

**Avohakkuiden vaikutukset valuma-alueen vesistöjen
tummuuteen ja vesilintujen pesintään Evolla vuosina
1990–2014**

Riina-Kaisa Ruokola

Maantiede
Pro gradu -tutkielma
Laajuus: 30 op

Ohjaaja:
Risto Kalliola

23.2.2023
Turku

Pro gradu -tutkielma

Pääaine: Maantiede

Tekijä: Riina-Kaisa Ruokola

Otsikko: Avohakkuiden vaikutukset valuma-alueen vesistöjen tummuuteen ja vesilintujen pesintään Evolla vuosina 1990–2014

Ohjaaja: Risto Kalliola

Sivumäärä: 58 sivua + liitteet 13 sivua

Päivämäärä: 23.2.2023

Vesistöt ovat tummuneet boreaalisella havumetsävyöhykkeellä viime vuosina. Teollistumisen jälkeen sulfaattipitoinen laskeuma kasvoi ja happamoitti maaperää, mutta viime vuosikymmeninä sulfaattipitoinen laskeuma on vähentynyt, mikä on puolestaan nostanut maaperän pH-arvoa. Emäksinen maaperä edistää orgaanisen materian liukenemistä, joka sisältää enimmäkseen liuennutta orgaanista hiiltä, jonka on arvioitu olevan yksi päätekijä vesistöjen tummumiselle. Valuma-alueen topografia, maaperän ominaisuudet, metsätyyppi ja maankäyttö vaikuttavat siihen, miten paljon liuennutta orgaanista hiiltä vesistöihin huuhtoutuu. Avohakkuut ovat yksi maankäytön muoto, joka lisää liuenneen orgaanisen hiilen määrää vesistöissä. Veden korkea tummuus saattaa puolestaan johtaa vesikasvillisuuden vähenemiseen, vesistön ravintoketjun köyhtymiseen ja tätä kautta niukempaan lajikirjoon.

Tutkielman tavoitteena on selvittää Evolla sijaitsevien viiden tutkimusjärven valuma-alueilla tehtyjen avohakkuiden vaikutus järvien tummumiseen ja tummumisen vaikutus tavin, sinisorsan, telkän ja haapanan esiintyvyyteen kolmen hypoteesin avulla: H1) Avohakkuut valuma-alueella lisäävät tutkimusjärvien tummumista, H2) avohakkuualueiden vaihtelevat ominaisuudet vaikuttavat tutkimusjärvien tummumiseen eri tavalla ja H3) tutkimusjärvien tummuminen vaikuttaa negatiivisesti vesilintujen esiintymiseen alueella.

Aineistoina käytän Maanmittauslaitoksen maastokarttarasteria, historiallisia ilmakuvia ja korkeusmallia (10m x 10m) valuma-alueiden, ojaverkoston, avohakkuualueiden ja rinnekaltevuuden tarkasteluun. Lisäksi käytössäni on Geologian tutkimuslaitoksen maaperäkartta maaperän kartoittamiseen, Suomen ympäristökeskuksen Corine Land Cover – aineisto (2000) metsätyypin määrittämiseen ja Ilmatieteenlaitoksen säähavaintoaineisto sadannan vaikutusten arviointiin. Lintuhavaintoaineiston olen saanut käyttööni Petri Nummelta ja veden tummuus -aineiston on tuottanut Lammin biologinen asema.

Muokkasin ja visualisoin aineistot ArcGIS Pro -paikkatieto-ohjelmalla kartoiksi ja kuvaajiksi valuma-alueiden ja hakkuualueiden ominaisuuksien visuaalista ja tilastollista tulkintaa varten. Käytin Excel-ohjelman regressioanalyysiä havaitakseni, miten erilaiset valuma-alueen ja hakkuualueen ominaisuudet vaikuttivat veden tummuuteen ja miten veden tummuus vaikutti lintujen esiintyvyyteen.

Tulokset osoittivat, että hakkuut ja niillä vallitsevat olosuhteet lisäävät tutkimusjärvien veden tummuutta enemmän kuin koko valuma-alueen olosuhteet. Lisäksi eri tutkimusjärvillä erilaiset hakkuualueiden ominaisuudet vaikuttivat veden tummuuteen eri tavoin. Erityisesti sadanta, turvemaan osuus ja ojitus vaikuttivat merkittävimmin useimpien tutkimusjärvien veden tummuuden kasvuun tai ylläpitoon. Tummuuden kasvu lisäsi tavin esiintymistä kahdella, sinisorsan yhdellä ja telkän esiintymistä kolmella tutkimusjärvellä. Haapanan esiintyvyys laski kahdella järvellä.

Jatkossa olisi tärkeää tutkia, miten sadannan ja lämpötilan vuodenaikaisvaihtelu vaikuttaa sadannan merkitykseen vuoden keskimääräisen sadannan sijaan. Olisi tärkeää tutkia tarkemmin myös avohakkuualueiden erilaisia ominaisuuksia ja millä tavalla niiden vaikutus vesistöjen tummuuteen vaihtelee eri järvien kohdalla. Vesilintu- ja hyönteiskantojen supistuessa täytyisi tarkastella selkärangattomien lajikirjoja ja muutosta tutkimusjärvissä suhteessa veden tummuuteen, mikä voisi antaa viitteitä vesilintujen tulevaisuudesta vesistöjen muuttuvissa olosuhteissa.

Avainsanat: Vesistöjen tummuminen, liuennut orgaaninen hiili, avohakkuu, vesilinnut

Master's thesis

Subject: Geography

Author(s): Riina-Kaisa Ruokola

Title: Impacts of clearcutting on water browning and waterfowl presence in Evo area in 1990–2014

Supervisor(s): Risto Kalliola

Number of pages: 58 pages

Date: 23.2.2023

Browning of water bodies has occurred in the boreal coniferous forest zone in recent years. After industrialization, sulfate-rich deposit increased and turned soil more acid. In the last centuries, sulfate-rich deposit has decreased and made soil more alkaline which enhance the dissolution of the organic matter. Further, the dissolved organic matter contains mostly dissolved organic carbon that has been estimated to be one of the main reasons for water colour increase. Also, leaching of dissolved organic carbon from soil to water bodies is dependent on topography, soil characteristics, forest type and land use of the catchment basin. According to several studies, different forestry practices, like clearcuttings, increase the amount of dissolved organic carbon in water bodies. High colour of the water may result in biodiversity loss in the lake area due to the depletion of the water plants and nutritive value of food chains.

Aim of this study is to examine how clearcutting affects water browning in five lakes in Evo, Finland, and how water browning is affecting presence of four waterbird species in the lakes. To reach the goal, I have three hypothesis: H1) Clearcutting in catchment basin increases the brownification of the study lakes, H2) varying characteristics of harvest area affects differently on water browning in separate lakes, and H3) water browning influences negatively on waterfowl presence.

Data for mapping catchment basin, ditch network, harvested areas and slope is provided by National Land Survey of Finland. Also, I used soil map provided by Geological Survey of Finland, Corine Land Cover (2000) -vector data from Finnish Environment Institute and precipitation data gathered by Finnish Meteorological Institute to assess soil and forest type and precipitation in the area. All data was open data. Historical aerial images from National Land Survey of Finland had to be screenshots from Paikkatietoikkuna. Bird data is provided by Petri Nummi, and water colour data by Lammi Biological Station.

I used ArcGIS Pro and Excel to edit and visualize data for visual and statistical interpretation of the attributes of catchment basin and harvest areas. Regression analysis was used to define which attributes increased water colour the most and how water browning affected waterfowl presence.

Results pointed that clearcuts and varying attributes of the harvested areas increase the water colour more than the attributes of entire catchment basin. However, attributes affect water colour differently in different lakes. Especially precipitation, increasing amount of peatland and ditching in the harvesting areas had the most significant impact on increased or high sustained water colour. Common teal presence increased in two lakes due to the brownification, mallard in one lake and common goldeneye in three lakes. Eurasian wigeon was decreased in two lakes due to the brownification.

It would be important to examine more precise how mean seasonal precipitation and mean temperature affects the discharge and further, water browning in relation to clearcuttings. In addition, varying characteristics of clearcutting areas and how they effect on water browning in different lakes should be examined more detailed. This study gives an insight to waterfowl presence in five studied lakes, but results remain uncertain. While waterfowls and invertebrates are declining generally, it would be crucial to study biodiversity of the invertebrates in relation to water browning. This would give references about the future of waterfowl presence in the changing environments.

Key words: Water browning, dissolved organic carbon, clearcutting, waterfowl

Sisällysluettelo

1	Johdanto	7
2	Tutkimuksen tausta	9
2.1	Metsätalous Suomessa	9
2.1.1	Suomen metsävarat	9
2.1.2	Metsänhoito Suomessa	10
2.2	Tummuvat vedet	11
2.2.1	Miksi vesistöt tummuvat?	11
2.2.2	Hakkuiden vaikutus vesistöjen DOC-pitoisuuteen	14
2.3	Vesiekosysteemi tummuuissa vesistöissä	16
3	Aineistot ja menetelmät	19
3.1	Tutkimusalue	19
3.2	Tutkimuslajit	21
3.3	Aineistot	23
3.4	Menetelmät	25
4	Tulokset	27
4.1	Tutkimusjärvien ja valuma-alueiden ominaisuudet	27
4.2	Valuma-alueen ominaisuudet suhteessa hakkuualueisiin	31
4.3	Tutkimusjärvien tummuus suhteessa valuma-alueiden ja hakkuualueiden ominaisuuksiin	33
4.4	Linnuston muutokset suhteessa veden tummuuteen	38
5	Keskustelu	41
5.1	Hakkuiden ja hakkuualojen ominaisuuksien vaikutus järvien tummuuteen	41
5.2	Järven tummuuden vaihtelun merkitys vesilintujen pesintään	45
6	Johtopäätökset	49
	Kiitokset	51
	Lähteet	52
	Liitteet	59

Liite 1. Ison Ruuhijärven, Särkijärven, Huhmarin ja Syrjänelusen rinnekaltevuuskartta	59
Liite 2. Pitkänniemenjärven rinnekaltevuuskartta	60
Liite 3. Ison Ruuhijärven, Särkijärven, Huhmarin ja Syrjänelusen maaperäkartta	61
Liite 4. Pitkänniemenjärven maaperäkartta	62
Liite 5. Ison Ruuhijärven, Särkijärven, Huhmarin ja Syrjänelusen metsätyypikartta	63
Liite 6. Pitkänniemenjärven metsätyypikartta	64
Liite 7. Valuma-alueiden ojaverkostokartta	65
Liite 8. Valuma-alueiden hakkuualueet	66
Liite 9. Ruuhijärven lintuhavainnot	67
Liite 10. Särkijärven lintuhavainnot	68
Liite 11. Huhmarin lintuhavainnot	69
Liite 12. Syrjänelusen lintuhavainnot	70
Liite 13. Pitkänniemenjärven lintuhavainnot	71

1 Johdanto

Metsät kattavat Suomen maapinta-alasta 75 % (Kulju ym. 2023). Metsätalouden näkökulmasta 20,3 miljoonaa hehtaaria Suomen metsämaasta soveltuu puuntuotantoon. Talousmetsien intensiivinen käyttö ja tehokas metsäpalojen torjunta vaikuttavat merkittävästi metsien rakenteeseen ja muutokset maisemassa voivat olla hyvin äkillisiä (Kuuluvainen ym. 2002). Havupuuvaltaisten talousmetsien hoidolla on viime vuosina huomattu olevan merkittävä vaikutus vesistöjen tummumiseen (engl. *brownification*) (Björnerås ym. 2017). Taloudellisesti hyödynnettävät havumetsät ovat merkittävä vesistöihin päätyvän terrestrisen, liuenneen orgaanisen aineksen lähde. Näillä alueilla raudan ja sen kanssa esiintyvän liuenneen orgaanisen hiilen määrä on suurempi kuin muilla maankäytön sektoreilla.

Maankuivatus on olennainen osa metsien hoitotoimenpiteitä silloin, kun tarkoituksena on parantaa talousmetsän tuottavuutta (Maankuivatus ja ojitus 2020). Perinteisiä keinoja tähän ovat alueen ojittaminen tai purojen perkaaminen. Suomessa metsäojituksia on tehty noin kuuden miljoonan hehtaarin alueelle (Soiden ennallistaminen 2016). Ojitus voi vaikuttaa valuma-alueen vesistöihin lisäämällä ravinnekuormitusta tai happamoittamalla vesiä. Ojittaminen lisää myös veteen liuenneen orgaanisen aineksen määrää (Åström ym. 2001).

Liennut orgaaninen aines (engl. *dissolved organic matter*, DOM) on yksi tärkeimmistä vesistöjen toimintaan ja ominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä (Solomon ym. 2015) ja viimeisten vuosikymmenten aikana sen määrä on kasvanut boreaalisissa vesistöissä (Arzel ym. 2020; Arvola ym. 2010). Liuenneen orgaanisen aineksen liukeneminen johtaa veden tummumiseen (Creed ym. 2018). Liennut orgaaninen aines koostuu yli 50-prosenttisesti liuenneesta orgaanisesta hiilestä (engl. *dissolved organic carbon*, DOC) (Jansson ym. 2007) ja myös sen määrä vesistöissä on kasvanut (Finstad ym. 2016; Monteith ym. 2007; Vuorenmaa ym. 2006). Liennut orgaaninen hiili on merkittävä osa maaperän ravinnevarantoja (Kreutzweiser ym. 2008). Vesistöjen tummumiseen vaikuttaa myös orgaanisen aineksen sisältämä rautapitoisuus (Björnerås ym. 2017; Kritzberg & Ekström 2012). Rautapitoisuuden kasvu on yhteydessä muun muassa orgaanisen hiilen kasvun määrään, kun tarkastellaan liuenneen orgaanisen aineksen ominaisuuksia.

Vesistöjen tummuminen johtaa ravintoketjujen ravinnearvojen köyhtymiseen (Creed ym. 2018) ja tätä kautta lajikirjon heikkenemiseen ravintoketjujen eri trofiatasoilla (Vasconcelos ym. 2019). Arzel ym. (2020) selvittivät tutkimuksessaan, että boreaalisen vyöhykkeen vesistöjen selkärangattomien eliöiden väheneminen selittynee vesistöjen tummumisella. Vesistöissä selkärangattomien kantojen muutokset vaikuttavat myös niitä ravintonaan pitäviin vesilintuihin ja muihin lajeihin. Erityisesti

joidenkin vesilintulajien poikueiden selviäminen riippuu alueen selkärangattomien määrästä (Nummi ym. 2012).

Vesilintulajien määrä on vähentynyt Suomen boreaalisissa metsäjärvisissä viime vuosikymmeninä (Elmberg ym. 2019; Pöysä ym. 2019; Lehikoinen ym. 2015). Lajien ja ympäristön vaihtelevat ominaisuudet, kuten ravinnon tarve ja sen saatavuus, vaikuttavat lajien esiintyvyyteen (Nummi ym. 2013; Virkkala 2004). Lisäksi lintujen esiintyvyyteen tietyillä alueilla vaikuttavat sääolosuhteet, lajien väliset vuorovaikutussuhteet ja ympäristön muutokset (Virkkala 2004). Elinympäristöön liittyvät ominaisuudet ja ravinnon saatavuus voivat kuitenkin painottua eri lajeilla eri tavalla (Nummi ym. 2013).

Järviympäristöissä sorsalinnut suosivat runsasta vesikasvillisuutta (Hansson ym. 2010), mutta liuenneen orgaanisen hiilen määrän kasvaessa, eli vesistön tummuessa, vesikasvillisuus saattaa vähentyä (Reitsema ym. 2018), koska vesipatsaan läpäisevän valon määrä vähenee (Kritzberg ym. 2019). Tällöin muutokset vesikasvillisuudessa vaikuttavat niihin selkärangattomiin eläimiin, jotka käyttävät kasveja suojana tai ravinnokseen.

Tutkin Evon retkeilyalueella sijaitsevien tutkimusjärvien valuma-alueilla tehtyjen avohakkuiden vaikutusta tutkimusjärvien tummumiseen ja vesistöjen tummumisen vaikutusta alueen vesilintujen esiintyvyyteen. Kuvaan tutkimusjärvien ja niiden valuma-alueiden luonnonmaantieteelliset ja ihmistoiminnalliset yleispiirteet osana valuma-alueiden metsänkäytön muutoksia vuosien 1990–2014 välillä. Kehitän aikasarjan järvien tummuuden muutoksista tutkimusajankohtana ja vertaan avohakkuiden vaikutuksia tähän tummuusvaihteluun. Lisäksi selvitän neljän eri vesilintulajin; tavin, sinisorsan, telkän ja haapanan esiintymistä tutkimusjärvien alueella ja vertaan aineistoa vesien tummuusaineistoihin aikasarjojen avulla. Minulla on kolme työhypoteesia, joiden paikkansapitävyyttä tutkielmassani tarkastelen: H1) Avohakkuut valuma-alueella lisäävät tutkimusjärvien tummumista, H2) avohakkuualueiden vaihtelevat ominaisuudet vaikuttavat tutkimusjärvien tummumiseen eri tavalla ja H3) tutkimusjärvien tummuminen vaikuttaa negatiivisesti vesilintujen esiintymiseen alueella.

2 Tutkimuksen tausta

2.1 Metsätalous Suomessa

2.1.1 Suomen metsävarat

Suomen metsämaan pinta-ala on 26,2 miljoonaa hehtaaria (Korhonen ym. 2021). Suomi on suhteellisesti tarkasteltuna Euroopan metsäisin maa, sillä jopa 75 % Suomen maapinta-alasta on metsää (Suomen metsävarat, s.a.). Luonnonvarakeskus vastaa Suomen metsävaratiedon tuottamisesta (Valtakunnan metsien inventointi s.a.). Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) tarkoituksena on mitata eri puolilla Suomea sijaitsevilta koelaloilta yli sata erilaista metsänkasvuun liittyvää tunnusta, joiden avulla tuotetaan vuosittain uutta metsävaratietoa. Metsävarojen lisäksi VMI:n tavoitteena on kartoittaa maankäyttöä, metsien omistussuhteita, metsien terveydentilaa, monimuotoisuutta ja hiilivaroja. Inventointeja on tehty vuodesta 1921 lähtien.

Metsämaaksi määritellään kaikki puun tuotantoon soveltuva ja soveltumaton sekä täysin tuottamaton metsä (Korhonen ym. 2021). Vaikka metsämaan osuus Suomessa on laskenut 0,5 miljoonaa hehtaaria viimeisen vuosisadan aikana muun muassa maatalousmaan lisääntyessä, vuosina 2014–2018 puuntuotantoon soveltuvan metsämaan osuus oli 20,3 miljoonaa hehtaaria, mikä on 1,6 miljoonaa hehtaaria enemmän kuin 1960-luvulla valmistuneessa inventoinnissa. Metsämaan tuottavuuden kasvu on pääosin seurausta turvemaiden valjastamisesta puuntuotantoon kuivaamalla. Suomen metsäpinta-alasta vain 12,6 prosenttia eli 2,9 miljoonaa hehtaaria on osittaisen metsätalouden käytössä. Kokonaan suojeltuja alueita on 2,4 miljoonaa hehtaaria eli 10,6 prosenttia metsä- ja kitumaasta (Suomen metsävarat s.a.). Hieman yli puolet metsämaasta omistaa yksityiset metsänomistajat (Korhonen ym. 2021). Valtionmaita on 35 % ja loput metsäyhtiöiden tai erilaisten yhteisöjen tai säätiöiden omistuksessa.

Valtakunnan metsien 13. inventoinnin vuosilta 2019–2020 kerätyn aineiston mukaan Suomen puusto kasvaa 103,5 miljoonaa kuutiometriä vuodessa (Suomen metsävarat, s.a.). Hakkuita kertyi 76 miljoonan kuutiometrin edestä, mistä 87 % meni suoraan metsäteollisuuden käyttöön ja loput energiapuuksi lämpö- ja voimalaitoksiin ja pientaloihin. Vuonna 2021 puuston kokonaispoistuma oli noin 92 miljoonaa kuutiometriä, johon sisältyy hakkuiden lisäksi metsään jäävät hakkuutähteen runkokuut ja luontaisesti kuolleet runkokuut.

2.1.2 Metsänhoito Suomessa

Metsänkasvatusta voidaan harjoittaa pääsääntöisesti kahdella eri tavalla. Jaksollisessa kasvatuksessa metsä on rakenteeltaan tasaikäinen ja siinä on selkeästi havaittavissa erikseen metsän kasvatusvaihe ja uudistamisvaihe (Metsänkasvatus ja kasvatushakkuut 2023). Kasvatusvaiheessa metsänhoito perustuu taimikonhoitoon, harvennushakkuisiin ja lopuksi pääte- eli uudistushakkuisiin. Uudistamisvaiheessa päätehakkuualueella varmistetaan, että tilalle syntyy uusi taimikko. Taimikko voi syntyä luontaisesti tai se voidaan viljellä kylvämällä tai istuttamalla. Jatkuvassa kasvatuksessa puuston rakenne on moninaisempi niin iältään kuin kooltaan. Metsänhoidollisina toimenpiteinä tehdään 15–20 vuoden sykleissä poimintahakkuita, joissa vain osa puista kaadetaan, tai pienaukkohakkuita. Pienten puiden osuus runkokuusta on suurin, mikä takaa hakkuiden jälkeen uusien puiden kasvamisen luontaisesti kehittyvien taimien ohella.

Metsikön rakenne ja maaperän ominaisuudet määrittelevät, mikä metsänhoitotapa tietylle alueelle soveltuu. Esimerkiksi turvemailla suositetaan jatkuvan kasvatuksen menetelmää, koska jatkuvapeitteisyys lisää haihduntaa (Karlsen ym. 2016; Schelker ym. 2013), jolloin pohjavedenpinta pysyy sopivana ja kunnostusojituksen tarve vähenee (Laudon & Hasselquist 2023). Lisäksi jatkuvan kasvatuksen menetelmä vähentää ravinteiden ja liunneen orgaanisen hiilen huuhtoutumista vesistöihin ojituksesta huolimatta (Palviainen ym. 2022).

Jaksollisessa metsänkasvatuksessa uudistamisen hakkuutapa määräytyy sen mukaan, onko metsä tarkoitus uudistaa luontaisesti vai viljellen (Metsän uudistaminen ja uudistushakkuut 2023). Avohakkuu tehdään uudistusalalle silloin, kun metsä uudistetaan viljellen. Tällöin kaikki vanha puusto poistetaan lukuun ottamatta mahdollisia säästöpuuryhmiä, joiden tarkoitus on edistää lahoppuun syntymistä ja turvata monimuotoisuutta. Säästöpuuryhmien yhteyteen jätetään pienemmät puut ja toisinaan riistatiheikköjä. Muita uudistushakkuumuotoja ovat siemenpuuhakkuut, joissa uudistusalalle jätetään 20–100 hyvälaatuista ja -latvuksista siemenpuuta hehtaarille; kaistalehakkuut, joissa havumetsää hakataan 25 metrin levyinen kaistale metsän reunasta, ja turvemaiden suojuspuuhakkuut, joissa metsän uudistaminen aloitetaan jo kymmenen vuotta ennen päätehakkuuta hakkaamalla metsä harvennusmallin alarajalle.

Turvemailla metsänhoidossa huomioidaan oikein ajoitetut metsänhoitotyöt ja hakkuut, vesiensuojelurakenteet, lannoitus ja kunnostusojitus (Suometsän hoito 2023). Kunnostusojitus tarkoittaa ojien avaamista ja täydennysojien kaivamista silloin, kun ojat tai puuston haihdunta ovat kykenemättömiä ylläpitämään riittävää pohjavedenpinnan tasoa. Kasvukauden aikana metsäntuotolle otollisin pohjavedenpinnan korkeus on noin 30–50 cm:n syvyydessä. Liian korkealla ollessaan

pohjavesi hidastaa puuston kasvua, mutta liian syvällä se lisää muun muassa hiilidioksidi- ja vesistöpäästöjä. Jatkuva kasvatus vähentää ojituksen tarvetta, kun pohjavedenpinta pysyy sopivalla korkeudella jatkuvapeitteisen puuston haihdunnan vuoksi (Karlsen ym. 2016; Schelker ym. 2013). Ojitus kasvattaa vesistöjen ravinne- ja kiintoainekuormaa sekä liuenneen orgaanisen hiilen määrää erityisesti turvemaidella (Estlander ym. 2021; Nieminen ym. 2021; Camino-Serrano ym. 2014; Åström ym. 2001). Tämän vähentämiseksi ojituksen yhteydessä tehdään kaivukatkoja, rakennetaan laskeutusaltaita ja pintavaluntakenttiä, joihin valuma-alueen ylipuoliset vedet ohjataan, ja vain välttämättömimmät ojat kunnostetaan (Suometsän hoito 2023). Kaivukatkojen, laskeutusaltaiden ja pintavaluntakenttien tarkoitus on hidastaa veden virtausta, kiintoaineksen ja ravinteiden huuhtoutumista ja eroosiota.

2.2 Tummuvat vedet

2.2.1 Miksi vesistöt tummuvat?

Valuma-alueelta huuhtoutuu jatkuvasti orgaanista ainesta ja ravinteita veden mukana uomaverkoston alapuolisiin vesistöihin (Valuma-aluekunnostus 2020). Valuma-alue voidaan rajata korkeuskartan avulla määritetyn vedenjakajan ja järven laskukohdan, jokien yhtymäkohdan, valtakunnan rajan tai merialueen avulla. Erilaiset veden virtausreitit vaikuttavat siihen, miten nopeasti vesi etenee valuma-alueen hydrologisessa järjestelmässä, ja millainen sen laatu ja kemiallinen koostumus on. Veden virtausreitteihin ja nopeuteen vaikuttavat paikalliset ilmasto-olosuhteet, valuma-alueen geologia ja topografia, maaperä ja kasvillisuus (Holden 2017).

Vesistöjen tummuminen johtuu terrestrisestä ympäristöstä tai kosteikolta veteen liuenneesta orgaanisesta aineksesta (Graneli 2012). Luonnon vedet sisältävät aina liuennutta orgaanista ainesta, joka on peräisin eliöiden, kuten kasvien, eläinten ja maaperän mikro-organismien hajoamis- tai erittämisprosesseista (Evans ym. 2005). Hajonnut orgaaninen materia varastoituu ensin maaperään, kunnes erilaiset hajotusprosessit muuntavat ne liukenevaan muotoon. Liuenneeksi orgaaniseksi ainekseksi lasketaan kaikki orgaaninen aines, joka läpäisee 0,45 mikrometrin suodattimen. DOM sisältää enimmäkseen suurimolekyylisiä humusyhdisteitä, mutta myös muita pienempiä yhdisteitä, kuten esimerkiksi hiilihydraatteja ja aminohappoja. Humusyhdisteet imevät pääasiassa spektrin sinistä näkyvää valoa, mikä aiheuttaa runsaasti orgaanisia yhdisteitä sisältävän veden ruskean värin. Liuennut orgaaninen aines vaikuttaa myös vesistöjen happamuuteen, hivenaineiden kuljetukseen, valon imeytyvyyteen ja fotokemiaan, energia- ja ravinnevarantoihin ja vedenkäsittelyprosesseihin.

Veden tummuuden tunnusluku on mgPt/l, jossa Pt viittaa keinotekoiseen platina-asteikkoon (Oravainen 1999). Kun veden tummuutta mitataan, vesinäytettä verrataan tähän platina-asteikkoon värikiekon avulla. Vedet, joissa arvo on alle 15 mgPt/l, pidetään värittöminä. 20–40 mgPt/l viittaa lievästi humuspitoiseen veteen, humuspitoiseen veteen arvot 50–100 mgPt/l ja hyvin tummiin ja voimakkaasti humuspitoisiin vesiin arvot, jotka ylittävät 100 mgPt/l, jolloin veden ruskea väri on jo silmillä havaittavissa.

Merkittävä tekijä vesistöihin liukenevan orgaanisen materian ja hiilen lisääntymisen taustalla on sulfaattipitoisen laskeuman väheneminen ja palautuminen ns. preindustriaiselle tasolle (Ekström ym. 2011; Monteith ym. 2007). Teollistuminen lisäsi sulfaattipitoista laskeumaa, mikä edisti maaperän happamoitumista ja vähensi orgaanisen materian liukenemista (Ekström ym. 2011). Orgaaninen materia liukenee sen sijaan helpommin, kun maaperän pH-arvo on noussut sulfaattilaskeuman pientymisen vuoksi. Lisäksi pH-arvon nouseminen tarkoittaa, että DOM sisältää enemmän isompia ja väriltään tummempia molekyylejä.

DOM kuljettaa hiiltä maa- ja vesiekosysteemien välillä (Evans ym. 2005). Liunneen orgaanisen aineksen tärkeä elementti onkin sen sisältämä liunnut orgaaninen hiili, koska sen pitoisuus liunneesta orgaanisesta materiasta on yli 50 prosenttia (Jansson ym. 2007). Koska liunneen orgaanisen materian määrä ympäristössä on kasvanut, myös liunneen orgaanisen hiilen määrä on kasvanut (Finstad ym. 2016; Monteith ym. 2007; Vuorenmaa ym. 2006). Pohjoisella pallonpuoliskolla tapahtuneen vesistöjen tummumisen syyksi onkin usein liitetty juuri liunneen orgaanisen hiilen määrän kasvu (Moore & Roulet 2006).

DOC-pitoisuus vaihtelee borealisilla valuma-alueilla suuresti ajallisesti ja alueellisesti (Nieminen 2015; Laudon ym. 2011). Maaperän tyyppi, alueella ennestään vaikuttavat hydrologiset ominaisuudet, hakkuut ja niiden aikana ja sen jälkeen vallitsevat sääolosuhteet ja vuodenaika (Kreutzweiser ym. 2008), sekä maaperän korkea rautapitoisuus (Nieminen 2015) ovat merkittäviä seikkoja, jotka voivat muuttaa lähivesistöjen DOC-pitoisuutta (Kreutzweiser ym. 2008).

