



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 87/2024

# Maannoksen poiston vaikutus vajoveden laatuun

MAAPOIS-pilottitutkimus

Antti-Jussi Lindroos ja Aino Smolander

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 87/2024

# **Maannoksen poiston vaikutus vajoveden laatuun**

MAAPOIS-pilottitutkimus

**Antti-Jussi Lindroos ja Aino Smolander**



**Viittausohje:**

Lindroos, A.-J. & Smolander, A. 2024. Maannoksen poiston vaikutus vajoveden laatuun : MAAPOIS-pilottitutkimus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 87/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 46 s.



ISBN 978-952-380-978-9 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-978-9>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Antti-Jussi Lindroos ja Aino Smolander

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2024

Julkaisuvuosi: 2024

Kannen kuva: Antti-Jussi Lindroos

## Alkusanat

Tutkimushanke ”Maannoksen poiston vaikutus vajoveden laatuun” (MAAPOIS-pilottitutkimus) toteutettiin Luonnonvarakeskuksen (Luke), Savo-Karjalan Vesiensuojeluyhdistys ry:n, Alva-yhtiöt Oy:n, Joensuun Vesi -liikelaitoksen ja Ylä-Savon Vesi Oy:n yhteisrahoituksella 1.6.2023 – 31.1.2024. Tarkoituksena oli tuottaa perustietoa maannoksen ja sen poiston vaikutuksesta vajoveden laatuun kolmella yksittäisellä tutkimuspaikalla pohjatiedoksi tulevaisuuden laajempaa tarkastelua varten.

Tässä raportissa on esitetty hankkeessa saadut tulokset, ja tutkimustyöstä ovat vastanneet erikoistutkija Antti-Jussi Lindroos ja johtava tutkija Aino Smolander Lukesta. Kenttäkokeista ovat vastanneet Lukessa tutkimusinsinöörit Markku Rantala ja Ismo Kyngäs, ja Luken Viikin laboratorio ja sen henkilökunta on vastannut kemiallisista analyyseistä.

Tutkimushanketta on ohjannut ohjausryhmä, johon ovat kuuluneet:

Jukka Koski-Vähälä, Savo-Karjalan Vesiensuojeluyhdistys ry

Jukka Tyrväinen, Alva-yhtiöt Oy

Juha Lemmetyinen, Joensuun Vesi -liikelaitos

Ulla Tyrväinen, Ylä-Savon Vesi Oy

Petri Reijonen, Suomen Pohjavesiteknikka Oy

Päivi Mäkiranta, Luonnonvarakeskus

## Tiivistelmä

Antti-Jussi Lindroos ja Aino Smolander

Luonnonvarakeskus, Helsinki

Tutkimushankkeen ”Maannoksen poiston vaikutus vajoveden laatuun (MAAPOIS-pilottitutkimus)” tarkoituksena oli selvittää, miten metsämaan maannosvyöhykkeen poisto vaikuttaa vajoveden määrään, kemialliseen koostumukseen ja veden mukana kulkeutuvien aineiden määriin. Tavoitteena oli tuottaa pohjatietoa maaperän pintavyöhykkeen kemiallisista prosesseista. Pohjatieto on tarpeen, kun arvioidaan metsämaan pintakerroksen poiston vaikutusta pohjaveden laatuun esimerkiksi maa-ainesten oton yhteydessä.

Tulokset tukivat tutkimushypoteesia ja kirjallisuudessa esitettyjä tuloksia, että maannosvyöhykkeen poisto ja sitä seuraava kivennäismaan paljastuminen voi lisätä vajoveden ja sen mukana kulkeutuvien aineiden määriä. Lisääntyneitä vajoveden pinta-alakohtaisia määriä havaittiin raudalle, mangaanille ja kaliumille maannoksen poistossa. Vajoveden raskasmetallien pitoisuudet olivat yleisesti matalia. Typen huuhtoutuminen vajoveden mukana oli vähäistä sekä maannoksen poistossa että sen ollessa paikallaan.

Tulokset osoittivat myös jatkotutkimustarpeen, sillä vaihtelu vajoveden pitoisuuksissa on tyyppillisesti suurta ja monivuotinen tutkimus on tarpeen kehityksen seuraamiseksi.

**Asiasanat:** vajovesi, metsämaa, maannos, maannoksen poisto

# Sisällys

<b>1. Johdanto .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Kirjallisuustarkastelu .....</b>	<b>8</b>
2.1. Maannoksen, puuston ja kasvillisuuden poiston vaikutus vajoveden määrään.....	8
2.2. Kivennäismaan paljastumisen vaikutus ravinteiden ja alkuaineiden huuhtoutumiseen .....	9
2.3. Maannoksen poiston vaikutus kivennäismaan hiileen ja typpeen .....	10
<b>3. Aineisto ja menetelmät .....</b>	<b>12</b>
<b>4. Tulokset.....</b>	<b>15</b>
4.1. Maannoksen ja sen poiston vaikutus vajoveden määrään.....	15
4.2. Kivennäismaan paljastumisen vaikutus ravinteiden ja alkuaineiden huuhtoutumiseen .....	16
4.3. Maannoksen poiston vaikutus vajoveden typpipitoisuuksiin.....	35
<b>5. Tulosten tarkastelu .....</b>	<b>38</b>
5.1. Maannoksen poiston vaikutus vajoveden määrään.....	38
5.2. Kivennäismaan paljastumisen vaikutus ravinteiden ja metallien huuhtoutumiseen .....	38
5.3. Maannoksen poiston vaikutus vajoveden typpipitoisuuksiin.....	39
5.4. Tutkimuksen luotettavuus ja jatkotutkimustarpeet.....	40
<b>6. Johtopäätökset.....</b>	<b>41</b>
<b>Viitteet.....</b>	<b>42</b>

# 1. Johdanto

Pohjavesialueet ovat usein metsäekosysteemejä ja metsämaiden maannosvyöhykkeen omavia alueita. Tyypillisiä tällaisia alueita ovat esimerkiksi harjualueet, jotka edustavat kangasmaiden metsätyyppejä. Niiden maannosvyöhykkeessä esiintyy usein hiekasta ja sorasta koostuva podsolimaannos tai kehittymättömämpi arenosolimaannos.

Sadeveden valuessa metsämaan podsolimaannoksen läpi vajoveden pH nousee ja samalla sen sisältämä orgaanisen aineen määrä pienenee (Lindroos ym. 2008). Vajoveden happamuuden väheneminen syvyyden kasvaessa johtuu maaperän luontaisesta neutralointi- ja puskuri-kyvystä happamuutta vastaan. Ylimmästä kivennäismaan kerroksesta (huuhtoutumiskerroksesta) vapautuu alkuaineita mineraalien rapautumisessa ja ioninvaihtoreaktioissa sekä sitoutumalla liukoiseen orgaaniseen ainekseen. Näin vapautuu mm. rautaa ja alumiinia sekä muita mineraaleissa esiintyviä metalleja, jotka saostuvat maannoksen rikastumiskerrokseen johtuen pH:n noususta ja liukoisen orgaanisen aineen saostumisesta (Reuss & Johnson 1986, Helmi-saari & Mälkönen 1989). Metallien ja alkuaineiden mobilisoituminen ja saostuminen perustuu maannoksen kemialliseen tasapainoon maa-aineksen ja veden välillä.

Maan pinnasta vajoveteen vapautuneiden metallien ja muiden alkuaineiden saostuminen maannoksen rikastumiskerrokseen muodostaa pohjavettä suojaavan vyöhykkeen metsäisillä alueilla. Myös ilmaperäisen laskeuman mukana tulleiden raskasmetallien (esim. kupari, nikkeli) on havaittu voivan sitoutua maannosvyöhykkeeseen mm. sitoutumalla orgaaniseen ainekseen ja maahiukkasten kationinvaihtopaikoille (Derome ym. 1998). Orgaanisen kerroksen poiston ja kivennäismaan tavanomaista pintakerrosta syvemmillä olevan rikastumiskerroksen ja pohjamaan paljastumisen maanpintaan on havaittu lisäävän mm. alumiinin pitoisuuksia maavedessä ja lisäävän mineraalien rapautumisnopeutta (Tanskanen & Ilvesniemi 2004, Lindroos & Ilvesniemi 2023). Mineraalien rapautuminen on myös voimakkaampaa maannoskehityksen alkuvaiheessa esimerkiksi silloin, kun vähemmän rapautunut ja maannostunut kerros tulee maannostumis- ja rapautumisprosesseille alttiiksi.

