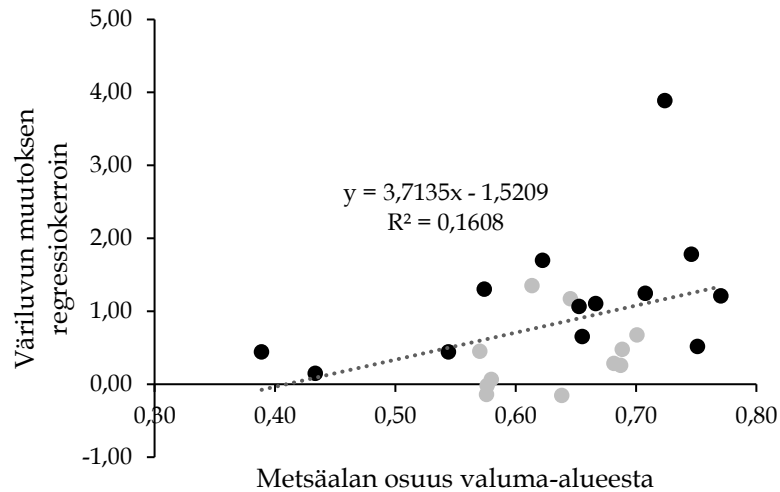
Tilastollisesti merkitsevää eroa valuma-alueiden pinta-aloissa ei havaittu parittaisessa vertailussa tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä (Kuva 5). Tummuneiden järvien valuma-alueiden pinta-ala oli keskimäärin  $89 \text{ km}^2$  (keskihajonta  $83 \text{ km}^2$ ,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueiden oli keskimäärin  $37 \text{ km}^2$  (keskihajonta =  $57 \text{ km}^2$ ,  $n = 11$ ) (Liite 5). Mann-Whitneyn U -testin mukaan ero ryhmien välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $U = 97$ ,  $p = 0,150$ .



Kuva 5. Tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden pinta-alojen ero ( $p = 0,150$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi. Ympyräsymboli kuvaa poikkeavaa havaintoa.

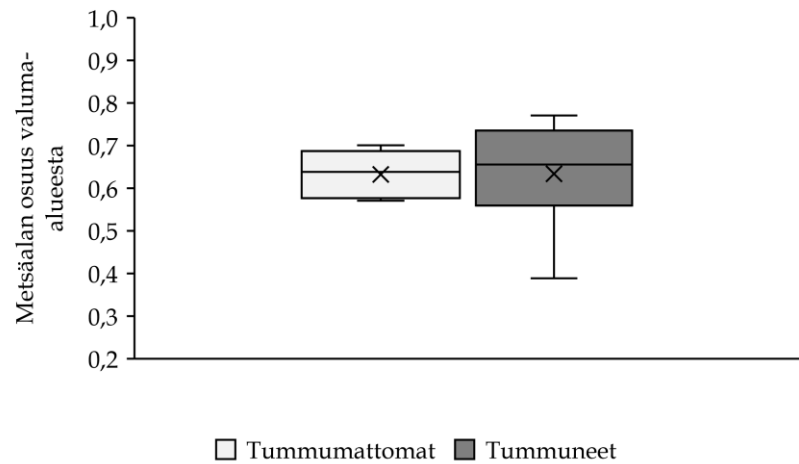
#### 4.2.2 Valuma-alueen metsäala

Tarkastellut valuma-alueet ovat metsävaltaisia: valuma-alueen metsäalan keskiarvo aineistossa oli 63 % ja vaihteluväli 39–77 % (Liite 3). Valuma-alueen metsäalan osuudella ei havaittu regressioanalyysin tulosten (Liite 4) perusteella olevan tilastollisesti merkitsevää vaikutusta järvien tummumiseen:  $t = 2,05$ ,  $r^2 = 0,16$ ,  $p = 0,052$  (Kuva 6).



Kuva 6. Metsäalan osuus valuma-alueesta suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,052$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

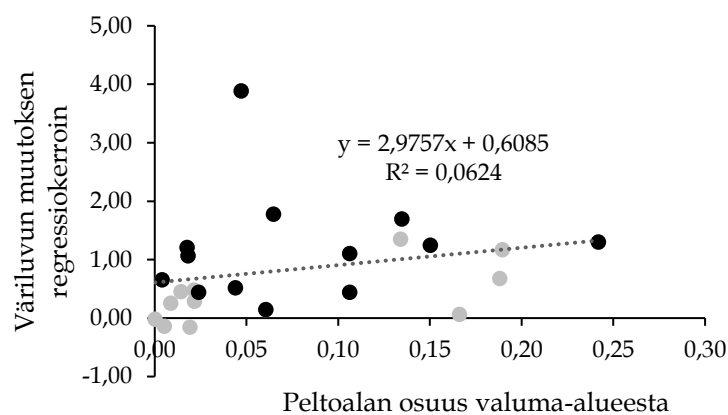
Eroa valuma-alueiden metsäalojen osuudessa ei havaittu myöskään parittaisessa vertailussa tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä (Kuva 7). Tummuneiden järvien valuma-alueilla metsää oli keskimäärin 63 % valuma-alueesta (keskihajonta 12 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueilla keskimäärin 63 % (keskihajonta = 5 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Riippumattomien otosten t-testin mukaan ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $t(22) = -0,027$ ,  $p = 0,978$ , 2-suuntainen.



Kuva 7. Ero metsäalan osuudessa tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueilla ( $p = 0,978$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi.

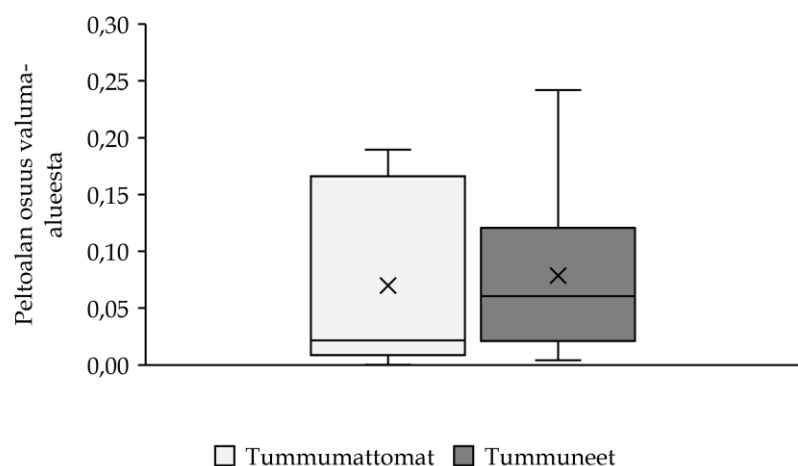
#### 4.2.3 Valuma-alueen peltoala

Peltoalan osuus tarkastelluilla valuma-alueilla oli keskimäärin vain 7 % ja vaihteli aineistossa 0–24 % välillä (Liite 3). Valuma-alueen peltoalan osuudella ei havaittu regressioanalyysin tulosten (Liite 4) perusteella olevan vaikutusta järvien tummumiseen:  $t = 1,21$ ,  $r^2 = 0,06$ ,  $p = 0,239$  (Kuva 8).



Kuva 8. Peltoalan osuus valuma-alueesta suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,239$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailta pisteillä.

Eroa valuma-alueiden peltoalojen osuudessa ei havaittu parittaisessa vertailussa tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä (Kuva 9). Tummuneiden järvien valuma-alueiden peltoalan osuus oli keskimäärin 8 % (keskihajonta 7 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueilla keskimäärin 7 % (keskihajonta = 8 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Mann-Whitneyn U -testin mukaan ero ryhmien välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $U = 85, p = 0,459$ .

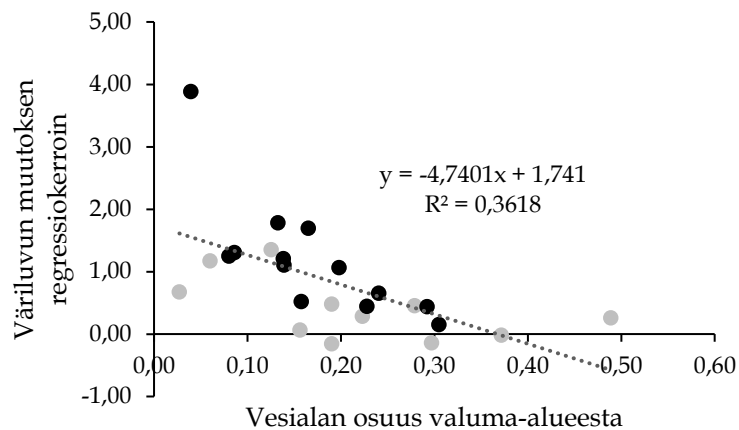


Kuva 9. Ero peltoalan osuudessa tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueilla ( $p = 0,459$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi.

#### 4.2.4 Valuma-alueen vesiala

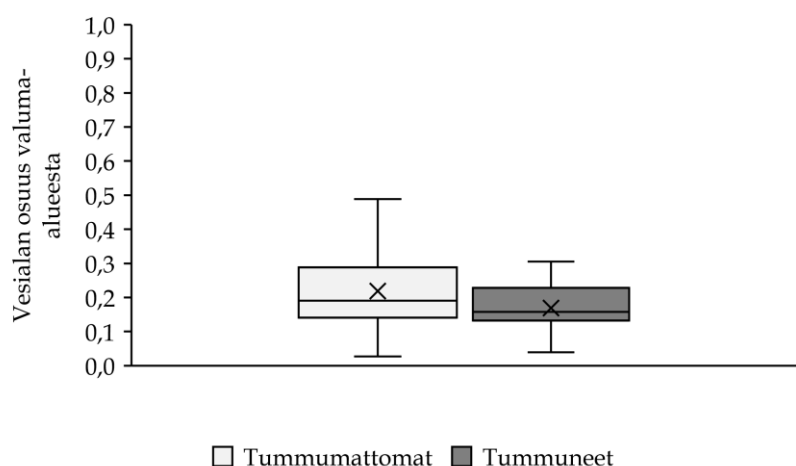
Valuma-alueiden vesialan osuudet vaihtelivat aineistossa 3 % ja 49 % välillä. Keskimäärin valuma-alueen vesialan osuus oli 19 % (Liite 3). Valuma-alueen vesialan osuuden havaittiin vaikuttavan tilastollisesti merkittävästi järvien tummumiseen. Regressioanalyysin (Liite 4) mukaan järven väriluvun muutoksen regressiokertoimella oli negatiivinen riippuvuus valuma-alueen vesialan osuudesta:  $t = -3,53, r^2 = 0,36, p = 0,002$  (Kuva 10).





Kuva 10. Vesialan osuus valuma-alueesta suhteessa järven värluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,002$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

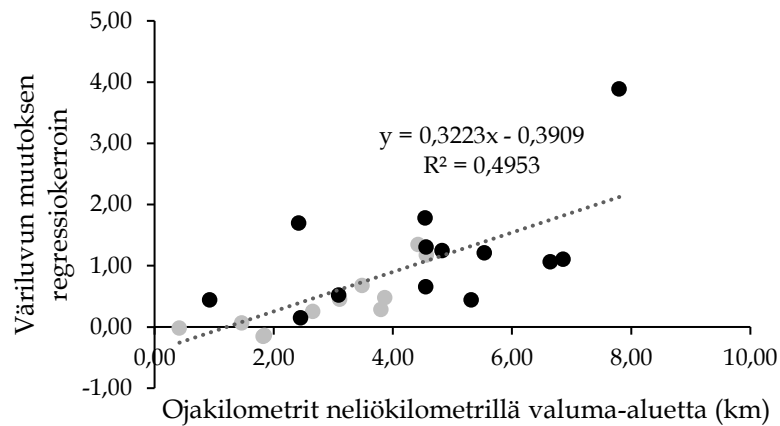
Kuitenkaan tummuneiden järvien valuma-alueilla ei ollut tilastollisesti merkitsevästi pienempää vesialan osuutta (Kuva 11). Tummuneiden järvien valuma-alueilla vesialan keskimääräinen osuus oli 17 % (keskihajonta 8 %,  $n = 13$ ) valuma-alueesta ja tummumattomien järvien vesialan osuus oli keskimäärin 22 % (keskihajonta = 14 %,  $n = 11$ ) valuma-alueesta (Liite 5). Riippumattomien otosten t-testin mukaan ero ei osoittautunut tilastollisesti merkitseväksi:  $t(15, 75) = 1,07$ ,  $p = 0,301$ , 2-suuntainen.



Kuva 11. Ero valuma-alueen vesialan osuudessa tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueilla ( $p = 0,301$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi.

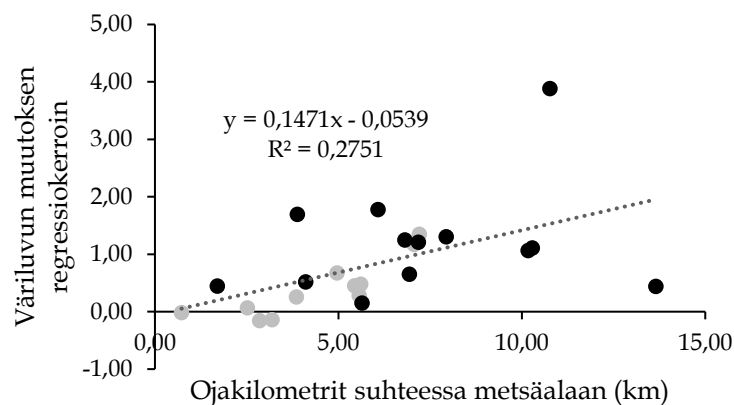
#### 4.2.5 Ojitus

Kaikilla tarkastelluilla valuma-alueilla oli tehty ojituksia. Ojakilometrit neliökilometrillä valuma-alueita olivat keskimäärin 3,79 km ja vaihtelu aineisossa oli 0,42 km ja 7,80 km välillä. Ojakilometrejä neliökilometrillä metsäalaa aineiston valuma-alueilla oli keskimäärin 6,01 km ja vaihtelu aineistossa oli 0,72 km ja 13,66 km välillä (Liite 3). Ojituksen havaittiin olevan tilastollisesti yhteydessä järvien tummumiseen. Regressioanalyysin tulosten (Liite 4) mukaan mitä enemmän valuma-alueen neliökilometrillä on ojakilometrejä, sitä enemmän järvi tummuu:  $t = 4,65$ ,  $r^2 = 0,50$ ,  $p = 0,0001$  (Kuva 12).



Kuva 12. Ojakilometrit neliökilometrillä valuma-alueetta suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,0001$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

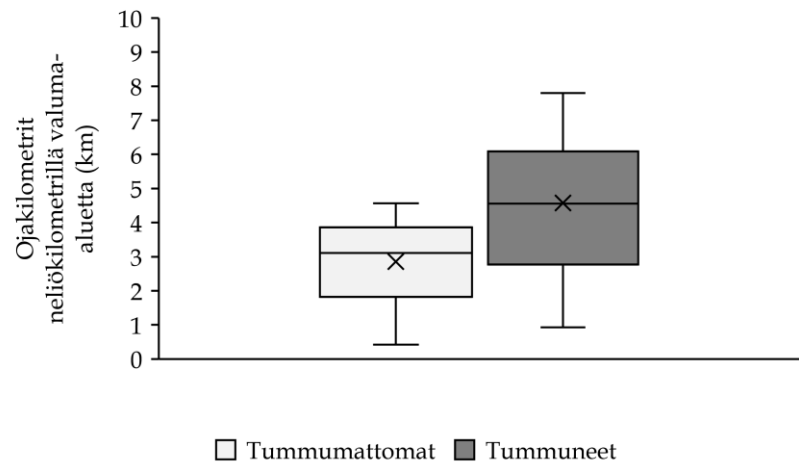
Regressioanalyysin (Liite 4) mukaan myös mitä suurempi valuma-alueen metsäalan ja ojitusintensiteetin suhde on, sitä enemmän järvi tummuu:  $t = 2,89$ ,  $r^2 = 0,28$ ,  $p = 0,009$  (Kuva 13).