Merissä, pohjavesissä ja kirkasvetisissä järvissä ja joissa liunnutta hiiltä tavataan vähiten. Suurimmillaan DOC-pitoisuus on orgaanisen maaperän sisältämissä huokosissa ja vesistöissä, joiden valuma-alueella on kosteikkoja ja turvemaita (Nieminen 2015; Evans ym. 2005; Creed ym. 2003). Erityisesti metsäpeitteisillä kosteikoilla, joilla latvus on tasainen, voidaan selittää noin 90 % valuma-alueen luonnollisesta DOC-pitoisuudesta (Creed ym. 2003). Lisäksi havupuuvaltaisissa metsissä DOC-pitoisuus maaperässä on suurempi kuin lehtometsissä, koska lehtometsien korkeampi maaperän orgaaninen aines syrjäyttää liunneen orgaanisen hiilen (Camino-Serrano ym. 2014).

Valuma-alueen topografia on yhteydessä pohjaveden virtaussuuntiin ja veden kemiallisiin ominaisuuksiin (Andersson & Nyberg 2009; Andersson & Nyberg 2007). Tasaisessa maastossa pohjaveden pinta on korkeammalla, jolloin pohjaveteen voi helpommin sekoittua orgaanista hiiltä metsän pohjasta (Andersson & Nyberg 2007). Lisäksi lähelle maanpintaa sijoittuva pohjaveden pinta saattaa vaikuttaa turpeen muodostumiseen ja soistumiseen tehokkaammin. Valuma-alueen keskimääräisen rinnekaltevuuden ja vesistöjen DOC-pitoisuuksien välinen yhteys on havaittu olevan niin vahva, että rinnekaltevuus selittää DOC-pitoisuutta paremmin kuin esimerkiksi valuma-alueen kosteikkojen määrä ja sijainti.

Toinen valuma-alueen hydrologisia ominaisuuksia kuvaava termi on topografinen kosteusindeksi (engl. *topographic Wetness Index*, TWI) (Andersson & Nyberg 2009). Yhdessä valuma-alueen keskimääräisen rinnekaltevuuden kanssa TWI:n avulla voidaan määrittää muun muassa pohjaveden virtaussuuntia ja pinnan korkeutta paremmin. Vesistöjen DOC-pitoisuuden on havaittu korreloivan voimakkaasti rinnekaltevuuden ja TWI:n kanssa ja vain heikosti maankäyttöön ja ilmasto-olosuhteisiin liittyvien seikkojen kanssa (Musolff ym. 2018). Valuma-alueilla, joilla on sekä korkea TWI että tasaisemmat maanpinnan korkeusvaihtelut, orgaanisen hiilen määrä on suurin.

Yleisesti tarkasteltuna valuma-alueen vesitasapainon tärkein säätelijä on kasvillisuus, joka vaikuttaa virtaamiin uomaverkoston alapuolisissa vesistöissä (Schelker ym. 2013). Alueelliset erot valuma-alueiden hydrologisissa prosesseissa saattavat olla suuria ja ne riippuvat pääsääntöisesti vuodenaajoista ja niiden mukaan vaihtelevista kosteusolosuhteista (Karlsen ym. 2016). Keväisin lumen sulamisen aikaan, kun valunta kasvaa, metsäisillä valuma-alueilla on havaittu vuodenaikaan sitoutunutta DOC-pitoisuuden kasvua (Laudon ym. 2011; Andersson & Nyberg 2007). Kesä on kosteusolosuhteiden näkökulmasta kuivinta aikaa vuodessa (Karlsen ym. 2016). Tällöin tiiviisti metsää kasvavat moreenimaat kuivuvat nopeammin kuin muut maaperätyypit, koska haihdunta on voimakasta runsaan kasvillisuuden vuoksi (Karlsen ym. 2016; Schelker ym. 2013). Tämä tarkoittaa myös sitä, että valunta niiltä vähenee.

Turvemailta valunta on runsasta läpi vuoden, mutta valuntahuippuna voidaan pitää kesää (Karlsen ym. 2016). Tämä johtuu pääosin kosteikkojen suurista vesivarastoista, vähäisestä kokonaihaidunnasta, moreenimaiden valunnan vähenemisestä, mutta myös keväisin vallitsevasta roudasta. DOC-pitoisuus laskee vesistöissä kevätaikaan, sillä jäätynyt maa hidastaa valuntaa ja vähentää näin huuhtoutuvan kiintoaineksen määrää (Laudon ym. 2011). Kesäisin sen sijaan kosteikoilla niin sanotun perusvalunnan aikaan DOC-pitoisuudet voivatkin olla yhtä korkeita kuin metsäisillä alueilla huippuvalunnan aikaan.

Pohjois-Euroopan havupuuvaltaisilla valuma-alueilla rautapitoisuus vesistöissä on kasvanut orgaanisen aineksen ja hiilen ohella (Björnerås ym. 2017; Kritzberg & Ekström 2012). Rautapitoisuus kasvaa orgaanisen aineksen määrän kasvaessa (Kritzberg & Ekström 2012), mutta se voidaan yhdistää suoraan myös orgaanisen hiilen määrän kasvuun (Björnerås ym. 2017; Weyhenmeyer ym. 2014). Raudan määrän lisääntyminen vesistöissä on usein liitetty veden tummumiseen (Kritzberg & Ekström 2012). Vesistöjen tummumista ei voidakaan selittää yksistään vesistöjen DOM-pitoisuuden määrän perusteella, vaan enemmänkin sen ominaisuuksien, kuten sen sisältämän orgaanisen hiilen ja raudan määrää tarkastelemalla.

Rauta liukenee tehokkaammin, kun ympäristön pH pienenee (Björnerås ym. 2019). Tämän vuoksi raudan mobilisaatio tapahtuu happamissa olosuhteissa helpommin. Maaperän happamuutta lisäävät muun muassa kasvillisuus ja mikrobitoiminta luomalla erilaisia orgaanisia yhdisteitä ja hiilidioksidia (Drewer 1994), toisin sanoen orgaaninen aines itsessään lisää ympäristön happamuutta, joka edistää raudan rapautumista ja liukenemistä. Rautapitoisuus vaihtelee vuodenaikojen ja sadannan mukaan kuten DOC-pitoisuuskin (Björnerås ym. 2017; Andersson & Nyberg 2009). Toisin sanoen, mitä enemmän sataa, sitä enemmän rautaa huuhtoutuu valuma-alueen vesistöihin. Huippuvalunnan aikaan rautapitoisuus kasvaa metsäisillä valuma-alueilla (Björkvald ym. 2006). Boreaalisten valuma-alueiden vesistöjen rautapitoisuuden kasvu voidaan mahdollisesti selittää myös DOC-pitoisuuksiltaan korkeiden turvemaiden runsaudella. Björneråsin ym. (2017) tutkimuksessa valtaosa rautapitoisuuden kasvutrendeistä sijoittui juuri boreaalisille, havupuuvaltaisille valuma-alueille.

2.2.2 Hakkuiden vaikutus vesistöjen DOC-pitoisuuteen

Metsätaloudellisilla toimenpiteillä on liuenneen orgaanisen aineksen DOC-pitoisuutta lisäävä vaikutus valuma-alueen vesistöissä (Schelker ym. 2012, Nieminen 2004). Muun muassa avohakkuiden jälkeen liuennutta orgaanista hiiltä esiintyy vesistöissä enemmän kuin ennen hakkuutta tai tutkimuksissa käytetyillä kontrollipisteillä, joilla hakkuuta ei tehdä. Avohakkuut lisäävät maaperän eroosiota ja nostavat pohjaveden pintaa (Nieminen ym. 2017). Ne yhdessä lisäävät niin liuenneen orgaanisen hiilen kuin myös raudan, hienosedimenttien ja muun kiintoaineen huuhtoutumista vesistöihin. Koska DOC-pitoisuus boreaalisilla valuma-alueilla vaihtelee suuresti vuodenajan ja maantieteellisen sijainnin perusteella (Nieminen 2015; Laudon ym. 2011), metsätaloudellisten toimenpiteiden, kuten avohakkuiden, tekeminen saattavat lisätä kyseisen valuma-alueen DOC-pitoisuutta eri tavoin.

Liuenneen orgaanisen hiilen määrä kasvaa hakkuiden jälkeen riippumatta siitä, millainen hakkuu alueella on tehty (Nieminen 2015). Toisin sanoen esimerkiksi sekä avohakkuulla että kevyemmällä

runkopuuharvennuksella on vesistöjen DOC-pitoisuutta lisäävä vaikutus. Toisaalta avohakkuu lisää ravinteiden kiertoa enemmän kuin harvennushakkuu (Kreutzweiser ym. 2008), joten vähemmän ympäristöä muokkaavat toimenpiteet hillitsevät myös liuenneen orgaanisen hiilen huuhtoutumista vesistöihin. Hakkuiden vaikutukset DOC-pitoisuuden kasvuun osoittautuvat jäävän kuitenkin pienemmiksi verrattuna muihin metsään mahdollisesti kohdistuvien häiriötekijöiden, kuten metsäpalojen tai nopeasti muuttuvan ilmaston vaikutuksiin.

Metsätaloudessa metsän kasvua pyritään tehostamaan muun muassa kuivattamalla turvemaita ojituksen avulla. Tiheämpi ojaverkosto lisää valuma-alueen vesistöjen DOC-pitoisuutta (Estlander ym. 2021). Koska turvemaiden maaperän DOC- ja rautapitoisuus ovat korkeimmillaan ja ojitus voimakkainta, turvemaiden ojitukset tummentavat vesistöjä erityisesti (Nieminen ym. 2021; Camino-Serrano ym. 2014). Ojittamattomien turvemaiden vaikutus valuma-alueen veden tummumiseen oli heikompi kuin ojitetuilla turvemaiden (Nieminen ym. 2021). Myös turvemaiden ravinnetaso vaikuttaa huuhtoutuvan liuenneen orgaanisen hiilen määrään. Minerotrofisilla eli ravinteikkailta kosteikoilta huuhtoutuminen on hakkuiden jälkeen voimakkaampaa kuin ombrotrofisilla eli vähäravinteisilla kosteikoilta (Nieminen 2015).

Myös hakkuiden jälkeisillä metsämaan hoitotoimenpiteillä, kuten avohakkuilla tai maaperän tuottavuutta lisäävällä maanmuokkauksella, saattaa olla DOC-pitoisuutta muuttavia vaikutuksia (Schelker ym. 2012). Kasvava puuvolyymi lisää DOC-pitoisuutta vesistöissä ojituksen vuoksi (Nieminen ym. 2021). Sekä moreeni- että turvemaiden avohakkuualueiden uudelleen metsittäminen lisää niin liuenneen orgaanisen materiaalin kuin liuenneen orgaanisen hiilen määrää pintavesissä aiheuttaen vesistöjen tummumista (Škerlep ym. 2020). Kunnostusojitusten on havaittu nostavan vesistöjen DOC-pitoisuutta heti seuraavina vuosina (Nieminen ym. 2018; Nieminen ym. 2010), mutta toisaalta yli kymmenen vuoden tarkastelussa havupuuvaltaisilla turvemaiden niillä oli DOC-pitoisuutta vähentävä vaikutus (Nieminen ym. 2018).

Se, miten pitkään itse hakkuiden vaikutukset liuenneen orgaanisen hiilen määrässä valuma-alueen vesistöissä näkyvät, voi vaihdella. Pääsääntöisesti tutkimukset ovat osoittaneet hakkuiden vaikutusten näkyvän selvästi lyhyellä aikavälillä vesistöjen DOC-pitoisuuksissa (Nieminen ym. 2015; Kreutzweiser ym. 2008). Nieminen ym. (2015) totesi tutkimuksessaan, ettei DOC-pitoisuus laskenut neljään vuoteen turvemaiden tehtyjen hakkuiden jälkeen. Kreutzweiser ym. (2008) selvittivät hakkuiden vaikutusta metsän hydrologiaan pääasiassa 2–10 hakkuiden jälkeisen vuoden ajalta ja havaitsivat, että ravinteiden määrä ja niiden huuhtoutuminen vesistöihin lisääntyivät tänä aikana.

Vuodenaika ja sääolosuhteet on tärkeää huomioida, kun arvioidaan hakkuiden aiheuttamaa liuenneen orgaanisen materian ja hiilen huuhtoutumista valuma-alueen vesistöihin. Talvella lumikerros estää hakkuiden suoraa kontaktia maaperään (Kreutzweiser ym. 2008), minkä vuoksi vaikutukset valuma-alueiden DOC-pitoisuuksien vaihteluun voivat olla vähäisiä. Talvisin lunta myös kertyy enemmän avoimille alueille kuin alueille, joita suojaa metsän latvusto (Karlsen ym. 2016; Schelker ym. 2013). Tämä tarkoittaa, että lumen sulaessa kevätvirtaamat saattavat olla hakkuuaukoilta suurempia kuin puupeitteisiltä alueilta. Tähän vaikuttaa lisäksi se, että avohakkuualueelta myös haihtuminen on vähäisempää, koska kasvillisuutta on niukemmin (Karlsen ym. 2016; Schelker ym. 2013). Tämä tarkoittaa, että lumen sulaessa kevätvirtaamat saattavat olla hakkuuaukoilta suurempia kuin puupeitteisiltä alueilta.

2.3 Vesiekosysteemi tummuissa vesistöissä

Liennut orgaaninen aines on välttämätöntä vesikasvillisuuden hyvinvoinnille, sillä sen mukana vesistöön huuhtoutuu kasvillisuuden tarvitsemia ravinteita (Vasconcelos ym. 2019). Jos DOM- ja DOC-pitoisuus järvessä kasvaa liian suureksi, se saattaa kuitenkin johtaa vesikasvillisuuden vähenemiseen (Vasconcelos ym. 2019; Reitsema ym. 2018). Vesipatsaaseen sitoutuneet ravinteet ohentavat vesipatsaan eufoottista eli valoa läpäisevää kerrosta (Urrutia-Cordero ym. 2017; Thrane ym. 2014), mikä saattaa muuttaa vesikasvilajien diversiteettiä (Reitsema ym. 2018). Esimerkiksi jotkut levälajit hyötyvät tummuvasta elinympäristöstä, mutta liiallinen ravinnepitoisuus ja valon väheneminen voi myös heikentää niiden elinympäristöä ja täten kasvua (Choudhury ym. 2019; Vasconcelos ym. 2019).

Liuenneen orgaanisen hiilen aiheuttama varjostus saattaa johtaa myös kasviplanktonin köyhtymiseen (Urrutia-Cordero ym. 2017; Thrane ym. 2014). Mitä tummemmaksi vesipatsas muuttuu, sitä enemmän siihen sitoutuu ravinteita ja sitä tehokkaammin se estää valon tunkeutumista syvemmälle ja järven pohjalle. Tämä heikentää muun muassa vedessä tapahtuvaa fotosynteesiä (Reitsema ym. 2018), joka tapahtuu juuri eufoottisessa kerroksessa. Vesistöjen tummuminen voi siis vaikuttaa akvaattisiin ravintoketjuihin *bottom up* -tyylisesti eli alempi trofiataso säätelee ylempää, kun primäärituotanto heikkenee.

Eläinplanktonin esiintyvyys ja käyttäytyminen vesistöissä riippuu lajista ja sen elinympäristön rakenteista (Williamson ym. 2020). Veden tummuus ja kiintoaineksen määrä ei vaikuta eläinplanktoniin ainoastaan välillisesti primäärituotannon heikkenemisen kautta, vaan myös suoraan sen käyttäytymiseen (Estlander ym. 2017; Estlander ym. 2009). Esimerkiksi vesikirppuja tavataan runsaammin kirkasvetisissä kuin tummemmissa järvissä, mutta toisaalta tummavetisissä olosuhteissa

vesikirput tuottavat enemmän jälkeläisiä ja selviytyivät paremmin kuin kirkkaissa vesistöissä (Minguez ym. 2020). Kirkasvetisemmissä järvissä vesikirppujen on myös havaittu kiinnittyvän vesikasvillisuuteen enemmän kuin humuspitoisemmissa järvissä, joissa ne puolestaan liikkuvat vapaammin, koska korkean humuspitoisuuden aiheuttama huono näkyvyys suojelee niitä paremmin pedoilta (Estlander ym. 2017).

DOC-pitoisuuksiltaan suurissa järvissä elävän eläinplanktonin diversiteetti, biomassa ja tiheys ei välttämättä eroa DOC-pitoisuuksiltaan köyhemmistä järvistä (Robidoux ym. 2015). Toisaalta esimerkiksi vesistöissä, joissa veden väri on tummempi, eläinplanktonin biomassa kasvaa rantavyöhykkeeltä avoveden suuntaan (Estlander ym. 2009). Myös kirkasvetisempien järvien rantavyöhykkeellä vesikasvillisuuden kasvaessa eläinplanktonin biomassa kasvaa, mutta humuspitoisemmissa vesistöissä biomassan kasvun ei ole havaittu olevan riippuvainen vesikasvillisuuden määrästä. Toisaalta humuspitoisimmissa järvissä eläinplanktonin biomassa vähenee, kun vesikasvillisuus on tiheimmillään.

Sekä hakkuut että turvemaiden ojitukset supistavat vesistöjen selkärangattomien määrää (Rajakallio ym. 2021). Erityisesti turvemaiden suorittettujen avohakkuiden vaikutus selkärangattomien vähenemiseen on suurempi kuin yksittäin avohakkuulla tai turvemaiden virtaamalla, mitä selittää turvemaiden korkea orgaanisen aineksen pitoisuus ja ojitusten kiintoaineksen määrää lisäävä vaikutus. Kun orgaanisen kiintoaineksen kulkeutuminen vesistöihin kasvaa, selkärangattomien lajien ja populaatioiden selviytyminen heikkenee ja populaatiot supistuvat (Arzel ym. 2020; Brown ym. 2018). Toisaalta lajitasolla muun muassa jotkut lajit jopa suosivat tummempaa vettä ja tiettyä DOC-pitoisuutta munimisvaiheessa (Lindholm ym. 2018). Ojittamattomilta avohakkuualueilta saapuvan kiintoaineksen määrää hillitsee muun muassa vesistöjen rantavyöhykkeet (Rajakallio ym. 2021). Luonnontilainen rantavyöhyke lisää vesistön selkärangattomien diversiteettiä (Suurkuukka ym. 2014). Rannoilla, joilla kasvillisuus on niukkaa, hyönteisten ja vapaasti uivien selkärangattomien määrä on vähäinen, mutta sarakasvillisuuden hallitsemilla rannoilla niiden määrä lisääntyy ja on korkeimmillaan siellä, jossa esiintyy tulvia (Nummi & Pöysä 1995).

Vesilintulajien määrä Suomessa boreaalisissa metsäjärvissä on vähentynyt viime vuosikymmeninä (Elmberg ym. 2019; Pöysä ym. 2019; Lehikoinen ym. 2015). Selkärangattomia ravintonaan hyödyntävät vesilintulajit ovat vähentyneet voimakkaammin kuin kasvinsyöjät (Elmberg ym. 2019; Pöysä ym. 2019). Yleisesti tarkasteltuna vesilintujen lajikirjo oli suurempi niissä järvissä, joissa oli monipuolisempaa kasvillisuutta kuin järvissä, joissa kasvillisuus oli köyhempää (Pöysä ym. 2019). Sen sijaan populaatiotasolla vuosina 1986–2013 vesilinnut ovat supistuneet voimakkaammin

eutrofisissa eli runsasravinteisissa järvissä, kun taas oligotrofisissa ympäristöissä populaatiokoot ovat pysyneet tasaisempina (Lehikoinen ym. 2015).

Kun verrattiin ajanjaksoja 1950–1970 ja 1996–2015 toisiinsa huomattiin, että oligotrofisissa järvissä lajien määrä ja populaatiokoot pääasiassa kasvoivat (Pöysä & Linkola 2021). Sen sijaan eutrofisissa järvissä vesilintujen lajikirjo pysyi lähes ennallaan, mutta populaatioiden koot supistuivat ja täten vesilintujen kokonaisesiintyvyys väheni. Myös oligotrofisilla järvillä havaittiin joidenkin yleisten lajien häviämisiä, mutta uusien lajien siirtyminen näille alueille riitti ylläpitämään runsasta lajikirjoa. Eutrofisilla järvillä lajien häviäminen oli sen sijaan niin voimakasta, etteivät uudet lajit ehtineet täyttää tyhjäksi jääneitä ekolokeroita.

3 Aineistot ja menetelmät

3.1 Tutkimusalue

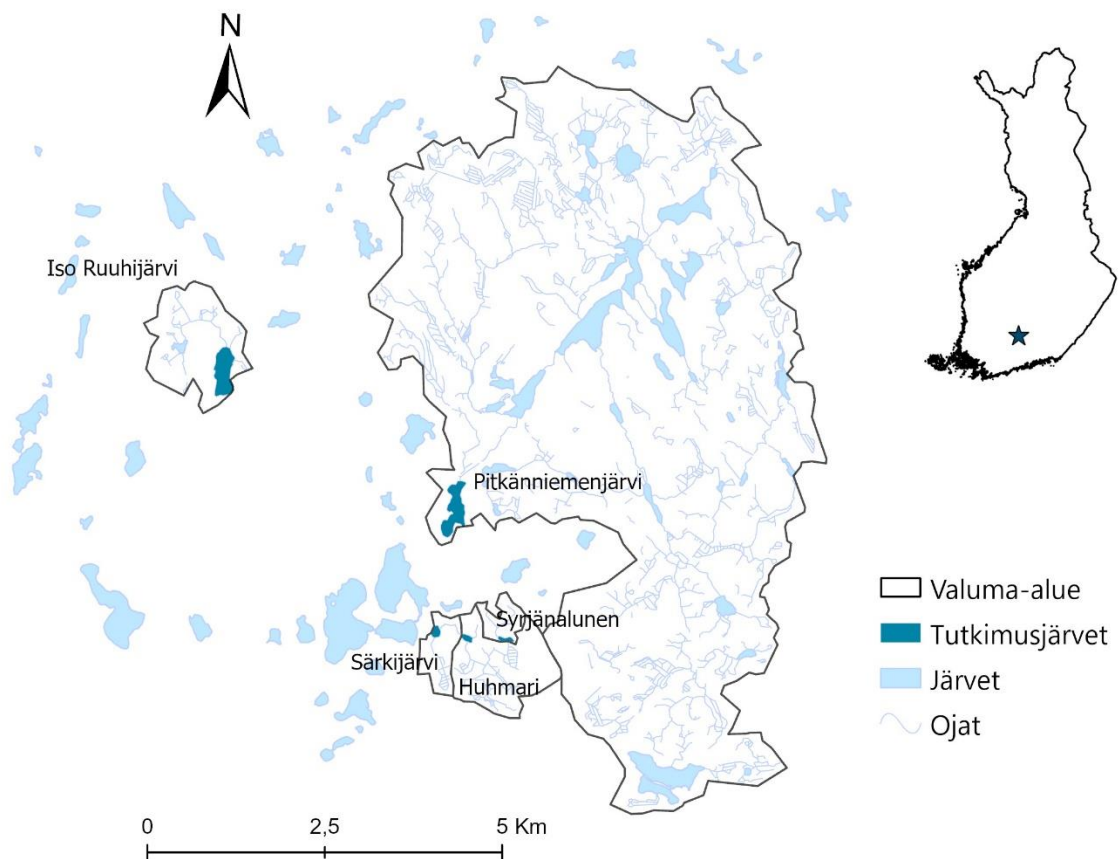
Evo sijaitsee noin 50 kilometriä Hämeenlinnasta koilliseen (kuva 1). Evon alue on harvaanasuttu ja pääasiallinen ympäristöön vaikuttava ihmistoiminta ja maankäytön sektori on metsätalous (Arzel ym. 2020; Arvola ym. 2010). Alueella sijaitsee Hämeen ammattikorkeakoulun metsäopetuksen kampus sekä siihen kytkeytyvä lähes 2000 hehtaarin kokoinen opetusmetsä. Maataloutta tutkimusalueella esiintyy hyvin marginaalisesti, alle 1 % sen pinta-alasta (Arzel ym. 2020). Lisäksi Evolla on laaja retkeilyverkosto, se kuuluu Natura2000 -suojelualueverkostoon ja sinne suunnitellaan myös maailman ensimmäistä tiedekansallispuistoa. Evon alueen vesistöt ovat osa Kokemäenjoen valuma-alueita (Arvola ym. 2010).

Evo ja tutkimusjärvet sijaitsevat vedenjakaja-alueella ja sen ympäristöstä löytyy runsaasti pieniä järviä ja lampia, joista useimmilla on vähintään yksi tai useampi syöttö- ja laskuoja (Arvola ym. 2010). Pieni osa alueen järvistä on laskuojattomia, ja ne saavat vettä ainoastaan sadannan tai pohjaveden kautta. Kallioperä Evolla koostuu lähinnä eteläisestä granodioriittivyöhykkeestä ja pohjois- ja itäosiin levittäytyvästä kiillegneissivyöhykkeestä. Vesistöjen valuma-alueiden maaperä koostuu pääosin hiekasta ja moreenista. Pohjavesisyötteiset järvet sijaitsevat pääasiallisesti glasiofluviaalisilla hiekkamailla Evon alueen eteläosassa, kun taas moreenimaiden pintavesisyötteiset järvet sijoittuvat enimmäkseen alueen pohjoispuolelle. Alueen itäpuolella on pohjoiseteläsuuntainen Syrjänalusenhajuri. Laajalle alueelle mahtuu myös hajanaisia saraturvevyöhykkeitä ja peruskallion paljastumia. Alue kuuluu eteläboreaaliseen kasvillisuusvyöhykkeeseen ja koostuu pääosin tuoreista ja kuivista kangasmetsistä, joilla hallitsevana lajina tavataan maaperän vähäravinteisuuden vuoksi mänty. Metsäluontoon vaikuttavat merkittävästi perinteinen metsätalous sekä alueella runsaana elävät majavat.

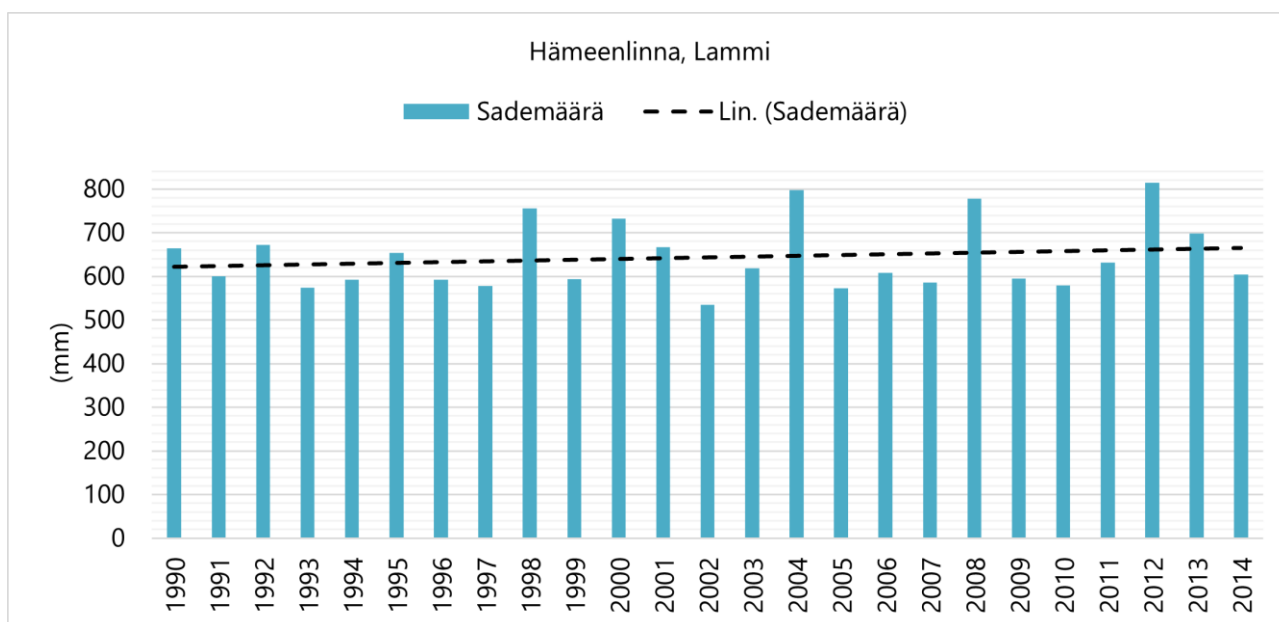
Tarkastelen tutkielmassani viittä järveä ja niiden valuma-alueita. Järvien valinnassa ensisijaisena kriteerinä oli, että keskenään vertailtavat järvet ovat suunnilleen samankokoisia, mutta lopulliseen valintaan vaikutti saatavilla oleva aineisto veden tummuudesta ja vesilinnuista. Isompiin järviin kuuluvat Pitkänniemenjärvi ja Iso Ruuhijärvi ja pienempien vertailussa tarkastelun kohteena ovat Särkijärvi, Huhmari ja Syrjänalunen. Iso Ruuhijärvi, Huhmari ja Pitkänniemenjärvi saavat vetensä pääasiallisesti pintavaluntana, kun Särkijärvi ja Syrjänalunen määritellään ns. pohjavesisyöttöisiksi järviksi (Arvola ym. 2010). Syrjänalusella huomioitavaa on myös se, että se on määritelty

lähdejärveksi sen pohjassa esiintyvien useiden lähteiden vuoksi. Lisäksi Syrjänalusen ja Huhmarin valuma-alueet ovat osa Särkijärven valuma-alueita.