Kasvavissa metsissä metsämaan typen kierto on hyvin suljettu siten, että vajoveden mukana pohjaveteen huuhtoutuu hyvin vähän orgaanista typpeä, ammoniumtyppeä ja nitraattityppeä (Mustajärvi ym. 2008). Maannosvyöhykkeen sekoittuminen erityisesti päätehakkuun ja maanmuokkauksen vaikutuksesta voi stimuloida typen kiertoa ja avata suljetun typen kierron lyhytaikaisesti, jolloin typpeä voi huuhtoutua vajoveden mukana (Smolander ym. 2019). Typen kierto on vilkkainta humuskerroksessa, sillä suurin osa mikrobitoiminnoista on riippuvaista orgaanisesta aineesta. Nitrifikaatio on tästä poikkeus ja nitraattityppeä muodostuu kivennäismaassakin. Kasvillisuuden ja orgaanisen kerroksen poistamisella saattaa olla ratkaiseva rooli nitraattitypen huuhtoutumisen kannalta, mutta koko maannosvyöhykkeen poistamisen vaikutuksista ei ole tietoa.

Tietoa on hyvin vähän siitä, miten metsäkasvillisuuden ja koko maannosvyöhykkeen poisto vaikuttaa läpi valuvan vajoveden määrään ja kemialliseen koostumukseen. Maahan tulevan veden koostumus myös muuttuu metsäkasvillisuuden ja maannosvyöhykkeen poistuessa, koska normaalisti maannosvyöhyke ottaa vastaan kasvillisuudesta peräisin olevaa orgaanista kuormaa ja happamuutta edistäviä yhdisteitä. Kasvillisuuden ja maannoksen poistuessa tärkeään asemaan nousee vajoveden koostumuksen kannalta ilmaperäinen laskeuma ja siihen perustuva sadeveden koostumus ja sen reaktio muuttumattoman, ei-maannostuneen,

maakerroksen kanssa. Kohteen ympäriltä tuleva karike ja sen hajoaminen muuttavat vähitellen tilannetta ajan kuluessa.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten metsämaan maannosvyöhykkeen poisto vaikuttaa vajoveden määrään ja kemialliseen koostumukseen, esim. metallipitoisuuksiin. Tavoitteena oli tuottaa pohjatietoa maaperän pintavyöhykkeen kemiallisista prosesseista. Tämä pohjatieto on tarpeen ennen laajempaa tutkimusta siitä, miten pintakerrosten poisto esimerkiksi maa-ainesten oton yhteydessä vaikuttaa pohjaveden laatuun. Maannoksen poiston vaikutusta selvitettiin erilaisissa maaperäoloissa, ja sen vuoksi tutkimus toteutettiin kolmella eri paikkakunnalla.

Tutkimuskysymykseen vastaamiseksi tehtiin kirjallisuustutkimusta olemassa olevan tiedon selvittämiseksi sekä aktiiviseen koejärjestelyyn perustuvaa tutkimusta, jolla selvitettiin maannosvyöhykkeen vaikutus maaperän pintaosan vajoveden määrään ja laatuun. Vajovettä kerättiin maannoksesta 0,4 m syvyydeltä maan pinnasta, mikä vastaa koko maannosvyöhykkeen paksuutta tutkimuskohteilla. Yleisesti ottaen maannosvyöhykkeen syvyys voi kuitenkin vaihdella paljon ja riippuu paikasta (Sandborg 1993b, Tamminen & Mälkönen 1999, Mälkönen & Tamminen 2003).

Tutkimushypoteesina oli, että maannosvyöhykkeen poisto lisää vajoveden määrää ja kemiallisten aineiden määriä. Tutkimuksia maannosvyöhykkeen poiston vaikutuksesta on aiemmin tehty vähän. Tämän pilottitutkimuksen on tarkoitus luoda perustaa laajemmalle tarkastelulle maaperän pintavyöhykkeen prosessien vaikutuksesta veden määrään ja laatuun.

## 2. Kirjallisuustarkastelu

### 2.1. Maannoksen, puuston ja kasvillisuuden poiston vaikutus vajoveden määrään

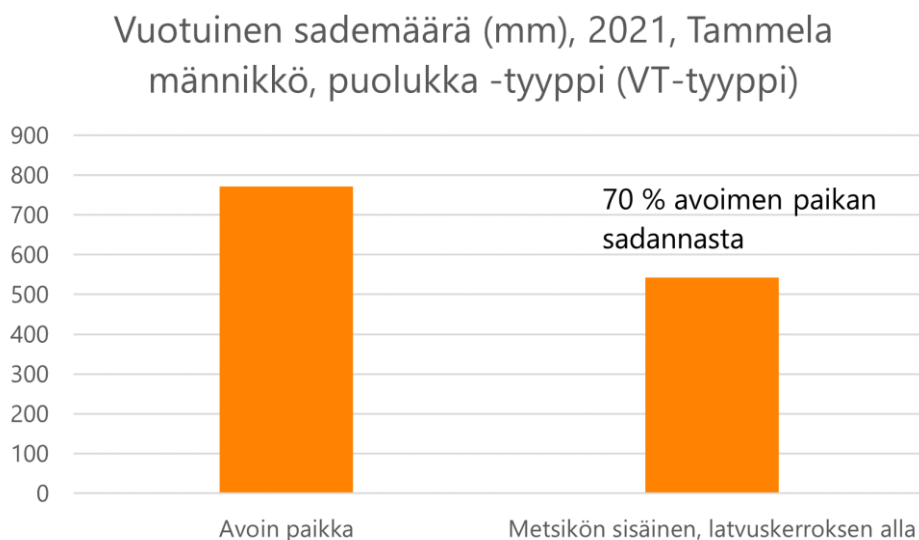
Puuston ja pintakasvillisuuden vaikutuksen loppuminen on yksi tärkeimmistä tekijöistä arvioitaessa metsämaan maannoksen poiston vaikutusta maassa alaspäin valuvan veden laatuun ja huuhtoutuviin alkuaineiden määriin (esim. Sandborg 1993b). Metsämailta huuhtoutuviin aineisiin vaikuttaa maaperän läpi kulkeutuva vesimäärä, ja yleisesti huuhtoutumisriskin oletetaan lisääntyvän vajovesimäärän kasvaessa. Tästä on esimerkkinä ravinteiden huuhtoutumisriskin lisääntyminen esimerkiksi heti avohakkuun jälkeen, jolloin puuston veden käyttö poistuu ja pintakasvillisuus ei ole vielä ehtinyt kehittyä. Toinen esimerkki on kevätvalunta ja syysateiden aiheuttama valunnan lisääntyminen, joita pidetään yleisesti ajankohtina, jolloin ravinteiden huuhtoutuminen voi lisääntyä.

Valunta metsämaan läpi lisääntyy puuston poiston jälkeen, koska sekä sen vedenotto että haihdunta vähenee (Seuna 1990). Lisäksi latvuskerroksen metsämaan tulevaa sadantamäärää vähentävä vaikutus loppuu. Sadanta- ja lumimäärät ovat aukealla paikalla suurempia kuin metsikön sisällä (Lindroos ym. 2007, Ide ym. 2013). Pintakasvillisuudella on myös keskeinen rooli veden käytössä, haihdunnassa ja ravinteiden sitojana (Piirainen ym. 2007, Piirainen 2019), ja pintakasvillisuuden poisto maannoksen poiston yhteydessä voi johtaa valunnan lisääntymiseen.