Kuva 13. Ojakilometrit suhteessa valuma-alueen metsäalaan suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,009$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

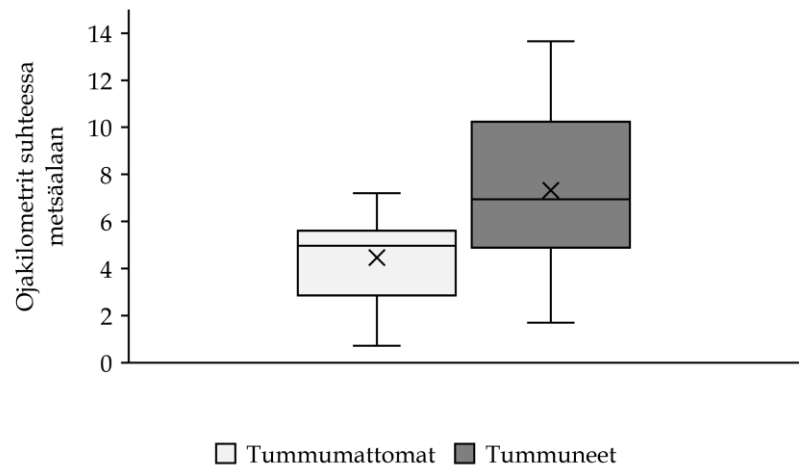
Tummuneiden järvien valuma-alueilla oli tilastollisesti merkitsevästi enemmän ojituksia neliökilometrillä valuma-alueetta (Kuva 14). Tummuneiden järvien valuma-alueilla ojakilometrejä oli keskimäärin 4,58 km neliökilometrillä valuma-

aluetta (keskihajonta 1,96 km,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueilla keskimäärin 2,86 km (keskihajonta = 1,33 km,  $n = 11$ ) (Liite 5). Riippumattomien otosten t-testin mukaan ero oli tilastollisesti merkitsevä:  $t(21, 13) = -2,54, p = 0,019$ , 2-suuntainen.



Kuva 14. Ero ojakilometreissä neliökilometrillä valuma- aluetta tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma- alueilla ( $p = 0,019$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi.

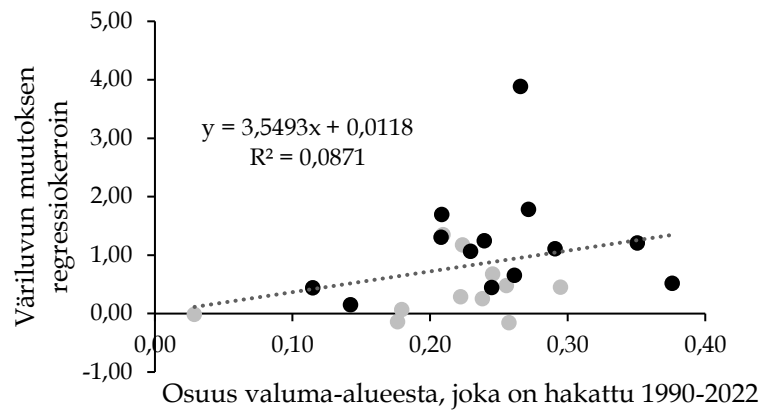
Tummuneiden järvien valuma- alueilla oli tilastollisesti merkitsevästi enemmän ojituksia myös suhteessa metsäalaan (Kuva 15). Tummuneiden järvien valuma- alueilla ojakilometri keskiarvo suhteessa metsäalaan oli 7,33 km (keskihajonta 3,26 km,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma- alueilla keskiarvo oli 4,46 km (keskihajonta = 2,01 km,  $n = 11$ ) (Liite 5). Riippumattomien otosten t-testin mukaan ero osoittautui tilastollisesti merkitseväksi:  $t(21, 28) = -2,64, p = 0,016$ , 2-suuntainen.



Kuva 15. Ero ojakilometreissä suhteessa valuma-alueen metsäalaan tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueilla ( $p = 0,016$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi.

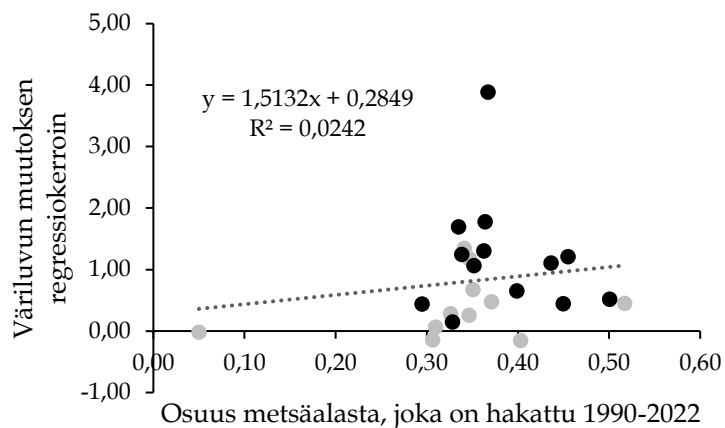
#### 4.2.6 Hakkuut

Tarkastelluilla valuma-alueilla oli tehty runsaasti hakkuita. Keskiarvo valuma-alueen hakatusta metsäalasta vuoden 1940 jälkeen oli 93 % ja vaihteluväli 74–99 % (Liite 3). Valuma-alueella tapahtuneilla hakkuilla ja väriluvun muutoksen välillä ei havaittu tilastollista merkitsevyyttä missään ikäluokassa. Regressioanalyysin (Liite 4) mukaan vuosina 1990-2022 hakatun puuston osuus valuma-alueen pinta-alasta (Kuva 16), ei vaikuttanut tilastollisesti merkitsevästi järvien tummumiseen:  $t = 1,45$ ,  $r^2 = 0,09$ ,  $p = 0,16$ .



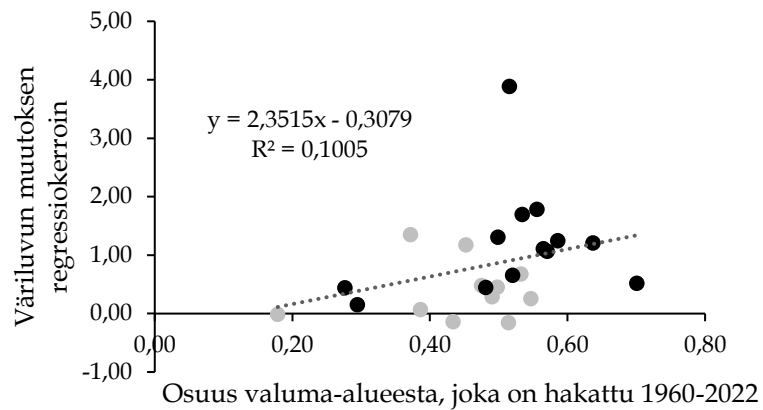
Kuva 16. Osuus valuma-alueesta, joka on hakattu 1990–2022 välillä suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,16$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

Regressioanalyysin (Liite 4) mukaan myöskään mukaan vuosina 1990-2022 hakatun puuston osuus valuma-alueen metsäalasta (Kuva 17), ei vaikuttanut tilastollisesti merkitsevästi järvien tummumiseen:  $t = 0,74$ ,  $r^2 = 0,02$ ,  $p = 0,47$ .



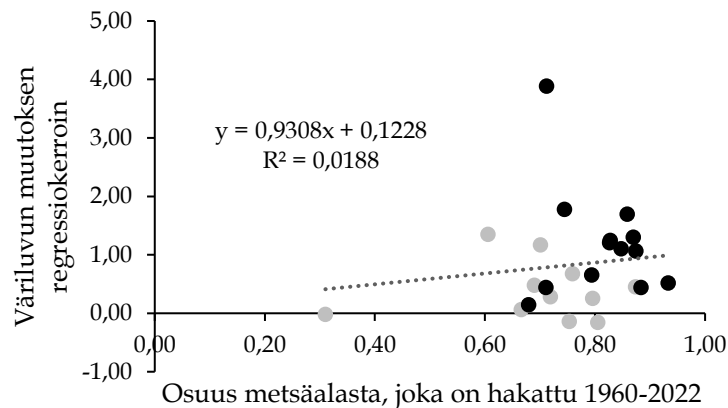
Kuva 17. Osuus metsäalasta, joka on hakattu 1990–2022 välillä suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,47$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

Regressioanalyysin (Liite 4) mukaan vuosina 1960-2022 hakatun puuston osuus valuma-alueen pinta-alasta (Kuva 18), ei vaikuttanut tilastollisesti merkitsevästi järvien tummumiseen:  $t = 1,57$ ,  $r^2 = 0,10$ ,  $p = 0,13$ .



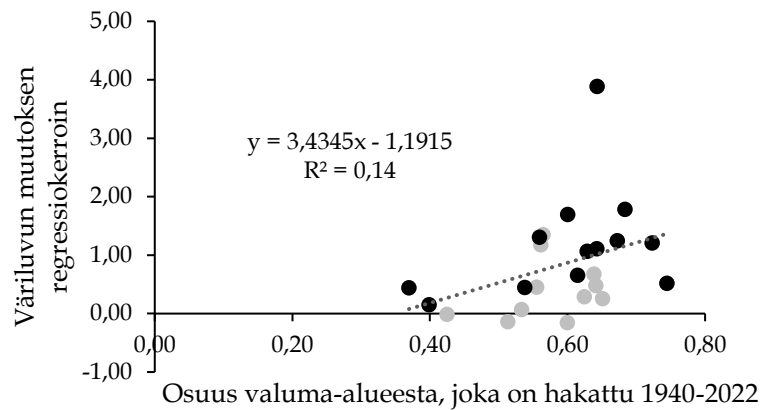
Kuva 18. Osuus valuma-alueesta, joka on hakattu 1960–2022 välillä suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,13$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

Regressioanalyysin (Liite 4) mukaan myöskään vuosina 1960-2022 hakatun puuston osuus valuma-alueen metsäalasta (Kuva 19), ei vaikuttanut tilastollisesti merkitsevästi järvien tummumiseen:  $t = 0,65$ ,  $r^2 = 0,02$ ,  $p = 0,52$ .



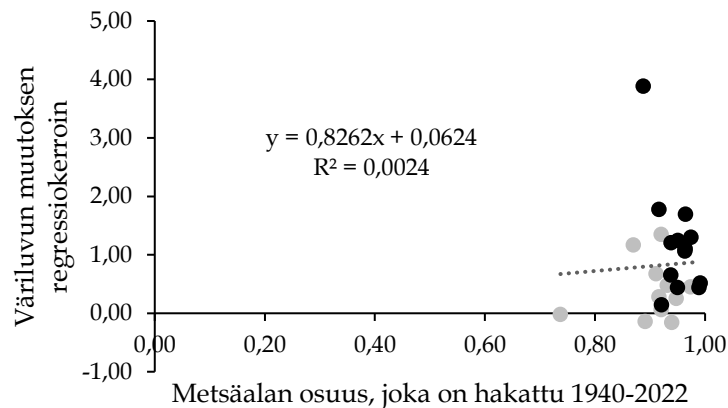
Kuva 19. Osuus metsäalasta, joka on hakattu 1960–2022 välillä suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,52$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

Regressioanalyysin (Liite 4) mukaan vuosina 1940-2022 hakatun puuston osuus valuma-alueen pinta-alasta (Kuva 20), ei vaikuttanut tilastollisesti merkitsevästi järvien tummumiseen:  $t = 1,89$ ,  $r^2 = 0,14$ ,  $p = 0,07$ .



Kuva 20. Osuus valuma-alueesta, joka on hakattu 1940–2022 välillä suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,07$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

Regressioanalyysin (Liite 4) mukaan myöskään vuosina 1940-2022 hakatun puuston osuus valuma-alueen metsäalasta (Kuva 21), ei vaikuttanut tilastollisesti merkitsevästi järvien tummumiseen:  $t = 0,23$ ,  $r^2 = 0,002$ ,  $p = 0,82$ .

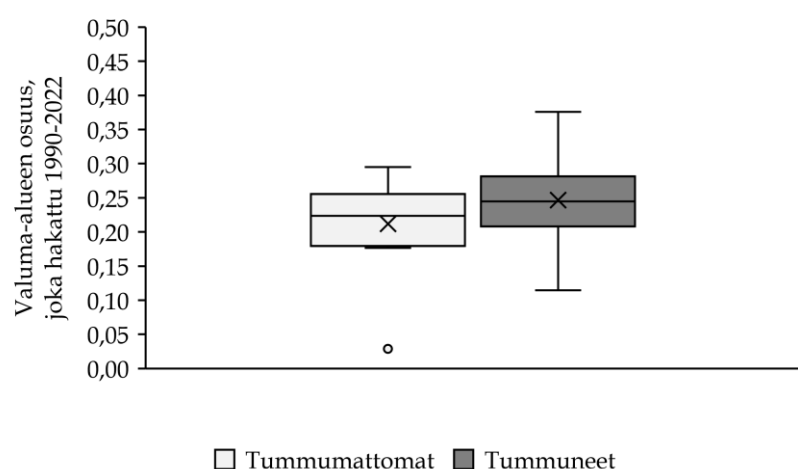


Kuva 21. Metsäalan osuus, joka on hakattu 1940–2022 välillä suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,82$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

Eroja kuitenkin havaittiin tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueilla tapahtuneissa hakkuissa. Tummuneiden järvien valuma-alueiden metsäalasta oli hakattu tilastollisesti merkitsevästi suurempi osuus vuosien 1960–2022 ja 1940–2022 välillä.

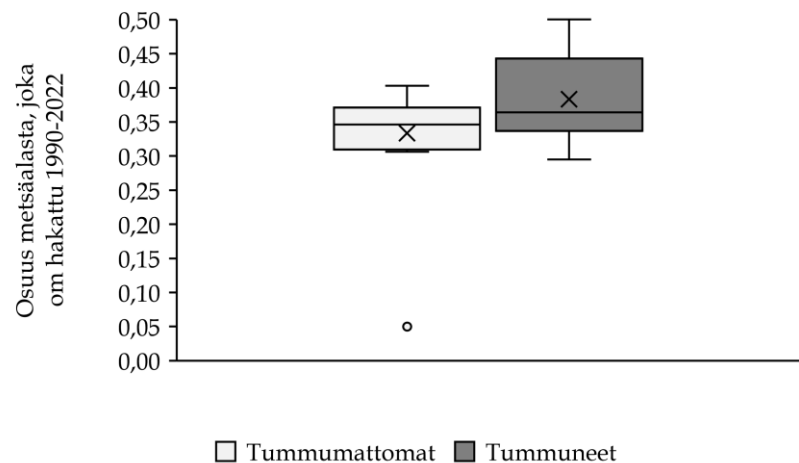


Eroja ei havaittu tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä valuma-alueen osuudessa, joka on hakattu 1990–2022 (Kuva 22). Tummuneiden järvien valuma-alueiden 1990-2022 välillä hakatun alan osuuden keskiarvo oli 25 % (keskihajonta 7 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien valuma-alueiden keskiarvo oli 21 % (keskihajonta = 7 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Riippumattomien otosten t-testin mukaan ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $t(21, 55) = -1,19, p = 0,248$ , 2-suuntainen.



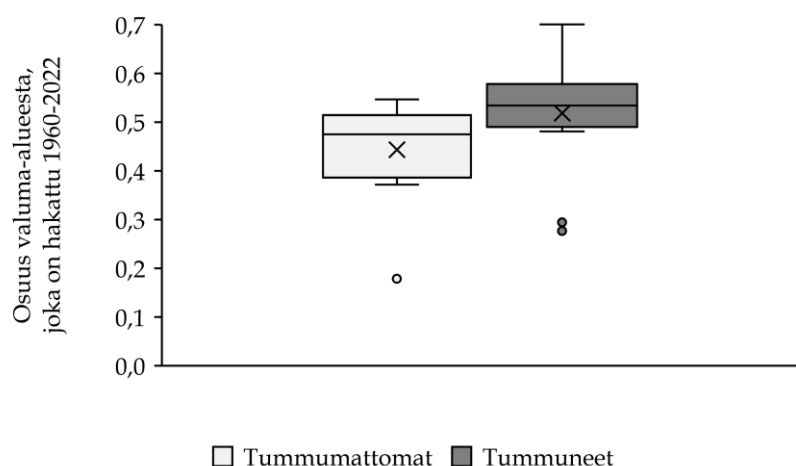
Kuva 22. Ero valuma-alueen osuudessa, joka on hakattu 1990–2022 tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,248$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi. Ympyräsymboli kuvaa poikkeavaa havaintoa.

Parittaisessa vertailussa eroja ei löytynyt myöskään 1990–2022 hakattujen metsäalojen osuuksien välillä tummuneiden ja tummumattomien järvien valuma-alueilla (Kuva 25). Tummuneiden järvien valuma-alueiden 1990-2022 välillä hakatun metsäalan osuuden keskiarvo oli 38 % (keskihajonta 6 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueiden keskiarvo oli 33 % (keskihajonta = 11 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Mann-Whitney'n U -testin mukaan ero ryhmien ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $U = 94, p = 0,207$ .