Tutkimusalueella lähin säähavaintoasema sijaitsee Hämeenlinnan Lammilla. Ennen vuotta 1997 vuotuinen sadanta on jäänyt alle 700 mm, mutta vuodesta 1998 eteenpäin sademäärä joinain vuosina kasvanut yli 700 mm ja vuonna 2012 jopa yli 800 mm (kuva 2). Vuoden 2000 jälkeen joka neljäs vuosi havaitaan sadantahuippu.



Kuva 1. Tutkimusjärvet ja niiden valuma-alueet Evolla.



Kuva 2. Vuosittainen keskimääräinen sadanta kasvaa tutkimusajankohtana.

3.2 Tutkimuslajit

Tarkastelen tutkielmassani neljää eri vesilintua: tavia, sinisorsaa, telkkää ja haapanaa (taulukko 1). Tavi (lat. *Anas crecca*) on rannoilla koko Suomessa tavattava puolisuikeltajasorsa, joka viihtyy moninaisissa ja vaatimattomissakin elinympäristöissä. Tavi suosii erityisesti myös tulva-alueita (Nummi & Pöysä 1995). Esimerkiksi majavan aiheuttaman tulvinnan on havaittu lisäävän tavin poikuetiheyksiä alueella (Nummi ym. 2019; Nummi & Hahtola 2008). Sinisorsa (lat. *Anas platyrhynchos*) on myös koko Suomessa yleisesti tavattu puolisuikeltajasorsa. Telkkä (lat. *Bucephala clangula*) on hyvin yleinen kokosuikeltajasorsa. Haapana (lat. *Mareca penelope*) suosii reheviä järviä, joilla rantakasvillisuus koostuu sara- ja kortekasveista (Pöysä ym. 2016). Haapana ja haapanan poikaset hyödyntävät kortekasvillisuutta ruuan etsimiseen, ei itse ravintona (Nummi ym. 2013). Alle viiden vuorokauden ikäiset poikaset syövät surviaissääskiä, mutta vaihtavat pian myös kasviravintoon.

Maantieteellisesti tarkasteltuna tavin ja sinisorsan tavallinen runsaus Evon alueella on 1–5 paria per km², kun taas telkän ja haapanan runsaus on niukempi, 0,1–1 paria per km². (Koskimies 2022). Tavi, sinisorsa ja telkkä ovat Suomessa elinvoimaisia lajeja (Punainen kirja 2019). Tavin lajimäärän on kuitenkin havaittu vähentyneen erityisesti eutrofisissa eli runsasravinteisissa elinympäristöissä (Lehikoinen ym. 2015). Sinisorsapopulaatiot ovat puolestaan kasvaneet sekä oligotrofisissa että eutrofisissa ympäristöissä, mutta huomattavasti nopeammin oligotrofisissa vesistöissä. Lisäksi sinisorsahavainnot ovat lisääntyneet majavien aiheuttamilla tulva-alueilla (Nummi & Holopainen 2014). Telkkäpopulaatiot ovat pysyneet tasaisina, joskin eutrofisissa ympäristöissä määrä on hieman

kasvanut (Lehikoinen ym. 2015). Haapana on Suomessa vaarantunut laji (Punainen kirja 2019), ja haapanapopulaatiot ovat laskeneet yleisesti, mutta etenkin eutrofisissa elinympäristöissä (Lehikoinen ym. 2015).

Taulukko 1. Tutkielmassa tarkasteltujen vesilintulajien yleisimmät elinympäristön valintaan vaikuttavat tekijät.

	Tavi	Sinisorsa	Telkkä	Haapana
Elinympäristö	Umpeen kasvaneet kosteikot, metsälammet, valtaajat, metsäiset järvenlahdet, saarten poukammat, tulva-alueet	Kaikentyyppiset rannikko-, järvi- ja suoseudut, mutta ei kivikkoiset tai kallioiset rannat	Avoimet järvien ja merenlahtien ruohostoiset rannat, myös karummat metsäjärvet ja suolammet	Rehevät järvet
Pesäpaikka	Metsässä aluskasvillisuuden seassa, toisinaan kaukanakin rannasta	Metsässä aluskasvillisuuden seassa, toisinaan kaukanakin rannasta	Puun kolo tai pönttö, korkeintaan 3 kilometrin päässä rannasta	Lähellä rantaa heinikossa tai pensaan suoissa
Ruokavalio	Aikuiset: vesi- ja heinäkasvien siemenet ja versot. Poikaset: selkärangattomat	Aikuiset: vesi- ja rantakasvien siemenet ja versot, ruoho- ja viljaoraat, kesäisin selkärangattomat. Poikaset: selkärangattomat	Aikuiset: vedessä elävät selkärangattomat, kalanpoikaset, vesikasvien versot ja siemenet. Poikaset: selkärangattomat	Aikuiset: vesi- ja heinäkasvien siemenet ja versot. Poikaset: surviaissääsket, vesi- ja heinäkasvien versot
Pesinnän ajankohta	3-7	4-8	4-8	5-8

Telkkä suosii pesäpaikkoinaan alueita, joilla tavataan sekä vapaasti uivia selkärangattomia lajeja että suurikokoisia hyönteisiä (Nummi ym. 2013). Suhteessa muihin tutkielmassa tarkasteltuihin lajeihin telkkä suosii enemmän selkärangattomia ja suurikokoisia hyönteisiä kuin pieniä hyönteisiä tai elinympäristön rakennetta. Kaksisiipisten lahkoon kuuluvien selkärangattomien esiintyminen alueella vaikuttavat haapanan ja tavin elinympäristön valintaan eniten (Nummi ym. 2013). Haapanan pesintään vaikuttaa myös elinympäristön ominaisuudet ja järven koko, mutta vähemmän kuin ravinnon esiintyminen. Kuitenkin on havaittu, että haapanapopulaatioiden supistuminen saattaa liittyä juuri muutoksiin elinympäristöissä. Esimerkiksi kortevaltaisen rantakasvillisuuden väheneminen saattaa olla yksi tekijä haapanakannan vähenemiseen (Pöytä ym. 2016).

Tavin poikastiheyteen vaikuttaa merkittävästi runsas selkärangattomien määrä (Čehovská ym. 2022). Eri-ikäisten poikueiden esiintymiseen vaikuttavat kuitenkin erilaiset elinympäristöön liittyvät tekijät

(Holopainen ym. 2014). Alle kolmen viikon ikäisten tavin poikasten määrään vaikuttaa lisääntyvien pariens runsaus ja ravinnon saatavuus, kun taas vanhemmilla poikasilla ravinto ja tulviminen ovat merkittävimmät esiintymiseen vaikuttavat tekijät. Sinisorsan esiintymiseen vaikuttavat eniten sekä suurikokoisten hyönteisten esiintyminen että elinympäristön rakenne (Nummi ym. 2013). Sekä tavin että sinisorsan poikaset suosivat elinympäristönään monipuolista, sarakasvillisuuden hallitsemaa rantaa (Nummi & Pöysä 1995).

Tavin ja sinisorsan poikasten tavoin telkän poikaset viihtyvät rannan tuntumassa sarakasvillisuuden suojissa, mutta yli kolmen viikon ikäisinä elinympäristö muuttuu yhtenäisemmäksi kuin tavilla ja sinisorsalla (Nummi & Pöysä 1995). Alle kolmeviikkoisina telkän poikasten ravinto koostuu selkärangattomista, joita ne löytävät kasveista ja veden pinnasta, ja ne suosivat tavi- ja sinisorsapoikueiden tapaan sarakasvien hallitsemaa aluetta. Myöhemmin telkkäpoikueet siirtyvät avoimempaan veteen ja suosivat alueita, joilla esiintyy kelluvaa vesikasvillisuutta. Siirtyminen avoimempaan ympäristöön kolmen viikon iässä viittaa lajin ominaisuuteen sukeltaa ravintoa. Sekä tavin, sinisorsan että telkän kohdalla selkärangattomien runsaus alueella viittaa pari-, poikue- ja poikastiheyden kasvuun sekä myös lintujen esiintymiseen alueella pesinnän päätyttyä (Čehovská ym. 2022).

3.3 Aineistot

Hyödynnän tutkielmassa kahdeksaa eri vapaasti ladattavaa tai lainattavaa aineistoa (taulukko 2). Tutkimusjärvien valuma-alueiden kartoittamiseen olen hyödyntänyt Maanmittauslaitoksen vapaasti ladattavissa olevaa maastokarttarasteria (1:50 000). Maanmittauslaitoksen historiallisten ilmakuvien avulla olen kartoittanut tutkimusalueella suoritettujen hakkuiden ajankohtaa ja sijaintia. Evon alueelta on olemassa ilmakuvia tutkimusajankohtana vuosilta 1995, 1998, 1999, 2008 ja 2012, joista hyödynnän kaikkia paitsi vuoden 2008 ilmakuvia. Maanmittauslaitoksen historiallisten ilmakuvien kuvakaappaukset olen ottanut suoraan Paikkatietoikkunasta, sillä aineisto ei ole sähköisesti ladattavissa ilman lisäkustannuksia, mutta ne ovat vapaasti kopioitavissa Paikkatietoikkunasta.

Valuma-alueiden maaperän yleispiirteiden kuvaamiseen olen käyttänyt Geologian tutkimuskeskuksen vapaasti ladattavaa Suomen maaperäaineistoa (1:20 000 / 1:50 000) ja valuma-alueen topografian ja rinnekaltevuuden kuvaamiseen Maanmittauslaitoksen vapaasti ladattavien aineistojen korkeusmallia (10 m x 10 m). Tutkimusjärvien valuma-alueiden hydrologisen verkoston kuvaamisessa olen hyödyntänyt niin ikään Maanmittauslaitoksen avointa aineistoa, ja metsätyypin ja maankäytön kuvaamisessa Suomen ympäristökeskuksen CORINE Land Cover -rasteriaineistoa

vuodelta 2000, koska se sijoittuu suurin piirtein tutkimusajankohdan puoliväliin, ja Maanmittauslaitoksen avointa aineistoa. Metsätyypin määrittäminen perustuu suoraan Corine Land

Taulukko 2. Tutkimuksessa hyödynnetyt aineistot ja käyttötarkoitus

Aineisto ja lataus/ - käyttöönottopvm	Aineiston omistaja	Käyttötarkoitus	Menetelmät	Työkalu
Maastokarttarasteri 1:50 000 (2020) 30.9.2021	Maanmittauslaitos	Valuma-alueiden ja ojaverkoston kartoittaminen	Valuma-alueiden digitointi korkeuskäyrien ja virtaussuuntien mukaisesti, ojien digitointi	ArcGIS Pro, QGIS
Historialliset ilmakuvat (1995, 1999, 2008, 2012) 7.9.2022	Maanmittauslaitos	Hakkuualueiden kaukokartoitus	Kuvakaappausten georeferointi, hakkuualueiden kartoittaminen	ArcGIS Pro, Paikkatietoikkuna
Maaperä 1:20 000 / 1:50 000 (2022) 20.4.2022	Geologian tutkimuskeskus	Valuma-alueiden maaperän kartoittaminen	Kallio-, kivennäis- ja turvemaiden luokittelu ja pinta- alan laskeminen	ArcGIS Pro, Excel
Korkeusmalli 10m x 10m (2022) 19.4.2022	Maanmittauslaitos	Hakkuualueiden rinnekaltevuuden kartoittaminen	Rinnekaltevuuden laskeminen ja visualisointi valuma- alueilta	ArcGIS Pro, Excel
CORINE Land cover 25ha (2000) 20.4.2022	Suomen ympäristökeskus	Metsätyypin ja ihmisvaikutuksen kartoittaminen	Metsätyypin visualisointi	ArcGIS Pro, Excel
Säähavainnot 1990– 2012 2.11.2022	Ilmatieteenlaitos	Sadannan vaikutuksen arviointi veden tummuuteen	Vuotuisen sademäärän laskeminen	Excel
Lintuhavainnot 1.5.2020	Petri Nummi petri.nummi@helsinki.fi	Vesilintujen pari- ja poikuehavainnot	Havaintojen laskeminen kultakin vuodelta	Excel
Veden tummuus 1.5.2020	Lammin biologinen asema	Veden tummuuden vaihtelun kartoittaminen	Veden tummuuden vaihtelun visualisointi	Excel

Cover -aineiston havumetsien määritelmään. Esimerkiksi havumetsä perustuu satelliittikuvista tehtyihin tulkintoihin, joissa yli 75 % metsästä koostuu havupuulajeista ja sekametsät on määritelty alle 70 % havu- ja lehtipuuosuudella. Säähavainnot Hämeenlinnan Lammin Pappilasta olen ladannut Ilmatieteenlaitoksen avoimesta latauspalvelusta (Havaintojen lataus s.a). Havaintoasema on tutkimusaluetta lähin, jossa on mitattu tutkimusajankohtana vuotuista sademäärää.

Tutkimusjärvien veden tummuusaineiston on Lammin biologisen aseman keräämä aineisto vuosilta 1990–2020. Aineisto on kerätty vuosittain Evon alueella sijaitsevista järvistä loka-marraskuun vaihteessa juuri ennen järvien jäätymistä. Tarkastelen vuosien 1990–2014 mittauksia viideltä tutkimusjärveltä. Iso Ruuhijärven, Huhmarin ja Pitkänniemenjärven mittaustulokset ovat poikkeukselliset, sillä niiden mittaushistoriasta löytyy kultakin yksi vuosi, jolloin mittausta ei ole suoritettu, mikä vaikuttaa järvien tummuuden keskiarvoon.

Lintujen esiintymistä ja pesinnän onnistumista arvioin Petri Nummen keräämällä havaintoaineistolla Evon alueen järviltä. Aineisto on kerätty vuosien 1988 ja 2014 välillä osana pitkäaikaista populaatioekologian projektia. Havainnot koskevat tavia, sinisorsaa, telkkää ja haapanaa. Aineistossa on aukkoja kunkin lajin kohdalla joinain vuosina, jolloin havainnointia ei ole tapahtunut, mikä vaikuttaa aineiston tulkintaan merkittävästi.

3.4 Menetelmät

Georeferoin Maanmittauslaitoksen historiallisten ilmakuviin kuvakaappaukset ArcGIS Pro -paikkatieto-ohjelmalla Maanmittauslaitoksen maastokarttarasterin avulla, minkä jälkeen kokosin jokaisesta valuma-alueesta resoluutioltaan mahdollisimman tarkan kuvamosaiikin kultakin saatavissa olevalta vuodelta metsänkäytön muutoksen tulkintaa varten. Avohakkuut on digitoitu vuosien 1990–1995, 1995–1999, 1999–2008 ja 2008–2012 välisiltä ajoilta. Vuosien 1990 ja 1995 välissä tapahtuneiden metsänkäytön muutosten arvioinnissa hyödynsin myös edellistä alueelta otettua ilmakuvaa vuodelta 1979. Hakkuiden tulkinnassa olen yleisesti käyttänyt tukena myös suoraan Paikkatietoikkunan historiallisten ilmakuviin karttatasoa helpottamaan kuvakaappausten ja paikkatieto-ohjelman aiheuttaman kohinan epävarmuutta.

Tutkimusjärvien valuma-alueen, valuma-alueen hakkuualojen, maaperän ominaisuuksien, rinnekaltevuuden, ojituksen ja metsätyypin ja maankäytön tulkinnassa käytettävissä olevat aineistot muokkasinkin vastaamaan tutkielman tavoitteita ArcGIS Pro -paikkatieto-ohjelmistolla. Valmistuneista kartoista johdin numeerisia arvoja ja taulukoita Excel -ohjelmalla kunkin teeman merkittävyyden tulkinnan helpottamiseksi. Hakkuualueiden ominaisuudet suhteessa koko valuma-alueen ominaisuuksiin esitän kirjallisuudesta johdettujen veden tummuuteen merkittävästi vaikuttavien tekijöiden perusteella (keskimääräinen rinnekaltevuus, turvemaan osuus, havumetsän osuus ja ojituksen määrä hakkuualueella) regressioanalyysia apuna käyttäen. Sademääräaineistosta laskin vuosittaisen sademäärän (mm) niin ikään Excel -ohjelmistolla.

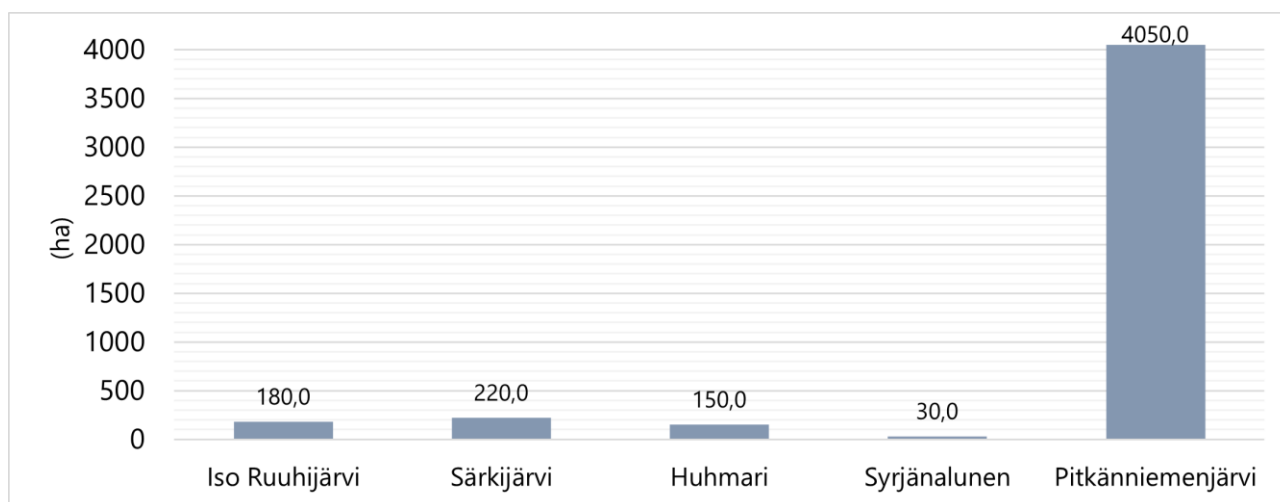
Veden tummuus -aineistosta laskin tutkimusajankohtana vaihtelevan tummuuden keskiarvon kunkin tutkimusjärven kohdalla koko tutkimusajalta. Tummuuden muutokset kokosin visuaalista tulkintaa varten järvikohtaisiksi kuvaajiksi. Tummuusaineiston käsittelin Excel-ohjelmistolla. Sekä valuma-alueiden ja hakkuualueiden välisiä eroja suhteessa veden tummumiseen että hakkuualueiden ominaisuuksien ja tutkimusjärvien keskimääräisen tummuuden välisiä yhteyksiä tarkastelin tilastollisin menetelmin Excel-ohjelmistolla. Hyödynsin regressioanalyysiä arvioimaan tummuuden vaihteluihin merkittävimmin vaikuttaneita hakkuualueiden ominaisuuksia. Tarkastelua varten laskin neljä tummuuskeskiarvoa kultakin tutkimusjärveltä vastaamaan eri ajankohtina tehtyjä hakkuita (1990–1995, 1995–1999, 1999–2008 ja 2008–2012).

Lintuaineistosta kokosin tavin, sinisorsan, telkän ja haapanan huhti- tai toukokuun aikana tehdyt koirashavainnot, joiden lukumäärä viittaa pesivien parien määrään. Lisäksi keräsin jokaiselta vuodelta myöhemmin kesällä tehdyt poikashavainnot pariesiintymisen ja pesimisen onnistumisen tulkitsemiseksi. Poikuehavainnoissa huomioin, onko kyseisenä vuonna havainnoitu kyseistä lajia huhti- ja toukokuun jälkeen. Jos lajin havaintokertoja oli useampi samana vuonna, jolloin parihavainnot oli vähintään yksi, mutta poikuetta ei ollut havaittu, on poikuehavainnoksi määritetty nolla. Jos havaintokertoja ei ollut myöhemmältä ajankohdalta vuodelta, jona vähintään yksi pari oli havaittu huhti-toukokuussa, ei poikuehavaintoa ole määritetty lainkaan virhemahdollisuuden vähentämiseksi. Laskin sekä pari- että poikuehavaintojen trendin ja kulmakertoimet kultakin tutkimusjärveltä Excel-ohjelmistolla. Regressioanalyysin avulla pyrin löytämään yhteyttä veden tummuuden ja havaittujen lintuparien määrän välillä. Laskin parihavainnot yhteen jokaiselta neljältä ajankohdalta (1990–1995, 1995–1999, jne.) ja vertasin kyseisen ajankohdan keskimääräiseen veden tummuuteen. Tulokset esitän siten, että yksi havaintokerta vastaa yhden vuoden huhti- ja toukokuussa tehtyjä koiras- tai parihavainnot tai myöhempänä ajankohtana tehtyjä poikuehavainnot.

4 Tulokset

4.1 Tutkimusjärvien ja valuma-alueiden ominaisuudet

Pitkänniemenjärven valuma-alue poikkeaa kooltaan muiden tutkimusjärvien valuma-alueista, sillä se on huomattavasti suurempi kuin muut valuma-alueet (kuva 3). Ison Ruuhijärven, Särkijärven ja Huhmarin valuma-alueet ovat lähes samaa kokoluokkaa, mutta Särkijärven valuma-alue pitää sisällään sekä Huhmarin että Syrjänalusen valuma-alueet. Syrjänalusen valuma-alue on huomattavasti pienempi kuin valuma-alueet.



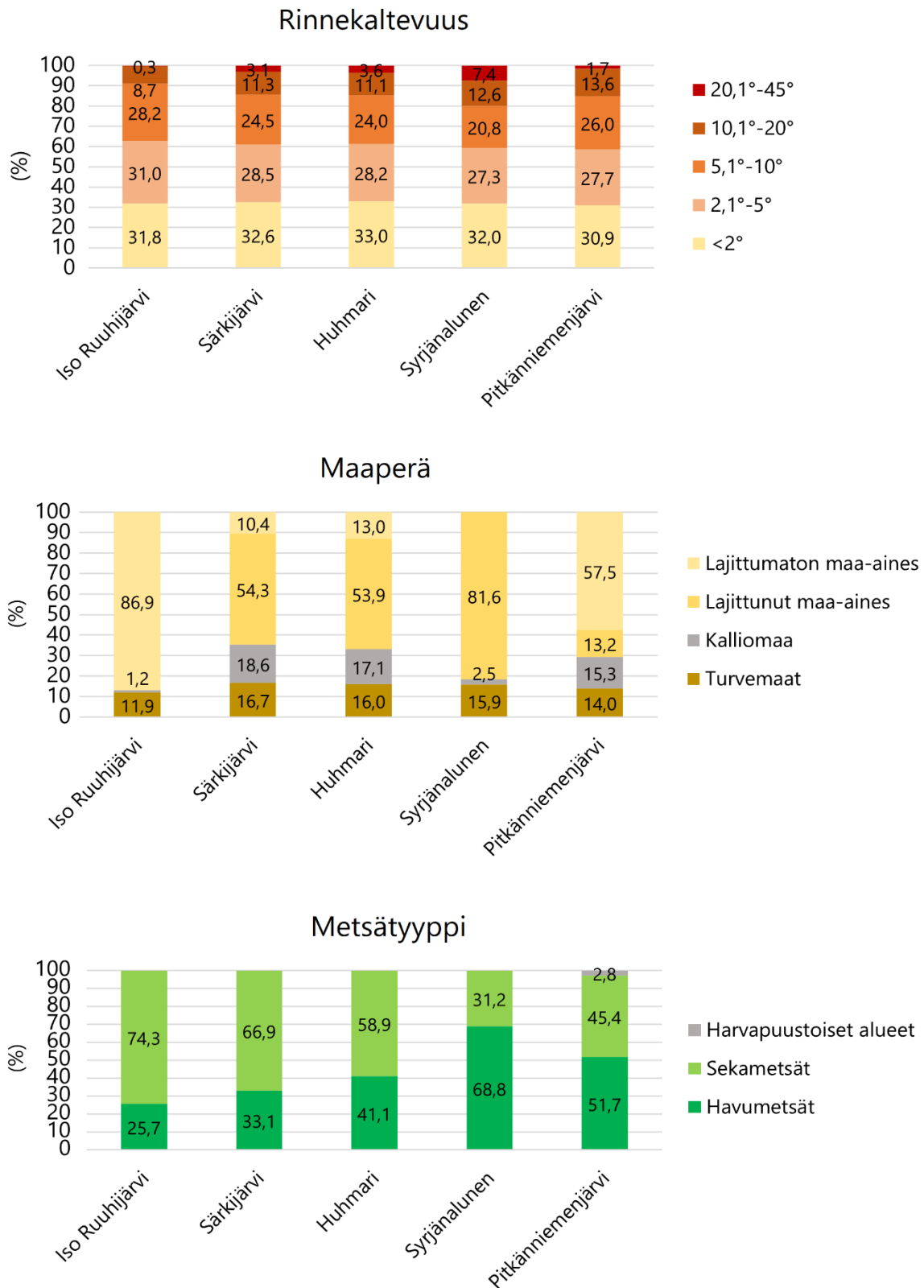
Kuva 3. Tutkimusjärivistä Ison Ruuhijärven, Särkijärven ja Huhmarin valuma-alueet ovat lähes samankokoisia, kun taas Syrjänalusen valuma-alue on huomattavasti pienempi ja Pitkänniemenjärven valuma-alue merkittävästi suurempi kuin muut.

Tutkimusjärivistä suurimmat ovat Iso Ruuhijärvi ja Pitkänniemenjärvi, jotka poikkeavat kooltaan merkittävästi muista tutkimusjärivistä. Molempien järvien pinta-ala on 14,2 hehtaaria, kun taas muiden järvien pinta-ala on alle kaksi hehtaaria. Särkijärvi, Huhmari ja Syrjänalunen ovat selkeästi pienempiä järviä ja kooltaan verrattavissa keskenään. Syrjänalunen on kooltaan pienin ja sen pinta-ala on 1,0 hehtaaria.

Valuma-alueet ovat rinnekaltevuudeltaan tasaisia, sillä valtaosa niiden maanpinnasta on alle kymmenen asteen kulmassa (kuva 4) (Liite 1–2). Kaikkien valuma-alueiden hallitsevin kaltevuus on tasamaata tai lähes tasamaata. Syrjänalusella jyrkimpien alueiden osuus on suurin, yhteensä 20 prosenttia, kun muilla valuma-alueilla niiden osuus jää korkeintaan n. 15 prosenttiin. Isolla Ruuhijärvellä yli 20 asteen kaltevuutta ei ole lainkaan.

Maaperän koostumuksessa on merkittävää vaihtelua valuma-alueiden kesken (kuva 4) (Liite 3–4). Syrjänalusella yli 80 prosenttia maaperästä koostuu lajittuneista maa-aineksesta, kun puolestaan Isolla Ruuhijärvellä lajittuneita maalajeja ei tavata lainkaan. Sen sijaan Isolla Ruuhijärvellä yli 85

prosenttia maaperästä koostuu lajittumattomista maa-aineksista, joita Syrjänalusella ei tavata lainkaan.



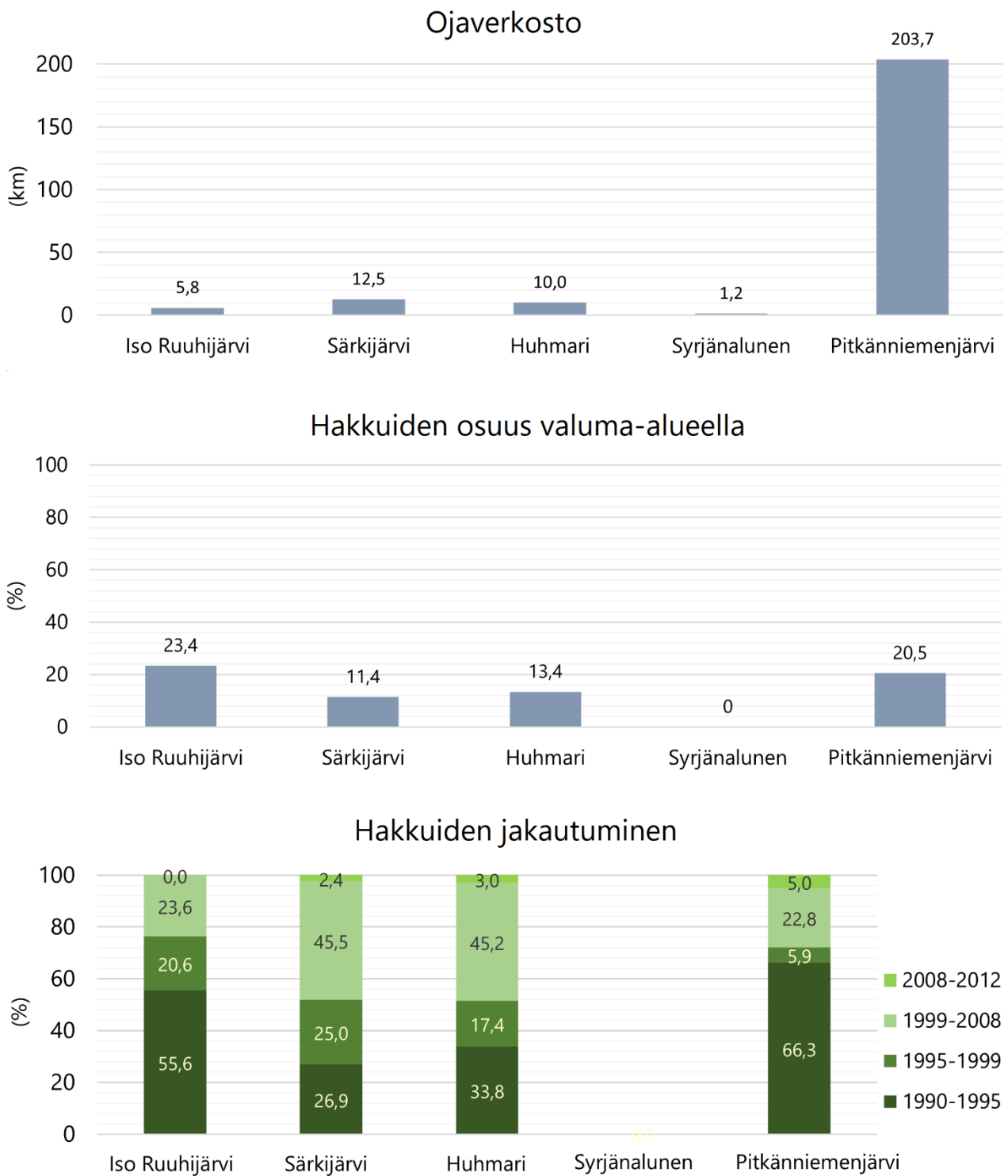
Kuva 4. Valuma-alueiden rinnekaltevuuden, maaperä- ja metsätyyppien vaihtelu.