Kasvillisuuden ja maannoksen veden käytön, sidonnan ja haihdunnan yhteisvaikutusta on seurattu mittaamalla vuotuista vesimäärää avoimella paikalla, metsikkösadannassa latvuskerroksen alla sekä metsämaassa 12 metsikössä eri puolilla Suomea ns. ICP Forests -metsien tilan seurantaohjelmassa (Lindroos ym. 2008). Latvuskerroksen aiheuttamaa metsämaan kohdistuvan sadantamäärän vähentymistä on tarkasteltu kuvassa 1. Esimerkkikohde edustaa kuivaa mäntyvaltaista kangasmetsää lajittuneella hiekkamaalla, kuten tämän tutkimuksen kenttäkokeetkin. Latvuskerros yksin vähentää mittausten mukaan metsämaan kohdistuvaa sadantamäärää n. 30 %.

Vesi- ja ympäristöhallitus, Geologian tutkimuskeskus sekä Tiehallitus toteuttivat Suomessa vuosina 1984–1992 yhteistutkimuksen soranoton vaikutuksista pohjaveteen. Tutkimus liittyi pohjaveden suojelutoimenpiteisiin soranoton suunnittelua ja soranottoa varten (esim. Sandborg 1993 a,b, Hyyppä & Penttinen 1993, Hatva 1993). Hankkeessa tutkittiin vajoveden laatua ja määrää liittyen maannoksen poistoon (Sandborg 1993b). Maannoksen poisto lisäsi sade- ja sulamisvesistä maaperään imeytyvän vajoveden määrää (Sandborg 1993b). Tämä liittyi puuston ja kasvillisuuden poistamiseen ja niiden kautta tapahtuvan haihdunnan (transpiraatio) loppumiseen sekä siihen, että veden haihtuminen on erilaista pelkästä mineraalimaan pinnasta verrattuna maannoksen karikke- ja kasvillisuuspintoihin (Sandborg 1993b). Sandborgin (1993b) mukaan myös humuskerros ja rikastumiskerros tasaavat veden virtausta maassa.

Johtopäätöksenä on, että maannoksen, pintakasvillisuuden ja puuston poistossa veden valunta maaperän läpi lisääntyy, ja siten myös aineiden huuhtoutumisriski voi lisääntyä.



**Kuva 1.** Sademäärä avoimella paikalla verrattuna metsikön sisäiseen sademäärään latvuserroksen alla Tammelassa sijaitsevalla intensiivisen seurannan alalla vuonna 2021 (aineiston lähde: ICP Forests, Luke).

## 2.2. Kivennäismaan paljastumisen vaikutus ravinteiden ja alkuaineiden huuhtoutumiseen

Maannoksen poiston suoraa vaikutusta vajo- ja pohjaveden laatuun on tutkittu melko vähän. Sandborg (1993b) tutki maannoksen poiston seurauksena tapahtuvan kivennäismaan paljastumisen vaikutusta vajoveden laatuun 1980- ja 1990-luvuilla. Tulosten mukaan vajoveden määrä ja vajoveteen liukenevien suolojen määrä kasvoivat maannoksen poiston seurauksena. Sandborg (1993b) raportoi vajoveden happamuuden ja orgaanisen aineen pitoisuuden kasvua paljastetussa kivennäismaassa verrattuna luontaiseen maannokseen. Toisaalta myös emäskationien pitoisuudet kohosivat (Sandborg 1993b). Vajoveden liukoisen orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuus ja pH ovat tärkeitä tekijöitä aineiden liukoisuuden kannalta. Matala pH voi edistää joidenkin metallien liukoisuutta, ja liukoinen orgaaninen aine ja hiili voivat sitoa itseensä metalleja liukoisiksi yhdisteiksi.

Backman & Väisänen (2001) raportoivat pohjaveden seurannan pitkäaikaistuloksista eri puolilta Suomea, ja totesivat, että soranotossa maannoksen poistaminen lisää mahdollisesti yhtenä tekijänä pohjaveden likaantumisherkkyttä.

Kun metsämaan kivennäismaata paljastetaan avohakkuun jälkeisessä maan muokkauksessa, maaperä altistuu eroosiolle ja kiintoaineen huuhtoutumiselle ennen kuin kasvillisuus kehittyy uudestaan (Ahtiainen & Huttunen 1999, Palviainen ym. 2014, Piirainen 2019). Tällöin alkuaineiden ja ravinteiden huuhtoutuminen saattaa lisääntyä. Metsämaan muokkaus avohakkuun jälkeen paljastaa merkittäviä pinta-aloja kivennäismaata orgaanisen kerroksen alta, ja siinä mielessä muokkauksokkeista saatuja tuloksia voidaan osin soveltaa myös tilanteeseen, jossa maannosvyöhyke on poistettu ja kivennäismaan pintaosat ovat alttiina sadevedelle. Maanmuokkaus ulottuu nykyään korkeintaan 25 cm syvyydelle maanpinnasta, mutta aikaisemmin laajasti käytössä ollut auraus ulottui selvästi syvemmälle (Laine ym. 2019). Vaikka lisääntynyttä kemiallisten aineiden huuhtoutumista on toisaalta raportoitu, niin toisaalta metsämailla maanmuokkauksen yhteydessä paljastuneiden kivennäismaan pintojen alta on myös

raportoitu suhteellisen vähäisiä aineiden huuhtoumääriä (Piirainen ym. 2007, 2009). Metsätalouden vesiensuojeluohjeissa pohjavesialueiden tärkeys on huomioitu mm. siten, että pohjavesialueilla ei tehdä voimakkaita maan muokkauksia (Piirainen 2015).

Rauta, mangaani ja alumiini ovat podsoli- ja arenosolimaannoksissa keskeisiä alkuaineita, joiden liukoisuus ja saostuminen liittyvät maannoksen kerrosrakenteen kehittymiseen (Mälkönen & Tamminen 2003). Kalium, kalsium ja magnesium ovat keskeisiä alkali- ja maa-alkalimetalleja maaperän happamuutta vastustavan puskurikyvyn kannalta. Ne ovat myös kasvien pääravinteita. Näitä aineita vapautuu luontaisesti maannoksessa mineraalien rapautumisessa (Starr ym. 2014). Orgaanisen kerroksen poiston ja kivennäismaan rikastumiskerroksen ja pohjamaan (syvyys 30 cm maan pinnasta) paljastumisen maanpintaan on havaittu lisäävän mm. alumiinin pitoisuuksia metsämaan pintaosan maavedessä (Tanskanen & Ilvesniemi 2004). Mineraalien rapautumisnopeus myös lisääntyy vapauttaen emäsravinteita (Ca, Mg) (Lindroos & Ilvesniemi 2023). Rapautuminen on yleensä erittäin hidas prosessi vapauttamaan alkuaineita metsämaan pintaosassa (Starr & Lindroos 2006), mutta sekundääristen saostumien paljastuminen maan pintaan voi lisätä aineiden vapautumista maaveteen muutamien vuosien aikana (Tanskanen & Ilvesniemi 2004, Lindroos & Ilvesniemi 2023). Mineraalien rapautuminen on myös voimakkaampaa maannoskehityksen alkuvaiheessa esimerkiksi silloin, kun vähemmän rapautunut ja maannostunut kerros tulee maannostumis- ja rapautumisprosesseille alttiiksi (Starr & Lindroos 2006).

### **2.3. Maannoksen poiston vaikutus kivennäismaan hiileen ja tyypeen**

Metsämaan orgaaninen kerros on erityisen tärkeä hiilen kierrolle. Maaperäeläimet ja -mikrobit hajottavat kariketta, jolloin hapellisissa oloissa hiilidioksidia vapautuu osan hiilestä jäädessä enemmän tai vähemmän pysyvästi maan orgaaniseen ainekseen. Kivennäismaan orgaanisen aineksen pitoisuudet ovat murto-osa humuskerroksen pitoisuuksista ja myös hiilen koostumus poikkeaa suuresti ollen valtaosin pitemmälle hajonnutta kuin pintamaassa.