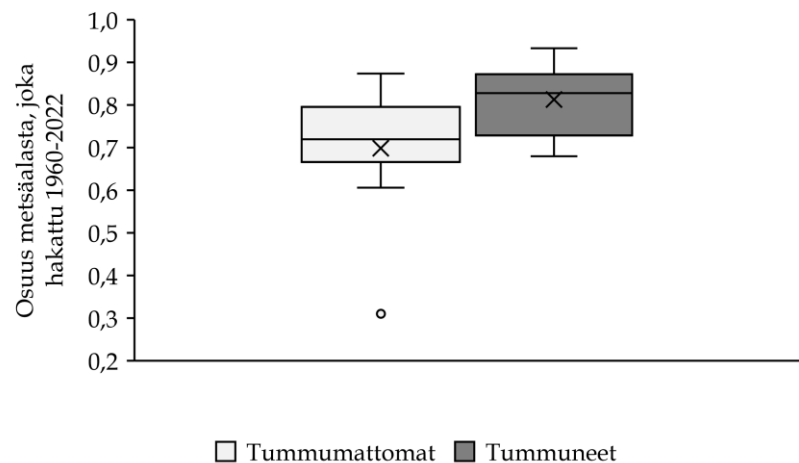
Kuva 25. Ero metsäalan osuudessa, joka on hakattu 1990–2022 tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,207$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi. Ympyräsymboli kuvaa poikkeavaa havaintoa.

Eroja ei havaittu myöskään tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä valuma-alueen osuudessa, joka on hakattu 1960–2022 (Kuva 23). Tummuneiden järvien valuma-alueiden 1960–2022 välillä hakatun alan osuuden keskiarvo oli 52 % (keskihajonta 12 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueiden keskiarvo oli 44 % (keskihajonta = 10 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Riippumattomien otosten t-testin mukaan ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $t(21, 96) = -1,64$ ,  $p = 0,115$ , 2-suuntainen.



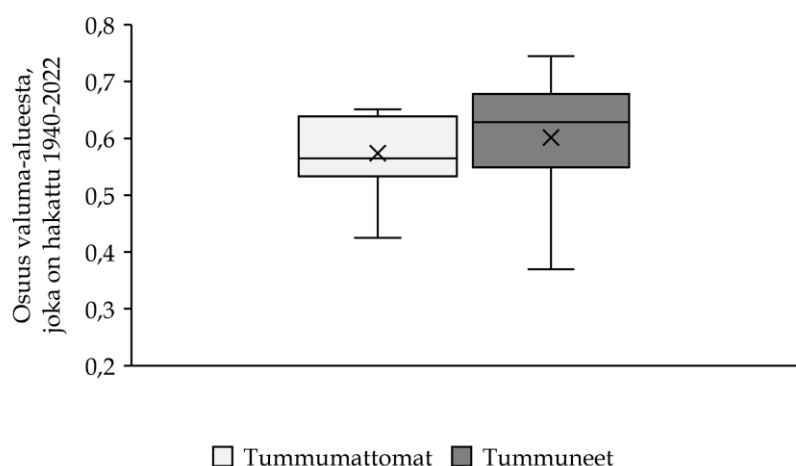
Kuva 23. Ero valuma-alueen osuudessa, joka on hakattu 1960–2022 tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,115$ ). Ympyräsymbolit kuvaavat poikkeavia havaintoja. Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi. Ympyräsymboli kuvaa poikkeavaa havaintoa.

Tummuneiden järvien valuma-alueilla oli kuitenkin hakattu metsäalasta tilastollisesti merkitsevästi enemmän vuosien 1960–2022 välillä, kuin tummumattomien järvien valuma-alueilla (Kuva 26). Tummuneiden järvien valuma-alueilla 1960–2022 välillä hakatun metsäalan osuuden keskiarvo oli 81 % (keskihajonta 8 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueiden keskiarvo oli 70 % (keskihajonta = 15 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Mann-Whitneyn U -testin mukaan ero ryhmien osoittautui tilastollisesti merkitseväksi:  $U = 110$ ,  $p = 0,026$ .



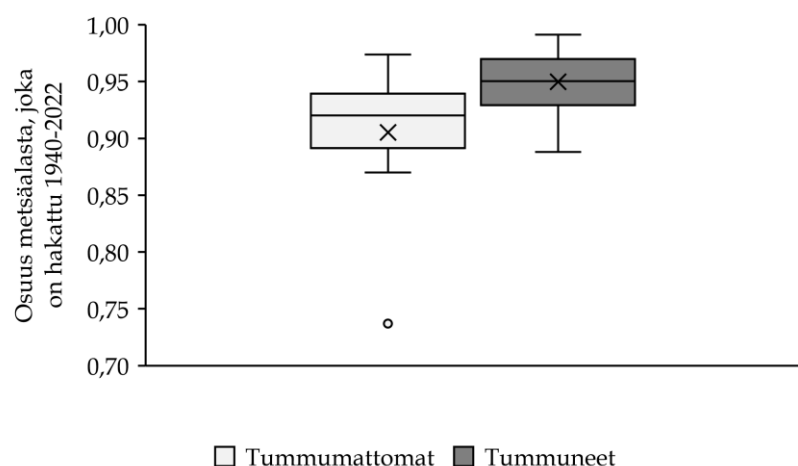
Kuva 26. Ero metsäalan osuudessa, joka on hakattu 1960–2022 tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,026$ ). Ympyräsymboli kuvaa poikkeavaa havaintoa. Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi. Ympyräsymboli kuvaa poikkeavaa havaintoa.

Tilastollisesti merkitseviä eroja ei havaittu myöskään tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä valuma-alueen osuudessa, joka on hakattu 1940–2022 (Kuva 24). Tummuneiden järvien valuma-alueiden 1940-2022 välillä hakatun alan osuuden keskiarvo oli 60 % (keskihajonta 11 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueiden keskiarvo oli 57 % (keskihajonta = 7 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Riippumattomien otosten t-testin mukaan ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $t(20, 09) = -0,75$ ,  $p = 0,462$ , 2-suuntainen.



Kuva 24. Ero valuma-alueen osuudessa, joka on hakattu 1940–2022 tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,462$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi.

Tummuneiden järvien valuma-alueilla oli kuitenkin hakattu metsäalasta tilastollisesti merkitsevästi enemmän 1940–2022 välillä (Kuva 27). Tummuneiden järvien valuma-alueiden 1940–2022 välillä hakatun metsäalan osuuden keskiarvo oli 95 % (keskihajonta 3 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueiden keskiarvo oli 91 % (keskihajonta = 6 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Mann-Whitneyn U -testin mukaan ero ryhmien välillä oli tilastollisesti merkitsevä:  $U = 113$ ,  $p = 0,015$ .

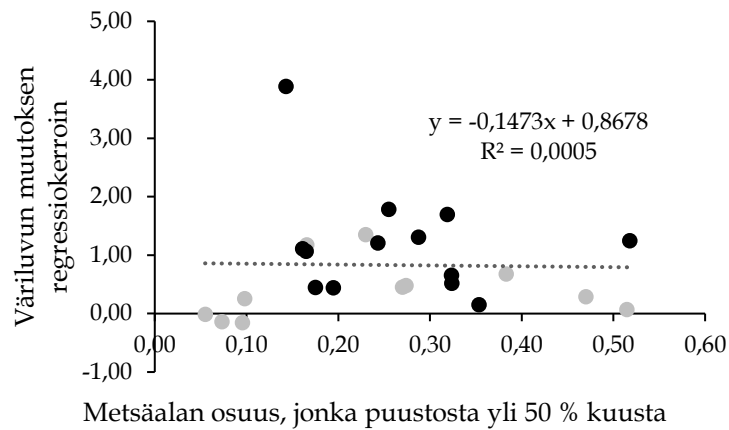


Kuva 27. Ero metsäalan osuudessa, joka on hakattu 1940–2022 tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,015$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi. Ympyräsymboli kuvaa poikkeavaa havaintoa.

#### 4.2.7 Kuusipuuvaltaisuus

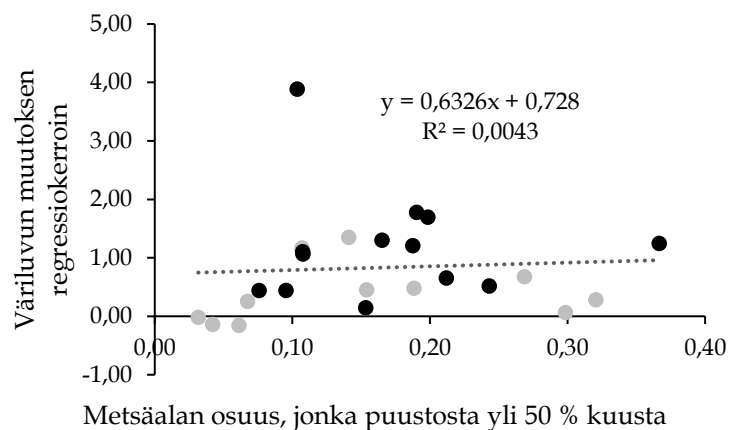
Aineistossa kuusipuuvaltaisuus vaihteli valuma-alueiden välillä jonkin verran. Valuma-alueen osuus, jolla kuusta oli yli 50 % puustosta, oli keskimäärin 16 % ja vaihteli 3 % ja 37 % välillä. Valuma-alueen osuus, jolla kuusta oli yli 80 % puustosta, oli keskimäärin 7 % ja vaihteli 1 % ja 23 % välillä. Valuma-alueen metsäalasta yli 50 % kuusta sisältävä osuus oli aineistossa keskimäärin 25 % ja vaihteli 5 % ja 52 % välillä. Valuma-alueen metsäalasta yli 80 % kuusta sisältävä osuus oli aineistossa keskimäärin 11 % ja vaihteli 1 % ja 34 % välillä (Liite 3).

Kuusipuuvaltaisuuden ja väriluvun muutoksen välillä ei havaittu tilastollista merkitsevyyttä. Myöskään parittaisessa vertailussa eroja ei löytynyt kuusipuuvaltaisuudessa tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä. Regressioanalyysin (Liite 4) mukaan osuudella valuma-alueesta, jolla kuusipuun osuus on yli 50 % (Kuva 28) ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhteyttä tummumiseen:  $t = 0,31$ ,  $r^2 = 0,0005$ ,  $p = 0,76$ .



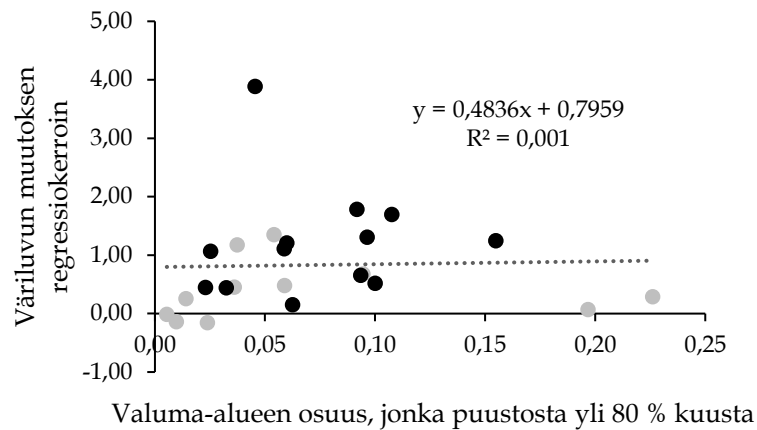
Kuva 28. Valuma-alueen osuus, jonka puustosta yli 50 % kuusta suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,76$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

Myöskään osuus valuma-alueen metsäalasta, jolla kuusipuun osuus on yli 50 % (Kuva 29) ei ollut tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä järvien tummumiseen:  $t = -0,11$ ,  $r^2 = 0,004$ ,  $p = 0,92$ .



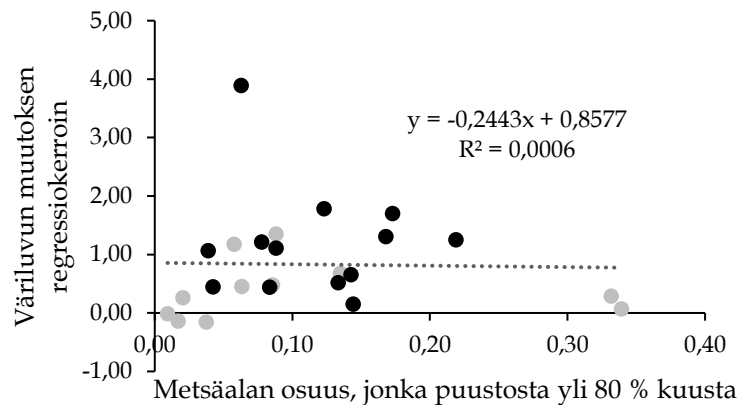
Kuva 29. Metsäalan osuus, jonka puustosta yli 50 % kuusta suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,92$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

Regressioanalyysin (Liite 4) mukaan osuudella valuma-alueesta, jolla kuusipuun osuus on yli 80 % (Kuva 30) ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhteyttä tummumiseen:  $t = 0,15$ ,  $r^2 = 0,001$ ,  $p = 0,88$ .



Kuva 30. Valuma-alueen osuus, jonka puustosta yli 80 % kuusta suhteessa järven värluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,88$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

Myöskään osuus valuma-alueen metsäalasta, jolla kuusipuun osuus on yli 80 % (Kuva 31) ei ollut tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä tummumiseen:  $t = -0,12$ ,  $r^2 = 0,0006$ ,  $p = 0,91$ .

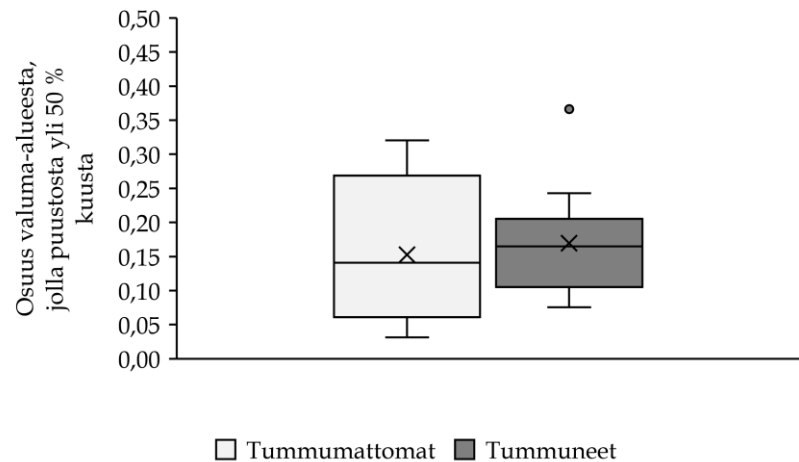


Kuva 31. Metsäalan osuus, jonka puustosta yli 80 % kuusta suhteessa järven värluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,91$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

Parittaisessa vertailussa eroja ei löytynyt tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä valuma-alueiden osuuksissa, joilla yli 50 % puustosta on kuusta

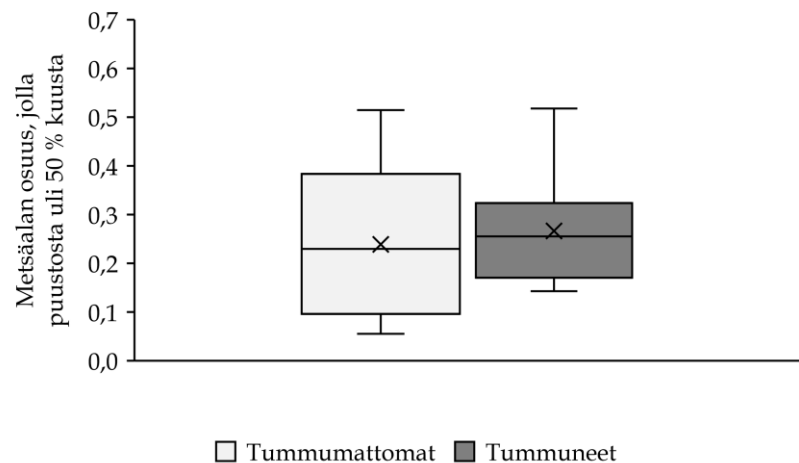


(Kuva 32.). Tummuneiden järvien valuma-alueiden osuuden, joilla yli 50 % puustosta on kuusta, keskiarvo oli 17 % (keskihajonta 8 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueiden keskiarvo oli 15 % (keskihajonta = 10 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Riippumattomien otosten t-testin mukaan ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $t(18, 38) = -0,44$ ,  $p = 0,664$ , 2-suuntainen.



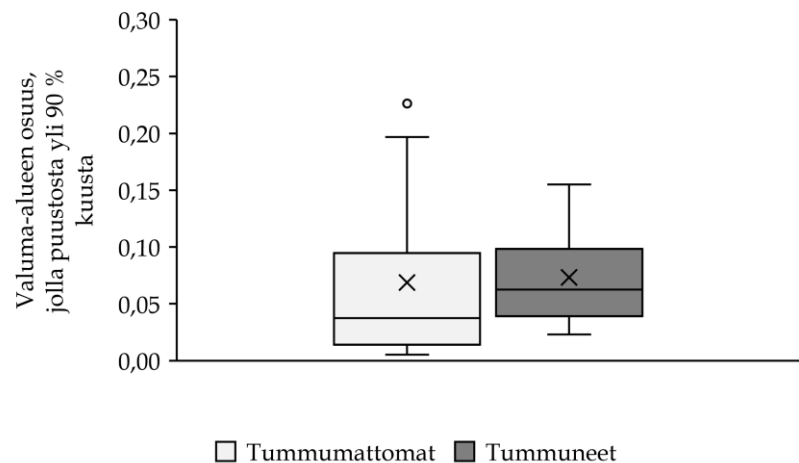
Kuva 32. Ero valuma-alueen osuudessa, jolla puustosta yli 50 % kuusta tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,664$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi. Ympyräsymboli kuvaa poikkeavaa havaintoa.