Särkijärvellä ja Huhmarilla oli 50 prosenttia maaperästä koostuu lajittuneista maa-aineksista, kun taas Pitkänniemenjärvellä lajittumattoman maa-aineksen osuus on yli 50 prosenttia. Turvemaan osuudessa ei havaita merkittäviä eroja valuma-alueiden välillä, kun prosenttiosuudet vaihtelevat 11–17 prosentin välillä. Särkijärvellä turvemaan osuus on suurin, Isolla Ruuhijärvellä pienin.

Valuma-alueiden metsätyyppi vaihtelee pääosin havu- ja sekametsän välillä (kuva 4) (liite 5–6). Pitkänniemenjärven alueella esiintyy myös harvapuustoisiksi luokiteltuja alueita, mutta niiden osuus on alle kolme prosenttia. Sekametsät hallitsevat selkeästi Ison Ruuhijärven, Särkijärven ja Huhmarin valuma-alueita, kun taas Syrjänelusen ja Pitkänniemenjärven valuma-alueilla pääasiallinen metsätyyppi on havumetsä.

Pitkänniemenjärven ojaverkosto on merkittävästi pidempi kuin muilla valuma-alueilla, yli 200 kilometriä (kuva 5) (Liite 7). Särkijärven ja Huhmarin ojaverkostot ovat lähes samanpituiset, sillä Särkijärven ojaverkosto on 12,5 kilometriä ja Huhmarin 10,0 kilometriä. Ison Ruuhijärven ojaverkosto on alle kymmenen kilometriä, ja Syrjänelusen ojaverkosto on selkeästi lyhyin.

Suhteessa valuma-alueen pinta-alaan eniten hakkuita on tehty Ison Ruuhijärven ja Pitkänniemenjärven valuma-alueella, yhteensä yli 20 prosenttia (kuva 5) (Liite 8). Särkijärvellä ja Huhmarilla hakkuiden osuus valuma-alueesta on selkeästi vähäisempi. Valtaosa hakkuista sijoittuu vuosille 1990–1995 kaikilla valuma-alueilla (kuva 5). Toiseksi eniten hakkuita on tehty vuosien 1999–2008 välisenä aikana, eniten Särkijärven ja Huhmarin valuma-alueilla. Vuosina 2008–2012 hakkuita on tehty kaikilla valuma-alueilla merkittävästi vähemmän kuin muina vuosina. Isolla Ruuhijärvellä hakkuita ei ole tehty lainkaan vuosina 2008–2012.



Kuva 5. Maankäytön osuus ja jakautuminen valuma-alueilla.

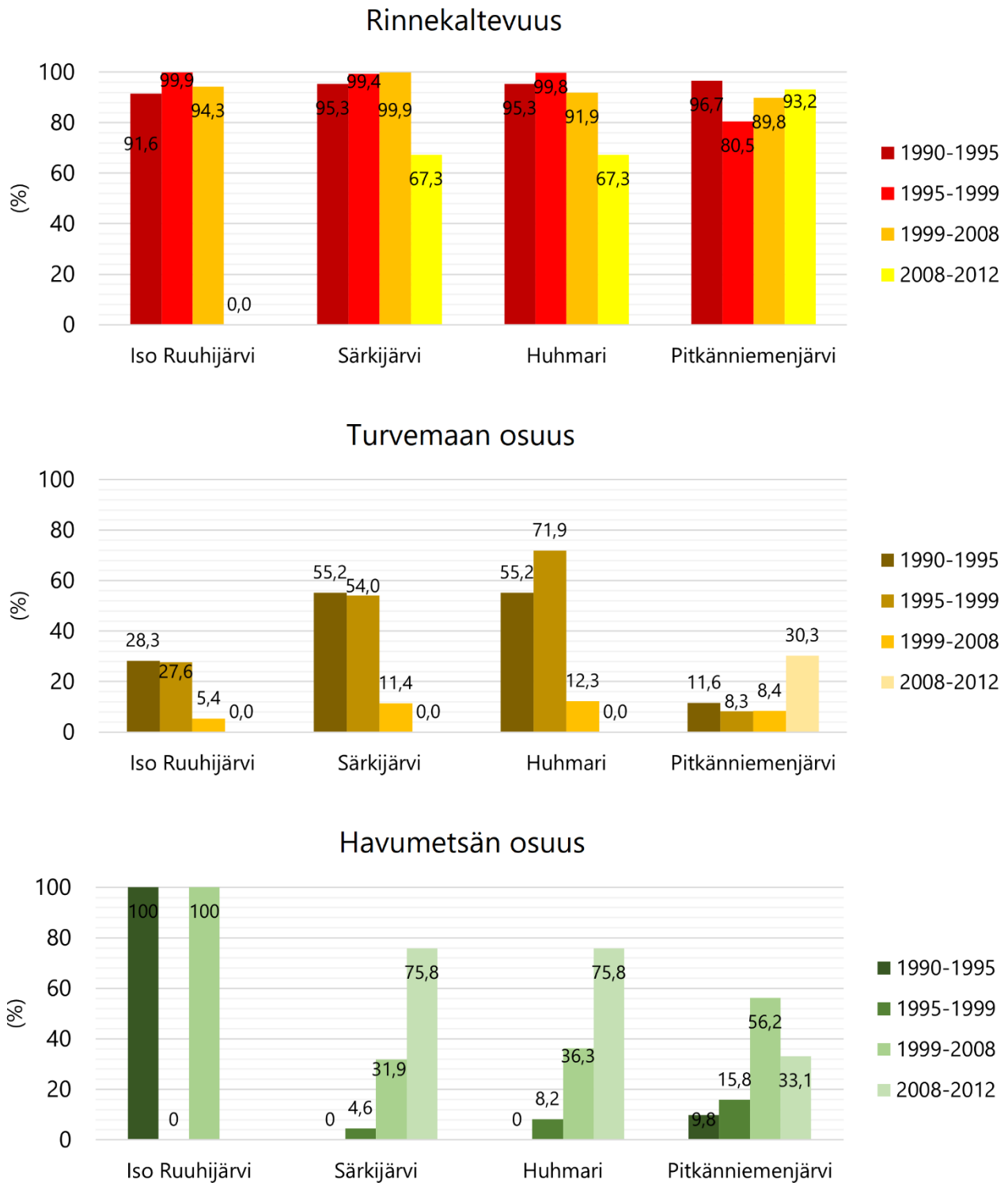
4.2 Valuma-alueen ominaisuudet suhteessa hakkuualueisiin

Hakkuualat ovat topografialtaan lähes yhtä tasaiset kaikilla valuma-alueilla. Valtaosalla hakkuualoista rinnekaltevuus on suurilta osin tai lähes kokonaan kymmenen tai alle kymmenen astetta (kuva 6). Esimerkiksi Isolla Ruuhijärvellä, Särkijärvellä ja Huhmarilla vuosina 1990–2008 tehdyillä hakkuilla yli 90 % alasta on rinnekaltevuudeltaan alle kymmenen astetta. Vuosina 2008–2012 Särkijärvellä ja Huhmarilla kymmenen tai alle kymmenen asteen rinnekaltevuuden osuus laskee huomattavasti, mikä tarkoittaa topografialtaan jyrkemmissä maastoissa tehtyjen hakkuiden lisääntymistä.

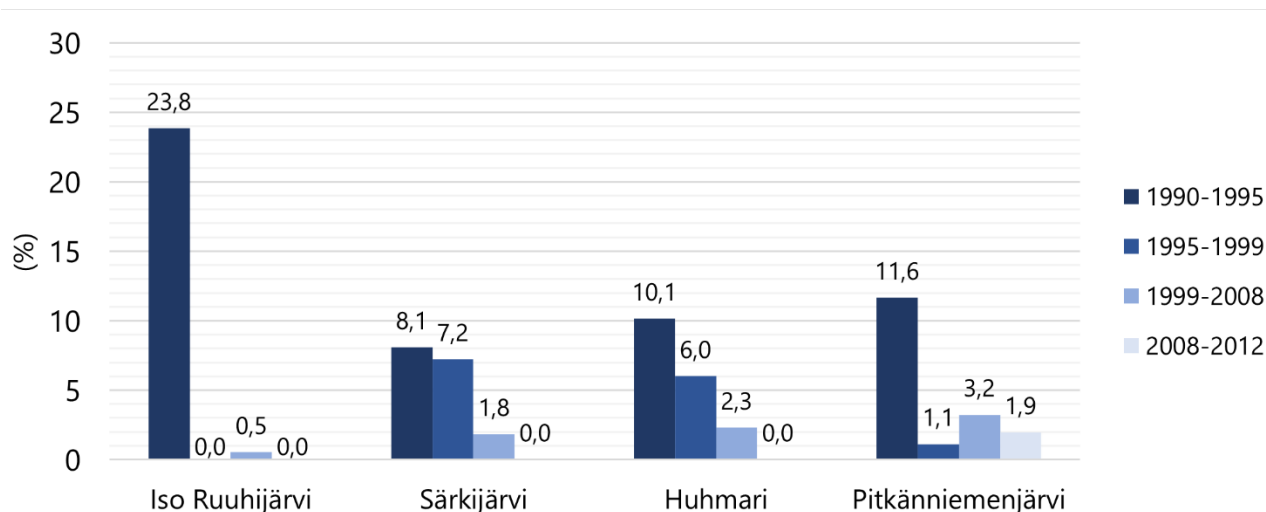
Turvemaan osuus hakkuualueilla vaihtelee niin valuma-alueittain kuin tarkasteltujen ajankohtien välillä huomattavasti. Isolla Ruuhijärvellä, Särkijärvellä ja Huhmarilla turvemaan osuus laskee tutkimusajankohtana siten, että vuosina 2008–2012 turvemaan osuus hakkuualoista on nolla prosenttia (kuva 6). Särkijärvellä ja Huhmarilla turvemaan osuuden muutos hakkuualoilla on hyvin merkittävä: molemmilla järvillä turpeen osuus on vuosina 1990–1999 yli 50 % hakkuualoista, mutta vuosina 1999–2008 turpeen osuus vähenee hieman yli kymmeneen prosenttiin. Pitkänniemenjärvellä hakkuut ovat sijoittuneet turvemaille hyvin maltillisesti ja tasaisesti aina vuoteen 2008 asti, mutta vuoteen 2012 turvemaan osuus kasvaa merkittävästi, yli 30 prosenttiin.

Havumetsän osuus hakkuista vaihtelee Isolla Ruuhijärvellä jyrkästi, sillä vuosina 1990–1995 ja 1999–2008 kaikki hakkuut ovat sijoittuneet havumetsävyöhykkeille ja vuosina 1995–1999 ainoastaan sekametsävyöhykkeille (kuva 6). Särkijärvellä ja Huhmarilla havumetsän osuus hakkuilla kasvaa jokaisena ajankohtana. Vuosina 1990–1995 kaikki hakkuut sijoittuvat sekametsäalueille, kun taas vuosina 2008–2012 yli 70 % hakkuista on tehty havumetsäalueille. Pitkänniemenjärven alueella metsätyyppi vaihtelee tasaisemmin. Eniten havumetsähakkuita on tehty vuosina 1999–2008, jolloin yli 50 prosenttia hakkuista keskittyi havumetsiin.

Hakkuualueilla sijaitsevan ojaverkoston osuus koko valuma-alueen ojaverkostosta on suurimmillaan vuosina 1990–1995 kaikilla valuma-alueilla (kuva 7). Isolla Ruuhijärvellä ojaverkoston osuus hakkuualueilla on merkittävästi suurempi kuin muilla valuma-alueiden hakkuualueilla. Myös muutos ojaverkoston osuudessa on Ison Ruuhijärven hakkuualoilla huomattavin, sillä ojituksen osuus laskee merkittävästi tai oja ei esiinny hakkuualueilla lainkaan myöhempinä ajankohtina. Särkijärvellä, Huhmarilla ja Pitkänniemenjärvellä valuma-alueen ojaverkoston osuudet ja muutos hakkuualoilla ovat keskenään verrattaessa lähes samankaltaiset. Särkijärven ja Huhmarin hakkuualueilla ei vuosina 2008–2012 esiinny ojituksia ollenkaan.



Kuva 6. Hakkuualueiden alle kymmenen asteen rinnekaltevuuden osuus sekä turve- ja havumetsän osuus valuma-alueittain.



Kuva 7. Valuma-alueiden ojituksen osuus hakkuualueilla laskee tutkimusajankohtana.

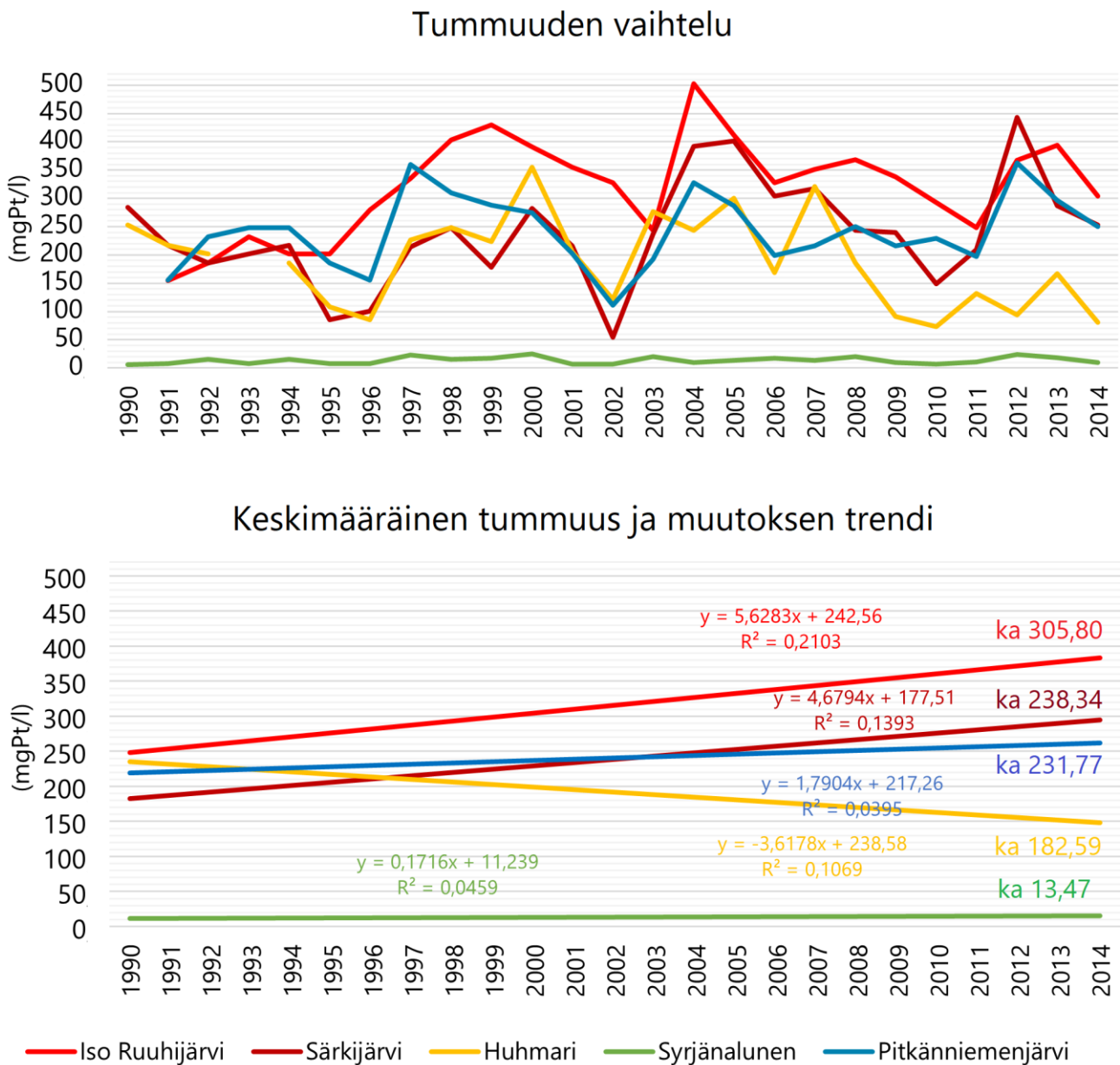
4.3 Tutkimusjärvien tummuus suhteessa valuma-alueiden ja hakkuualueiden ominaisuuksiin

Isolla Ruuhijärvellä, Särkijärvellä, Huhmarilla ja Pitkänniemenjärvellä tutkimusajankohdan keskimääräinen veden tummuus on yli 100 mgPt/l, joten ne voidaan luokitella voimakkaasti humuspitoisiksi järviksi. Erityisesti Isolla Ruuhijärvellä tummuusarvo on keskimääräisesti yli 300 mgPt/l, mikä tekee siitä erityisen humuspitoisen. Syrjänelusen keskimääräinen tummuus on sen sijaan alle 15 mgPt/l, joten se voidaan määritellä värittömäksi vesistöksi.

Keskenään verrattaessa kaikkien tutkimusjärvien tummuuden vaihtelussa on havaittavissa yhdenmukaisuutta (kuva 8). Esimerkiksi vuosina 1995–1996 ja 2002–2003 kaikkien järvien tummuus laskee ja vuosina 2004–2005 tummuus kasvaa. Karkeampia yhteistrendejä havaitaan esimerkiksi vuonna 2012, jolloin Iso Ruuhijärven, Särkijärven, Syrjänelusen ja Pitkänniemenjärven tummuus kasvaa, mutta Huhmarin tummuus kasvaa vasta seuraava vuonna, ja vuosina 1997–2000, jolloin kaikkien järvien tummuus kasvaa, mutta Särkijärven, Huhmarin ja Syrjänelusen tummuuden huippu seuraa vasta vuonna 2000, kun Isolla Ruuhijärvellä ja Pitkänniemenjärvellä huippu sijoittuu vuoteen 1997.

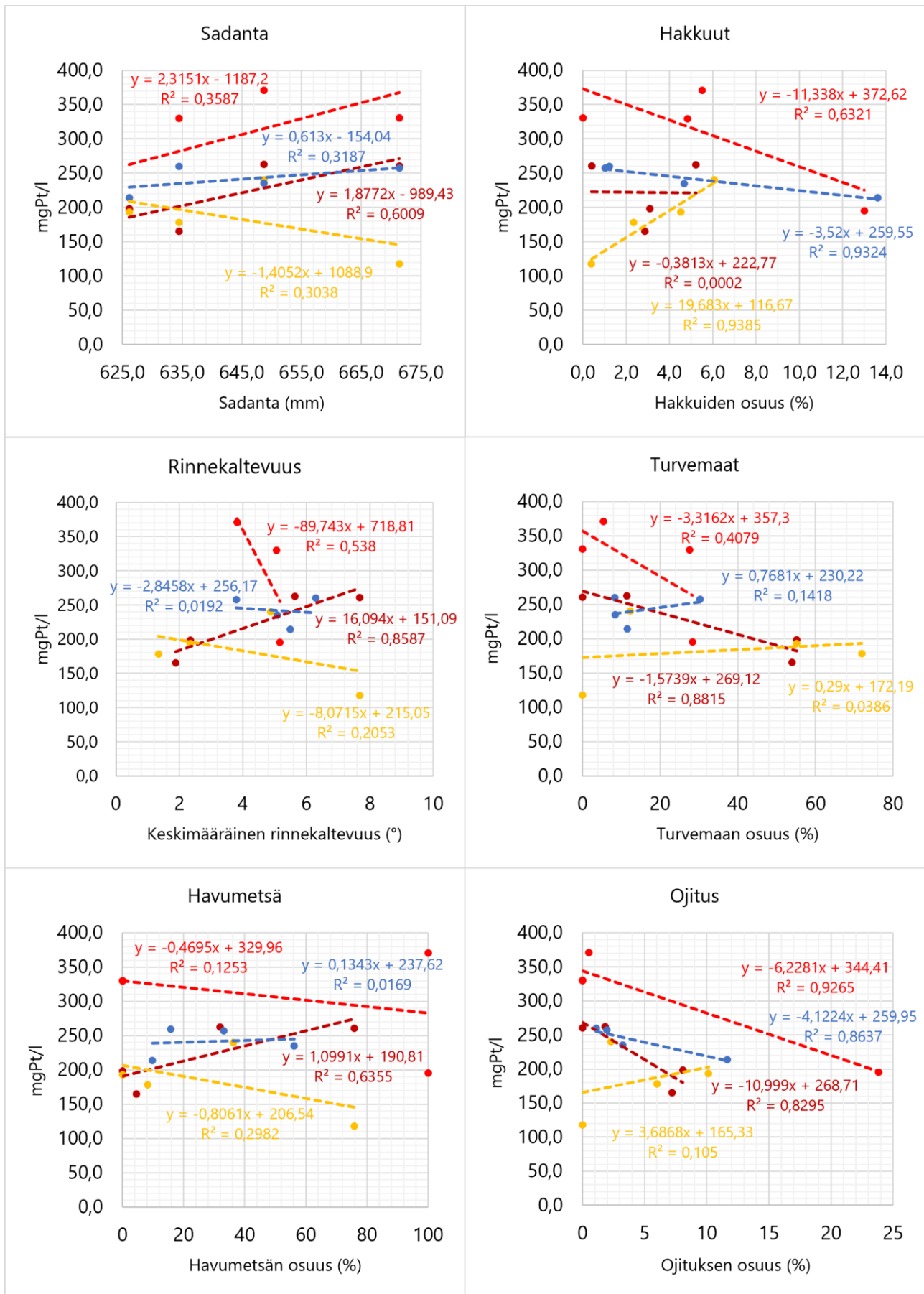
Kaikilla muilla järvilla, paitsi Huhmarilla, veden tummuus on kasvanut tutkimusajankohtana (Kuva 8). Voimakkain kasvu havaitaan Isolla Ruuhijärvellä, kun taas maltillisinta veden tummuuden kasvu on Syrjänelusella. Myös keskiarvoisesti tarkasteltuna selkeästi tummin vesi on Isolla Ruuhijärvellä ja kirkkain Syrjänelusella (kuva 8). Vaikka Huhmarin veden tummuus laskee tutkimusajankohtana,

se ei ole merkittävästi kirkaampi verrattuna Särkijärven ja Pitkänniemenjärven keskimääräiseen tummuusasteeseen.



Kuva 8. Tutkimusjärvien tummuuden vaihtelu, keskiarvo ja muutos tutkimusajankohtana.

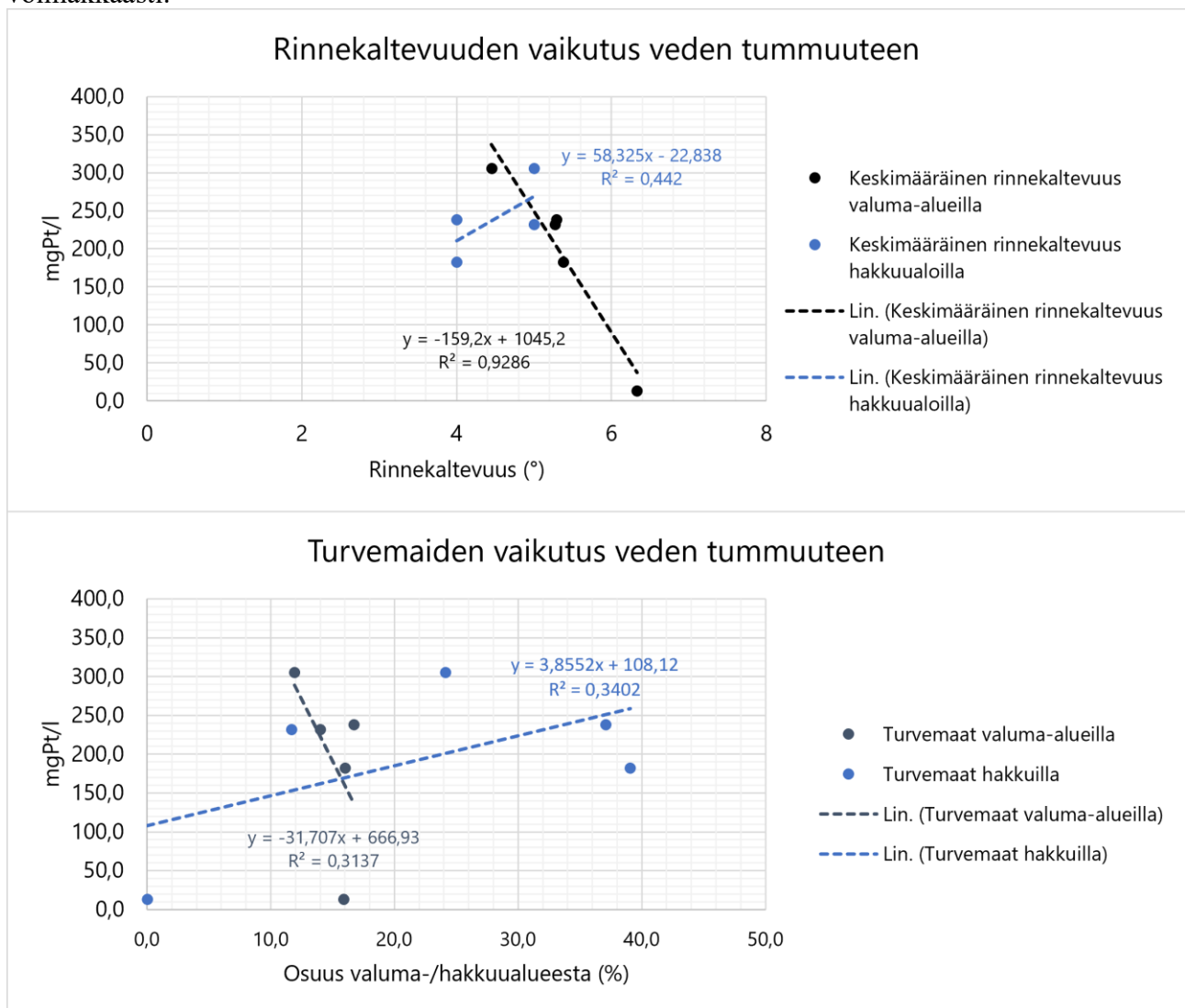
Suuremman sadannan vaikutus vesistöjen tummuuden kasvuun on havaittavissa kaikilla muilla järvilla, paitsi Huhmarilla (kuva 9). Isolla Ruuhijärvellä vaikutus on suurin, mutta selityssaste on heikko ($r^2 = 0,3$). Sen sijaan Särkijärvellä lisääntyvä sadanta selittää vesien tummumista 60-prosenttisesti.



Kuva 9. Hakkualueiden ominaisuudet veden tummuutta selittävänä tekijänä. Punainen = Iso Ruuhijärvi, tummanpunainen = Särkijärvi, keltainen = Huhmari ja sininen = Pitkäniemenjärvi. Pisteet osoittavat neljänä ajankohtana (1990–1995, 1995–1999, 1999–2008, 2008–2012) tehtyjen hakkuiden yhteismäärän kullakin valuma-alueella.

Hakkuualan kasvaessa Ison Ruuhijärven, Särkijärven ja Pitkänniemenjärven veden tummuus on laskee. Suurin muutos havaitaan Isolla Ruuhijärvellä, jolla hakkuualan lisääntyminen selittää veden tummuuden vähenemistä kohtalaisesti ($r^2 = 0,6$). Pitkänniemenjärvellä selitysaste on puolestaan voimakas, $r^2 = 0,9$. Huhmarilla hakkuuden lisääntyminen lisää veden tummuutta ja selittää 90-prosenttisesti.

Särkijärvellä jyrkempi keskimääräinen rinnekaltevuus hakkuualueella lisää veden tummuutta ja selittää sitä voimakkaasti ($r^2 = 0,8$) (kuva 9). Sen sijaan Isolla Ruuhijärvellä veden tummuus laskee jyrkästi rinnekaltevuuden kasvaessa selitysasteen ollessa kohtalainen ($r^2 = 0,5$). Verrattaessa valuma-alueiden ja hakkuualueiden keskimääräisintä rinnekaltevuutta huomataan, että hakkuualueilla rinnekaltevuuden kasvaessa myös veden tummuus kasvaa ja selittyy kohtalaisesti ($r^2 = 0,4$) (kuva 10). Valuma-alueetasolla rinnekaltevuuden kasvu vähentää veden tummuutta ja selittää sitä erittäin voimakkaasti.