Myös typen kierron moninaisista prosesseista valtaosa on riippuvaista orgaanisesta aineesta ja siten humuskerros on niiden tärkeä ympäristö (Smolander 2019). Typen muuttuminen isokokoisten orgaanisten typpiyhdisteiden depolymerisaatioissa molekyylikooltaan pienemmiksi orgaanisiksi yhdisteiksi, aminohapoiksi ja lopulta mineralisaatioissa ammoniumtypeksi tapahtuu pääosin orgaanisessa kerroksessa. Samoin typen poistuminen lopulta ilmakehään denitrifikaatioissa dityppioksidina eli ilokaasuna ( $N_2O$ ) tarvitsee orgaanista ainetta, sillä tämänkin heterotrofisten mikrobien toiminta tarvitsee orgaanisen aineen hiiltä hiilen ja energian lähteenään. Sen sijaan nitrifikaatio, jossa ns. nitrifikaatiobakteerit pelkistävät ammoniumtypestä nitraattityppeä, ei tarvitse orgaanisia yhdisteitä. Nitrifikaatiobakteerit ovat autotrofeja ja hyödynnevät hiilidioksidia hiilen lähteenään. Siten nitrifikaatiobakteereille tarjoutuu kilpailuetu kivennäismaassa ja nitraattitypen muodostus voi olla huomattavan vilkasta, jos ammoniumtypeä on riittävästi (Smolander ym. 2000a). Ilokaasusta osa muodostuu nitrifikaation sivutuotteena.

Maannoksen poiston vaikutuksia maan hiileen ja tyypeen ei ole tietääksemme juurikaan tutkittu. Sen sijaan pelkän orgaanisen kerroksen poistamisen vaikutuksesta löytyy tutkimuksia, jotka ovat hiilen ja typen kierron orgaanisesta aineesta riippuvuuden takia osin sovellettavissa maannoksen poiston vaikutuksiin. Joissakin hakkuutähteen vaikutuksia tarkastelevissa tutkimuksissa koko orgaanisen kerroksen poisto on ollut yhtenä käsitteilynä. Samantyyppistä

kysymyksen asettelua löytyy maanmuokkausmenetelmiin liittyvissä tutkimuksissa, joissa on verrattu paljastunutta kivennäismaata, esim. laikkua muokkaamattomaan maapintaan. Lisäksi eroosioon liittyvissä tutkimuksissa löytyy yhteneväisyyksiä maannoksen poistoon. Em. tutkimuksista vain osa on tehty ilmasto- ja ympäristöolojamme vastaavissa olosuhteissa. Silti ilmiöissä lienee samankaltaisuuksia.

Maannoksen poiston vaikutuksessa huomattava merkitys on samanaikaisella elävän kasvillisuuden poistolla. Maahan ei tule uutta kariketta eikä myöskään juurieritteitä, jotka ovat helposti hajotettavia. Toisaalta kasvillisuuden typen ja muiden ravinteiden otto loppuu. Ennen kuin uutta kariketta tulee kivennäismaan pintaan, typen (ja hiilen) ainoa uusi lähde on laskeuma. Kasvillisuuden poistaminen muuttaa maan tilannetta ja esim. eri typpimuotojen runsautta myös maan ilmavuuden muuttumisen takia. Runsaasti typpeä pidättävän mykorritsa-verkoston rikkoutuminen on myös iso muutos maan typpitilanteelle. Orgaanisen kerroksen poisto äärevöittää maan lämpötilaa. Tiivisrakenteisessa maassa myös veden seisomisella on suuri merkitys lisääntyneen hapettomuuden takia. Karkearakenteisilla harjuilla tällä ei liene kuitenkaan merkitystä, joten sitä ei tässä käsitellä. Sen sijaan suurentuneilla vesimäärillä on merkitystä maan hiileen ja typpeen huuhtoutumisen lisääntymisen takia.

Orgaanisen kerroksen poisto on useiden erilaisissa oloissa tehtyjen tutkimusten mukaan vähentänyt kivennäismaan hiilen ja typen pitoisuuksia ja hiilivarastoa (Piatek & Allen 1999, Li ym. 2003, Powers ym. 2005, Geissen ym. 2013). Metsämaan muokkaustutkimukset ovat osoittaneet yhdenmukaisesti em. havaintojen kanssa, että hiilidioksidipäästöt ovat olleet aina alhaisia paljastuneesta kivennäismaasta (Strömngren & Mjöfors 2012, Mjöfors ym. 2015, Strömngren ym. 2017), mikä kertoo hajotettavan orgaanisen hiilen vähenemisestä. Vastaavaa vähäistä hiilen mineralisaatiota on havaittu muokatun metsämaan mättäiden päällyskivennäismaassa (Smolander ym. 2000b). Myös vajoveden nitraattitypen pitoisuuksien on raportoitu kohoavan paljastuneessa kivennäismaassa (Sandborg 1993b).

Maaperän hiili- ja typpipitoisuuden lisäksi orgaanisen kerroksen poiston vähentävä vaikutus on havaittu mikrobiomassan hiilen ja typen määrissä ja mikrobiaktiivisuuksissa (Jordan ym. 2000, Li ym. 2004, Geissen ym. 2013) ja kasveille saatavissa olevan typen tai muiden ravinteiden määrässä (Jordan ym. 2000, Powers ym. 2005). Merkittävää vaikutusta ei kuitenkaan aina ole havaittu (Piatek & Allen 1999, Li ym. 2003, Mariani ym. 2006). Powers ym. (2005) totesivatkin, että riippuu suuresti kohteesta, miten paljon orgaanisen kerroksen poisto pienentää kivennäismaan hiili- ja typpipitoisuutta ja mineralisoitavissa olevan typen määrää. Yleisesti ottaen orgaanisen kerroksen poistolle alttiimpia ovat karkearakenteiset, vähäravinteiset ja heikosti puskuroidut hiekkamaat, kun taas hienompijakeisilla mailla muutokset ovat pienempiä (Slesak ym. 2017). Poikkeuksen muodostavat kuitenkin liettymiselle ja tiivistymiselle alttiit hienojakoiset maat, esim. hiesu. Osassa tutkimuksista vaikutus johtuikin osaksi tai jopa kokonaan maan tiivistymisestä orgaanisen kerroksen poiston seurauksena, ei niinkään itse poistosta. Harjumaaperällämme tiivistyminen ei ole kuitenkaan oleellista ainakaan lyhyellä aikavälillä.

Kokonaishiilen ja liukoisen orgaanisen hiilen pitoisuuden pienentymisen lisäksi myös sen laatu muuttuu. Orgaanisen kerroksen poistamisen seurauksena havaittiin kivennäismaassa vähemmän pysyväisluontoista aromaattista hiiltä, joka oli peräisin esim. ligniinistä (Huang ym. 2010). Orgaanisen aineen laadun muuttuminen määrän lisäksi on tärkeä tiedostaa, sillä orgaanisen aineen koostumus vaikuttaa sen absorptio-ominaisuuksiin ja reagointiin esim. metallien kanssa. Lisäksi liukoisen orgaanisen aineen koostumus voi vaikuttaa maan happamuustilaan, mikä puolestaan vaikuttaa esim. metallien liukoisuuteen.