Parittaisessa vertailussa eroja ei löytynyt myöskään tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä metsäalan osuuksissa, joilla yli 50 % puustosta on kuusta (Kuva 33). Tummuneiden järvien metsäalan osuuden, joilla yli 50 % puustosta on kuusta, keskiarvo oli 27 % (keskihajonta 10 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueiden keskiarvosta oli 24 % (keskihajonta = 16 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Riippumattomien otosten t-testin mukaan ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $t(16, 64) = -0,48$ ,  $p = 0,636$ , 2-suuntainen.



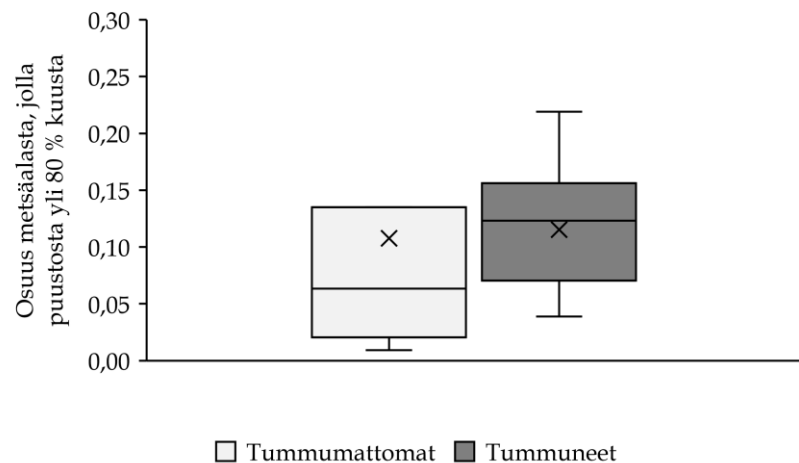
Kuva 33. Ero metsäalan osuudessa, jolla puustosta yli 50 % kuusta tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,636$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi.

Eroja ei löytynyt parittaisessa vertailussa myöskään tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä valuma-alueiden osuuksissa, joilla yli 80 % puustosta on kuusta (Kuva 34.). Tummuneiden järvien valuma-alueiden osuuden, joilla yli 80 % puustosta on kuusta, keskiarvo oli 7 % (keskihajonta 4 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueiden keskiarvo oli myös 7 % (keskihajonta = 8 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Mann-Whitneyn U -testin mukaan ero ryhmien välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $U = 92$ ,  $p = 0,252$ .



Kuva 34. Ero valuma-alueen osuudessa, jolla puustosta yli 80 % kuusta tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,252$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi. Ympyräsymboli kuvaa poikkeavaa havaintoa.

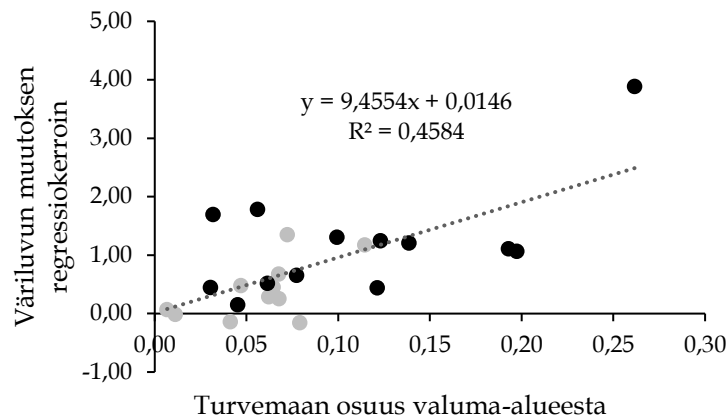
Parittaisessa vertailussa eroja ei löytynyt tummuneiden ja tummumattomien järvien valuma-alueiden välillä metsäalan osuuksissa, joilla yli 50 % puustosta on kuusta (Kuva 35). Tummuneiden järvien metsäalan osuuden, joilla yli 80 % puustosta on kuusta, keskiarvo oli 12 % (keskihajonta 5 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueiden keskiarvo oli 11 % (keskihajonta = 12 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Mann-Whitney'n U -testin mukaan ero ryhmien välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $U = 93, p = 0,228$ .



Kuva 35. Ero metsäalan osuudessa, jolla puustosta yli 50 % kuusta tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,228$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi.

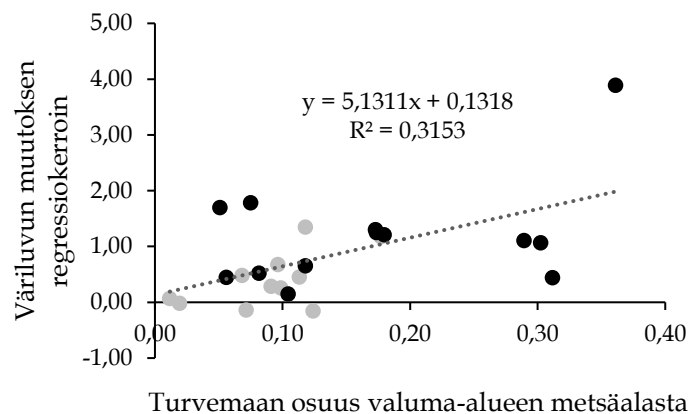
#### 4.2.8 Turvemaat

Aineistossa valuma-alueen turvemaan osuus oli keskimäärin 9 % ja sen osuus vaihteli 2 % ja 26 % välillä. Turvemaan osuus valuma-alueen metsäalasta oli keskimäärin 14 % ja vaihtelu 1 % ja 36 % välillä (Liite 3). Turvemaiden havaittiin olevan tilastollisesti yhteydessä järvien tummumiseen. Regressioanalyysin (Liite 4) mukaan mitä enemmän valuma-alueen alasta on turvemaata, sitä enemmän järvi tummuu:  $t = 4,32$ ,  $r^2 = 0,46$ ,  $p = 0,0003$  (Kuva 36).



Kuva 36. Turvemaan osuus valuma-alueesta suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,0003$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

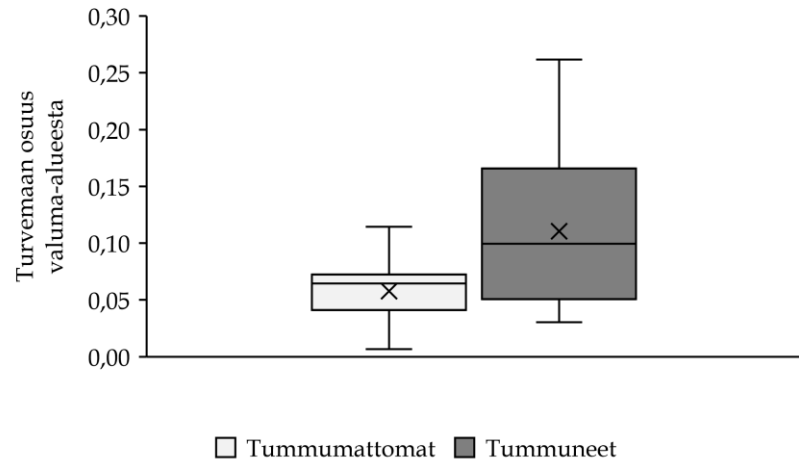
Regressioanalyysin (Liite 4) mukaan järvi tummuu myös valuma-alueen metsäalan turvemaan osuuden kasvaessa:  $t = 3,18$ ,  $r^2 = 0,32$ ,  $p = 0,004$  (Kuva 37).



Kuva 37. Turvemaan osuus valuma-alueen metsäalasta suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,004$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

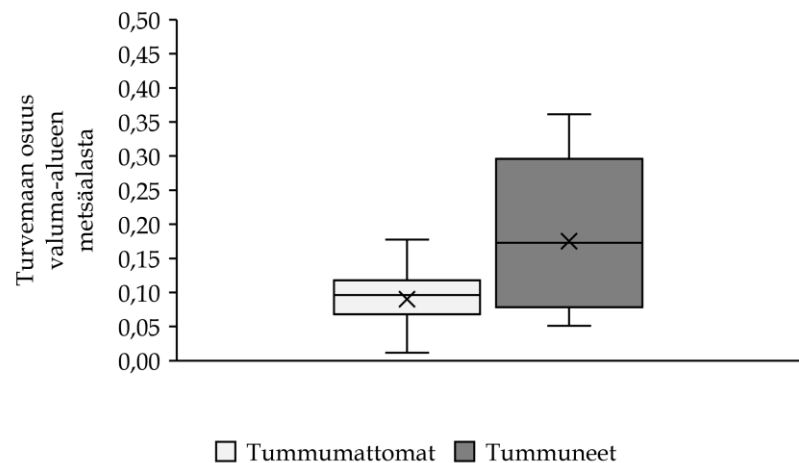
Parittaisessa vertailussa eroja ei kuitenkaan löytynyt valuma-alueen turvemaan osuudessa tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä (Kuva 38). Tummuneiden järvien valuma-alueiden turvemaan osuuden keskiarvo oli 11 % (keskihajonta 7 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueiden keskiarvo

oli 6 % (keskihajonta = 3 %, n = 11) (Liite 5). Mann-Whitneyn U -testin mukaan ero ryhmien välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $U = 100, p = 0,106$ .



Kuva 38. Ero turvemaan osuudessa valuma-alueesta tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,106$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi.

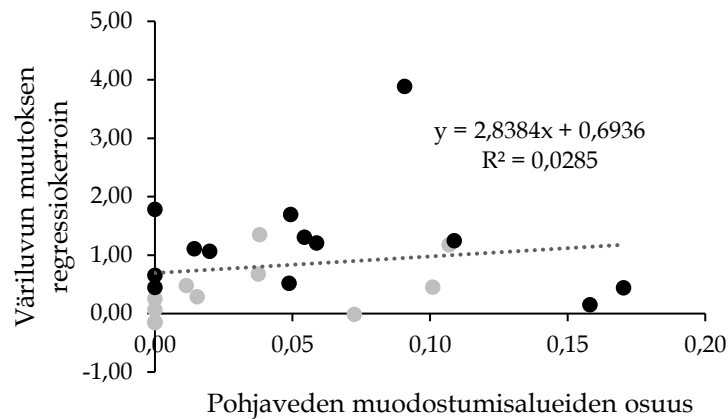
Parittaisessa vertailussa tilastollisesti merkitseviä eroja ei myöskään löytynyt turvemaan suhteesta metsäalaan tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä (Kuva 39). Tummuneiden järvien valuma-alueiden turvemaan ja metsäalan suhteen keskiarvo oli 18 % (keskihajonta 11 %, n = 13) tummumattomien järvien valuma-alueiden keskiarvo oli 9 % (keskihajonta = 5 %, n = 11) (Liite 5). Mann-Whitneyn U -testin mukaan ero ryhmien välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $U = 103, p = 0,072$ .



Kuva 39. Ero turvemaan osuudessa metsäalasta tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,072$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi.

#### 4.2.9 Pohjaveden muodostumisalueet

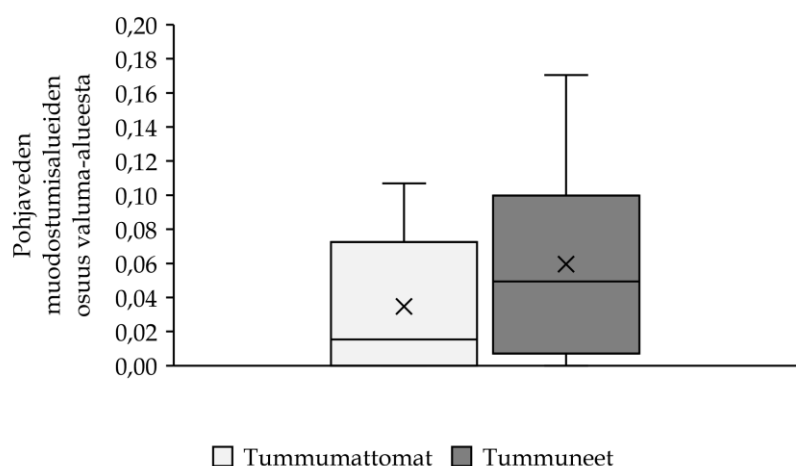
Tarkastelluilla valuma-alueilla oli vain vähän pohjaveden muodostumisalueita. Pohjaveden muodostumisalueiden osuus valuma-alueesta oli koko aineistossa keskimäärin 5 % ja vaihtelu aineistossa oli 0–17 % (Liite 3). Regressioanalyysin (Liite 4) tulosten perusteella pohjaveden muodostumisalueilla ei ollut vaikutusta järvien tummumiseen:  $t = 0,80$ ,  $r^2 = 0,03$ ,  $p = 0,43$  (Kuva 40).



Kuva 40. Pohjaveden muodostumisalueiden osuus valuma-alueesta suhteessa järven väriluvun muutoksen regressiokertoimeen ( $p = 0,43$ ). Tilastollisesti merkitsevästi tummuneiden järvien havainnot mustilla pisteillä ja tummumattomien järvien havainnot harmailla pisteillä.

Parittaisessa vertailussa eroja ei myöskään löytynyt valuma-alueiden pohjaveden muodostumisalueiden osuudessa tummuneiden ja tummumattomien järvien välillä (Kuva 41). Tummuneiden järvien valuma-alueiden pohjaveden muodostumisalueiden keskiarvo oli 6 % (keskihajonta 6 %,  $n = 13$ ) ja tummumattomien järvien valuma-alueiden keskiarvo oli 3 % (keskihajonta = 4 %,  $n = 11$ ) (Liite 5). Mann-Whitneyn U -testin mukaan ero ryhmien välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevä:  $U = 91$ ,  $p = 0,277$ .





Kuva 41. Ero pohjaveden muodostumisalueiden osuudessa tummumattomien ja tummuneiden järvien valuma-alueiden välillä ( $p = 0,277$ ). Raksisymboli kuvastaa keskiarvoa ja laatikon sisällä oleva viiva mediaania. Laatikoiden ylä- ja alarajat ovat kvartaalit, viiksinä ovat minimi ja maksimi.

## 5 TULOSTEN TARKASTELU

Tutkimushypoteesina oletettiin, että valuma-alueen maankäyttö ja ominaisuudet vaikuttavat järvien tummumiseen ja, että tummuneiden ja tummumattomien järvien valuma-alueiden maankäytössä ja ominaisuuksissa on eroja. Tutkielmassa havaittiin maankäytön ja ominaisuuksien vaikuttavan järvien tummumiseen ja löydettiin eroja tummuneiden ja tummumattomien järvien valuma-alueiden maankäytössä ja ominaisuuksissa. Nollahypoteesi siis kumoutui ja vastahypoteesi jäi voimaan.

Tutkimushypoteesina oli, että luontaisesti tummat järvet tummuvat luontaisesti kirkkaita järviä voimakkaammin. Tutkielmassa havaittiinkin suuremman väriluvun omaavien järvien tummuvan voimakkaammin eli hypoteesi jäi voimaan. Veden väriluvun keskiarvon tarkasteluaikana havaittiin vaikuttavan veden värin trendiin tutkielmassa tarkastelluista muuttujista kaikista eniten (Liite 4).

Luontaisesti tummien järvien valuma-alueet ovat usein ravinnerikkaita turvemaita, joista orgaanista ainesta pääsee karkaamaan enemmän vesistöön (Härkönen ym. 2023). Kuitenkin esimerkiksi Hahmajärven väriluvun keskiarvo tarkasteluaikana suuri (Liite 1), mutta sen väriluvun trendi ei ollut tilastollisesti merkitsevästi kasvava (Taulukko 2). Syynä tähän poikkeamaan voisi se, että järvi on pieni ja luontaisestikin hyvin tumma, eikä siksi ole enää tarkasteluaikana tummunut tilastollisesti merkitsevästi lisää tai järvi on tummunut jo ennen tarkastelujaksoa.

Tutkimushypoteesina oli myös, että järvet, joiden valuma-alueilla enemmän metsä- tai peltoalaa tummuvat voimakkaammin. Tutkimushypoteesi kuitenkin kumoutui ja nollahypoteesi jäi voimaan, vaikkakin metsäalan osuus valuma-alueesta oli lähes tilastollisesti merkitsevä (Liite 4). Metsäalan osuudella ei havaittu olevan aineistossa merkitystä veden värin nousun kannalta mahdollisesti siksi, että suurin osa valuma-alueista oli metsävaltaisia.