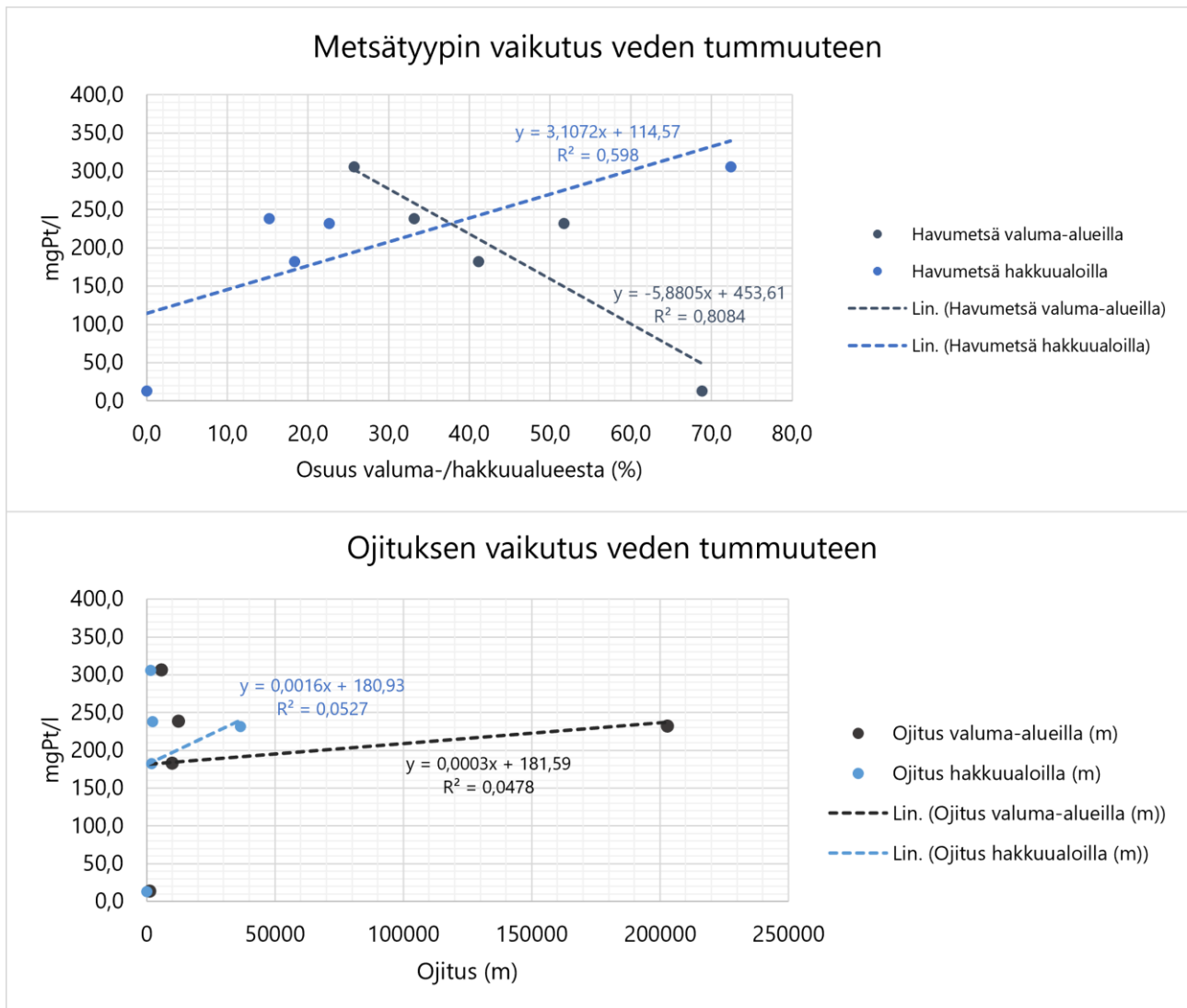


Kuva 10. Valuma-alueen ja hakkuualueiden keskimääräisen rinnekaltevuuden ja turvemaan osuuden merkitys veden tummumiseen.

Turvemaiden osuuden kasvaessa hakkuualueilla Huhmarilla ja Pitkänniemenjärvellä vesistö tummuu (kuva 9). Toisaalta molempien järvien kohdalla selitysaste jää heikoksi tai hyvin heikoksi ($r^2 = <0,3$). Isolla Ruuhijärvellä ja Särkijärvellä veden tummuus vähenee turvemaiden osuuden lisääntyessä hakkuualueilla. Särkijärvellä turvemaiden suurempi osuus selittää voimakkaasti ($r^2 = 0,8$) muutosta veden tummuudessa, kun Isolla Ruuhijärvellä vaikutus on kohtalainen ($r^2 = 0,4$). Kun verrataan yleisesti valuma-alueiden ja hakkuiden turvemaan osuutta veden tummuuden muutokseen, huomataan, että mitä enemmän hakkuut sijoittuvat turvemaille, sitä enemmän vesi tummuu, joskin selittävänä tekijänä sen merkitys on heikko ($r^2 = 0,3$) (kuva 10).

Havumetsien suurempi osuus hakkuualueilla selittää Särkijärven veden tummuuden kasvua kohtalaisesti ($r^2 = 0,6$). Muilla tutkimusjärvillä havumetsän osuus jää merkityksettömäksi, joskin muilla tutkimusjärvillä havaitaan lievää tummuuden vähenemistä havumetsäosuuden kasvaessa. Yleisesti tarkasteltuna huomataan, että valuma-alueilla havumetsän osuuden kasvaessa vesistöjen tummuus laskee (kuva 11). Hakkuualueilla sen sijaan havumetsän osuuden kasvaessa myös vesistö tummuu ja se selittää vesistöjen tummumista kohtalaisesti.

Särkijärvellä ojituksen lisääntyminen hakkuualueella vaikuttaa vesistöjen tummuuden kasvuun, mutta selittää sitä huonosti ($r^2 = 0,1$). Muilla järvillä ojituksen määrän kasvu selittää sen sijaan voimakkaasti vesistöjen tummumisen vähenemistä ($r^2 = >0,8$). Kun valuma-alueen ja hakkuualueiden suhteellista ojitusta verrataan keskenään, huomataan, että molemmilla tasoilla ojituksen määrän kasvaessa vesistöjen tummuus kasvaa, mutta selittävänä tekijänä ojituksen kasvu jää hyvin heikolle tasolle (kuva 11).



Kuva 11. Havumetsän ja ojituksen merkitys veden tummuuteen niin valuma- kuin hakkuualueella.

4.4 Linnuston muutokset suhteessa veden tummuuteen

Isolla Ruuhijärvellä kaikki muut lajit, paitsi haapana, ovat runsastuneet tutkimusjakohtana, mutta muutosta kuvaava kulmakerroin ja mallin selitysaste on hyvin heikko jokaisen lajin kohdalla ($r^2 = <0,3$) (liite 9). Sinisorsahavainnot ovat kasvaneet eniten. Poikuehavainnoissa ei ole tapahtunut suurta muutosta tutkimusajankohtana millään lajilla, ja tavipoikueiden lievää runsastumista malli selittää vain heikosti ($r^2 = 0,2$).

Särkijärvellä tavihavainnot ovat runsastuneet ja malli selittää muutoksesta hieman yli 30 prosenttia (liite 10). Sen sijaan sinisorsa- ja telkkähavainnot ovat vähentyneet, mutta muutos ja mallin selitysaste on heikko molemmilla kuten tavillakin. Kuitenkin samalla, kun sinisorsahavainnot ovat vähentyneet, poikashavainnoja on ollut runsaammin ja malli selittää muutosta hyvin voimakkaasti ($r^2 = 0,9$).

Haapanaa ei ole havainnoitu Särkijärvellä kuin yhtenä vuonna, jolloin kannan vaihtelua ei voi päätellä.

Myös Huhmarilla kaikkien lintulajien esiintymistiheyden muutos selittyy vain heikosti, joskin kaikkien lajien kohdalla havaitaan parihavaintojen kasvua (liite 11). Telkkähavainnot runsastuvat voimakkaimmin, mutta selittyvät vain hieman yli 20-prosenttisesti. Poikuehavainnoissa ei tapahdu merkittävää muutosta tutkimusajankohtana.

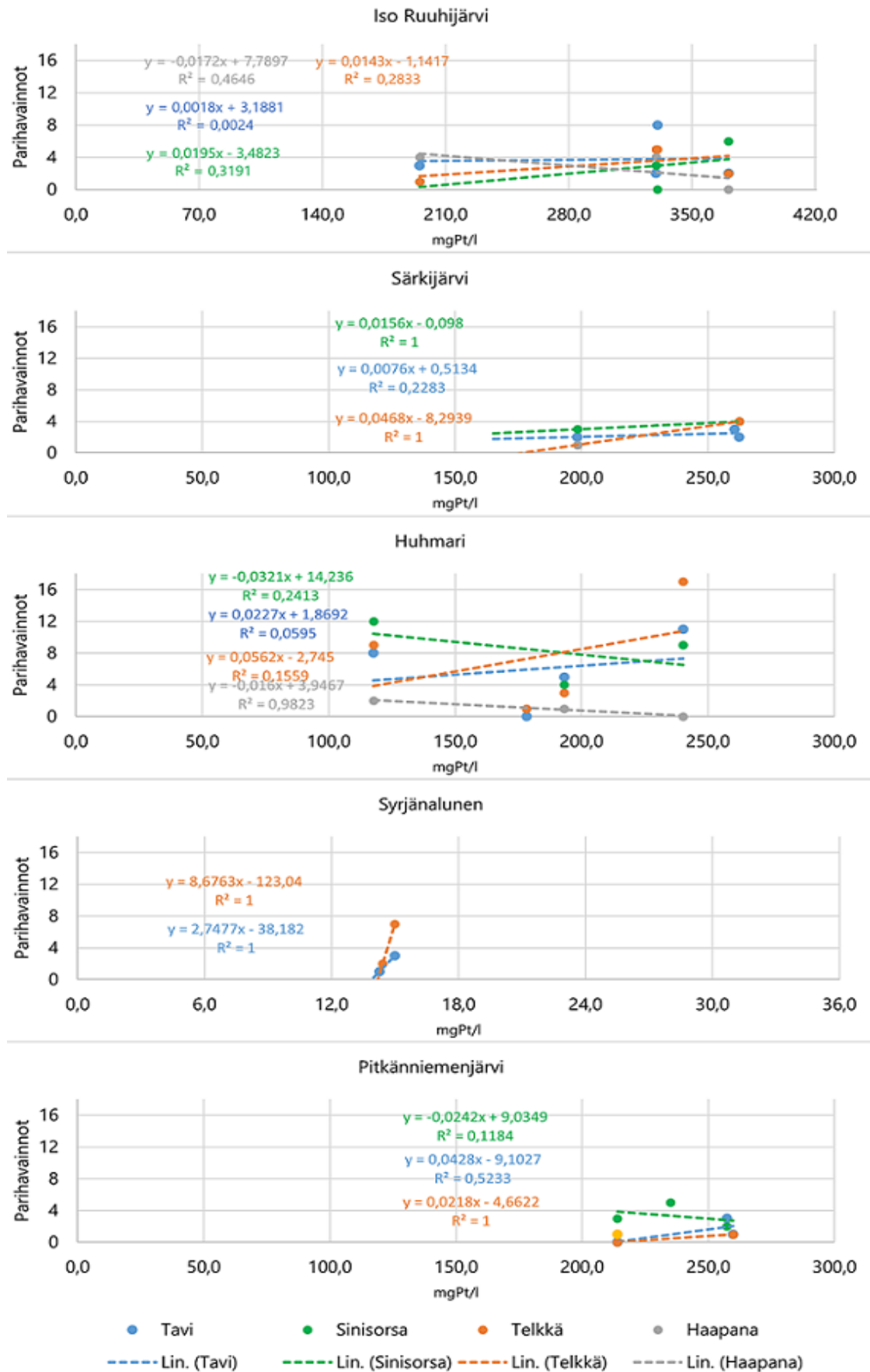
Syrjänelusella on havainnoitu ainoastaan tavia ja telkkää, mutta molempia lajeja on tavattu hyvin tasaisesti läpi tutkimusajankohdan (liite 12). Telkkäpoikuehavainnot ovat runsastuneet, mutta selittyvät vain heikosti ($r^2 = 0,3$). Pitkänniemenjärvellä merkittävää on telkkähavaintojen lisääntyminen, mutta havaintokertoja on ollut vain kaksi, joten mallin voimakas selitysaste selittyy siten (liite 13). Myös tavilla ja sinisorsalla havainnot ovat kasvaneet, mutta muutos on hyvin pieni ja selittyy joko heikosti tai hyvin heikosti. Havaintokertoja haapanan kohdalla ei ole kuin yksi, joten päätelmiä haapanan esiintyvyydestä Pitkänniemenjärvellä ei voida tehdä.

Isolla Ruuhijärvellä tavi-, sinisorsa- ja telkkähavainnot kasvavat veden tummuuden kasvaessa, mutta veden tummuus selittää ilmiötä vain heikosti ($r^2 = <0,3$) (kuva 12). Voimakkain kasvu havaitaan sinisorsalla ja heikoin telkällä. Haapanahavainnot laskevat tummuuden kasvaessa selitysasteen ollessa kohtalainen (46%).

Myös Särkijärvellä tavia, sinisorsaa ja telkkää on tavattu sitä enemmän, mitä tummempaa vesi on. Kasvu on heikohkoa kaikilla kolmella lajilla, mutta sinisorsan ja telkän kohdalla selitysaste on erittäin voimakas (100%) eli veden tummuminen selittää lajien havaintomäärien kasvua täydellisesti.

Huhmarilla tavin ja telkän esiintyminen kasvaa maltillisesti, kun veden tummuusarvo kasvaa. Telkällä mallin selitysaste on 15% ja tavilla 5%, joten tummuuden muutos selittävänä tekijänä on kuitenkin heikko. Sinisorsan ja haapanan esiintyminen Huhmarilla puolestaan laskee vesistön tummuessa. Haapanalla veden tummuminen selittää jopa 98-prosenttisesti eli hyvin voimakkaasti haapanahavaintojen laskua.

Syrjänelusella sekä tavia että telkkää esiintyy enemmän niinä vuosina, kun veden tummuusarvo on korkeampi, ja tummuuden muutoksen selitysaste on molemmilla lajeilla 100%. Myös Pitkänniemenjärvellä tavin ja telkän esiintyminen runsastuu veden tummuuden kasvaessa. Molemmilla lajeilla veden tummuminen selittää muutosta voimakkaasti tai kohtalaisesti. Sinisorsan väheneminen veden tummuuden kasvaessa ja veden tummuus selittävänä tekijänä on heikko.



Kuva 12. Tummuuden vaikutus lintujen esiintyvyyteen tutkimusjärvillä.

5 Keskustelu

5.1 Hakkuiden ja hakkuualojen ominaisuuksien vaikutus järvien tummuuteen

Tutkielman tarkoituksena oli selvittää, miten avohakkuut vaikuttavat tutkimusjärvien veden tummuuteen ja niillä pesiviin vesilintulajeihin. Tutkimushypoteeseja oli kolme: H1) Hakkuut valuma-alueella lisäävät tutkimusjärvien tummumista, H2) hakkuualueiden vaihtelevat ominaisuudet vaikuttavat tutkimusjärvien tummumiseen eri tavalla ja H3) tutkimusjärvien tummuminen vaikuttaa negatiivisesti vesilintujen esiintymiseen alueella.

Viidestä tutkimusjärvestä neljässä veden tummuus on kasvanut vuosien 1990–2014 välisenä aikana. Tämä vastaa globaalia trendiä, jonka mukaan vesistöt ovat tummuneet viime vuosikymmenten aikana pohjoisilla leveysasteilla yleisesti (Arzel ym. 2020; Arvola ym. 2010; Monteith ym. 2007; Evans ym. 2005). Regressioanalyysi osoitti, että hakkuualueilla vallitsevilla olosuhteilla on voimakkaampi vesistöjä tummentava vaikutus kuin koko valuma-alueella yhteensä, mikä on tutkielman ensimmäisen hypoteesin mukainen johtopäätös. Myös aikaisemmissa tutkimuksissa boreaalisen metsävyöhykkeen hakkuilla on havaittu olevan vesistöjä tummentava vaikutus (Schelker ym. 2012; Nieminen 2004).

Veden tummuuden muutoksiin vaikuttivat eri ominaisuudet eri järvillä, mikä tukee tutkielman toisen hypoteesin paikkansapitävyyttä. Voimakkain veden tummuuden kasvu on tapahtunut Isolla Ruuhijärvellä. Avohakkuiden runsaus voi selittää muutosta, mutta myös järven keskimääräistä tummuutta, joka on suurempi kuin muilla tutkimusjärvillä. Toisaalta regressioanalyysi osoittaa, että Isolla Ruuhijärvellä hakkuiden vaikutus vesistöjen tummumiseen on päinvastainen, mutta se selittynee hakkuiden kohtalaisen voimakkaalla vähenemisellä vuosien mittaan, kun hakkuiden aiheuttama paine DOC-pitoisuuden kasvuun laskee (Schelker ym. 2012; Nieminen 2004). Myös Pitkänniemenjärvellä avohakkuiden vuosittainen väheneminen saattaa selittää, miksi hakkuilla on veden tummuutta laskeva vaikutus. Huhmarilla hakkuiden vaikutus veden tummuuteen on selkeä, mutta koska veden tummuus on laskenut tutkimusajankohtana, voidaan hakkuita pitää enemmänkin tummuutta ylläpitävänä ominaisuutena. Syrjänalusella ei ole tehty avohakkuita ollenkaan tutkimusajankohtana, mikä vähentää DOC-pitoisuuden huuhtoutumista ja selittänee osittain Syrjänaluksen huomattavasti kirkkaampaa vettä.

Tutkielmassa hyödynsin ainoastaan valuma-alueilla tehtyjen avohakkuiden pinta-alaa ja niiden suhteellista osuutta koko valuma-alueesta. Jotta hakkuiden vaikutus vesistöjen tummuuteen olisi tarkempi, olisi tärkeää vertailla hakkuiden sijaintia ja etäisyyttä tutkimusjärvestä, sillä vesistöjen koskemattomat rantavyöhykkeet vähentävät ojittamattomilta avohakkuualueilta saapuvan

kiintoaineksen määrää vesistöissä (Rajakallio ym. 2021). Tämä saattaa johtaa kaukana rannasta tehtyjen hakkuiden merkityksen heikkenemiseen ja rantavyöhykkeelle ulottuvien hakkuiden merkityksen lisääntymiseen vesistöjen tummumiselle. On myös tärkeää huomioida, että hakkuualojen kartoittaminen perustuu subjektiiviseen visuaaliseen tulkintaan ilmakuvista.

Isolla Ruuhijärvellä ja Pitkänniemenjärvellä sadannan lisääntyminen on merkittävin tekijä, joka selittää veden tummumista, vaikka selitysaste jää molemmissa heikoksi. Kun verrataan Isoa Ruuhijärveä ja vuosittaista sademäärän vaihtelua huomataan kuitenkin, että esimerkiksi vuosina 1998–2000, 2004 ja 2012–2013 sekä sademäärä että veden tummuus kasvavat merkittävästi. Sama sadannan ja veden tummuuden yhtäaikainen vaihtelu on havaittavissa myös Pitkänniemenjärvellä. Muun muassa Kreutzweizer ym. (2008) ovat todenneet tutkimuksessaan, että ilmasto-olosuhteilla on hakkuita merkittävämpi vaikutus vesistöjen tummumiselle.

Sadannan merkitys veden tummuuden kasvussa korostuu erityisesti Särkijärvellä, jossa sadannan lisääntyminen selittää veden tummuuden kasvua 60-prosenttisesti eli huomattavasti voimakkaammin kuin muilla järvillä. Särkijärvellä yhdessä lisääntyneen sadannan kanssa topografialtaan tasainen maasto voi korostaa liunneen orgaanisen hiilen huuhtoutumista vesistöihin (Musolff ym. 2018). Rinnekaltevuuden keskimääräinen vaihtelu on melko vähäistä kaikilla valuma- ja hakkuualueilla ja pääsääntöisesti alle kymmenen astetta, mikä ei välttämättä vielä lisää merkittävästi pintavaluntana vesistöihin huuhtoutuvan veden määrää. Tämä saattaa selittää regressioanalyysin tuloksen, jossa rinnekaltevuuden kasvaessa Särkijärven valuma-alueella myös vesistön tummuuden trendi on kasvava. Tasaisessa maastossa pohjaveden pinta on korkeammalla, jolloin pohjaveteen voi helpommin sekoittua orgaanista hiiltä metsän pohjasta (Musolff ym. 2018; Andersson & Nyberg 2007). Korkea pohjaveden pinta saattaa myös edesauttaa turpeen muodostumista ja muuta soistumista (Andersson & Nyberg 2007). Isolla Ruuhijärvellä rinnekaltevuuden maltillinen kasvu puolestaan vähentää veden tummuutta, mitä saattaa selittää se, että keskimääräinen rinnekaltevuus hakkuualueilla on Isolla Ruuhijärvellä suurempi kuin Särkijärvellä. Rinnekaltevuus selittää DOC-pitoisuutta paremmin kuin esimerkiksi valuma-alueen kosteikkojen määrä ja sijainti (Andersson & Nyberg 2007). Syrjäanalusen valuma-alueella on puolestaan muihin tutkimusjärviin verrattuna suhteellisesti eniten yli kymmenen ja 20 asteen kaltevuuspintoja ja veden tummuus on huomattavasti vähäisempi kuin muilla järvillä.

Tutkielmassa tarkastelin sadannan vuosittaista vaihtelua, mikä lisää sadannan merkityksen epävarmuutta vuodenaikaistasolla. Sadannan vaihtelun tarkastelu vaihtuvien vuodenaikojen mukaan olisi syventänyt hakkuiden ja sadannan välistä yhteyttä eri valuma-alueilla. Lisääntynyt sadanta

talvella lisää hakkuuaukoille kerääntyvän lumen määrää (Schelker ym. 2013), joka keväisin lisää sulamisvesistä syntynyttä valuntaa ja täten orgaanisen materian huuhtoutumista. Myös haihdunta paljaalta hakkuualueelta on vähäisempää kuin latvuksen peittämiltä alueilta, mikä osaltaan voi lisätä valuntaa ja huuhtoutumista (Karlsen ym. 2016; Schelker ym. 2013). Riippuen hakkuuaukon kasvunopeudesta sen vaikutus suuremman lumimäärän kerääntymiseen ja voimakkaampaan kevätvaluntaan saattaa kestää vuosia hakkuun jälkeenkin. Tätä tukee Kreutzweizerin ym. (2008) tekemä tutkimus etenkin turvemaille tehtyjen hakkuiden jälkivaikutuksesta, jossa vesistöjen DOC-pitoisuus oli koholla joitain vuosia hakkuiden jälkeen.

Hakkuualojen kartoittamiseen hyödyntämieni ilmakuvien karkea aikamittakaava ei antanut viitteitä siitä, mihin vuodenaikaan hakkuut alueella oli tehty, minkä vuoksi vuodenaikasidonnaisten hakkuiden vaikutusta lienneen orgaanisen hiilen huuhtoutumiseen on mahdoton arvioida. Esimerkiksi lumen suojaavan vaikutuksen vuoksi talvihakkuut vähentävät kontaktia maaperään, mikä vähentää lienneen orgaanisen hiilen huuhtoutumista (Kreutzweiser ym. 2008).

Keskimääräisen lämpötilan tarkastelun avulla olisin voinut arvioida sateen olomuotoa. Kun valunta kasvaa, metsäisillä valuma-alueilla on havaittu DOC-pitoisuuden kasvua (Laudon ym. 2011; Andersson & Nyberg 2007). Leutoina talvina valtaosa tai jopa kaikki sateesta saattaa olla vettä, jolloin lumikerros ei ole suojaamassa talvihakkuiden vaikutusta maaperään ja tätä kautta orgaanisen hiilen huuhtoutumiseen. Lisäksi vesisateet kasvattavat valuntaa, mikä voi johtaa DOC-pitoisuuden kasvuun myös talvella.

Turvemaan osuus hakkuualueilla ei näytä vaikuttavan tutkimusjärvien veden tummumiseen kovin voimakkaasti siitä huolimatta, että turvemaille DOC-pitoisuudet ovat suuremmat verrattuna muihin maaperätyyppeihin (Nieminen 2015). Creed ym. (2003) ovat lisäksi havainneet, että erityisesti metsäpeitteiset kosteikot saattavat selittää jopa 90 prosenttia vesistöjen DOC-pitoisuudesta. Turvemailta myös valunta on runsasta läpi vuoden (Karlsen ym. 2016). Toisaalta Isolla Ruuhijärvellä ja Särkijärvellä havaitaan voimakas turvemaan veden tummuutta laskeva vaikutus, mikä selittynee turvemaan osuuden vähenemisellä hakkuualoilla vuosien mittaan.

Huhmarilla turvemaan osuuden kasvu hakkuualoilla selitti veden tummuuden kasvua vain hyvin heikosti, vaikka turvemaan osuus hakkuualoilla on siellä suurempi kuin muiden valuma-alueiden hakkuualoilla. Toisaalta turvemaan osuus Huhmarin hakkuualoilla laskee vuoden 1999 jälkeen merkittävästi, mikä selittänee turvemaan merkityksen vähenemisen. Tämä voisi selittää osin myös Huhmarilla tutkimusajankohtana tapahtunutta veden keskimääräistä tummuuden laskua, sillä hakkuut erityisesti turvemaille on havaittu lisäävän lienneen orgaanisen hiilen huuhtoutumista vesistöihin

(Nieminen 2015; Creed 2003). Lisäksi hakkuiden siirtymisellä rinnekaltevuudeltaan jyrkemmille alueille vuoden 1999 jälkeen voisi olla yleisesti Huhmarin veden tummuutta laskeva vaikutus. Tällöin muun muassa sadannasta aineutuvan pintavalunnan merkitys korostuisi.

Turvemaiden merkityksen vähäisyyttä saattaa selittää hakkuualojen maltillinen ojittaminen suhteessa koko valuma-alueen ojaverkostoon. Isolla Ruuhijärvellä vuosien 1990–1995 hakkuut sisältävät lähes 24 prosenttia koko valuma-alueen ojituksista, mutta seuraavina vuosina osuus laskee nolnaan tai 0,5 prosenttiin. Muiden valuma-alueiden hakkuilla ojituksen osuus on korkeintaan noin 11 prosenttia, josta osuus laskee myöhemminä vuosina. Tiheämpi ojaverkosto lisää DOC-pitoisuutta vesistöissä (Estlander ym. 2021). Erityisesti turvemaiden ojitus tummentaa vesistöjä sen sisältämän korkean DOC- ja rautapitoisuuden vuoksi (Nieminen ym. 2021; Camino-Serrano ym. 2014). Kun hakkuualojen turvemailla ojituksen määrä jää vähäiseksi, myös niiden vaikutus vesistöjen tummumiseen heikkenee.

Yhteinen ojaverkosto Huhmarin ja Syrjänalusen kanssa voi lisätä Särkijärveen kohdistuvaa liuenneen orgaanisen hiilen määrää, kun ojaverkoston pituus kasvaa (Estlander ym 2021). Toisaalta Syrjänalusen veden huomattavan vähäinen tummuus ja ojaverkoston merkittävä lyhyys verrattuna muihin valuma-alueisiin ei selitä Särkijärven veden tummuutta. Särkijärven ojaverkostosta myös selkeä enemmistö sijoittuu juuri Huhmarin valuma-alueelle, jossa veden tummuus on laskenut. Toisaalta ojaverkoston kartoittamisessa hyödynnetty Maanmittauslaitoksen maastokarttarasteri on vuodelta 2020, joten ojaverkoston kaivausvuosia tai mahdollisia muutoksia ei ole otettu huomioon, mikä saattaa aiheuttaa epävarmuutta ojaverkoston merkitsevyyteen vesistöjen tummumisessa.

Syrjänalusella huomattava ero muiden tutkimusjärvien veden tummuuteen saattaa johtua siitä, että se on lähdejärvi (Arvola ym. 2010). Lisäksi Syrjänalusen valuma-alueella avohakkuuta ei ole tehty lainkaan tutkimusajankohtana, ja siellä vesi on keskimääräisesti ja merkittävästi kirkkaampaa (Schelker ym. 2012; Nieminen 2004) ja se vaihtelee vuosittain vähemmän kuin muissa tutkimusjärvissä. Syrjänalusen valuma-alueen turvemaan osuus on hyvin vähäinen. Topografialtaan moninaisempi valuma-alue ja turvemaiden vähyys voivat vähentää vesistöihin huuhtoutuvan DOC:in määrää (Musolff ym. 2018; Nieminen 2015). Syrjänalusen valuma-alue on myös kooltaan huomattavasti pienempi kuin muut valuma-alueet, joten valuntaan ja veden imeytymiseen vaikuttava pinta-ala on myös pienempi.

Syrjänalusen valuma-alue on havupuuvaltainen, mikä saattaa puolestaan lisätä veden tummuutta, sillä havupuuvaltaisilla alueilla maaperän on havaittu sisältävän enemmän liuennutta orgaanista hiiltä kuin esimerkiksi lehtipuumetsissä (Camino-Serrano ym. 2014). Toisaalta havupuuvaltaisuuden merkitys

vesistöjen tummumisessa Syrjäalusella vähenee, kun pintavalunta lisääntyy jyrkemmillä alueilla. Särkijärvellä havumetsän osuuden kasvu hakkuualueilla on sen sijaan kohtalaisen voimakas selittävä tekijä veden tummumiselle, sillä havumetsän osuus kasvaa tutkimusajankohtana.