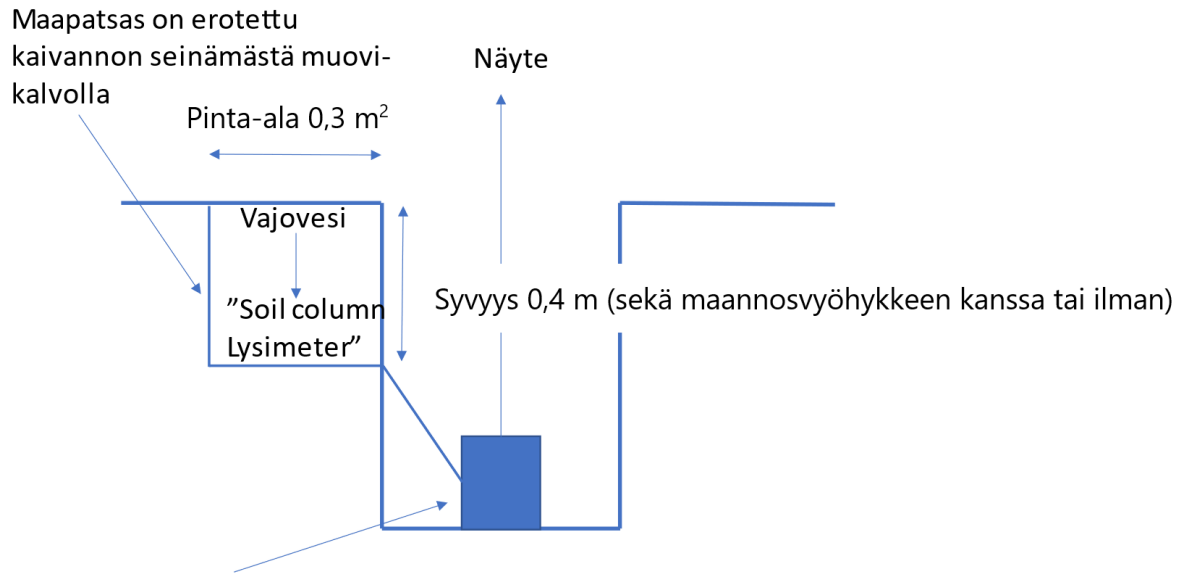
### 3. Aineisto ja menetelmät

Kokeellisessa osassa toteutettiin kenttätutkimus kolmella alueella (Joensuu, Lapinjärvi, Vuonteenharju). Kaikki kohteet olivat mäntyä kasvavia kankaita, joiden puusto oli varttunutta. Joensuun karun kankaan metsätyyppi oli jäkälätyyppi (CIT, Cajander 1949), missä aluskasvillisuus koostui jäkälästä ja kanervasta, ja kangashumuskerros oli hyvin ohut. Lapinjärven ja Vuonteenharjun kuivahkon kankaan metsätyyppi oli puolukkatyyppi (VT, Cajander 1949), missä aluskasvillisuus koostui puolukasta ja mustikasta. Maannoksen orgaaninen pintakerros oli voimakkaimmin kehittynyt Lapinjärven kohteella, missä humuskerros oli selvästi paksuin verrattuna Vuonteenharjun ja Joensuun kohteisiin. Lapinjärven ja Vuonteenharjun kohteilla pintakasvillisuus oli runsaampaa kuin Joensuun kohteella, joka oli erittäin karu ja kuiva.

Kaikkien kohteiden maannostyyppi oli Arenosol (IUSS Working Group WRB 2006), mikä on heikosti kehittynyt hiekkaan ja soraan syntynyt maannostyyppi (Mälkönen & Tamminen 2003, Tamminen & Tomppo 2008). Arenosolissa on kangasmaan kasvillisuudesta syntynyt orgaaninen humuskerros (O-horisontti). Sen alapuolisessa kivennäismaassa esiintyvät huuhtoutumiskerros (E-horisontti), rikastumiskerros (B-horisontti), vaihettumisvyöhyke (BC-horisontti) ja muuttumaton pohjamaa (C-horisontti), mutta nämä kerrokset eivät ole kehittyneet arenosolissa niin voimakkaiksi kuin Suomen yleisimmässä metsämaiden maannostyypissä podsoli-maannoksessa (Tamminen & Tomppo 2008). Hyvin kehittyneessä maannoksessa huuhtoutumiskerros on hyvin vaalean harmaan ja rikastumiskerros tiivis ja punaruskean värinen. Tutkimuskohteiden Arenosol-maannoksissa kaikki edellä mainitut kerrokset ovat havaittavissa, mutta eivät selvästi kehittyneinä. Kaikkien tutkimuskohteiden maalaji oli kivetön lajittunut hiekka.

Kenttätutkimuksessa maannosvyöhyke säilytettiin kontrollikäsitelyssä ja poistokäsittelyssä maannosvyöhyke poistettiin pohjamaahan (n. 40–50 cm maan pinnasta) saakka. Käsitelyruudut olivat pienialaisia (0,30 m<sup>2</sup>), ja ruuduilta niiden läpi valuva vajo-vesi ohjattiin maan sisään n. 0,4 m syvyydelle asennettuun maakolonnilysimetriin (Lindroos ym. 2016, Kuva 2). Käsitelyjä rakennettiin kullekin tutkimuskohteelle 2 koeruutua maannosvyöhykkeen kanssa (kontrolli 1 ja 2) ja 2 koeruutua, joiden päältä maannosvyöhyke oli poistettu ja sen tilalle laitettu muuttumatonta pohjamaata (poisto 1 ja 2) (Kuva 3).

Lysimetri asennettiin koeruudun alle siten, että jokainen WRB-maannosluokituksen (IUSS Working Group WRB 2006) mukainen geneettinen maannoskerros (O-, E-, B-, BC-, C-horisontti) erotti varovasti maaprofiilista ja pidettiin erillään ennen takaisin maahan laittamista. Maaprofiilikaivanto, mistä em. kerrokset oli erotettu, vuorattiin muovikelmulla ja kaivannon pohjalle asennettiin keruukouru. Kontrollikäsitelyssä maannoskerrokset siirrettiin takaisin alkuperäiselle paikalleen maaprofiilissa. Orgaaninen kerros ja pintakasvillisuus pyrittiin pitämään mahdollisimman häiriintymättömänä. Poistokäsittelyssä kaivanto täytettiin pohjamaalla samaan korkeuteen kuin kontrollikäsitelyn maapinta. Tämän jälkeen profiiliin/lysimetrin seinämä suljettiin ja tuettiin puurakenteella. Vajovesinäytteet kerättiin näytesäiliöihin, jotka olivat sijoitettu kaivantoon maanpinnan alapuolelle (Kuva 2). Näytesäiliöt oli suljettu kannella ja suojattu vanerilevyillä sateelta ja auringon valolta. Näin pyrittiin estämään haihduntaa säiliöistä (Kuva 3).



Näytesäiliö kaivannon pohjalla viileässä ja pimeässä

**Kuva 2.** Tässä työssä käytetty vajovesilysimetreihin perustuva koejärjestely.



**Kuva 3.** Kuva koejärjestelystä. Kuva: Markku Rantala, Luke.

Lysimetrien asentaminen häiritsee maannosta aina jonkin verran lysimetrityyppistä riippumatta (Derome ym. 2001), mutta tässä käytettyjen lysimetrien on aiemmin havaittu asettuvan normaaliin maaperän olosuhteita vastaavaan tilaan suhteellisen nopeasti ja tuottavan vertailukelpoisia tuloksia kauemmin maassa olleisiin kansainvälisissä seurantatutkimuksissa käytettyihin lysimetrityyppisiin nähden (Derome ym. 2002, Lindroos ym. 2016). Sekä kontrolliin että maannoksen poistoon voi vaikuttaa kuitenkin se, että niihin on siirretty maata. Kontrolliruuduilla maannoshorisontit ensin irrotettiin maasta ja laitettiin lysimetriin takaisin. Poistokäsittelyssä maannosvyöhykkeen tilalle siirrettiin syvemmältä (> 50 cm syvyydeltä) pohjamaata.

Lysimetrit rakennettiin alueille touko/kesäkuussa 2023 maan ollessa sula. Vesinäytteet kerättiin noin kerran kuukaudessa heinä – marraskuussa. Vesinäytteet tuotiin Luken Viikin laboratorioon Helsinkiin. Vesinäytteitä tuli 50 kappaletta.

Näytteet suodatettiin laboratoriossa membraanisuodattimilla (0,45 µm) ja kestävästi happokäsittelyllä. Vajovesinäytteistä tehtiin metallien (Cu, Ni, Fe, Mn, Cd, Pb, Zn) ja ravinteiden (Ca, Mg, K) pitoisuuksien määrittely ICP-laitteella. Lisäksi määritettiin vajoveden pH, liukoinen orgaaninen hiili (DOC eli TOC suodatetusta näytteestä), Ntot, NH<sub>4</sub>-N ja NO<sub>3</sub>-N.