Peltoalalla ei havaittu olevan vaikutusta järvien tummumiseen eli nollahypoteesi jäi voimaan. Tämä voi johtua siitä, että tarkasteltavat valuma-alueet eivät olleet maatalousvaltaisia. Aiemmassa tutkimuksessa peltoalan on kuitenkin havaittu olevan positiivisesti yhteydessä veden väriin (Holopainen ja Lehikoinen 2021).

Tutkimushypoteesina oli myös, että järvet, joiden valuma-alueilla on suurempi vesiala, tummuvat vähemmän. Tämä hypoteesi jäi voimaan ja nollahypoteesi kumoutui. Isomman vesialan omaavien valuma-alueiden järvet eivät tummu niin herkästi, sillä näillä valuma-alueilla on isompi vesimassa ottamassa kuormitusta vastaan. Esimerkkinä tästä toimi latvajärvi Rautjärvi, joka puskuroi Karijärven tummumista.

Tutkimushypoteesina oli myös, että ojitus lisää järvien tummumista. Myös tämä hypoteesi jäi voimaan ja nollahypoteesi kumoutui. Valuma-alueen ojitusintensiteetin havaittiin lisäävän järvien tummumista. Ojituksen myötä humus ja muu orgaaninen väriä lisäävä aines pääsee valumaan vesistöön tehokkaammin. Metsäalan ja valuma-alueen ojitusintensiteetin suhde järvien tummumiseen ei ollut aivan niin suuri kuin valuma-alueen ojitusintensiteetin vaikutus. Syynä tähän voi

olla kaikkien valuma-alueiden suuri metsäala (Liite 3) ja se, että ojituksia tehdään nimenomaan metsäalueille puuntuotannon tehostamiseksi. Ojitusintensiteetin havaitseminen vesistöjä tummentavaksi tekijäksi vahvistaa aiemassa tutkimuksessa saatuja vastaavia tuloksia ojittamisen veden väriä lisäävänä tekijänä (Estlander ym.2021, Holopainen ja Lehikoinen 2022).

Yksi tutkimushypoteeseista oli, että järvet, joiden valuma-alueilla on tehty enemmän hakkuita tummuvat voimakkaammin. Hakkuita tarkasteltaessa ei kuitenkaan havaittu tilastollista merkitsevyyttä eli hypoteesi kumoutui ja nollahypoteesi jäi voimaan. Toisaalta aineistossa oli havaittavissa hakatun alan ja veden värin kasvulla jonkinasteinen yhteys. Esimerkiksi puuston osuus valuma-alueen pinta-alasta, joka on hakattu 1940–2022 vaikutti lähes tilastollisesti merkitsevästi veden värin kasvuun (Liite 3).

Eroja hakkuumäärissä kuitenkin havaittiin tummuneiden ja tummumattomien järvien valuma-alueilla. Tummuneiden järvien valuma-alueiden metsäaloista oli 1960–2022 ja 1940–2022 välillä hakattu tilastollisesti merkitsevästi enemmän kuin tummumattomien järvien valuma-alueiden metsäaloista. Tutkimuksessa pystyttiin siis osoittamaan voimakkaan hakkuuintensiteetin lisäävän veden väriä. Tulokset osoittivat myös, että 1940-luvulta lähtien kaikilla valuma-alueilla suurin osa metsäalasta on hakattu jossain vaiheessa (Liite 3). Tarkastellut valuma-alueet ovat siis voimakkaasti valjastettu metsätaloudeksi.

Laajojen hakkuiden ja muiden metsätaloustoimien, kuten ojituksen, vuoksi metsämaan osuus valuma-alueista oli selittävä tekijä tummumiselle. Tarkastellut valuma-alueen olivat selvästi metsätalouden piirissä ja hakkuita tehty runsaasti, mikä on yhdessä ojituksen myötä lisännyt orgaanisen aineksen karkaamista vesistöön. Vastaavanlaisia tuloksia on saatu myös aiemmassa tutkimuksessa (Estlander ym. 2021, Holopainen ja Lehikoinen 2022, Shah ym. 2022, Härkönen ym. 2023).

Tutkimushypoteesina oli myös, että valuma-alueen kuusipuuvallisuus lisää veden väriä. Kuusipuuvallisuudella ei havaittu olevan vaikutusta järvien tummumiseen

eli hypoteesi kumoutui ja nollahypoteesi jäi voimaan. Škerlep ym. (2020) aiemmassa tutkimuksessa kuitenkin havaittiin selkeä yhteys metsittämisen, ja erityisesti kuusipuuvaltaisuuden lisääntymisen, lisäävän veden väriä. Tässä tutkielmassa kuusipuuvaltaisuudella ei kuitenkaan havaittu olevan yhteyttä järvien tummumiseen ehkä siksi, että kuusipuuvaltaiset alat olivat tarkastelluilla valuma-alueilla keskenään samankaltaisia, eikä kuusipuuvaltaisuus keskittynyt pelkästään esimerkiksi ojitetuille turvemailla.

Tutkimushypoteesina olikin myös, että turvemaat lisäävät tummumista. Turvemailla havaittiinkin olevan veden väriä lisäävä vaikutus eli tutkimushypoteesi jäi voimaan ja nollahypoteesi kumoutui. Mitä enemmän valuma-alueen alasta on turvemaata, sitä enemmän järvi tummui (Liite 4). Myös mitä suurempi valuma-alueen metsäalan ja turvemaan suhde on, sitä enemmän järvi tummui (Liite 4). Turvemetsiä on ojitettu mittavasti Suomessa puuntuotannon tehostamiseksi. Turvemaat ovat humuspitoisia ja ojituksen myötä orgaaninen aines pääsee valumaan vesistöihin niitä tummentaen. Turvemaiden kuivatuksen on havaittu lisäävän orgaanisen hiilen kuormitusta pintavesiin ja näin lisäävän veden väriä (Nieminen ym. 2021).

Tutkimushypoteesina oli lisäksi, että pohjaveden muodostumisalueet valuma-alueella ehkäisevät tummumista lähteiden kirkastavan vaikutuksen vuoksi. Tutkimushypoteesi kuitenkin kumoutui ja nollahypoteesi jäi voimaan. Pohjaveden muodostumisalueiden ei siis havaittu puskuroivan järvien tummumista. Toisaalta tarkastelluilla valuma-alueilla oli vain vähän pohjavedenmuodostumisalueita.

Ryhmien välillä olevat erot eivät aina olleet tilastollisesti merkitseviä, vaikka regressioanalyysin tulos olisi (esimerkiksi turvemaat), sillä jako tummuneisiin ja tummumattomiin on tehty tilastollisesti merkitsevän trendin perusteella ja osa tutkimusjärvistä lähes ylitti rajat, mutta ne laskettiin silti tummumattomien ryhmään vertailussa. Lähes kaikissa tutkimusjärvissä veden värin muutoksen 1990–2022 regressiokerroin oli positiivinen eli trendi oli kasvava, vaikkei kasvu ollutkaan kaikissa tilastollisesti merkitsevää (Taulukko 2). Vain kolmessa tutkimusjärvessä regressiokerroin oli negatiivinen eli järven väriluku oli laskusuunnassa.

Regressioanalyysi puolestaan ottaa huomioon paremmin järven tummumisasteen eli se kuvastaa paremmin muuttujien vaikutusta järvien tummumistrendiin.

Tutkielman tulosten luotettavuuteen vaikuttivat mahdolliset virheet ja vuodenaikaisvaihtelun tuomat poikkeamat veden väriluvun mittausarvoissa. Virhelähteinä tutkielmassa ovat myös mahdolliset laskuvirheet Excelissä tai tietojen siirrossa eri ohjelmien välillä. Tutkielman aineisto oli myös kohtalaisen pieni ja joidenkin muuttujien kohdalla yksittäinen havainto saattoi nostaa trendin tilastollisesti merkitseväksi.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkielmassa havaittiin veden luontaisen tummuuden sekä valuma-alueen ojitussiteetin, hakkuiden ja turvemaiden lisäävän järvien tummumista. Valuma-alueen suuren vesialan havaittiin puolestaan suojaavan järveä tummumiselta. Valuma-alueen maankäytön tunnistaminen tärkeänä tekijänä vesien tummumisessa tarkoittaa, että maanpeitteen hallinnalla ja valuma-aluelähtöisellä tarkastelulla voidaan torjua pintavesien tummumista. Myös Škerlep (2021) väitöskirjassaan korostaa maanpeitteen hallinnan merkityksellisyyttä pintavesien tummumisen torjunnassa.

Tuoreessa Härkösen ym. (2023) katsausartikkelissa tarkasteltiin metsätalouden vaikutuksia tummumiseen turvemaidella. Useimmat suometsätaloudessa käytetyt vesiensuojelurakenteet eivät artikkelin mukaan pidätä orgaanista hiiltä, etenkin liukoisessa muodossa, vaan tarvitaan systeemistä muutosta kuormituksen muodostumisen ja ylimääräisen huuhtoutumisen estämiseksi. Artikkelin mukaan olennaisinta tässä olisi nimenomaan käytännöt, jotka vähentävät valuntaa ja lisäävät maaperän pidätyskykyä.

Kuitenkin joillain oikein toteutetuilla metsänhoitotoimenpiteillä voidaan vähentää vesistöön kohdistuvia vaikutuksia. Tällaisia menetelmiä ovat esimerkiksi riittävät suojavyyhykkeet, vähävaikutteisten tekniikoiden hyödyntäminen sekä jatkuva

kasvatus (Shah ym. 2022, Härkönen ym.2023). Jatkuvan kasvatuksen ohella sekametsien suosiminen voi Härkösen ym. (2023) mukaan myös auttaa tummumisen ehkäisyssä ja samalla myös lisätä luonnon monimuotoisuutta.

Humuskuorman vähentäminen on pääroolissa vesistöjen tummumisen ehkäisyssä. Vähentämällä vesistöjen humuskuormaa vesistöjen tilaa voidaan parantaa ja arvokkaat kirkkaat pintavedet pitää kirkkaina. Tämä vaatii toimintatapojen muutosta ja ennen kaikkea haitallisten toimien vähentämistä ja todellisen tarpeen arviointia esimerkiksi kunnostusojituksissa. Metsäojia tukkimalla ja vedenpidätyskykyä parantamalla voidaan vähentää vesistöjen humuskuormaa ja täten ehkäistä vesien tummumista.

Suomessa metsätaloutta varten ojitettujen turvemaiden ojat ovat keskimäärin leveydeltään 1–2 m ja syvyydeltään 0,8–1,2 m (Minkkinen ym. 2020). Uudelleen ojituksia tulisi harkita tarkkaan ja pitäytyä riittävässä ojitussyvydessä. Riittävä kuivatussyvyys on kuitenkin vain 0,35 m (Sarkkola ym. 2012). Nykyisin ojat kaivetaan tarpeettoman syviksi, jolloin humuskuorma lisääntyy tarpeettoman paljon. Myös Härkösen ym. (2023) katsauksen mukaan matalamman ojitussyvyyden vaikuttavuus ja valuma-alue tason suunnittelu ovat kuormituksen vähentämisessä tärkeitä. Ojitus toimien huomiointi erityisesti turvemailla ja tummien järvien valuma-alueilla on erityisen tärkeää pintavesien tummumisen ehkäisyssä.

Tärkeitä alueita, joilla humuskuormitus tulee huomioida ovat metsitetyt turvemaat, turvetuotantoalueet sekä vanhat turvetuotantoalueet, joilla on uusiokäyttöä. Vanhoilla turvetuotantoalueilla tulisi huomioida uudelleenvettymismahdollisuus vesitalouden suunnittelussa. Humuksen ja hiilen karkaaminen maaperästä ei ole haitallista pelkästään vesistöille, vaan aiheuttaa haittaa myös metsä- ja maataloudelle heikentämällä maan kasvukuntoa (Sarkkola ym. 2012). Hiilen karkaaminen maaperästä vaikuttaa myös hiilitaseeseen ja nivoutuu näin yhteen myös ilmastonmuutokseen (Hartley ym. 2021).

Tummuminen ja lisääntynyt humuskuormitus kuitenkin vaikuttavat negatiivisesti vesiekosysteemeihin ja tuottavat haasteita muun muassa juomavedenpuhdistuksessa. Vesien tummuminen ja humuskuormitus ei kuitenkaan ole suoraan mukana EU:n Vesipuitedirektiivin (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/60/EY) vesien tilan määrittämisen mittareissa. Humuskuorman olennaisten vesistövaikutusten vuoksi se olisi kuitenkin tarpeen ottaa nykyistä kattavammin huomioon vesien tilan arvioinnissa, jotta ennalta ehkäisy ja toimenpiteiden kohdentaminen helpottuisi.

Tutkielman tulokset osoittavat yhdessä aiemman tutkimuksen kanssa, että maan ja veden hiilenkierto sekä hiilinielujen toimivuus muuttuvassa ilmastossa kaipaavat kattavaa lisätutkimusta. Maankäytön roolin ymmärtäminen hiilenkierrossa ja pintavesien orgaanisen aineksen kuormituksessa on tärkeää pintavesien tilan parantamisen kannalta.

## **KIITOKSET**

Lopuksi haluan antaa kiitoksen kaikille tämän Pro gradu -työn tekemisessä mukana olleille henkilöille.

Kiitos Kaakkois-Suomen ELY-keskuksen Vesistöt-yksikölle ja Visa Niittyniemelle työn mahdollistamisesta. Kiitos Taina Ihaksille kaikesta avusta ja tuesta. Kiitos Antti Haapalalle avusta Hertan vedenlaatutietojen käsittelyn kanssa. Kiitos Tapio Tuukkaselle avusta tilastomenetelmien kanssa. Suuri kiitos Pyry Mäkelälle korvaamattomasta avusta paikkatietoanalyysien ja -aineistojen kanssa.

Kiitos Anssi Vähätalolle, Anssi Lensulle ja Salla Ahoselle avusta tutkimuksen suunnittelussa ja työn viimeistelyssä.

Kiitos tämän työn osittaisesta rahoituksesta Kaakkois-Suomen ELY-keskukselle.

Kouvolassa 29.4.2023

Venla Valjakka

## KIRJALLISUUSLUETTELO

- Anderson L., DeMont I., Dunnington D., Bjorndahl P., Redden D., Brophy M. & Gagnon G. 2022. A review of long-term change in surface water natural organic matter concentration in the northern hemisphere and the implications for drinking water treatment. *Sci. Tot. Environ.* 858: 159699.
- Aroviita, Jukka Mitikka, Sari Vienonen, Sanna: Julkaisija: Suomen ympäristökeskus: Päiväys: 2019: Kieli: fi: Kuuluu julkaisusarjaan: Suomen ympäristökeskuksen raportteja 37/2019: ISBN: 978-952-11-5074-6: ISSN: 1796-1726: URI: <http://hdl.handle.net/10138/306745>
- Arvola L., Leppäranta M. & Äijälä C. 2017. CDOM variations in Finnish lakes and rivers between 1913 and 2014. *Sci. Tot. Environ.* 601–602: 1638–1648.
- Arzel C., Nummi P., Arvola L., Pöysä H., Davranche A., Rask M., Olin M., Holopainen S., Viitala R., Einola E. & Manninen-Johansen S. 2020. Invertebrates are declining in boreal aquatic habitat: The effect of brownification? *Sci. Tot. Environ.* 724: 138199.
- Blanchet C., Arzel C., Davranche A., Kahilainen K., Secondi J., Taipale S., Lindberg H., Loehr J., Manninen-Johansen S., Sundell J., Maanan M., Nummi P. 2022. Ecology and extent of freshwater browning - What we know and what should be studied next in the context of global change. *Sci. Tot. Environ.* 812, 152420. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.152420.
- Brothers S., Köhler J., Attermeyer K., Grossart H.P., Mehner T., Meyer N., Scharnweber K. & Hilt S. 2014. A feedback loop links brownification and anoxia in a temperate, shallow lake. *Limnology and Oceanography* 59: 1388–1398.
- Chapelle F.H., Shen Y., Strom E.W. & Benner R. 2016. The removal kinetics of dissolved organic matter and the optical clarity of groundwater. *Hydrogeology Journal* 24: 1413–1422.
- Curtin D., Peterson M.E. & Anderson C.R. 2016. pH-dependence of organic matter solubility: Base type effects on dissolved organic C, N, P, and S in soils with contrasting mineralogy. *Geoderma* 271: 161–172.
- de Wit H., Valinia S., Weyhenmeyer G., Futter M., Kortelainen P., Austnes K., Hessen D., Raike A., Laudon H. & Vuorenmaa J. 2016. Current Browning of Surface Waters Will Be Further Promoted by Wetter Climate. *Environmental Science & Technology Letters* 3.
- Drinan T.J., Graham C.T., O'Halloran J. & Harrison S.S.C. 2013. The impact of catchment conifer plantation forestry on the hydrochemistry of peatland lakes. *Sci. Tot. Environ.* 443: 608–620.
- Duffy C., O'Donoghue C., Ryan M., Kilcline K., Upton V. & Spillane C. 2020. The impact of forestry as a land use on water quality outcomes: An integrated analysis. *Forest Policy and Economics* 116: 102185.
- Eklöf K., Brömssen C. von, Amvrosiadi N., Fölster J., Wallin M.B. & Bishop K. 2021. Brownification on hold: What traditional analyses miss in extended surface water records. *Water Research* 203: 117544.