Havumetsän osuuden tulkinnassa on tärkeää ottaa huomioon käyttämäni aineiston ajantasaisuus. Tässä tutkielmassa metsätyypin arviointi koko tutkimusalueella perustuu vuoden 2000 CORINE Land Cover -vektoriaineistoon (CLC), joten on mahdollista, että tutkimusajankohtana metsätyypikuviot eivät ole pysyneet staattisena, ja seka- ja havumetsien osuus on saattanut vaihdella kulloisenkin metsän kehitysvaiheen ja tehtyjen hakkuiden mukaan. Esimerkiksi Pitkänniemenjärven alueella hakkuut vuosina 1990–1995 ovat sijoittuneet CLC-aineiston perusteella jonkin verran niin sanotuille vähäpuustoisille alueille, mikä saattaa viitata siihen, että CLC-aineisto tulkitsee alueen vuonna 2000 vähäpuustoiseksi alueeksi juuri hakkuun vuoksi, mutta joka on saattanut hakkuiden aikaan olla määriteltävissä joko seka- tai havumetsäksi.

Koska Isolla Ruuhijärvellä ja Pitkänniemenjärvellä veden keskimääräinen tummuus on suurempi ja tummuminen voimakkaampaa kuin muilla järvillä, mutta selkeää tähän vaikuttavaa tekijää ei havaittu, voidaan pohtia hakkuualueiden ominaisuuksien yhteisvaikutuksen olevan merkittävässä roolissa järvien tummumiselle. Toisaalta Isolla Ruuhijärvellä on havaittu majavan pesintää vuosina 2002–2011, mikä voisi selittää Ison Ruuhijärven suurta veden tummuutta, sillä majavan aiheuttaman tulvinnan on havaittu lisäävän liuenneen orgaanisen materian huuhtoutumista vesistöihin (Westbrook ym. 2017) ja tummentavan vesistöjä jopa niin paljon, että se peittää hakkuiden mahdollisen vaikutuksen (Blanchet ym. 2022).

Pitkänniemenjärven valuma-alue on valtava verrattuna muihin tutkimusjärviin, mikä lisää huuhtoutumispinta-alaa huomattavasti ja voisi osaltaan selittää Pitkänniemenjärven tummumista. Muita mahdollisia selityksiä Pitkänniemenjärven tummuuden kasvulle saattaa olla suurelle valuma-alueelle runsaina levittyvät hakkuualat ja huomattavasti pidempi ojaverkosto kuin muilla valuma-alueilla, jolloin myös puuston biomassan kasvu uudelleenmetsitetyillä alueilla on saattanut lisätä liuenneen orgaanisen kiintoaineksen ja hiilen huuhtoutumista (Škerlep ym. 2019).

5.2 Järven tummuuden vaihtelun merkitys vesilintujen pesintään

Lintuhavaintoaineiston perusteella havaittavaa muutosta vesilintujen ja poikueiden esiintymisessä tutkimusjärvillä on vaikea tulkita, sillä kaikilla tutkimusjärvillä aineisto kykenee korkeintaan heikosti viittaamaan eri lajien esiintyvyyden vähenemiseen tai kasvuun. Tämä johtuu vesilintuaineiston sisältämistä useiden vuosienkin ajanjaksoista, joilta aineistoa ei ole kerätty ollenkaan. Esimerkiksi

haapanalla havaintokertoja kertyy Särkijärvellä ja Pitkänniemenjärvellä vain yksi koko tutkimusajankohtana. Ilman useampaa havaintokertaa ei saada todellista tietoa linnuston kehityksestä koko tutkimusajankohtana.

Kun tarkastellaan veden tummuuden muutosta lintujen esiintyvyyttä selittävän tekijänä, huomataan, että puolessa havaintokerroista tummuus selittää vesilintukannan muutosta vähintään kohtalaisesti. Särkijärvellä, Syrjänelusella ja Pitkänniemenjärvellä tavi, sinisorsa ja telkkä runsastuvat veden tummuuden kasvaessa, kun puolestaan Isolla Ruuhijärvellä ja Huhmarilla haapana vähenee tummuuden kasvaessa.

Haapanakannan lasku Isolla Ruuhijärvellä selittyy lähes 50-prosenttisesti veden tummumisella ja Huhmarilla 98-prosenttisesti, mutta tuloksia pohtiessa on otettava huomioon havaintokertojen määrä, johon regressioanalyysi perustuu. Isolla Ruuhijärvellä haapanaa on havainnoitu 11 vuonna, kun taas Huhmarilla havaintokertoja on vain neljä. Tästä syystä Isolla Ruuhijärvellä veden tummuuden vaikutusta haapanan esiintyvyyteen voidaan pitää luotettavampana kuin Huhmarilla.

Ison Ruuhijärven veden tummuus on kasvanut eniten ja on keskimääräisesti tummin kaikista tutkimusjärivistä, mikä voi viitata voimakkaaseen kasvillisuuden supistumiseen, kun näkösyvyys lisääntyneen orgaanisen materian ja hiilen vuoksi heikkenee (Vasconcelos ym. 2019; Reitsema ym. 2018). Tämä on saattanut johtaa ravintoketjujen ravinnearvojen tai itse ravintoketjujen heikkenemiseen, mikäli liian vähäinen valo yhdessä peittävän kasvillisuuden kanssa vähentää alkutuotantoa ja heikentää muiden selkärangattomien lajien elinympäristöä. Elinympäristön muutosten on havaittu olevan syynä haapanapopulaatioiden vähenemiseen (Nummi ym. 2013). Haapanakannat ovat supistuneet erityisesti suosimillaan eutrofisilla järvillä (Lehikoinen ym. 2015). Esimerkiksi haapanan poikaset syövät ensimmäisinä elinpäivinä kaksisiipisten lahkoon kuuluvia surviaissääskiä, ja on havaittu, että niiden esiintyminen alueella on merkittävin haapanan elinympäristöön valintaan vaikuttava tekijä (Nummi ym. 2013). Vesistön tummuminen Isolla Ruuhijärvellä saattaa vähentää rehevän järven tarjoamaa kasvillisuuden ja muun lajiston tuomaa turvaa, kun valon määrä vähenee.

Koska Huhmarilla veden tummuus on laskenut tutkimusajankohtana, haapanan esiintyvyydessä havaitaan heikkoa kasvua, joskin aineistoon perustuva arvio ei ole merkittävä. Toisaalta veden tummumiseen liittyvä kasvu yhdistetään haapanan vähentymiseen Huhmarilla erittäin voimakkaasti. Veden tummuuden lasku saattaa tarjota paremmat elinympäristön olosuhteet haapanalle, sillä liuenneen orgaanisen materian ja hiilen varjostus ja sen vaikutus esimerkiksi kasvillisuuden niukkuuteen on vähäisempää kuin Isolla Ruuhijärvellä, mutta koska tummempi vesi selittää

haapanakannan laskua niin voimakkaasti, voidaan päätellä, että Huhmarin veden tummuus on kokonaisuudessaan edelleen liian suuri, jotta haapana suosisi sitä elinympäristönään.

Koska haapana on määritelty Punaisessa kirjassa (2019) vaarantuneeksi lajiksi, lajin väheneminen alueelta, jossa sen esiintymistiheys on ennestään väljä (Koskimies 2022) on huolestuttava. Lisäksi tulisi ottaa huomioon yleisesti boreaalisten alueiden vesistöjen tummumisen kasvava trendi, koska se saattaa heikentää haapanan elinympäristöjä laajemmalla alueella.

Tavin ja telkän esiintyminen Särkijärvellä ja Syrjänelusella on erittäin voimakkaasti sidoksissa veden tummuuden kasvuun; mitä tummempaa vettä, sitä enemmän järvellä esiintyviä pareja on havaittu. Särkijärvellä tavin ja telkän havaintokertoja on molempia seitsemänä vuonna, kun taas Syrjänelusella tavilla ainoastaan neljänä ja telkällä kahdeksana vuonna. Tämän vuoksi telkän esiintyvyyteen liittyvät arviot molemmilla järvilla ovat hieman luotettavampia kuin tavilla.

Särkijärvellä veden tummuuden kasvu ja taviens esiintymisen välinen yhteys voinee osittain johtua majavan läsnäolosta, sillä ajanjaksoina, joina tavia on havainnoitu Särkijärvellä, järvellä on havaittu myös majavan aktiivisuutta (majava-aineisto; maininta aineistokohdassa, vai kenties tutkimusaluekuvauksessa?). Majavien aiheuttamat tulvat ovat tavin suosimia elinympäristöjä ja niiden on havaittu lisäävään muun muassa taviens poikastiheyttä (Nummi ym. 2019; Holopainen ym. 2014; Nummi & Hahtola 2008; Nummi & Pöysä 1995). Koska poikasten ravinto koostuu hyönteisistä ja muista selkärangattomista lajeista, ja niiden määrä on runsaimmillaan juuri tulva-alueilla (Nummi & Pöysä 1995), Särkijärvellä tavin esiintyvyyden kasvu saattaa liittyä juuri tulvinnan aiheuttamaan, runsaaseen selkärangattomien määrään, mitä tukee muun muassa Čehovskán ym. (2022) havainnot selkärangattomien määrän ja tavin poikastiheyden välillä.

Tavipoikasten ravinnon hankinta voinee myös helpottua sopivan tummassa vedessä, jossa vapaana uivia selkärangattomia on enemmän kuin kirkkaammissa vesistöissä (Estlander ym. 2017). Särkijärvellä myös telkkää suosinee tummemmassa vedessä vapaana uivien selkärangattomien määrä. Koska selkärangattomien biomassan on havaittu kasvavan rantavyöhykkeeltä kohti avovettä tummemmassa vedessä (Estlander ym. 2009), se helpottaa avoveteen kolmen viikon jälkeen siirtyviä telkän poikasia ravinnon hankinnassa. Syrjänelusella, jossa vesi huomattavasti kirkkaampaa kuin muissa tutkimusjärvisissä, veden tummuminen lisää ravinnonsaantimahdollisuuksia telkällä avovedessä ja muutoin myös elinympäristönsä suhteen vaatimattomalla tavilla rantavyöhykkeellä.

Samalla, kun majavat muokkaavat Särkijärvellä ympäristöä taville ja telkälle suotuisiksi, ne kuitenkin lisäävät vesistöjen DOM-pitoisuutta (Westbrook ym. 2017). Tämä yhdessä turvemaiilla tehtyjen

hakkuiden ja ojitusten kanssa voimistaa veden tummuuden kasvua, ja täten selkärangattomien lajien määrän vähenemistä vesistöissä (Rajakallio ym. 2021; Arzel ym. 2020; Brown ym. 2018; Estlander ym. 2009). Hakkuiden ja majavien liiallinen yhteisvaikutus voi tulevaisuudessa vaikeuttaa esimerkiksi tavin elinympäristön valintaa, sillä juuri kaksisiipisten lahkoon kuuluvat hyönteiset määrittävät tavin elinympäristön valintaa eniten.

Telkän esiintymistiheyden kasvu selittyy voimakkaasti veden tummumisella myös Pitkänniemenjärvellä, mutta tulokseen vaikuttaa voimakkaasti se, ettei telkkää ole havainnoitu Pitkänniemenjärvellä kuin kahtena vuonna, joista toisena lajia ei havaittu lainkaan. Tämän vuoksi kannan muutosarvio jää Pitkänniemenjärvellä heikoksi.

Sinisorsan esiintyvyyden muutos selittyy veden tummumisella vain heikosti sekä Isolla Ruuhijärvellä, Särkijärvellä että Huhmarilla, joista Huhmarilla selitysaste on kaikista heikoin. Koska Huhmarilla veden tummuus on laskenut tutkimusajankohtana, tämä voi viitata sinisorsan suosivan tummempaa vettä, mutta erityisesti Pitkänniemenjärvellä, jossa tummempi vesi selittää sinisorsan esiintymistiheyden kasvua yli 50-prosenttisesti. Sinisorsaa on havainnoitu Pitkänniemenjärvellä seitsemänä vuonna, mikä antaa kohtalaisia viitteitä lajin esiintymisestä.

6 Johtopäätökset

- Hakkuut lisäävät Ison Ruuhijärven, Särkijärven, Huhmarin ja Pitkänniemenjärven veden tummuutta, kun hakkuualueiden ominaisuuksia verrataan koko valuma-alueen ominaisuuksiin. Hakkuiden rinnekaltevuuden maltillisuus, turvemaiden ja havumetsien osuus ja tiheämpi ojaverkosto vaikuttavat vesistöjen tummuuden kasvamiseen enemmän kuin koko valuma-alueen yhtäläiset ominaisuudet.
- Isolla Ruuhijärvellä ja Pitkänniemenjärvellä sadanta ja hakkuut olivat merkittävien tummuuteen vaikuttava tekijä. Sekä Isolla Ruuhijärvellä että Pitkänniemenjärven hakkuualueiden erilaiset ominaisuudet yhdessä korostanevat veden tummuutta. Isolla Ruuhijärvellä veden tummuutta ylläpitäviä tekijöitä ovat rinnekaltevuus ja turvemaan osuus. Pitkänniemenjärvellä korostuu hakkuiden ja ojituksen määrä ja täten huuhtoutumispinta-alan laajuus.
- Särkijärvellä merkittävimmin veden tummuuden kasvamiseen vaikuttaa sadanta, rinnekaltevuus ja havupuuvaltaisuus. Turvemaiden osuus hakkuualueilla on veden tummuutta ylläpitävä ominaisuus.
- Huhmarilla hakkuut ja eri ominaisuuksien yhteisvaikutus tummentavat ja ylläpitävät veden tummuutta.
- Syrjäalusella veden tummuuden maltilliseen vaihteluun vaikuttavat valuma-alueen ja järven omat olosuhteet, kuten lähteisyys, muita valuma-alueita pienempi pinta-ala, jyrkempi rinnekaltevuus ja turvemaan vähäisyys.
- Koska ilmastonmuutos muuttaa Suomen sadeolosuhteita (Olsson ym. 2015) ja täten kiintoaineksen ja liuenneen orgaanisen hiilen huuhtoutumista vesistöihin (Škerlep ym. 2020), ja koska kasvava sadanta oli tässä tutkielmassa merkittävä syy vesistöjen tummumiselle, olisi tärkeää tarkastella vuosittaisen keskimääräisen sadannan sijaan sadannan vuodenaikaisvaihtelua ja keskimääräistä lämpötilaa sateen olomuodon määrittämiseksi. Lisäksi avohakkuiden ajoitus vuodenvaihteluun nähdessä auttaisi ymmärtämään paremmin tutkimusjärvien tummuuteen vaikuttaneita tekijöitä.
- Tavia esiintyy runsaammin Särkijärvellä ja Syrjäalusella, kun vesistö tummuu. Myös sinisorsan esiintyminen Pitkänniemenjärvellä on lisääntynyt ja vesistön tummuminen selittää tätä kohtalaisesti. Lisäksi telkkien määrä Särkijärvellä, Syrjäalusella ja Pitkänniemenjärvellä

on kasvanut vesistöjen tummuessa. Ainoastaan haapanaparien esiintyvyys Isolla Ruuhijärvellä ja Huhmarilla on laskenut, mitä tummemmaksi vesi on muuttunut.

- Veden tummuuden vaikutusten arviointi vesilintulajeihin on kuitenkin heikkoa aineiston rikkonaisuuden vuoksi tai pääsääntöisesti hypoteesinvastaisia. Linnuston muutoksen luotettavammassa tarkastelussa olisi tärkeää hyödyntää eheitä havaintoaineistoja, joissa on pitkiä peräkkäisiä havaintovuosia, jotta veden tummuuden vaihtelun merkitystä lintujen esiintyvyyteen voitaisiin arvioida.
- Koska vesilintukannat ovat supistuneet viime vuosina (Elmberg ym. 2019; Pöysä ym. 2019; Lehikoinen ym. 2015) ja niiden ravintonaan käyttämien selkärangattomien lajien määrä on vähentynyt vesistön tummumisen seurauksena (Arzel ym. 2020; Vasconcelos ym. 2019; Brown ym. 2018), olisi tärkeää tutkia tarkemmin tutkimusjärvien selkärangattomien lajikirjoa ja sen muutosta suhteessa veden tummuuteen. Tämä voisi viitata myös alueella pesivien vesilintulajien esiintymiseen nyt ja tulevaisuudessa vesistöjen muuttuvissa olosuhteissa.

Kiitokset

Haluan kiittää Risto Kalliola rakentavasta ja kannustavasta graduohjauksesta koko prosessin ajan ja Céline Arzelia avusta aiheen hioutumisessa ja aineistojen hankinnassa. Haluan myös kiittää Petri Nummea ja Lammin biologista asemaa gradun mahdollistavien aineistojen tuottamisesta ja niiden lainaamista käyttööni. Lisäksi haluan kiittää aviomiestäni Mikko Suutamaa tuesta, jota hän on osoittanut graduprosessin aikana.

Lähteet

- Andersson, J-O. & L. Nyberg (2009) Using official map data on topography, wetlands and vegetation cover for prediction of stream water chemistry in boreal headwater catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*. 13: 4. s. 537–549.
- Andersson, J-O. & L. Nyberg (2007) Spatial variation of wetlands and flux of dissolved organic carbon in boreal headwater streams. *Hydrological Processes*. 22: 12. s. 1965–1975.
- Arvola, L., Rask, M., Ruuhijärvi, J., Tulonen, T., Vuorenmaa, J., Ruoho-Airola, T. & J. Tulonen (2010) Long-term patterns in pH and colour in small acidic boreal lakes of varying hydrological and landscape settings. *Biogeochemistry*. 101. s. 269–279.
- Arzel, C., Nummi, P., Arvola, L., Pöysä, H., Davranche, A., Rask, M., Olin, M., Holopainen, S., Viitala, R., Einola, E. & S. Man-ninen-Johansen (2020) Invertebrates are declining in boreal aquatic habitat: The effect of brownification? *Science of the Total Environment*. 724. s. 138199.
- Björkvald, L., Buffam, I., Laudon, H. & M. Mörth (2006) Hydrogeochemistry of Fe and Mn in small boreal catchments: The role of seasonality, landscape type and scale. *Geochemica et Cosmochimica Acta*. 70: 18. s. A52.
- Björnerås, C., Škerlep, M., Floudas, D., Persson, P. & E. Kritzberg (2019) High sulfate concentration enhances iron mobilization from organic soil to water. *Biochemistry*. 144:3. s. 245–259.
- Björnerås, C., Weyhenmeyer, G. A., Evans, C. D., Gessner, M. O., Grossart, H.-P., Kangur, K., Kokorite, I., Kortelainen, P., Laudon, H., Lehtoranta, J., Lottig, N., Monteith, D. T., Nöges, P., Nöges, T., Oulehle, F., Riise, G., Rusak, J. A., Räike, A., Sire, J., Sterling, S. & E. S. Kritzberg (2017) Widespread Increases in Iron Concentration in European and North American Freshwaters. *Global Biochemical Cycles*. 31: 10. s.1488–1500.
- Blanchet, C., Davranche, A., Nummi, P., Kahilainen, K., Lindberg, H., Viitala, R. & C. Arzel (2022) Browning of a Small Humic Boreal Lake – Effect of Beaver Floods Over Forestry Practices at a Catchment Scale. Saatavilla SSRN: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4279651>
- Brown, L., Aspray, K., Ledger, M., Mainstone, C., Palmer, S., Wilkes, M. & J. Holden (2018). Sediment deposition from eroding peatlands alters headwater invertebrate biodiversity. *Global Change Biology*. 25: 2. s. 602–619.
- Camino-Serrano, M., Gielen, B., Luysaert, S., Ciais, P., Vicca, S., Guenet, B., De Vos, B., Cools, N., Ahrens, B., Arain, M., Borken, W., Clarke, N., Clarkson, B., Cummins, T., Don, A., Pannatier, E., Laudon H., Moore, T., Nieminen, T., Nilsson, M., Peichl, M., Schwendenmann, L., Siemens, J. & I. Janssens (2014) Linking variability in soil solution dissolved organic carbon to climate, soil type, and vegetation type. *Global Biochemical Cycles*. 28: 5. s. 497–509.
- Čehovská, M., Kattainen, S., Väänänen, V.-M., Putaala, A. & P. Nummi (2022) Compensating freshwater habitat loss – duck productivity and food resources in man-made wetlands. *European Journal of Wildlife Research*. 68. 35.

- Choudhury, M., Urrutia-Cordero, P., Zhang, H., Ekvall, M., Medeiros, L. & L-A. Hansson (2019) Charophytes collapse beyond a critical warming and brownification threshold in shallow lake systems. *Science of total environment*. 661. s. 148–154.
- Creed I., Bergström, A-K., Trick, G., Grimm, N., Hessen, D., Karlsson, J., Kidd, K., Kritzberg, E., McKnight, D., Freeman, E., Senar, O., Andersson, A., Ask, J., Berggren, M., Cherif, M., Giesler, R., Hotchkiss, E., Kortelainen, P., Palta, M., Vrede, T. & G. Weyhenmeyer (2018) Global change-driven effects on dissolved organic matter composition: Implications for food webs of northern lakes. *Global Change Biology*. 24: 8. s. 3692–3714.
- Creed, F., Sanford, S., Beall, F., Molot, L. & P. Dillon (2003) Cryptic wetlands: integrating hidden wetlands in regression models of the export of dissolved organic carbon from forested landscapes. *Hydrological Processes*. 17. s. 3629–3648.
- Drewer, J. (1994) The effect of land plants on weathering rates of silicate minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 58: 10. s. 2325–2332.
- Ekström, S., Kritzberg, E., Kleja, D., Larsson, N., Nilsson, A., Graneli, W. & B. Bergkvist (2011) Effect of Acid Deposition on Quantity and Quality of Dissolved Organic Matter in Soil–Water. *Environmental Science & Technology*. 45: 11. s. 4733–4739.
- Elmberg, J., Arzel, C., Gunnarsson, G., Holopainen, S., Nummi, Pöysä, H. & K. Sjöberg (2019) Population change in breeding boreal waterbirds in a 25-year perspective: What characterises winners and losers? *Freshwater Biology*. 65: 2. s. 167–177.
- Estlander, S., Pippingsköld, E. & J. Horppila (2021) Artificial ditching of catchments and brownification-connected water quality parameters of lakes. *Water Research*. 205. s. 117674
- Estlander, S., Horppila, J., Olin, M. & L. Nurminen (2017) Should I stay or should I go? The diurnal behaviour of plant-attached zooplankton in lakes with different water transparency. *Journal of Limnology*. 76: 2. s. 253–260.
- Estlander, S., Nurminen, L., Olin, M., Vinni, M. & J. Horppila (2009) Seasonal fluctuations in macrophyte cover and water transparency of four brown-water lakes: implications for crustacean zooplankton in littoral and pelagic habitats. *Hydrobiologia*. 620. s. 109–120.
- Evans, C., Monteith, D. & D. Cooper (2005) Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts. *Environmental Pollution*. 137: 1. s. 55–71.
- Finstad, A.G., Andersen, T., Larsen, S., Tominaga, K., Blumentrath, S., De Wit, H., Tømmervik, H. & D. Hessen (2016) From greening to browning: Catchment vegetation development and reduced S-deposition promote organic carbon load on decadal time scales in Nordic lakes. *Scientific Reports*. 6, s. 31944.
- Finstad, A.G., Helland, I., Ugedal, O., Hesthagen, T. & D. Hessen (2013) Unimodal response of fish yield to dissolved organic carbon. *Ecology letters*. 17: 1. s. 36–43.
- Graneli, W. (2012). Brownification of Lakes. *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. Dordrecht. Springer Netherlands. s. 117–119.

- Hansson, L-A, Nicolle, A., Brönmark, C., Hargeby, A., Lindström, Å. & G. Andersson (2010) Waterfowl, macrophytes, and the clear water state of shallow lakes. *Hydrobiologia*. 646: 1. s.101–109.
- Havaintojen lataus (s.a) Ilmatieteenlaitos. Tieto haettu 15.10.2022.
< <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus> >
- Holden, J. (2017) An Introduction to Physical Geography and the Environment. Pearson. Slovakia.
- Holopainen, S., Nummi, P. & H. Pöysä (2014) Breeding in the stable boreal landscape: lake habitat variability drives brood production in the teal (*Anas crecca*). *Freshwater Biology*. 59. s. 2621–2631.
- Jansson, M., Persson, L., De Roos, A., Jones, R. & L. Tranvik (2007) Terrestrial carbon and intraspecific size-variation shape lake ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*. 22: 6. s. 316–322.
- Karlsen, R., Grabs, T., Bishop, K., Buffam, I., Laudon, H. & J. Seibert (2016) Landscape controls on spatiotemporal discharge variability in a boreal catchment. *Water Resources Research*. 52: 8. s. 6541–6556.
- Korhonen, K., Ahola, A., Heikkinen, J., Henttonen, H., Hotanen, J.-P., Ihalainen, A., Melin, M., Pitkänen, J., Rätty, M., Sirviö M. & M. Strandström (2021) Forests of Finland 2014–2018 and their development 1921–2018. *Silva Fennica*. 55: 5. 10662.
- Koskimies, P. (2022) Suomen linnut – Suuri lintukirja. Readme.fi, EU.
- Kreutzweiser, D., Hazlett, P. & J. Gunn. (2008) Logging impacts on the biogeochemistry of boreal forest soils and nutrient export to aquatic systems: A review. *Environmental Reviews*. 16. s. 157–179.
- Kritzberg, E. & S. Ekström (2012) Increasing iron concentrations in surface waters – a factor behind brownification? *Biosciences*. 9: 4. s. 1465–1478.
- Kritzberg, E., Hasselquist, E., Škerlep, M., Löfgren, S., Olsson, O., Stadmark, J., Valinia, S., Hansson, L-A. & H. Laudon (2019). Browning of freshwaters: Consequences to ecosystem services, underlying drivers, and potential mitigation measures. *Ambio*. 49. s. 375–390.
- Kulju, I., Niinistö, T., Peltola, A., Rätty, M., Sauvala-Seppälä, T., Torvelainen J., Uotila, E. & E. Vaahtera (2023) Metsätilastollinen vuosikirja 2022. Luonnonvarakeskus.
- Kuuluvainen, T., Mäki, J., Karjalainen, L. & H. Lehtonen (2002). Tree age distributions in oldgrowth forest sites in Vienansalo wilderness, eastern Fennoscandia. *Silva Fennica* 36:1. s.169–184.
- Laudon, H. & E. Hasselquist (2023) Applying continuous-cover forestry on drained boreal peatlands; water regulation, biodiversity, climate benefits and remaining uncertainties. *Trees, Forests and People*. 11. 100363.
- Laudon, H., Berggren, M., Ågren, A., Buffam, I., Bishop, K., Grabs, T., Jansson, M. & S. Khler (2011) Patterns and Dynamics of Dissolved Organic Carbon (DOC) in Boreal Streams: The Role of Processes, Connectivity, and Scaling. *Ecosystems*. 14. s. 880893
- Lehikoinen, A., Rintala, J., Lammi, E. & H. Pöysä (2015) Habitat-specific population trajectories in boreal waterbirds: alarming trends and bioindicators for wetlands. *Animal Conservation*. 19: 1. s. 88–95.