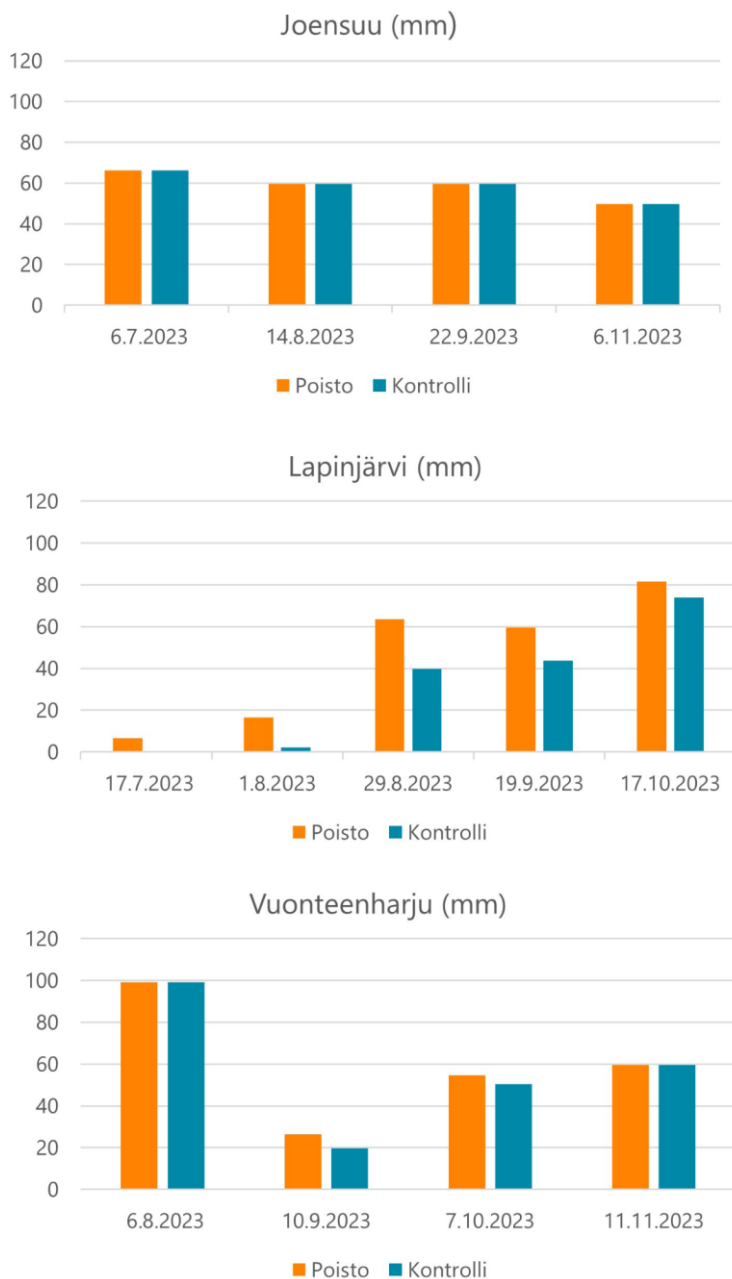
Maannoksen poiston vaikutusta vajoveden koostumukseen selvitettiin alkuaineiden pitoisuuksien perusteella. Lisäksi laskettiin alkuaineille vajoveden sisältämä massa pinta-alaa kohti koko mittausjakson aikana ilmoitettuna keskimäärin kuukautta kohden (mg/m<sup>2</sup>/kuukausi). Tämä lasketaan lysimetriin kertyneen vesimäärän ja alkuaineen pitoisuuden yhdistelmänä, kun mittausjakson pituus ja lysimetrin pinta-ala tunnetaan. Kullekin tutkimuskohteelle laskettiin summa kahden ruudun (toiston) läpi veden mukana kulkeutuneesta määrästä. Tutkimuskohteiden tuloksista laskettiin koko aineiston keskiarvo kontrollille ja poistolle, mikäli pinta-alakohtainen tulos voitiin laskea kaikille kohteille.

Edellä kuvattu laskenta noudattaa YK:n metsien Yhdenmetytyn Seurannan ohjekirjaa (UN-ECE Integrated Monitoring Manual protocol, IM Manual 1998). Kyseinen yleiseurooppalainen seurantajärjestelmä kattaa pienten valuma-alueiden laskeuman, metsikkösadannan, maaveden, vajoveden ja valuntavesien tilan seurannan, ja kyseistä menetelytapaa on noudatettu laajasti seurantatutkimuksissa ja tieteellisissä julkaisuissa. Tätä menetelmää on käytetty myös Suomessa useissa metsämaita koskevissa vesitutkimuksissa, esimerkiksi raskasmetallien taseiden seurantatutkimuksissa (Ukonmaanaho ym. 2001, Ukonmaanaho 2001), ja vajoveden mukana kulkeutuvien typen eri muotojen sekä rikin, fosforin ja emäskationien pinta-alakohtaisten määrien laskennassa liittyen hakkuiden vaikutukseen ravinteiden huuhtoutumiseen (Piirainen ym. 2002, Piirainen 2002).

## 4. Tulokset

### 4.1. Maannoksen ja sen poiston vaikutus vajoveden määrään

Maannoksen poisto lisäsi maassa alaspäin valuvan veden määrää erityisesti kesällä Lapinjärvellä. Vuonteenharjulla ensimmäistä kesän näytteenottokertaa edelsi runsas sadanta ja vajovesimäärät olivat sekä maannoksen poistossa ja kontrollissa suuria, mutta maannoksen poisto lisäsi vajoveden määrää toisella ja kolmannella näytteenottokerralla. Syksyllä maannoksen vajoveden määrää vähentävä vaikutus väheni tai loppui sekä Lapinjärvellä että Vuonteenharjulla. Joensuun ohuen humuksen omaavalla kohteella maannoksella ei havaittu olevan vaikutusta vajoveden määrään (Kuva 4).



**Kuva 4.** Vajoveden määrä näytteenottokerroittain tutkimuskohteilla.

## 4.2. Kivennäismaan paljastumisen vaikutus ravinteiden ja alkuaineiden huuhtoutumiseen

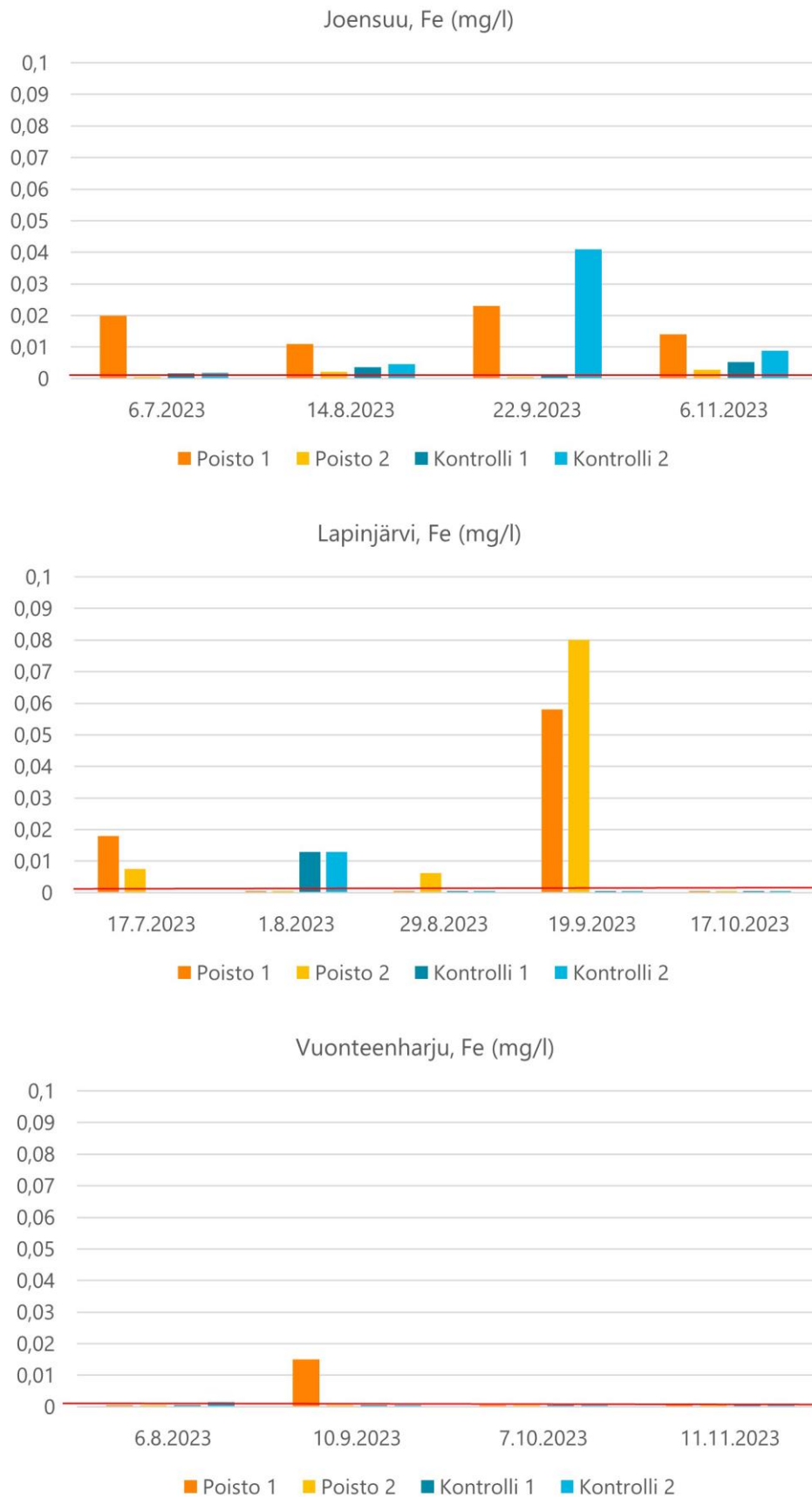
### Rauta (Fe) ja mangaani (Mn)