- Estlander S., Pippingsköld E. & Horppila J. 2021. Artificial ditching of catchments and brownification-connected water quality parameters of lakes. *Water Research* 205: 117674.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/60/EY.
- Hartley I.P., Hill T.C., Chadburn S.E. & Hugelius G. 2021. Temperature effects on carbon storage are controlled by soil stabilisation capacities. *Nature Communications* 12:6713.
- Holopainen S. & Lehtikoinen A. 2022. Role of forest ditching and agriculture on water quality: Connecting the long-term physico-chemical subsurface state of lakes with landscape and habitat structure information. *Sci. Tot. Environ.* 806: 151477.
- Hughes A.O. & Quinn J.M. 2019. The effect of forestry management activities on stream water quality within a headwater plantation *Pinus radiata* forest. *Forest Ecology and Management* 439: 41–54.
- Hussain M.Z., Robertson G.P., Basso B. & Hamilton S.K. 2020. Leaching losses of dissolved organic carbon and nitrogen from agricultural soils in the upper US Midwest. *Sci. Tot. Environ.* 734: 139379.
- Härkönen L.H., Lepistö A., Sarkkola S., Kortelainen P. & Räike A. 2023. Reviewing peatland forestry: Implications and mitigation measures for freshwater ecosystem browning. *Forest Ecology and Management* 531: 120776.
- Kaakkois-Suomen vesienhoidon toimenpidesuunnitelma 2022–2027. 2022. [https://www.ymparisto.fi/download/53\\_2022\\_Raportteja\\_10052022pdf/%7B6446E475-F4CC-44D5-9E91-97F65A573F4C%7D/175179](https://www.ymparisto.fi/download/53_2022_Raportteja_10052022pdf/%7B6446E475-F4CC-44D5-9E91-97F65A573F4C%7D/175179) (luettu 25.10.2022)
- Kaal J., Pérez-Rodríguez M. & Biester H. 2022. Molecular Probing of DOM Indicates a Key Role of Spruce-Derived Lignin in the DOM and Metal Cycles of a Headwater Catchment: Can Spruce Forest Dieback Exacerbate Future Trends in the Browning of Central European Surface Waters? *Environmental Science & Technology*.
- Klante C., Larson M. & Persson K.M. 2021. Brownification in Lake Bolmen, Sweden, and its relationship to natural and human-induced changes. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 36: 100863.
- Kritzberg E.S. & Ekström S.M. 2012. Increasing iron concentrations in surface waters – a factor behind brownification? *Biogeosciences* 9: 1465–1478.
- Lepistö A., Räike A., Sallantausta T. & Finér L. 2021. Increases in organic carbon and nitrogen concentrations in boreal forested catchments – Changes driven by climate and deposition. *Sci. Tot. Environ.* 780: 146627.
- Li X., Zhang Q., Feng J., Jiang D. & Zhu B. 2023. Forest management causes soil carbon loss by reducing particulate organic carbon in Guangxi, Southern China. *Forest Ecosystems* 10: 100092.
- Nieminen M., Sarkkola S., Sallantausta T., Hasselquist E.M. & Laudon H. 2021. Peatland drainage - a missing link behind increasing TOC concentrations in waters from high latitude forest catchments? *Sci. Tot. Environ.* 774: 145150.

- Mattila T.J. & Ezzati G. 2022. A common agricultural soil test can identify legacy P hotspots in a drainage ditch network. *Journal of Environmental Management* 302: 113876.
- Meyer-Jacob C., Michelutti N., Paterson A.M., Cumming B.F., Keller W. & Smol J.P. 2019. The browning and re-browning of lakes: Divergent lake-water organic carbon trends linked to acid deposition and climate change. *Scientific Reports* 9: 16676.
- Minkkinen K., Ojanen P., Koskinen M. & Penttilä T. 2020. Nitrous oxide emissions of undrained, forestry-drained, and rewetted boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 478: 118494.
- Raza S., Zamanian K., Ullah S., Kuzyakov Y., Virto I. & Zhou J. 2021. Inorganic carbon losses by soil acidification jeopardize global efforts on carbon sequestration and climate change mitigation. *Journal of Cleaner Production* 315: 128036.
- Sarkkola S., Hökkä H., Ahti E., Koivusalo H. & Nieminen M. 2012. Depth of water table prior to ditch network maintenance is a key factor for tree growth response. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27: 649–658.
- Sarkkola S., Nieminen M., Koivusalo H., Laurén A., Kortelainen P., Mattsson T., Palviainen M., Piirainen S., Starr M. & Finér L. 2013. Iron concentrations are increasing in surface waters from forested headwater catchments in eastern Finland. *Sci. Tot. Environ.* 463–464: 683–689.
- Schmidt S.I., Hejzlar J., Kopáček J., Paule-Mercado Ma.C., Porcal P. & Vystavna Y. 2021. Relationships between a catchment-scale forest disturbance index, time delays, and chemical properties of surface water. *Ecological Indicators* 125: 107558.
- Senar O.E., Creed I.F. & Trick C.G. 2021. Lake browning may fuel phytoplankton biomass and trigger shifts in phytoplankton communities in temperate lakes. *Aquatic Sciences* 83: 21.
- Shah N.W., Baillie B.R., Bishop K., Ferraz S., Högbom L. & Nettles J. 2022. The effects of forest management on water quality. *Forest Ecology and Management* 522: 120397.
- Sikström U. & Hökkä H. 2016. Interactions between soil water conditions and forest stands in boreal forests with implications for ditch network maintenance. *Silva Fennica* 50:1416
- Škerlep M., Steiner E., Axelsson A.-L. & Kritzberg E.S. 2020. Afforestation driving long-term surface water browning. *Global Change Biology* 26: 1390–1399.
- Škerlep M. 2021. Changing land cover as a driver of surface water browning.
- Stetler J.T., Knoll L.B., Driscoll C.T. & Rose K.C. 2021. Lake browning generates a spatiotemporal mismatch between dissolved organic carbon and limiting nutrients. *Limnology and Oceanography Letters* 6: 182–191.
- Taipale S.J., Vuorio K., Strandberg U., Kahilainen K.K., Järvinen M., Hiltunen M., Peltomaa E. & Kankaala P. 2016. Lake eutrophication and brownification downgrade availability and transfer of essential fatty acids for human consumption. *Environment International* 96: 156–166.

- Wang Y., Paul S.M., Jocher M., Espic C., Alewell C., Szidat S. & Leifeld J. 2021. Soil carbon loss from drained agricultural peatland after coverage with mineral soil. *Sci. Tot. Environ.* 800: 149498.
- Weyhenmeyer G.A. & Karlsson J. 2009. Nonlinear response of dissolved organic carbon concentrations in boreal lakes to increasing temperatures. *Limnology and Oceanography* 54: 2513–2519.
- Williamson C.E., Overholt E.P., Pilla R.M., Leach T.H., Brentrup J.A., Knoll L.B., Mette E.M. & Moeller R.E. 2015. Ecological consequences of long-term browning in lakes. *Scientific Reports* 5: 18666.
- Zheng L., Xing Y., Ding A., Sun S., Cheng H., Bian Z., Yang K., Wang S. & Zhu G. 2022. Brownification of freshwater promotes nitrogen-cycling microorganism growth following terrestrial material increase and ultraviolet radiation reduction. *Sci. Tot. Environ.* 853: 158556.

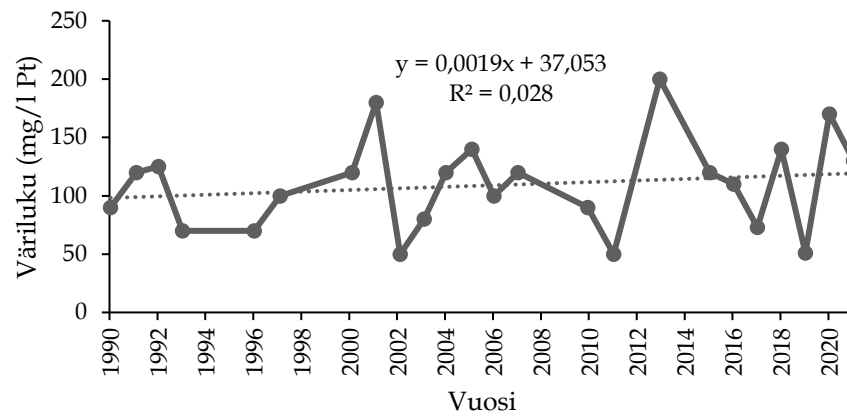
## LIITE 1 TUTKIMUSJÄRVIEN VÄRILUVUT

Taulukko 3. Tutkimusjärvien väriluvun keskiarvo, väriluvun keskihajonta ja näytteenottokerrat tarkasteluaikana 1990–2022.

Järvi	Väriluvun keskiarvo 1990–2022 välillä (mg/l Pt)	Keskihajonta	Näytteenottokerrat 1990–2022 välillä (lkm.)
Hahmajärvi	109,13	6,68	24
Hirvasjärvi	10,00	4,49	21
Immаланjärvi	11,16	1,46	32
Kannusjärvi	102,20	8,70	15
Karijärvi	14,00	2,25	15
Kurvinjärvi	177,69	39,98	13
Kärinki	19,50	3,81	18
Luomijärvi	28,40	0,76	15
Merkjärvi	5,50	1,03	6
Nurmijärvi	16,20	3,51	15
Pahkajärvi	29,83	5,46	12
Pieksänjärvi	49,73	10,68	30
Pieni Rautjärvi	46,29	11,99	21
Pääjärvi	67,68	12,31	28
Rautjärvi	18,57	5,18	14
Sompanen	53,83	11,28	12
Sonnanen	2,62	0,17	34
Suojärvi	16,04	0,53	24
Suuri Rautjärvi	54,41	14,82	17
Tervajärvi	75,26	14,57	19
Torsa-Pieni-Torsa	67,02	9,04	22
Tuusjärvi	74,16	8,90	31
Urajärvi	21,30	3,57	23
Valkjärvi	11,60	2,06	5

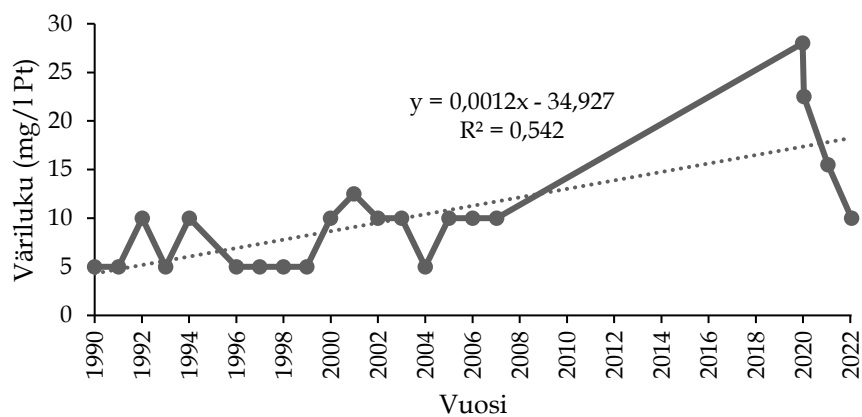
## LIITE 2 TUTKIMUSJÄRVIEN VÄRILUVUN TRENDIKUVAAJAT

Hahmajärvi, väriluku mg/l Pt



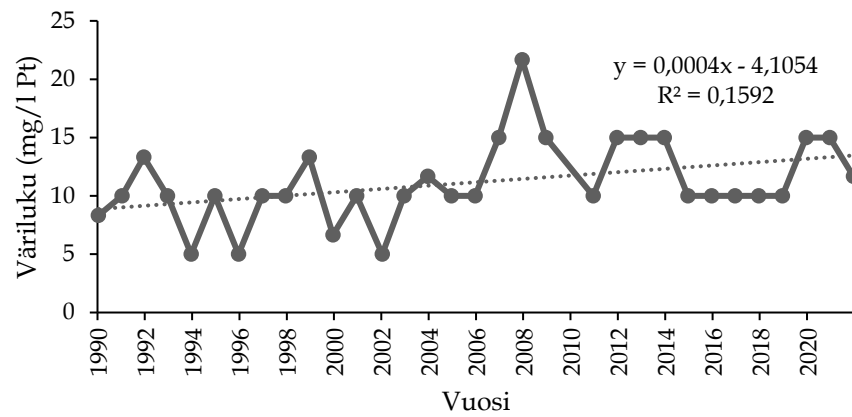
Kuva 42. Väriluvun trendi ajan suhteen Hahmajärvässä.

Hirvasjärvi, väriluku



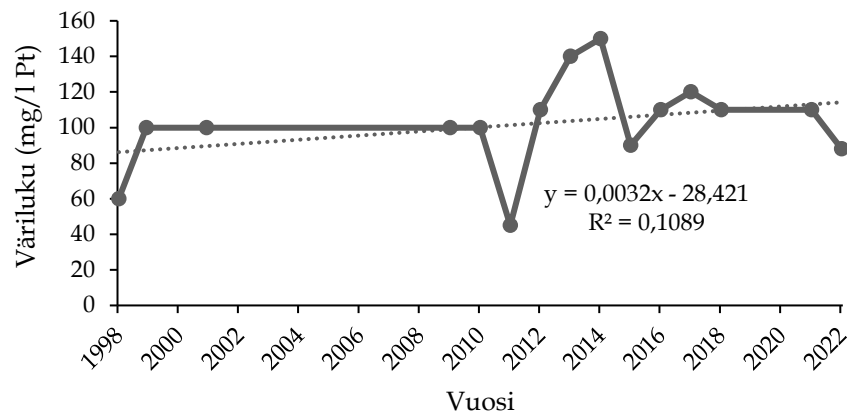
Kuva 43. Väriluvun trendi ajan suhteen Hirvasjärvässä.

### Immalanjärvi, väriluku



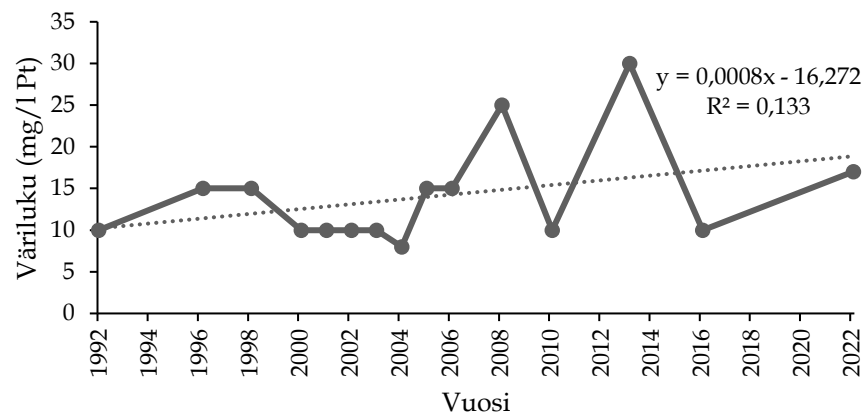
Kuva 44. Väriluvun trendi ajan suhteen Immalanjärvässä.

### Kannusjärvi, väriluku



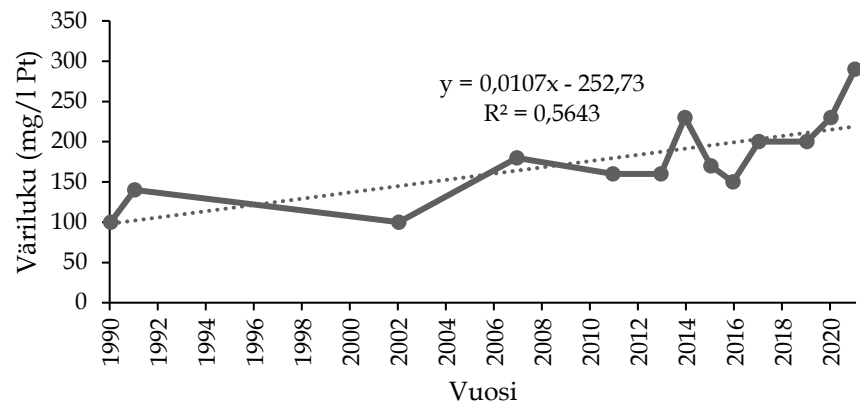
Kuva 45. Väriluvun trendi ajan suhteen Kannusjärvässä.