- Lindholm, M., Eie, M., Hessen, D., Johansen, J., Weiby, K. & J. Thaulow (2018) Effects of water browning on freshwater biodiversity: the case of the predatory phantom midge *Chaoborus nyblaei*. *Hydrobiologia*. 813. s. 33–40.
- Maankuivatus ja ojitus (2020). Ympäristö. Tieto haettu 29.11.2022.
<https://www.ymparisto.fi/fi-fi/vesi/vesien_kaytto/Maankuivatus_ja_ojitus>
- Metsän kasvatusta ja kasvatushakkuut (2023) Metsäkeskus. Tieto haettu 9.2.2023.
<<https://www.metsakeskus.fi/fi/metsan-kaytto-ja-omistus/metsanhoito-ja-hakkuut/metsankasvatusta-ja-kasvatushakkuut>>
- Metsän uudistaminen ja uudistushakkuut (2023) Metsäkeskus. Tieto haettu 9.2.2023.
<<https://www.metsakeskus.fi/fi/metsan-kaytto-ja-omistus/metsanhoito-ja-hakkuut/metsan-uudistaminen-ja-uudistushakkuut>>
- Minguez, L., Sperfeld, E., Berger, S., Nejstgaard, J. & M. Gessner (2020) Changes in food characteristics reveal indirect effects of lake browning on zooplankton performance. *Limnology and Oceanography*. 65. s. 1028–1040
- Monteith, D., Stoddard, J., Evans, C., de Wit, H., Forsius, M., Høgåsen, T., Wilander, A., Skjelkvåle, B., Jeffries, D., Vuorenmaa, J., Keller, B., Kopáček, J. & J. Vesely (2007) Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature*. 450. s. 537–540.
- Moore, T. & N. Roulet (2006) Environmental chemistry Browning the waters. *Nature*. 444. s. 283–284.
- Musolff, A., Fleckstein, J., Opitz, M., Büttner, O., Kumar, R. & J. Tittel (2018) Spatio-temporal controls of dissolved organic carbon stream water concentrations. *Journal of Hydrology*. 566. s. 205–215.
- Nieminen, M., Sarkkola, S., Sallantausta, T., Hasselquist, E. & H. Laudon (2021) Peatland drainage - a missing link behind increasing TOC concentrations in waters from high latitude forest catchments? *Science of Total Environment*. 744. s. 145150
- Nieminen, M., Palviainen, M., Sarkkola, S., Laurén, A., Marttila, H. & L. Linér (2018) A synthesis of the impacts of ditch network maintenance on the quantity and quality of runoff from drained boreal peatland forests. *Ambio*. 47. s. 523–534.
- Nieminen, M., Sarkkola, S. & A. Laurén (2017). Impacts of forest harvesting on nutrient, sediment and dissolved organic carbon exports from drained peatlands: A literature review, synthesis and suggestions for the future. *Forest Ecology and Management*. 392. s. 13–20.
- Nieminen, M., Koskinen, M., Sarkkola, S., Laurén, A., Kaila, A., Kiikkilä, O., Nieminen, T. & L. Ukonmaanaho (2015) Dissolved Organic Carbon Export from Harvested Peatland Forests with Differing Site Characteristics. *Water, Air & Soil Pollution*. 226, 181.
- Nieminen, M., Ahti, E., Koivusalo, H., Mattson, T., Sarkkola, S. & A. Laurén (2010) Export of Suspended Solids and-Dissolved Elements from Peatland Areas after Ditch Network Maintenance in South-Central Finland. *Silva Fennica*. 44: 1. s.161

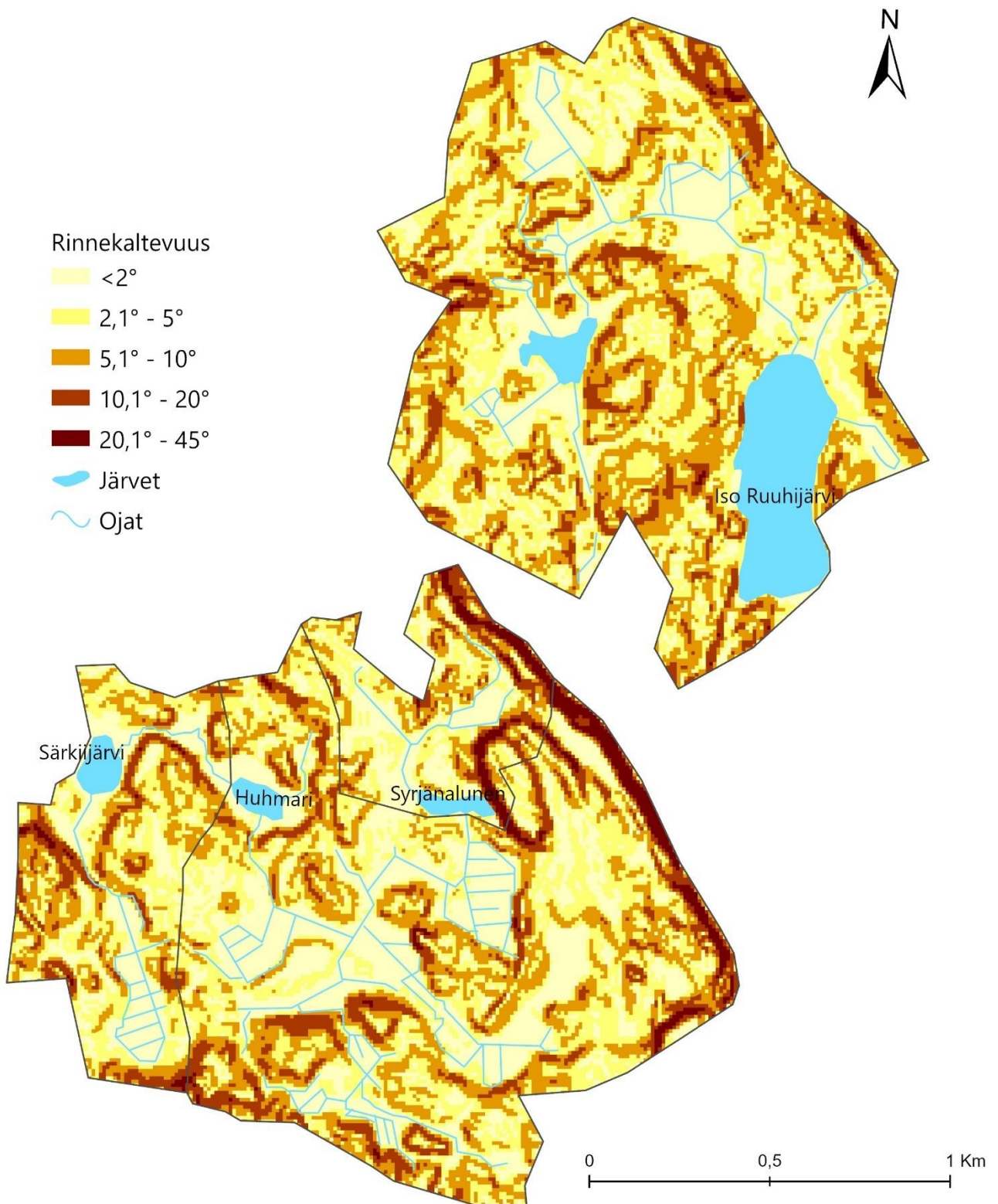
- Nieminen, M. (2004) Export of dissolved organic carbon, nitrogen and phosphorus following clear-cutting of three Nor-way spruce forests growing on drained peatlands in southern Finland. *Silva Fennica*. 38:2. s. 123–132.
- Nummi, P., Suontakanen, E.-M., Holopainen, S. & V.-M. Väänänen (2019) The effect of beaver facilitation on Common Teal: pairs and broods respond differently at the patch and landscape scales. *International Journal of Avian Science*. 161: 2. s. 241–480.
- Nummi, P. & S. Holopainen (2014) Whole-community facilitation by beaver: ecosystem engineer increases waterbird diversity. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 24: 5. s. 575–729.
- Nummi, P., Paasivaara, A., Suhonen, S., Pöysä, H., Clark, R. & R.I. Clark (2013) Wetland use by brood-rearing female ducks in a boreal forest landscape: the importance of food and habitat. *The International Journal of Avian Science*. 155: 1. s. 68–79.
- Nummi, P. & A. Hahtola (2008) The beaver as an ecosystem engineer facilitates teal breeding. *Ecography*. 31: 4. s. 417–544.
- Nummi, P. & H. Pöysä (1995) Habitat use by different-aged duck broods and juvenile ducks. *Wildlife Biology*. 1: 3. s. 181–187.
- Olsson, T., Jakkila, J., Veijalainen, N., Backman, L. & J. Kaurola (2015) Impacts of climate change on temperature, precipitation and hydrology in Finland – studies using bias corrected Regional Climate Model data. *Hydrology and Earth System Sciences*. 19: 7. s. 3217–3238.
- Oravainen, R. (1999) Vesistötulosten tulkinta -opasvihkonen. Kokemäenjoen vesistön vesiensuojeluyhdistys ry. Tieto haettu 3.2.2023. <<https://kvvy.fi/wp-content/uploads/2015/10/opasvihkonen.pdf>>
- Palviainen, M., Peltomaa, E., Laurén, A., Kinnunen, N., Ojala, A., Berninger, F., Zhu, X. & J. Pumpanen (2022) Water quality and the biodegradability of dissolved organic carbon in drained boreal peatland under different forest harvesting intensities. *Science of Total Environment*. 806: 4. 150919.
- Punainen kirja. Laji.fi. Tieto haettu 13.1.2023.
<<https://punainenkirja.laji.fi/results/MX.26366?checklist=MR.424>>
- Pöysä, H. & P. Linkola (2021) Extending temporal baseline increases understanding of biodiversity change in European boreal waterbird communities. *Biological Conservation*. 257. s. 109139.
- Pöysä, H., Holopainen, S., Elmberg, J., Gunnarsson, G., Nummi, P. & K. Sjöberg (2019) Changes in species richness and composition of boreal waterbird communities: a comparison between two time periods 25 years apart. *Scientific Reports*. 9: 1. s. 1725.
- Pöysä, H., Elmberg, J., Gunnarsson, G., Holopainen, S., Nummi, P. & K. Sjöberg (2016) Habitat associations and habitat change: explanation for population decline in breeding Eurasian Wigeon *Anas Penelope*. *Hydrobiologia*. 785. s. 207–217.
- Rajakallio, M., Jyväsjärvi, J., Muotka, T. & J. Aroviita (2021) Blue consequences of the green bioeconomy: Clear-cutting intensifies the harmful impacts of land drainage on stream invertebrate biodiversity. *Journal of Applied Ecology*. 58: 7. s. 1523–1532.

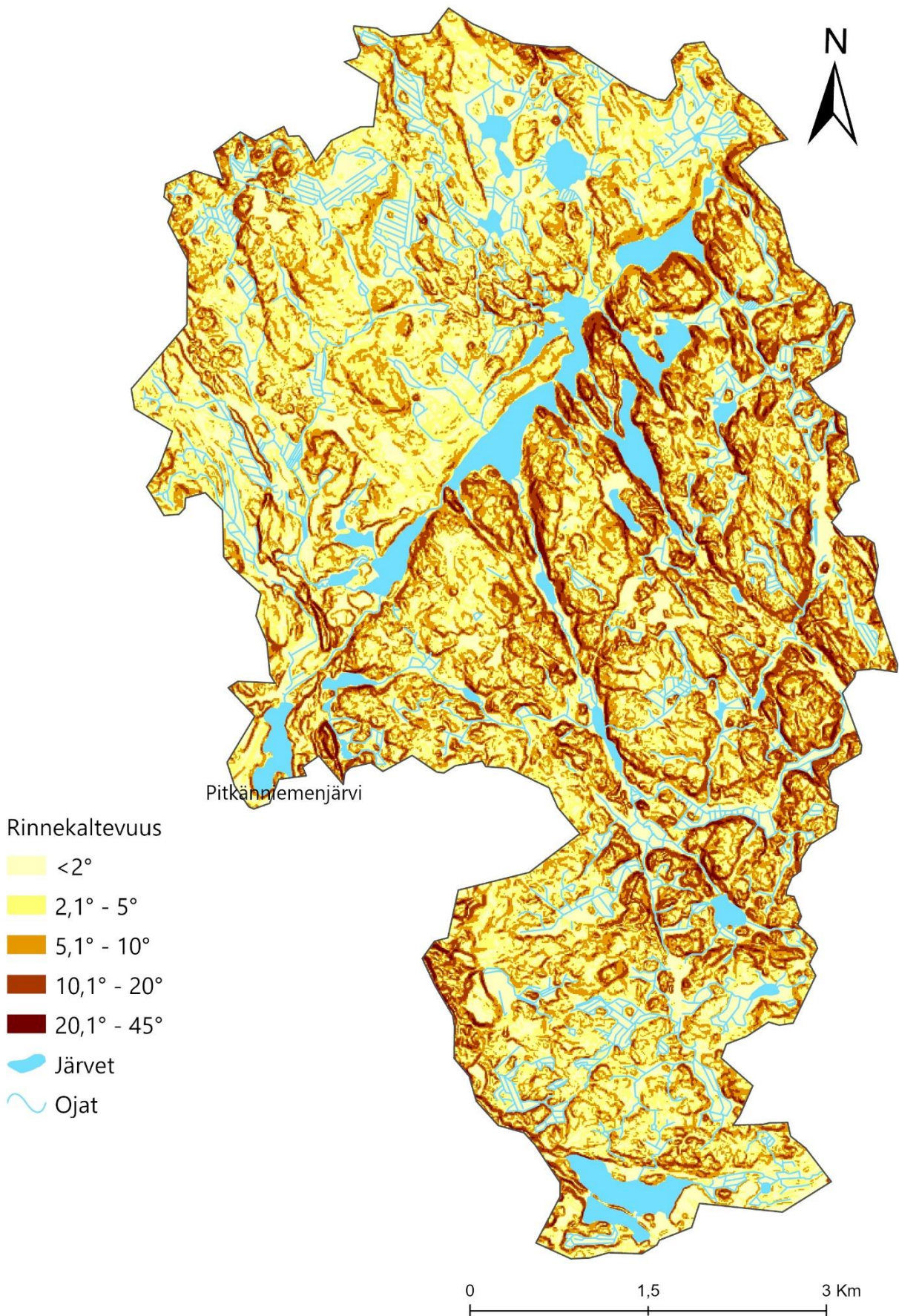
- Reitsema, R., Meire, P. & J. Schoelynck (2018). The future of freshwater macrophytes in a changing world: dissolved organic carbon quantity and quality and its interactions with macrophytes. *Frontiers in Plant science*. 9. s. 629.
- Robidoux, M., Giorgio, P. & A. Derry (2015) Effects of humic stress on the zooplankton from clear and DOC-rich lakes. *Freshwater Biology*. 60. s. 1263–1278.
- Schelker, J., Kuglerová, L., Eklöf, K., Bishop, K. & H. Laudon (2013) Hydrological effects of clear-cutting in a boreal forest – Snowpack dynamics, snowmelt, and streamflow responses. *Journal of Hydrology*. 484. s. 105–114.
- Schelker, J., Eklöf, K., Bishop, K. & H. Laudon (2012) Effects of forestry operations on dissolved organic carbon concentrations and export in boreal first-order streams. *Journal of Geophysical Research*. 117: G1. doi:10.1029/2011JG001827
- Škerlep, M., Steiner, E., Axelsson, A-L. & E. Kritzberg (2020) Afforestation driving long-term surface water browning. *Global Change Biology*. 26:3. s. 1390–1399.
- Solomon, C., Jones, S., Weidel, B., Buffam, I., Fork, M., Karlsson, J., Larsen, S., Lennon, J., Read, J., Sadro, S. & J. Saros (2015) Ecosystem Consequences of Changing Inputs of Terrestrial Dissolved Organic Matter to Lakes: Current Knowledge and Future Challenges. *Ecosystems*. 18:3. s. 376–386.
- Suomen metsävarat (s.a.). Maa- ja metsätalousministeriö. (Tieto haettu 9.2.2023)
<<https://mmm.fi/metsat/suomen-metsavarat>>
- Suometsän hoito (2023) Metsäkeskus. Tieto haettu 9.2.2023.
<<https://www.metsakeskus.fi/fi/metsan-kaytto-ja-omistus/metsanhoito-ja-hakkuut/suometsan-hoito>>
- Suurkuukka, H., Virtanen, R., Suorsa, V., Soinen, J., Paasivirta, L. & T. Muotka (2014) Woodland key habitats and stream biodiversity: Does small-scale terrestrial conservation enhance the protection of stream biota? *Biological Conservation*. 170. s. 10–19.
- Thrane, E., Hessen, D. & T. Andersen (2014) The Absorption of Light in Lakes: Negative Impact of Dissolved Organic Carbon on Primary Productivity. *Ecosystems*. 17. s. 1040–1052.
- Urrutia-Cordero, P., Ekvall, M., Ratcovich, J., Soares, M., Wilken, S., Zhang, H. & L-A. Hansson (2017) Phytoplankton diversity loss along a gradient of future warming and brownification in freshwater mesocosms. *Freshwater Biology*. 62: 11. s. 1869–1878.
- Valtakunnan metsien inventointi (VMI) Luonnonvarakeskus. Tieto haettu 9.2.2023.
<<https://www.luke.fi/fi/seurannat/valtakunnan-metsien-inventointi-vmi/valtakunnan-metsien-inventointi-vmi-kuvaus#tuloksia>>
- Valuma-aluekunnostus (2020). Ympäristö. Tieto haettu 29.11.2022.
<https://www.ymparisto.fi/fi-fi/vesi/Vesistojen_kunnostus/Valumaalueen_kunnostus>
- Vasconcelos, F., Diehl, S., Rodríguez, P., Hedström, P., Karlsson, J. & P. Byström (2019) Bottom-up and top-down effects of browning and warming on shallow lake foodwebs. *Global Change Biology*. 25. s. 504–521.

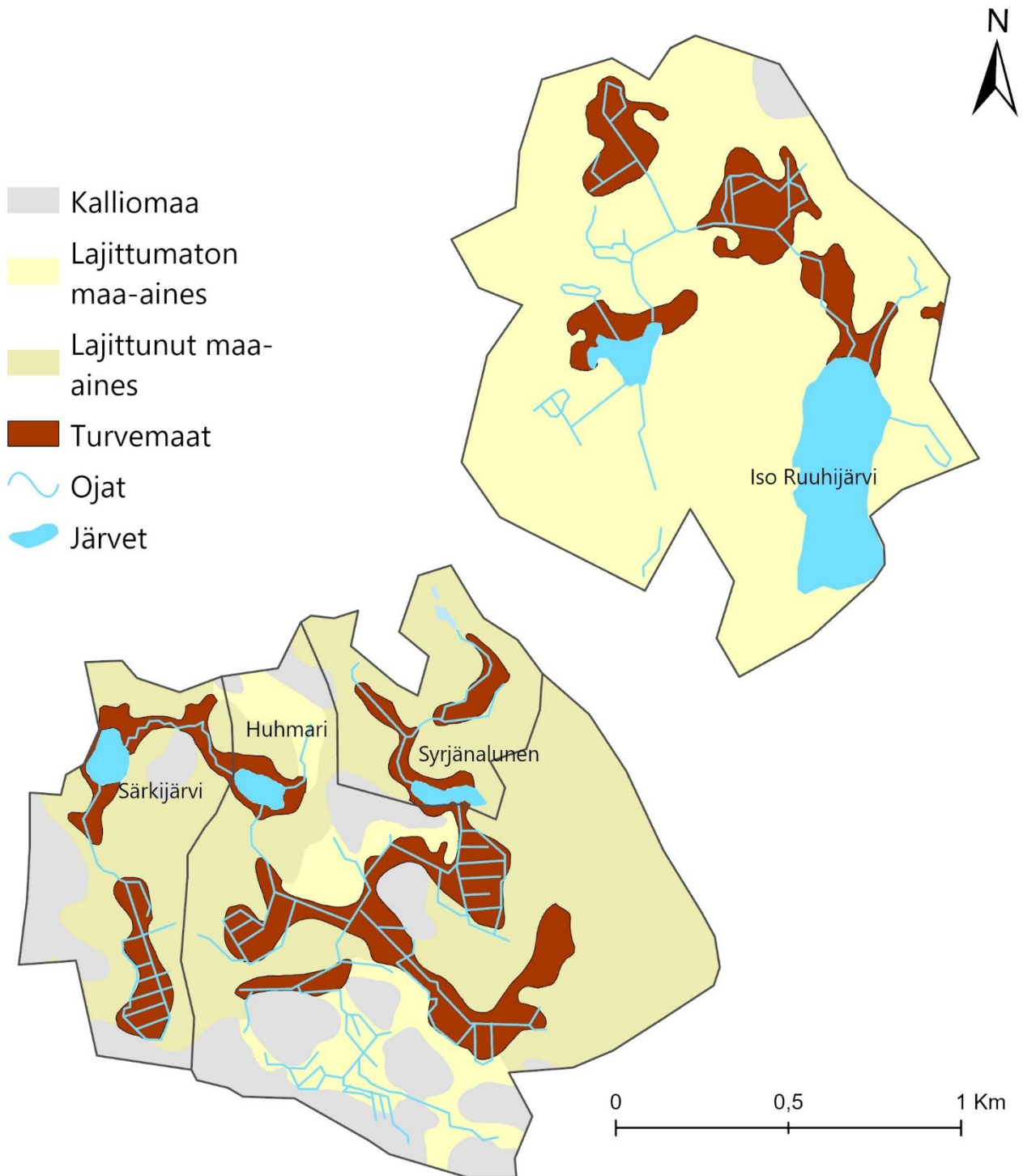
- Virkkala, R. (2004) Bird species dynamics in a managed southern boreal forest in Finland. *Forest ecology and management*. 195:1. s. 151–163.
- Vuorenmaa, J., Forsius, M. & J. Mannio (2006) Increasing trends of total organic carbon concentrations in small forest lakes in Finland from 1987 to 2003. *Science of the Total Environment*. 365. s. 47–65.
- Westbrook, C., Cooper, D. & C. Anderson (2017) Alteration of hydrogeomorphic processes by invasive beavers in southern South America. *Science of Total Environment*. 574. s. 183–190.
- Weyhenmeyer, G., Prairie, Y. & L. Tranvik (2014) Browning of Boreal Freshwaters Coupled to Carbon-Iron Interactions along the Aquatic Continuum. *PLOS One*. 9: 2. e88104.
- Williamson, C., Overholt, E., Pilla, R. & K. Wilkins (2020) Habitat-Mediated Responses of Zooplankton to Decreasing Light in Two Temperate Lakes Undergoing Long-Term Browning. *Frontiers in Environmental Science*. 8. s. 73.
- Åström, M., Aaltonen, E-K. & J. Koivusaari (2001) Effect of ditching operations on stream-water chemistry in a boreal forested catchment. *Science of Total Environment*. 279: 1–3. s. 117–129.

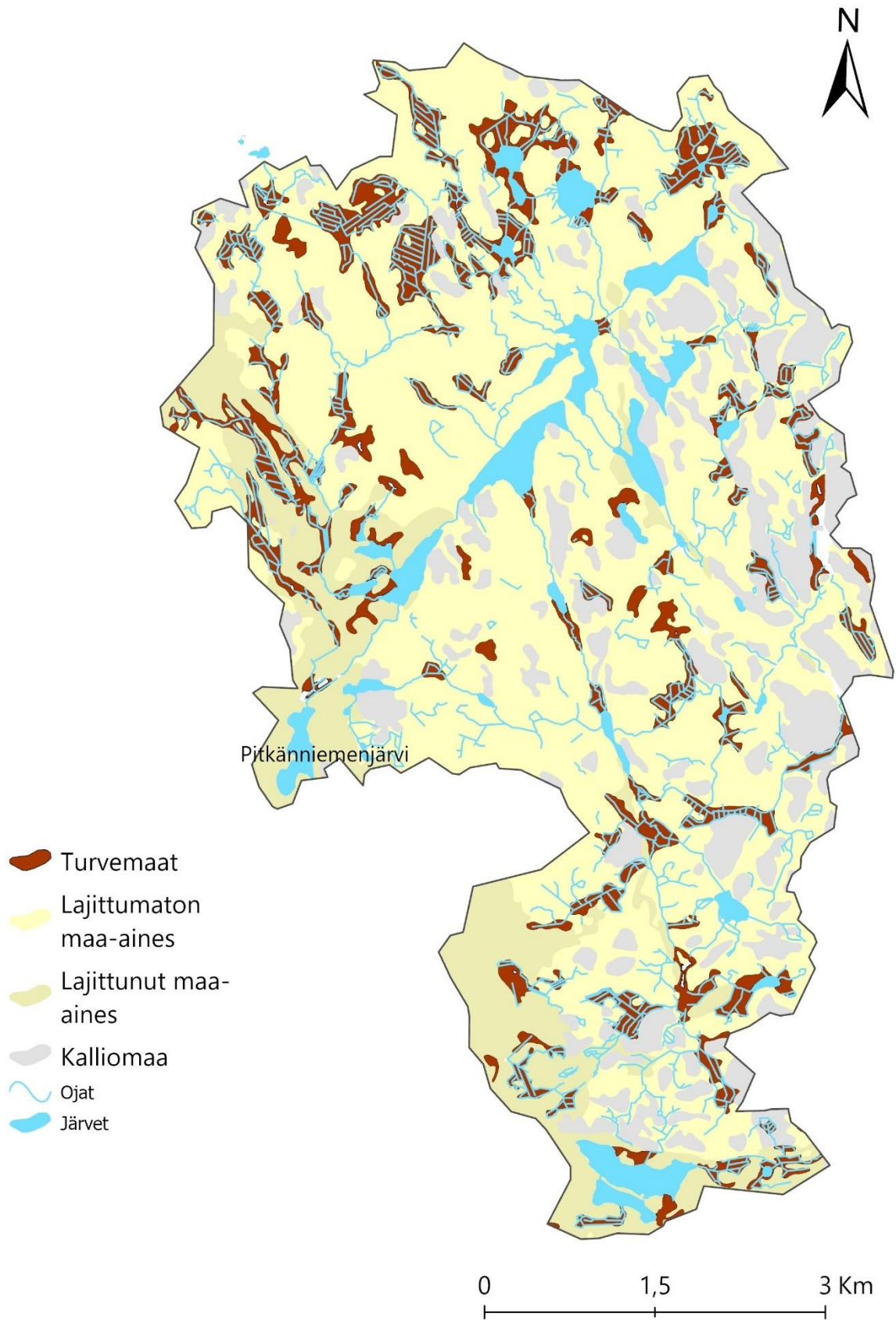
Liitteet

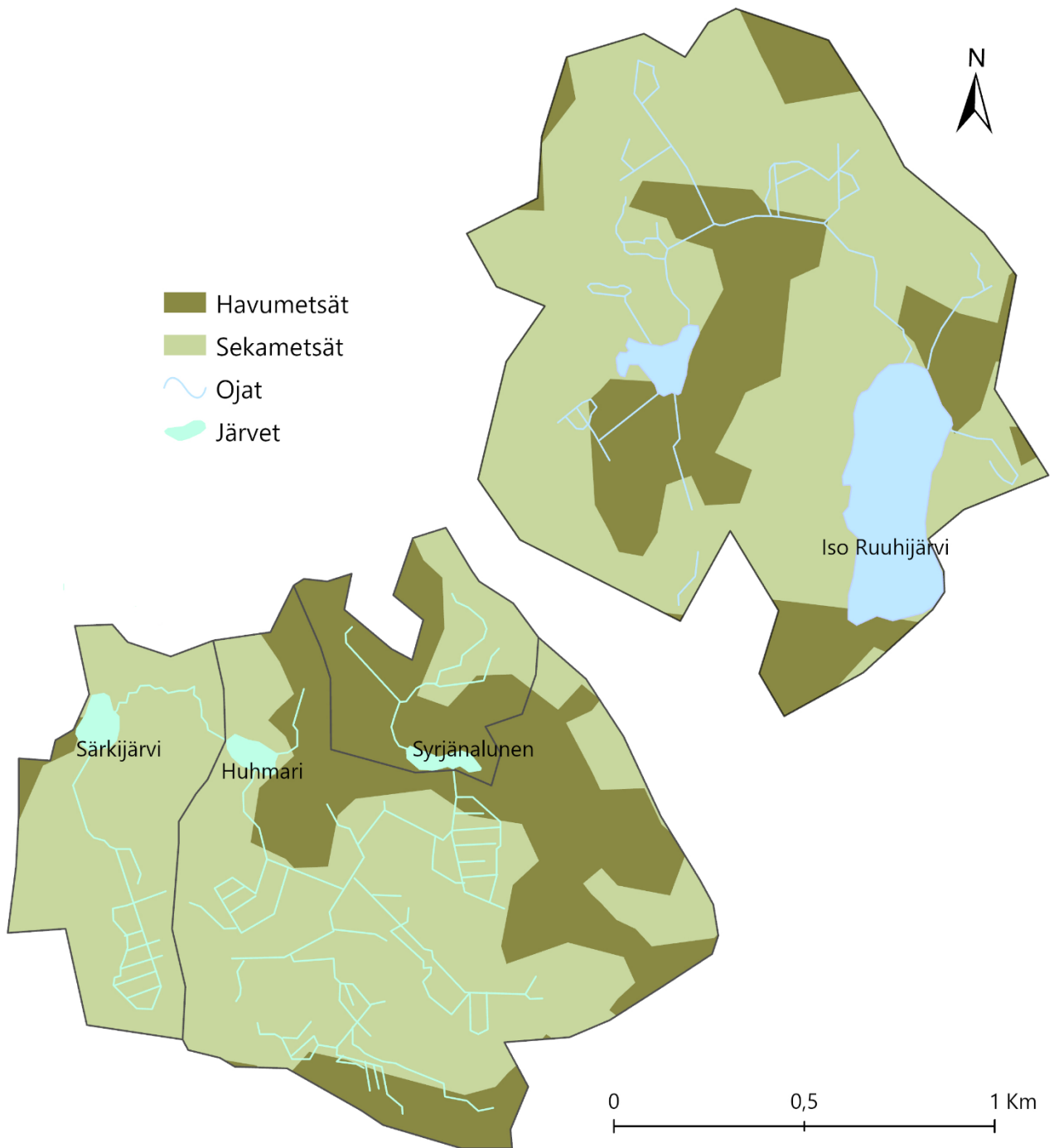
Liite 1. Ison Ruuhijärven, Särkijärven, Huhmarin ja Syrjänalusen rinnekaltevuuskartta