Joensuussa korkeimpia Fe-pitoisuuksia esiintyi kaikilla näytteenottokerroilla toisella poistoruudulla (Poisto 1) sekä yhdellä näytteenottokerralla toisella kontrolliruudulla (kontrolli 2). Lapinjärvellä selvästi muita näytteenottokertoja korkeammat Fe-pitoisuudet esiintyivät syyskuun näytteenottokerralla molemmilla poistoruuduilla. Vuonteenharjulla esiintyi Poisto 1 -ruudulla syyskuussa muita havaintoja korkeampi Fe-pitoisuus (Kuva 5).

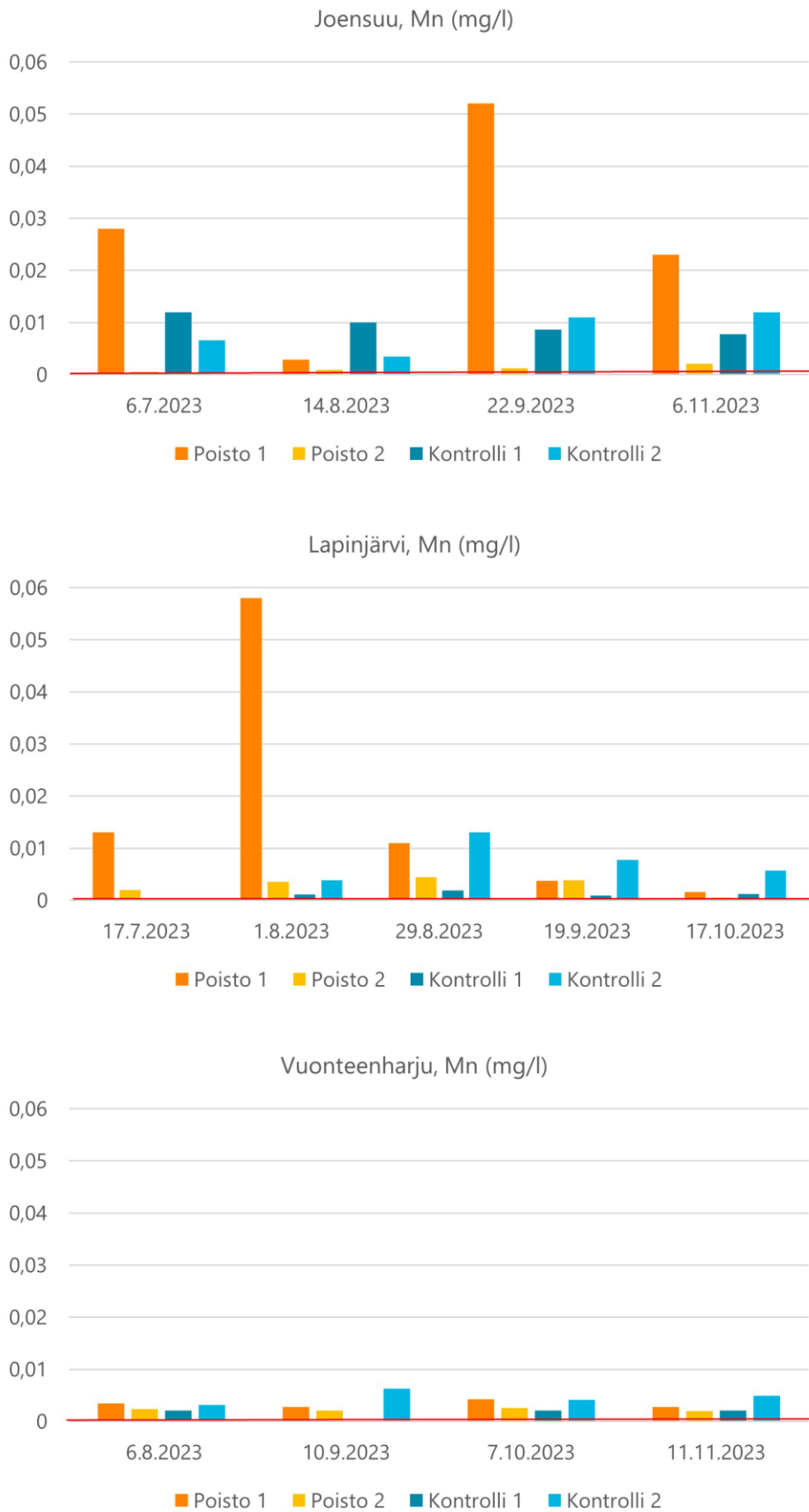
Joensuussa esiintyi kolmella näytteenottokerralla muita havaintoja korkeampia Mn-pitoisuuksia toisella poistoruudulla (Poisto 1). Lapinjärvellä esiintyi yhdellä näytteenottokerralla muita havaintoja korkeampi Mn-pitoisuus toisella poistoruudulla (Poisto 1). Vuonteenharjulla Mn-pitoisuudet olivat matalia (Kuva 6).

Vajoveden sisältämä Fe-määrä ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{kuukausi}$ ) oli poistoruuduilla suurempi kuin kontrolliruuduilla Joensuun ja Lapinjärven kohteilla (Kuva 7). Mn-määrä ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{kk}$ ) oli suurempi poistoruuduilla kuin kontrolliruuduilla kaikilla kohteilla (Kuva 7).

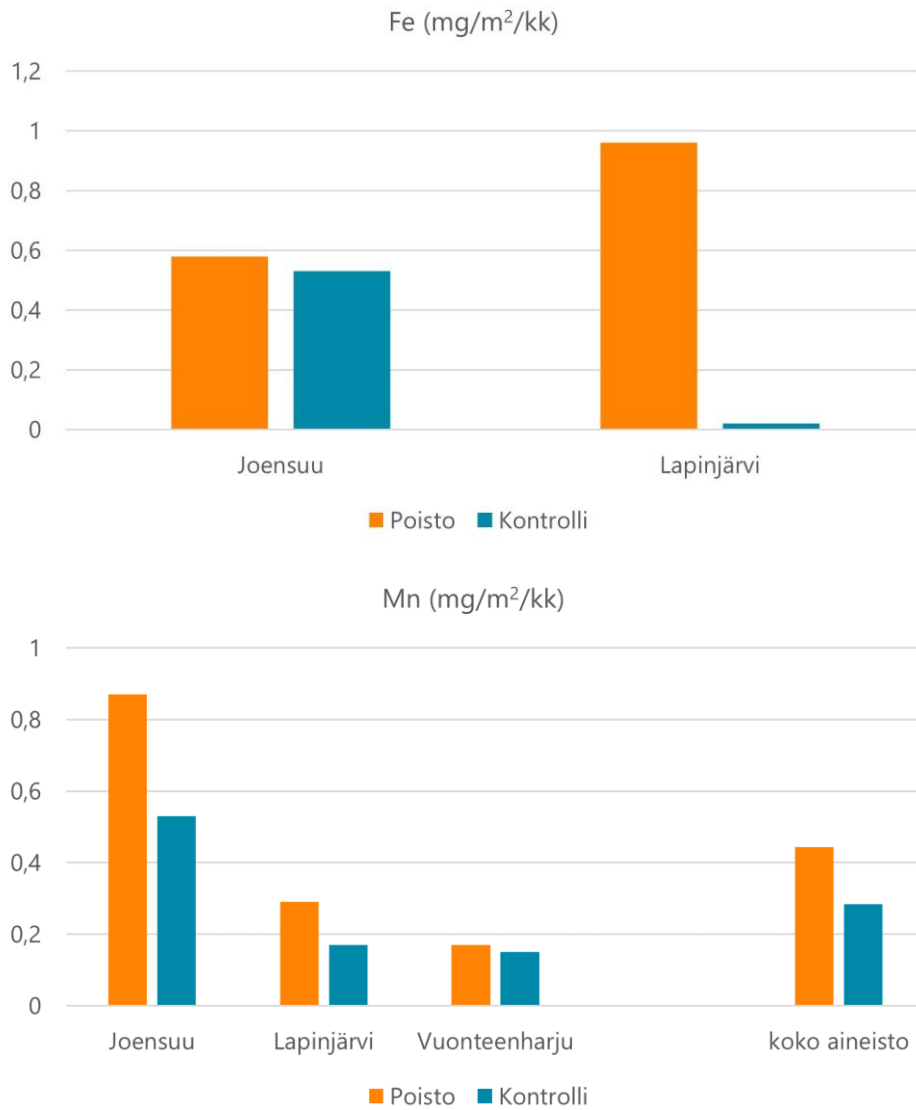
Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 87/2024