### Karijärvi, väriluku



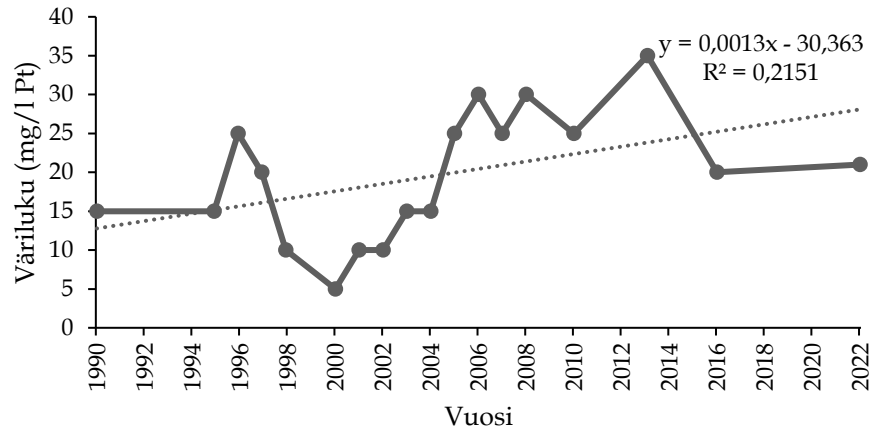
Kuva 46. Väriluvun trendi ajan suhteen Karijärvässä.

## Kurvinjärvi, väriluku



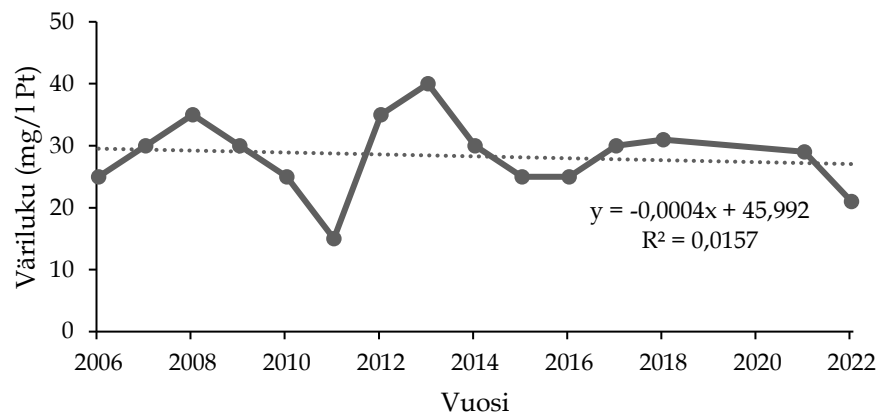
Kuva 47. Väriluvun trendi ajan suhteen Kurvinjärvessä.

## Kärinki, väriluku



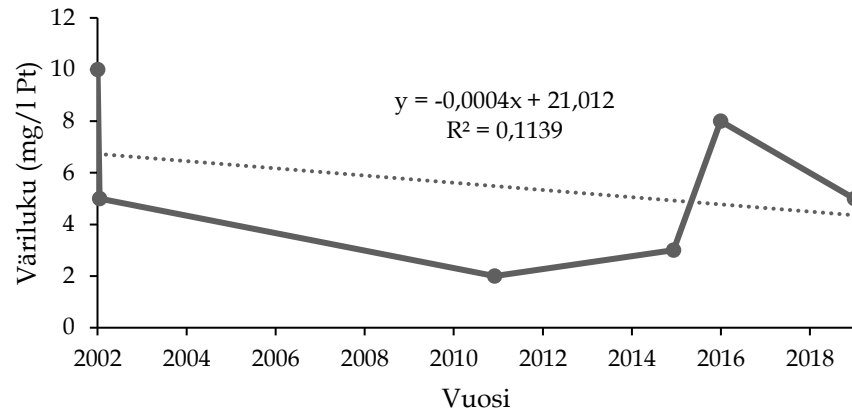
Kuva 48. Väriluvun trendi ajan suhteen Käringissä.

## Luomijärvi, väriluku



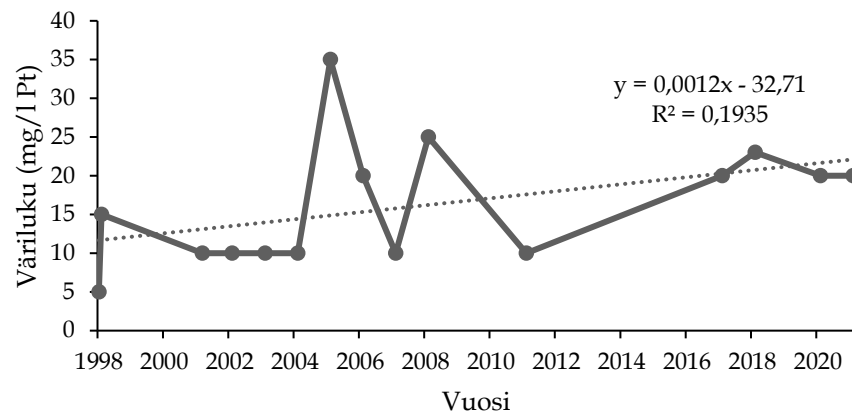
Kuva 49. Väriluvun trendi ajan suhteen Luomijärvessä.

## Merkjärvi, väriluku



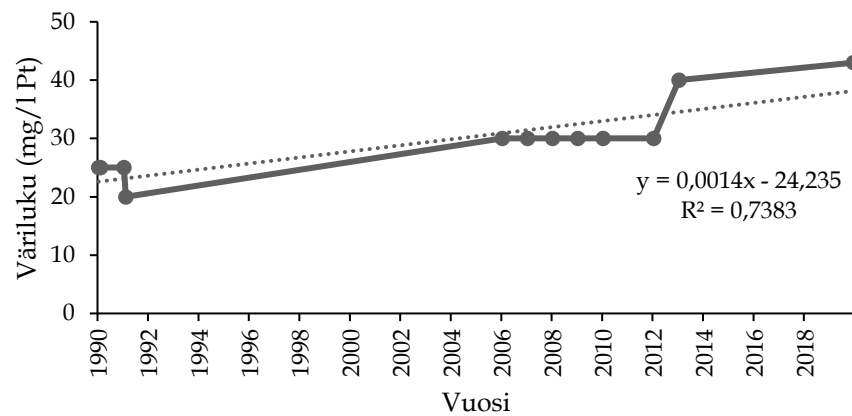
Kuva 50. Väriluvun trendi ajan suhteen Merkjärvässä.

## Nurmijärvi, väriluku



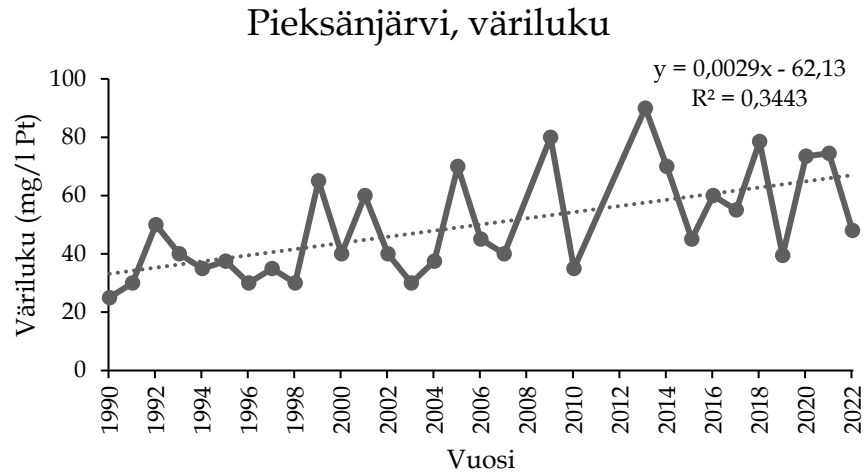
Kuva 51. Väriluvun trendi ajan suhteen Nurmijärvässä.

## Pahkajärvi, väriluku

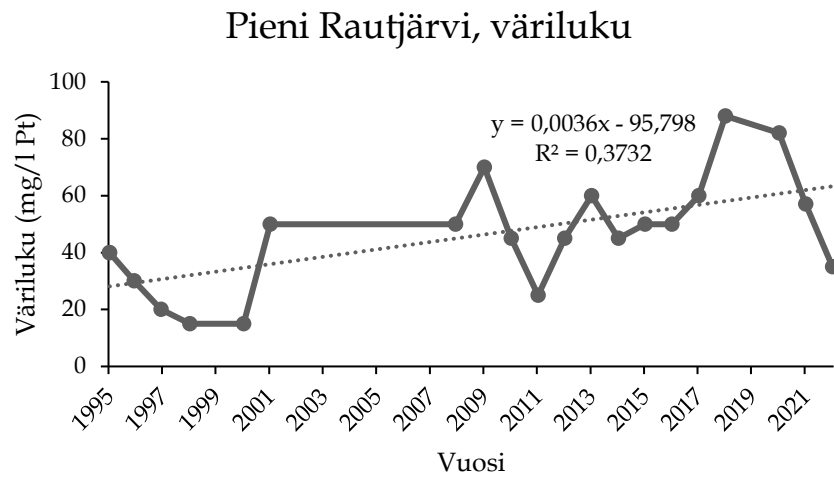


Kuva 52. Väriluvun trendi ajan suhteen Pahkajärvässä.

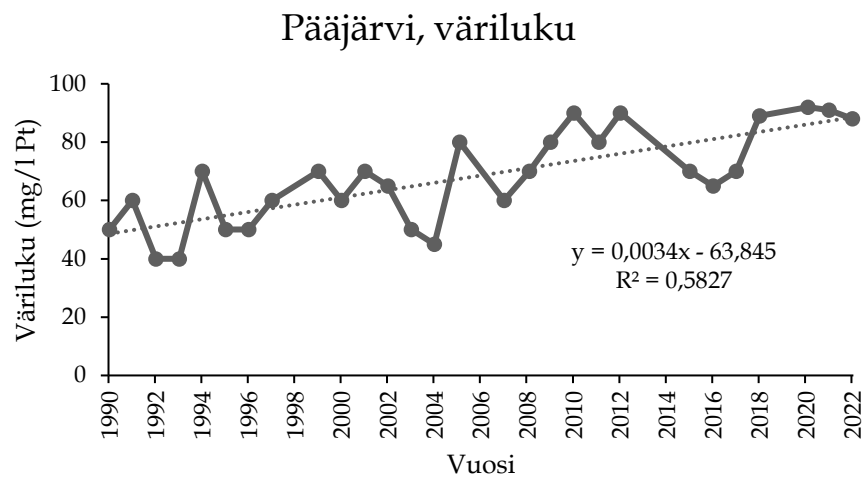




Kuva 53. Väriluvun trendi ajan suhteen Pieksänjärvessä.

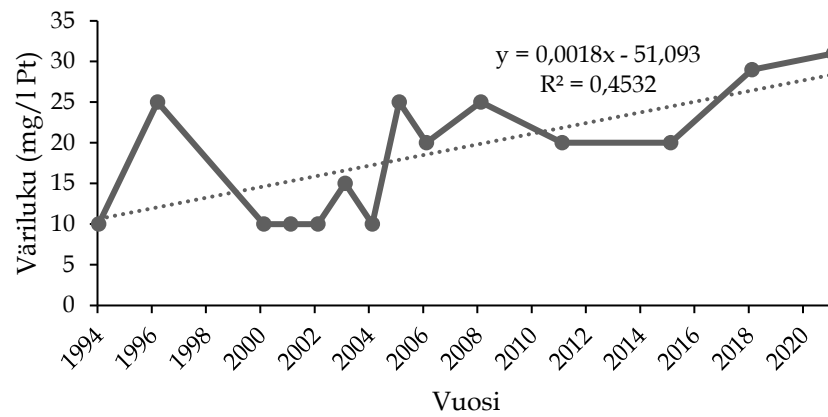


Kuva 54. Väriluvun trendi ajan suhteen Pienessä Rautjärvessä.



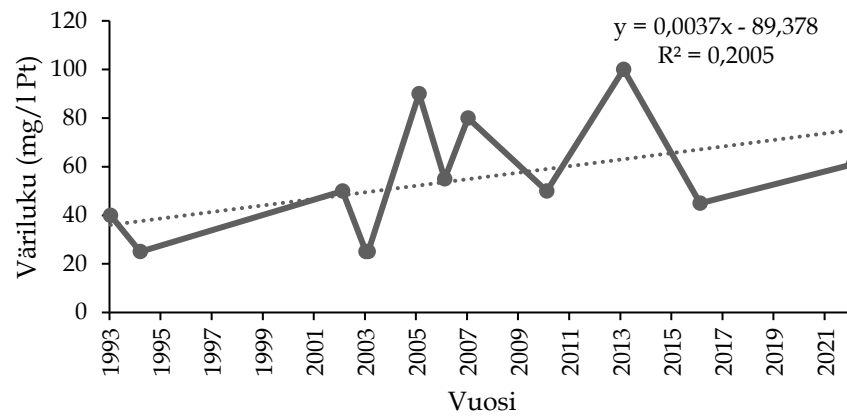
Kuva 55. Väriluvun trendi ajan suhteen Pääjärvessä.

## Rautjärvi, väriluku



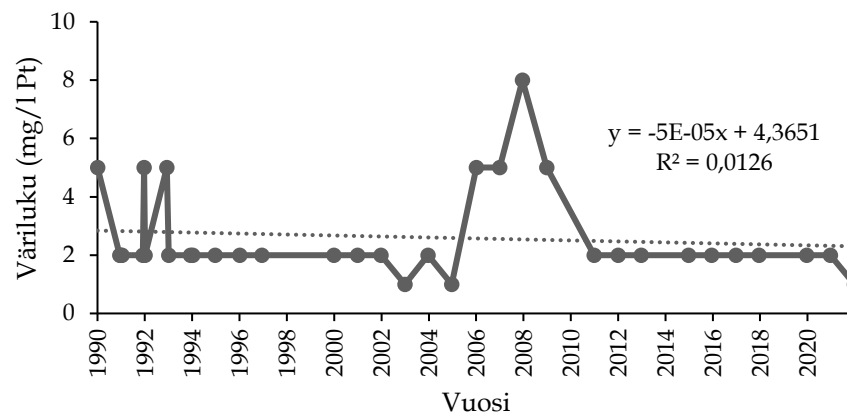
Kuva 56. Väriluvun trendi ajan suhteen Rautjärvessä.

## Sompanen, väriluku

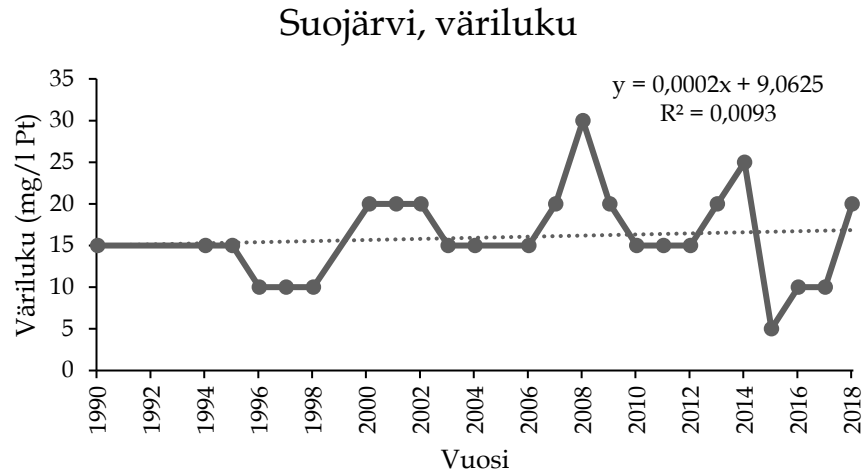


Kuva 57. Väriluvun trendi ajan suhteen Sompasessa.