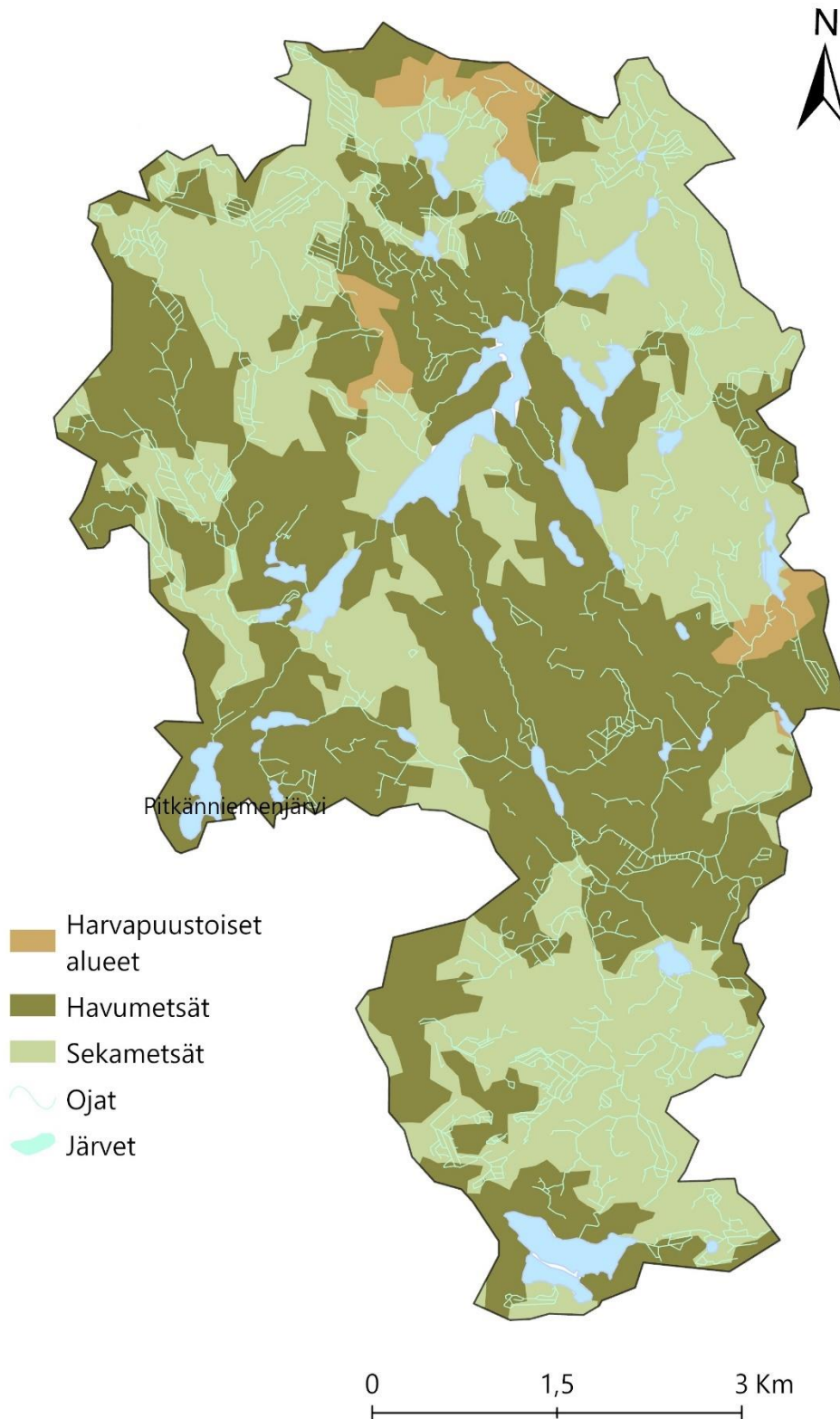


Liite 2. Pitkänniemenjärven rinnekaltevuuskartta

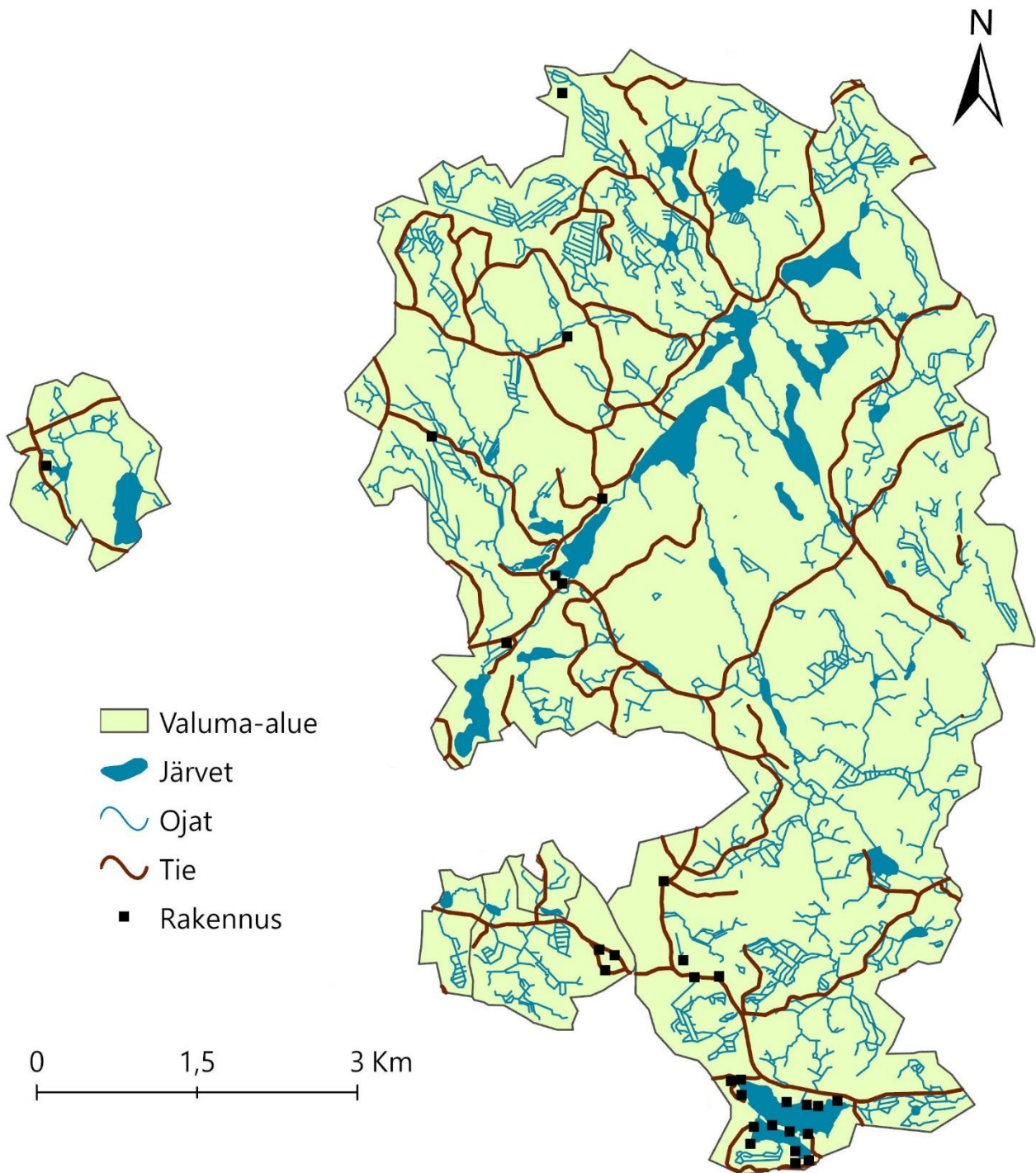
Liite 3. Ison Ruuhijärven, Särkijärven, Huhmarin ja Syrjänalusen maaperäkartta

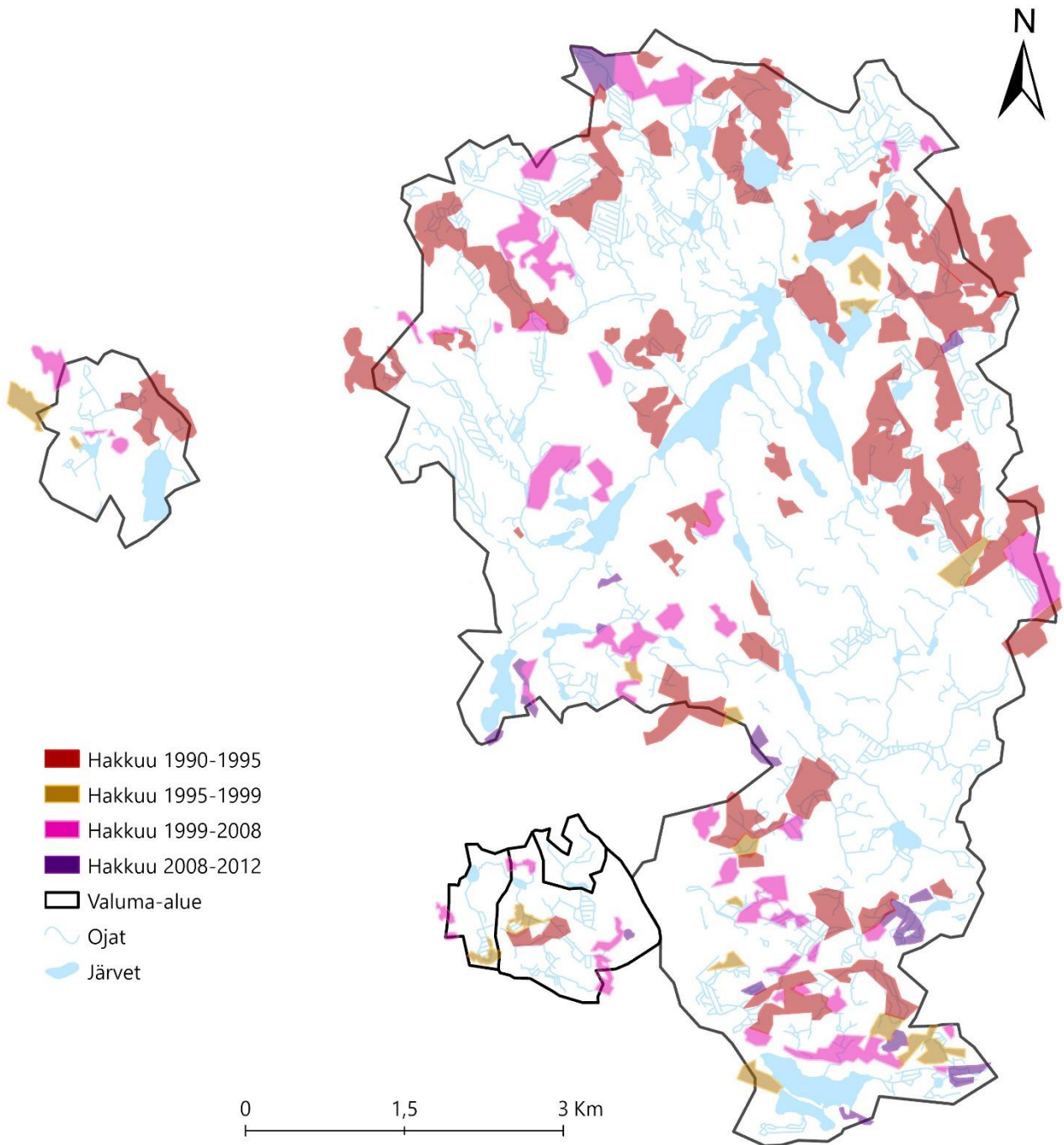
Liite 4. Pitkänniemenjärven maaperäkartta

Liite 5. Ison Ruuhijärven, Särkijärven, Huhmarin ja Syrjänalusen metsätyypikartta

Liite 6. Pitkänniemenjärven metsätyyppikartta

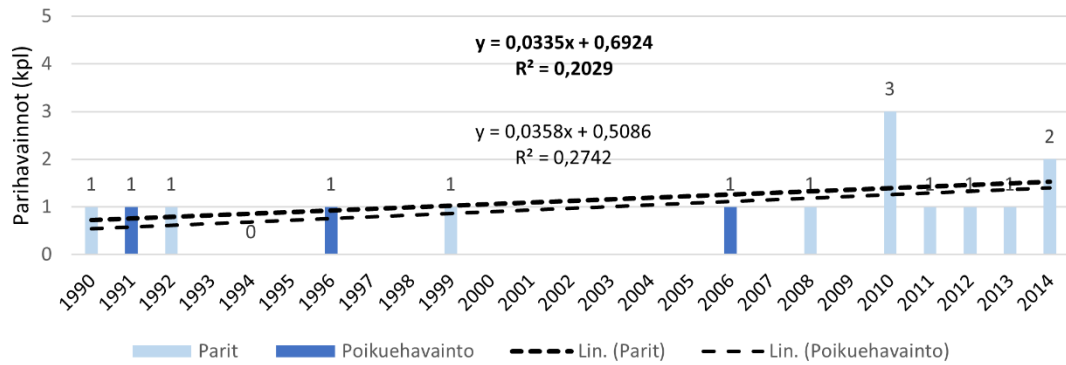
Liite 7. Valuma-alueiden ojaverkostokartta



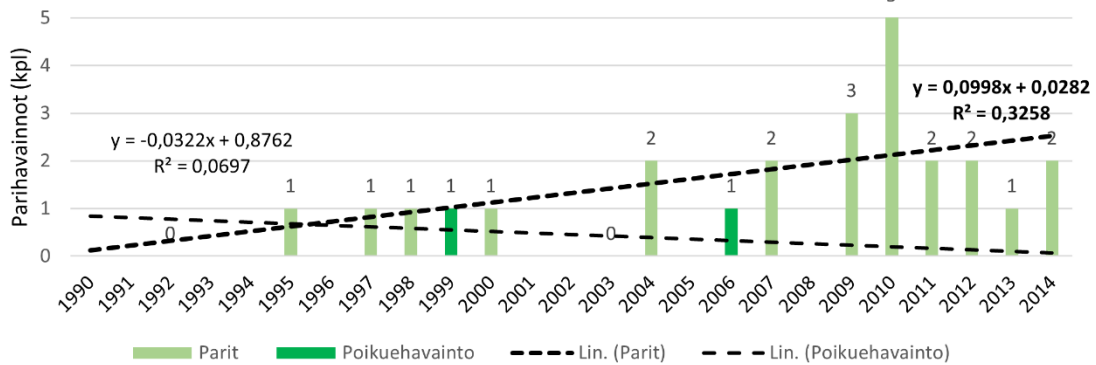
Liite 8. Valuma-alueiden hakkuualueet

Liite 9. Ruuhijärven lintuhavainnot

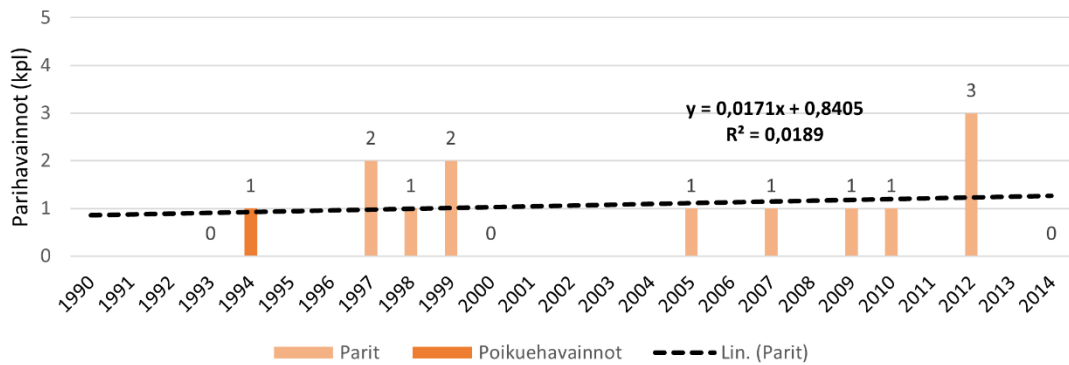
Tavi



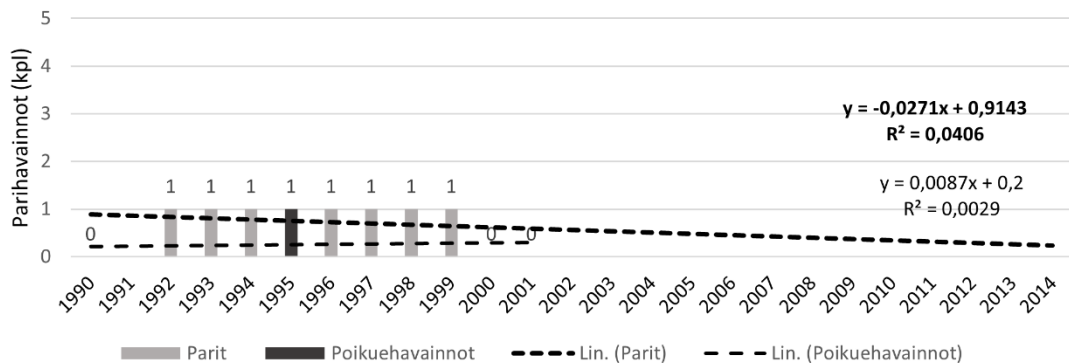
Sinisorsa



Telkkä

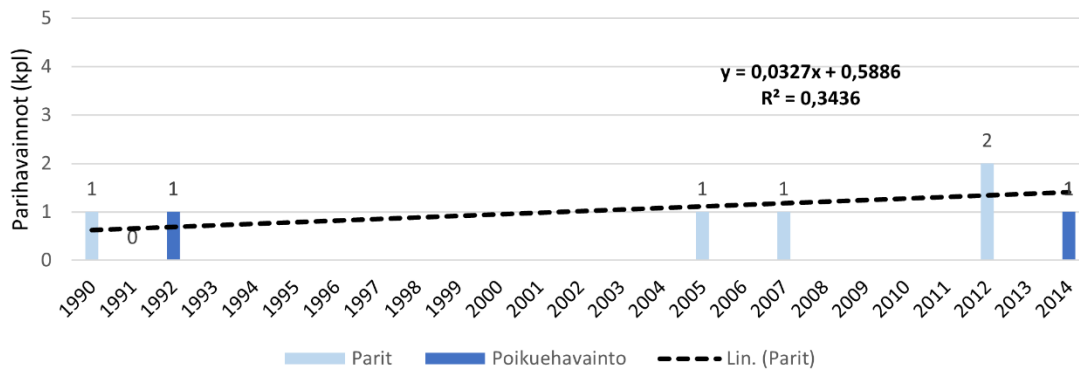


Haapana

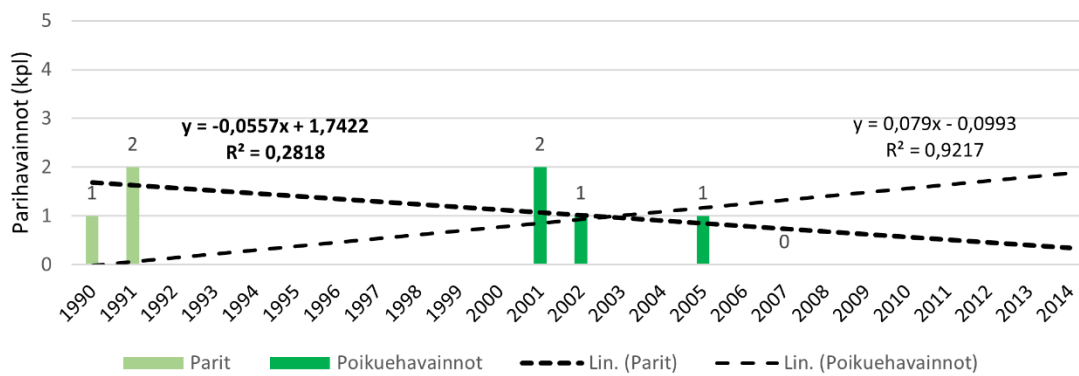


Liite 10. Särkijärven lintuhavainnot

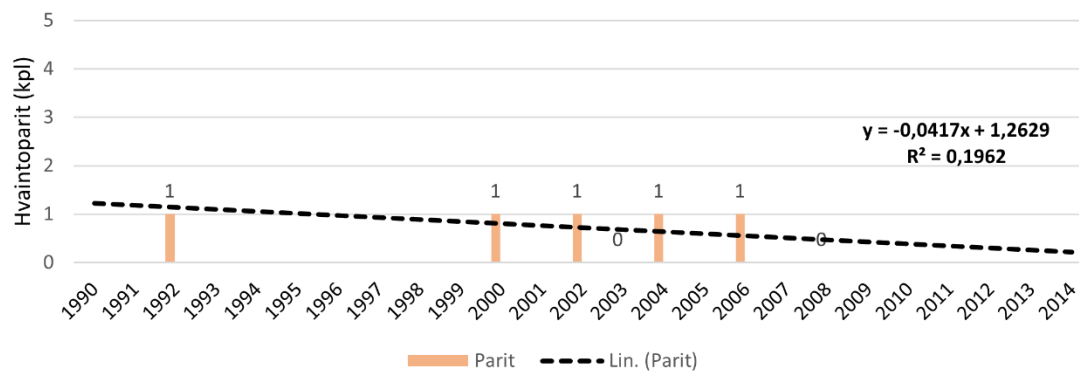
Tavi



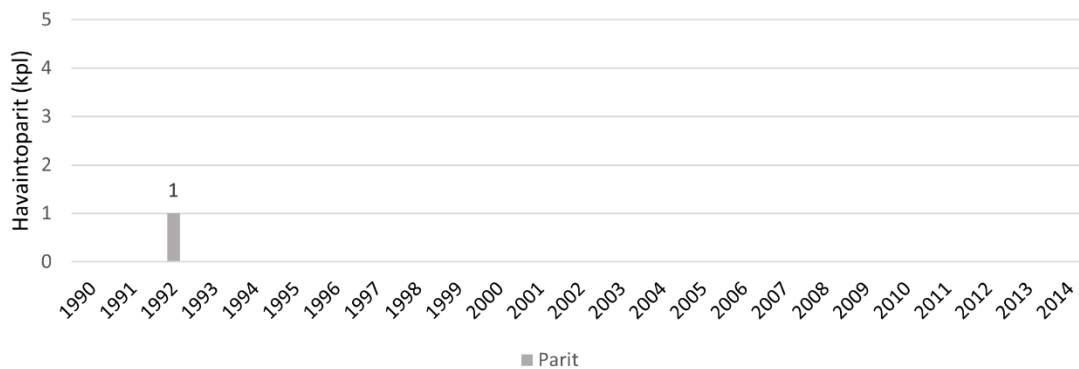
Sinisorsa



Telkkä

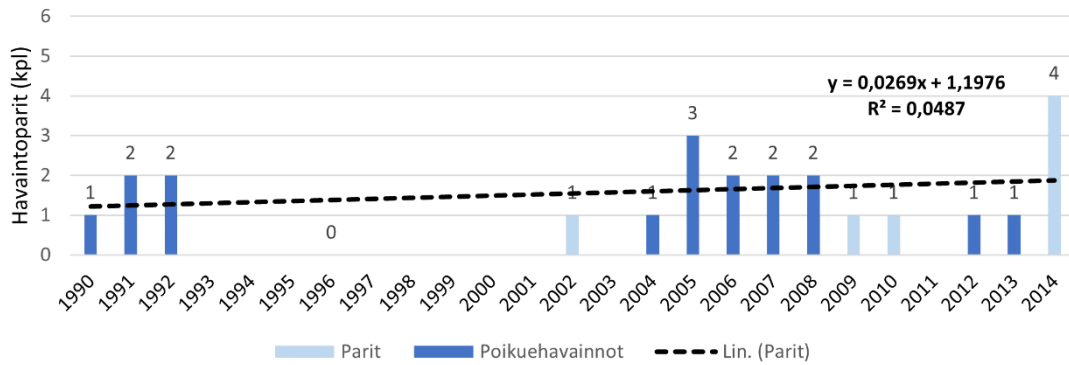


Haapana

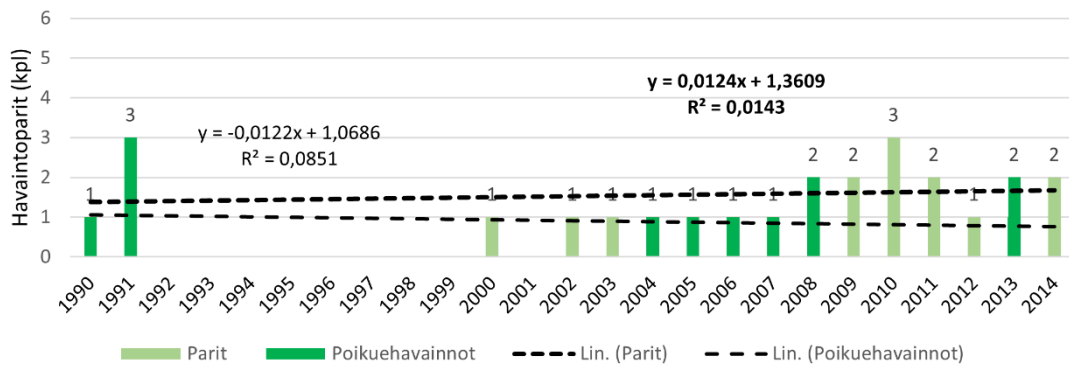


Liite 11. Huhmarin lintuhavainnot

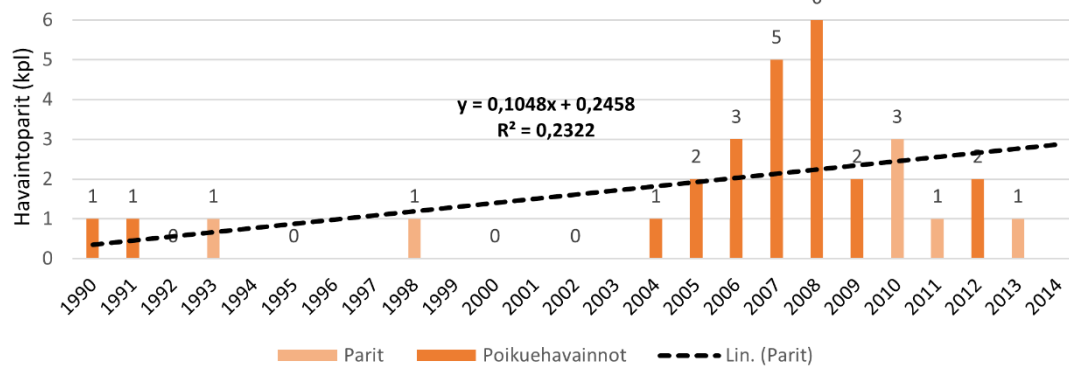
Tavi



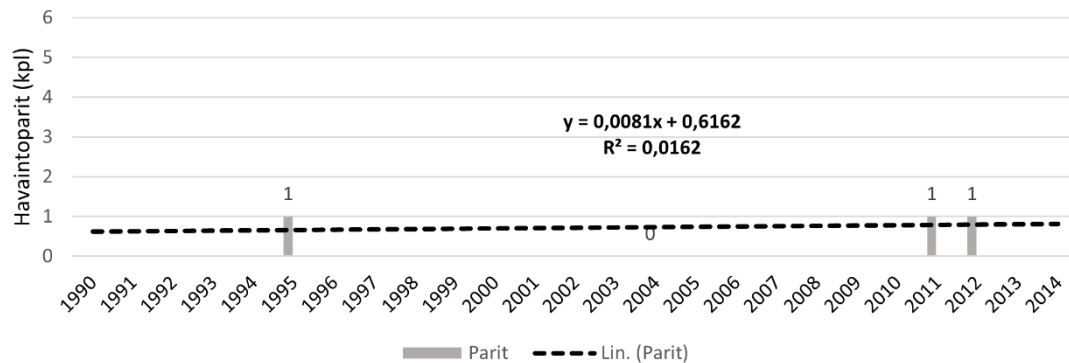
Sinisorsa



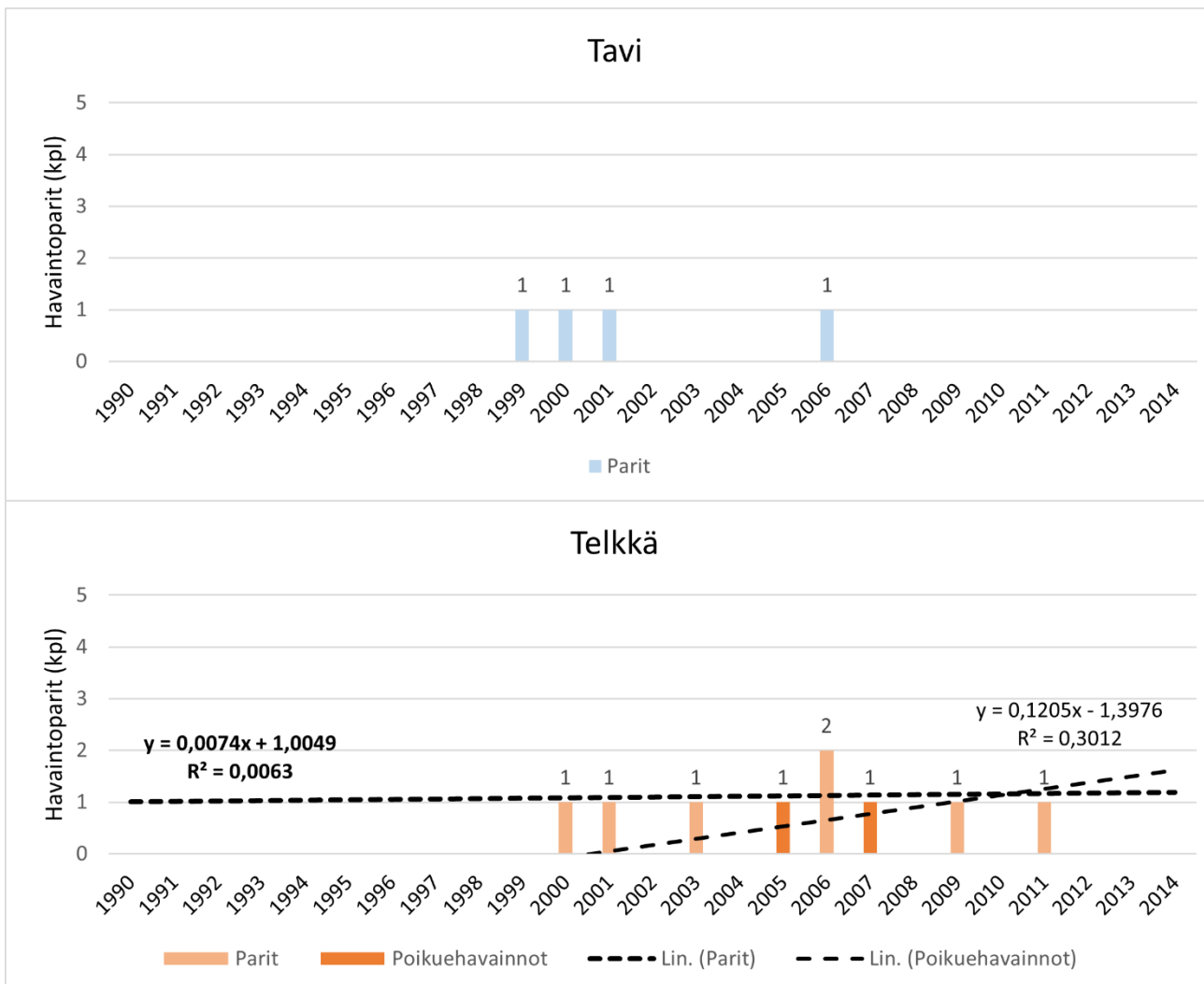
Telkkä



Haapana



Liite 12. Syrjäanalusen lintuhavainnot



Liite 13. Pitkänniemenjärven lintuhavainnot