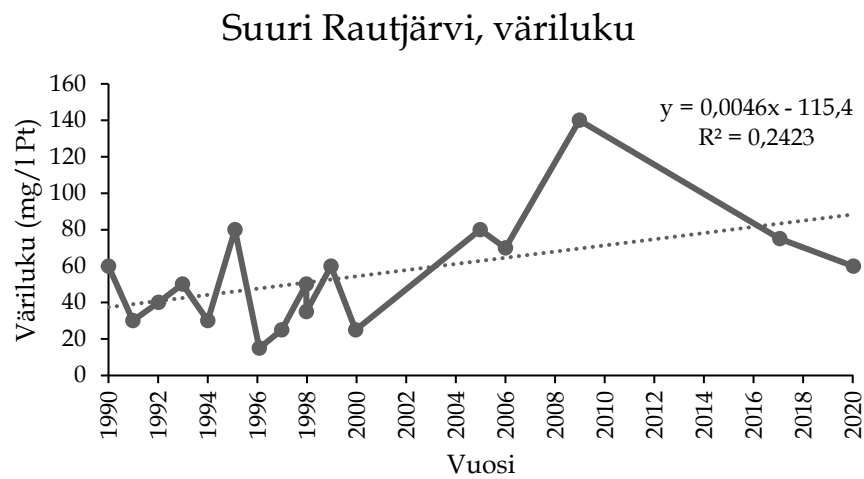
## Sonnanen, väriluku



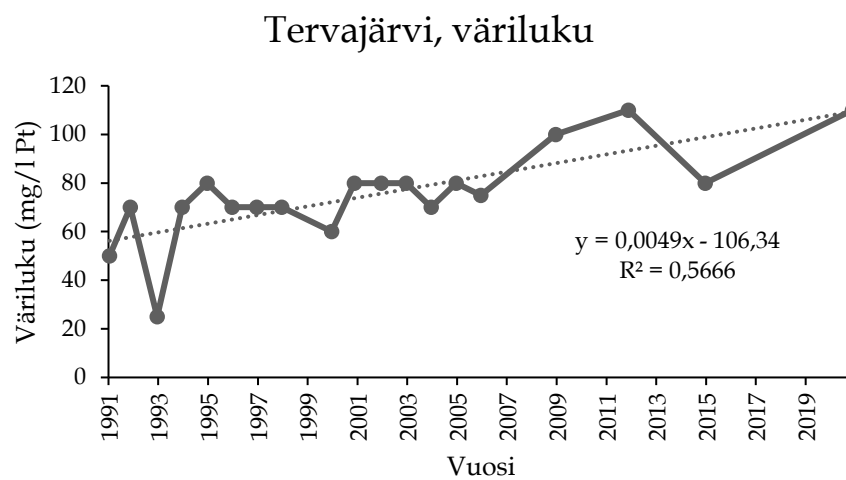
Kuva 58. Väriluvun trendi ajan suhteen Sonnasessa.



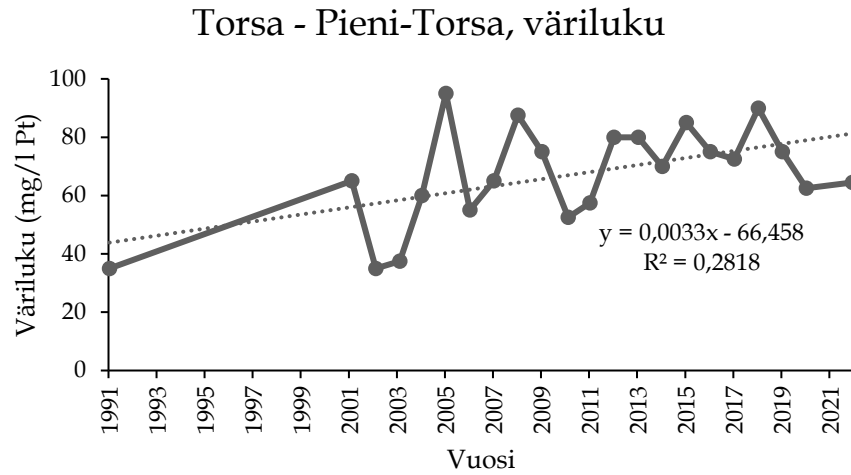
Kuva 59. Väriluvun trendi ajan suhteen Suojärnessä.



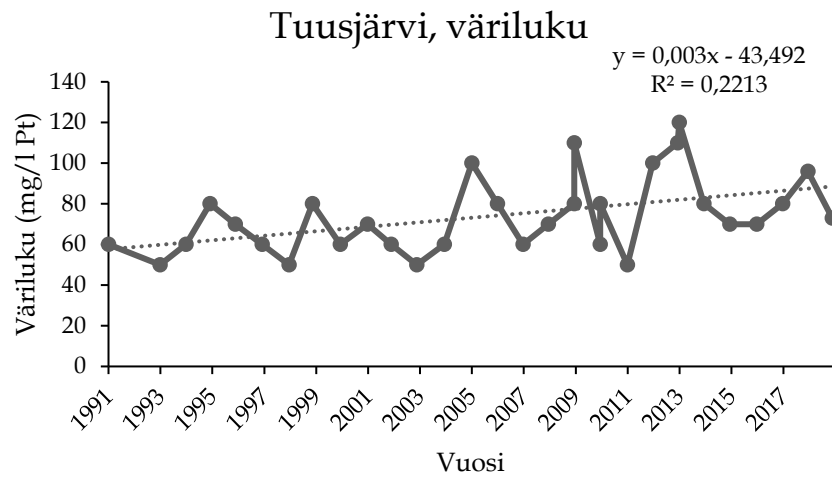
Kuva 60. Väriluvun trendi ajan suhteen Suuressa Rautjärnessä.



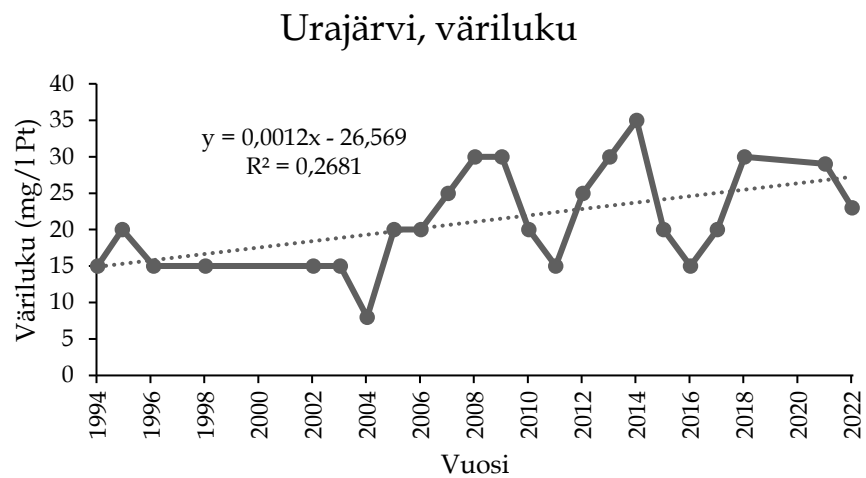
Kuva 61. Väriluvun trendi ajan suhteen Tervajärnessä.



Kuva 62. Väriluvun trendi ajan suhteen Torsa -Pieni-Torsassa.

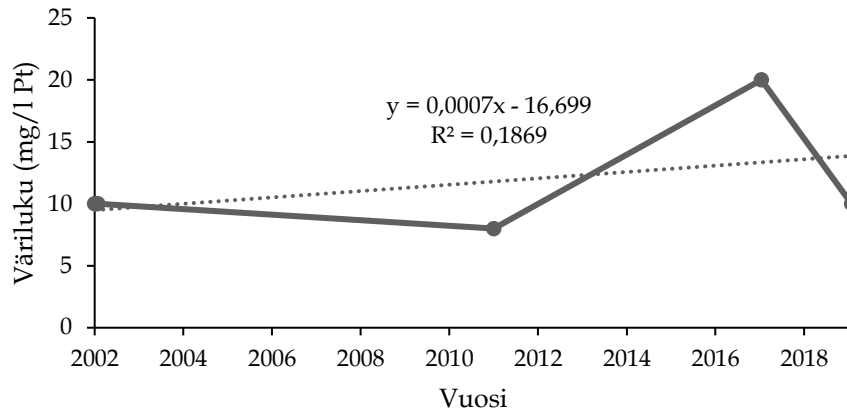


Kuva 63. Väriluvun trendi ajan suhteen Tuusjärvässä.



Kuva 64. Väriluvun trendi ajan suhteen Urajärvässä.

## Valkjärvi, väriluku



Kuva 65. Väriluvun trendi ajan suhteen Valkjärnessä.

## LIITE 3 VALUMA-ALUEEN MAANKÄYTÖN JA OMINAISUUKSIEN TUNNUSLUVUT KOKO AINEISTOSSA

Taulukko 4. Valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien tunnusluvut koko aineistosta.

	Keskiarvo	Keskihajonta	Minimi	Maksimi
Väriarvon keskiarvo 1990–2022 välillä (mg/l Pt)	45	42	3	178
Valuma-alueen pinta-ala (km <sup>2</sup> )	65	75	4	226
Metsäalan osuus valuma-alueesta	0,63	0,09	0,39	0,77
Peltoalan osuus valuma-alueesta	0,07	0,07	0,00	0,24
Vesialan osuus valuma-alueesta	0,19	0,11	0,03	0,49
Ojakilometrit neliökilometrillä valuma-alueella (km)	3,79	1,88	0,42	7,80
Ojakilometrit neliökilometrillä metsäalaa (km)	6,01	3,07	0,72	13,66
Puustoon osuus valuma-alueen pinta-alasta, joka hakattu 1990–2022	0,23	0,07	0,03	0,38
Puustoon osuus valuma-alueen metsäalasta, joka hakattu 1990–2022	0,36	0,09	0,05	0,52
Puustoon osuus valuma-alueen pinta-alasta, joka hakattu 1960–2022	0,48	0,12	0,18	0,70
Puustoon osuus valuma-alueen metsäalasta, joka hakattu 1960–2022	0,76	0,13	0,31	0,93
Puustoon osuus valuma-alueen pinta-alasta, joka hakattu 1940–2022	0,59	0,09	0,37	0,74
Puustoon osuus valuma-alueen metsäalasta, joka hakattu 1940–2022	0,93	0,05	0,74	0,99
Osuus valuma-alueesta, jolla kuusta yli 50 % puustosta	0,16	0,09	0,03	0,37
Osuus metsäalasta, jolla kuusta yli 50 % puustosta	0,25	0,13	0,05	0,52

Osuus valuma-alueesta, jolla kuusta yli 80 % puustosta	0,07	0,06	0,01	0,23
Osuus metsäalasta, jolla kuusta yli 80 % puustosta	0,11	0,09	0,01	0,34
Turvemaan osuus valuma-alueesta	0,09	0,06	0,02	0,26
Turvemaan osuus metsäalasta	0,14	0,09	0,01	0,36
Pohjaveden muodostumisalueiden osuus valuma-alueesta	0,05	0,05	0,00	0,17

---

# LIITE 4 VALUMA-ALUEEN MAANKÄYTÖN JA OMINAISUUKSEN JA VEDEN VÄRIN MUUTOKSEN VÄLISEN YHTEYDEN REGRESSIOANALYYSIN TULOKSET

Taulukko 5. Regressioanalyysin tulokset. Tilastollisesti merkitsevä arvo tummennettu.

	Regressio- kerroin	Keskivirhe	t-arvo	Selitysaste	Tilastollinen merkitsevyys
Väriluvun keskiarvo 1990–2022 välillä (mg/l Pt)	0,018	0,002	7,854	0,737	<b>0,0000001</b>
Valuma-alueen pinta-ala (km <sup>2</sup> )	0,002	0,002	0,74	0,02	0,469
Metsäalan osuus valuma-alueesta	3,71	1,81	2,05	0,16	0,052
Peltoalan osuus valuma-alueesta	2,98	2,46	1,21	0,06	0,239
Vesialan osuus valuma-alueesta	-4,74	1,34	-3,53	0,36	<b>0,002</b>
Ojakilometrit neliökilometrillä valuma-alueella (km)	0,32	0,07	4,65	0,50	<b>0,0001</b>
Ojakilometrit neliökilometrillä metsäalaa (km)	0,15	0,05	2,89	0,28	<b>0,009</b>
Puustoon osuus valuma-alueen pinta-alasta, joka hakattu 1990–2022	3,55	2,45	1,45	0,09	0,16
Puustoon osuus valuma-alueen metsäalasta,	1,51	2,05	0,74	0,02	0,47



joka hakattu 1990–2022 Puustoon osuus valuma-alueen pinta-alasta, joka hakattu 1960–2022	2,35	1,50	1,57	0,10	0,13
Puustoon osuus valuma-alueen metsäalasta, joka hakattu 1960–2022	0,93	1,43	0,65	0,02	0,52
Puustoon osuus valuma-alueen pinta-alasta, joka hakattu 1940–2022	3,43	1,82	1,89	0,14	0,07
Puustoon osuus valuma-alueen metsäalasta, joka hakattu 1940–2022	0,83	3,56	0,23	0,002	0,82
Osuus valuma- alueesta, jolla kuusta yli 50 %	0,63	2,05	0,31	0,004	0,76
Osuus metsä- alasta, jolla kuusta yli 50 %	-0,15	1,40	-0,11	0,001	0,92
Osuus valuma- alueesta, jolla kuusta yli 80 %	0,48	3,23	0,15	0,001	0,88
Osuus metsä- alasta, jolla kuusta yli 80 %	-0,24	2,10	-0,12	0,001	0,91
Turvemaan osuus valuma- alueesta	9,46	2,19	4,32	0,46	<b>0,0003</b>
Turvemaan osuus metsä- alasta	5,13	1,61	3,18	0,32	<b>0,004</b>
Pohjaveden muodostumis- alueiden osuus valuma-alu- eesta	2,84	3,54	0,80	0,028	0,43

## LIITE 5 VALUMA-ALUEEN MAANKÄYTÖN JA OMINAISUUKSIEN TUNNUSLUVUT TUMMUNEIDEN JA TUMMUMATTOMIEN JÄRVIEN VALUMA-ALUEILLA

Taulukko 6. Valuma-alueen maankäytön ja ominaisuuksien tunnusluvut tummuneiden ja tummumattomien järvien valuma-alueilla. Järveä pidetään tummuneena, mikäli väriluvun muutoksen regressioanalyysin tulos alitti raja-arvon 0,05.

	Ei tummunut = 0	n	Keskiarvo	Keskihajonta	Minimi	Maksimi
	Tummunut = 1					
Väriluvun keskiarvo 1990– 2022 välillä (mg/l Pt)	0	11	34,46	37,77	2,62	109,13
	1	13	54,08	44,04	10,00	177,69
Valuma-alueen pinta-ala (km <sup>2</sup> )	0	11	36,98	56,51	4,46	200,03
	1	13	89,13	82,67	3,94	226,36
Metsäalan osuus valuma- alueesta	0	11	0,63	0,05	0,57	0,70
	1	13	0,63	0,12	0,39	0,77
Peltoalan osuus valuma- alueesta	0	11	0,07	0,08	0,00	0,19
	1	13	0,08	0,07	0,00	0,24
Vesialan osuus valuma- alueesta	0	11	0,22	0,14	0,03	0,49
	1	13	0,17	0,08	0,04	0,30
Ojakilometrit neliökilometrillä valuma-alueella (km)	0	11	2,86	1,33	0,42	4,57
	1	13	4,58	1,96	0,93	7,80
Ojakilometrit neliökilometrillä metsäalaa (km)	0	11	4,46	2,01	0,72	7,21
	1	13	7,33	3,26	1,70	13,66
Puustoon osuus valuma- alueen pinta-alasta, joka hakattu 1990–2022	0	11	0,21	0,07	0,03	0,29
	1	13	0,25	0,07	0,11	0,38
Puustoon osuus valuma- alueen metsäalasta, joka hakattu 1990–2022	0	11	0,33	0,11	0,05	0,52
	1	13	0,38	0,06	0,29	0,50
	0	11	0,44	0,10	0,18	0,55

Puustoon osuus valuma- alueen pinta-alasta, joka hakattu 1960–2022	1	13	0,52	0,12	0,28	0,70
Puustoon osuus valuma- alueen metsäalasta, joka hakattu 1960–2022	0	11	0,70	0,15	0,31	0,87
	1	13	0,81	0,08	0,68	0,93
Puustoon osuus valuma- alueen pinta-alasta, joka hakattu 1940–2022	0	11	0,57	0,07	0,42	0,65
	1	13	0,60	0,11	0,37	0,74
Puustoon osuus valuma- alueen metsäalasta, joka hakattu 1940–2022	0	11	0,91	0,06	0,74	0,97
	1	13	0,95	0,03	0,89	0,99
Osuus valuma-alueesta, jolla kuusta yli 50 % puustosta	0	11	0,15	0,10	0,03	0,32
	1	13	0,17	0,08	0,08	0,37
Osuus metsäalasta, jolla kuusta yli 50 % puustosta	0	11	0,24	0,16	0,05	0,51
	1	13	0,27	0,10	0,14	0,52
Osuus valuma-alueesta, jolla kuusta yli 80 % puustosta	0	11	0,07	0,08	0,01	0,23
	1	13	0,07	0,04	0,02	0,15
Osuus metsäalasta, jolla kuusta yli 80 % puustosta	0	11	0,11	0,12	0,01	0,34
	1	13	0,12	0,05	0,04	0,22
Turvemaan osuus valuma- alueesta	0	11	0,06	0,03	0,01	0,11
	1	13	0,11	0,07	0,03	0,26
Turvemaan osuus metsäalasta	0	11	0,09	0,05	0,01	0,18
	1	13	0,18	0,11	0,05	0,36
Pohjaveden muodostumisalueiden osuus valuma-alueesta	0	11	0,03	0,04	0,00	0,11
	1	13	0,06	0,06	0,00	0,17

---