**Kuva 5.** Vajoveden Fe-pitoisuus eri kohteilla ja näytteenottokerroilla. Määrittysraja 0,001 mg/l merkitty punaisella viivalla.



**Kuva 6.** Vajoveden Mn-pitoisuus eri kohteilla ja näytteenottokerroilla. Määrittysraja 0,0002 mg/l merkitty punaisella viivalla



**Kuva 7.** Vajoveden sisältämä Fe- ja Mn-määrä (mg/m<sup>2</sup>/kuukausi) tutkimuskohteittain sekä koko aineiston keskiarvona. Vuonteenharjulla pääosa Fe-havainnoista oli alle määrittämissä rajoissa, ja pinta-alakohtaista arvoa ei ole esitetty.

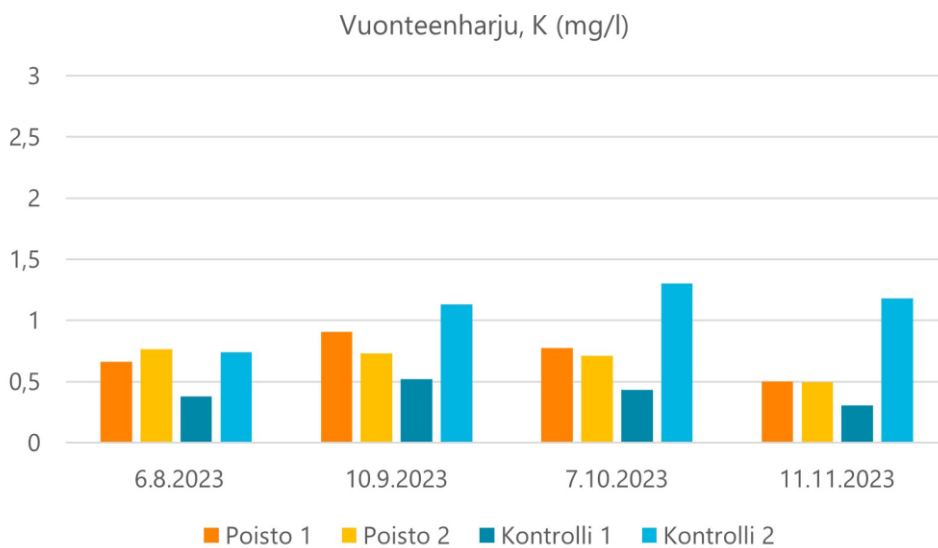
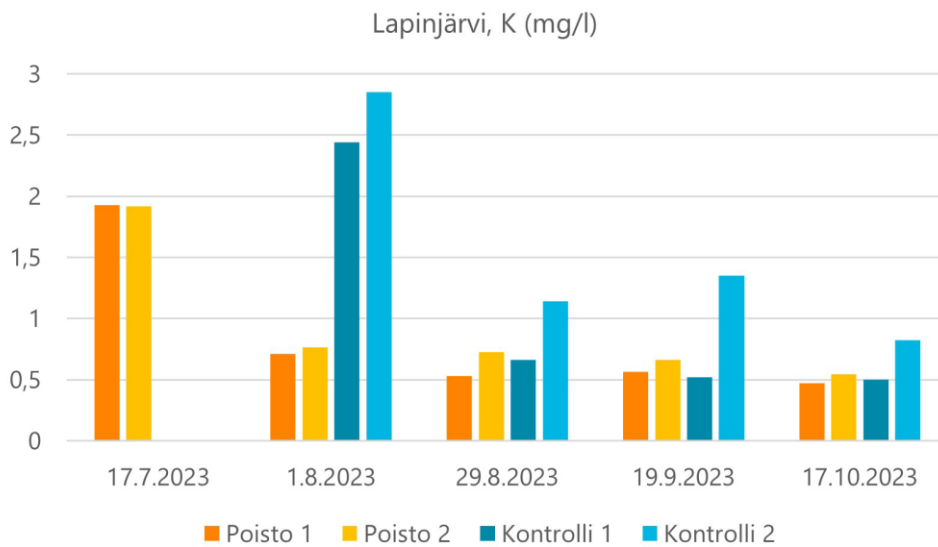
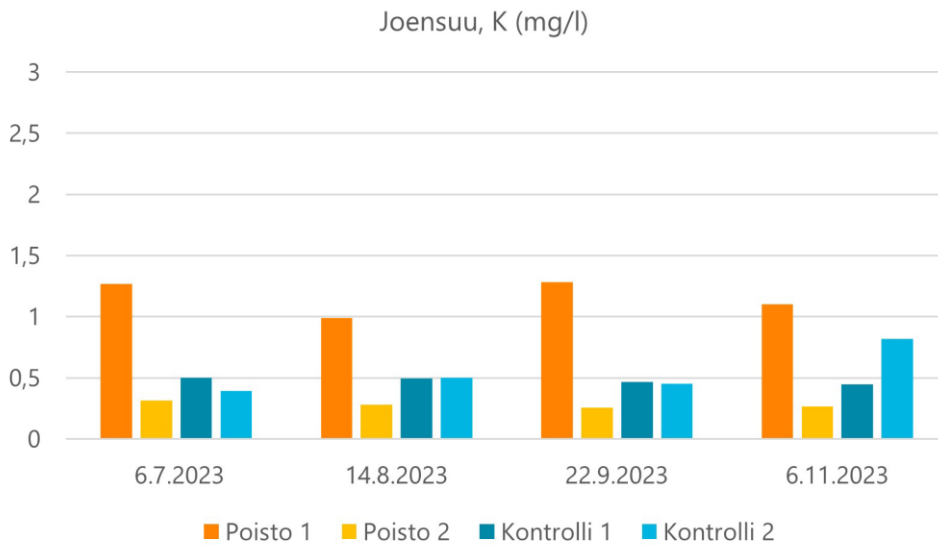
### **Kalium (K), kalsium (Ca) ja magnesium (Mg)**

Joensuussa korkeimmat K-pitoisuudet mitattiin poisto 1-ruudulla kaikilla näytteenottokerroilla. Lapinjärvellä ensimmäisellä näytteenottokerralla mitattiin korkeita K-pitoisuuksia molemmilla poistoruuduilla, ja toisella näytteenottokerralla molemmilla kontrolliruuduilla. Vuonteenharjulla poistoruutujen K-pitoisuudet olivat korkeampia kaikilla näytteenottokerroilla verrattuna kontrolli 1-ruutuun, mutta kontrolli 2-ruudulla mitattiin kaikkein korkeimmat pitoisuudet syys-, loka- ja marraskuussa (Kuva 8).

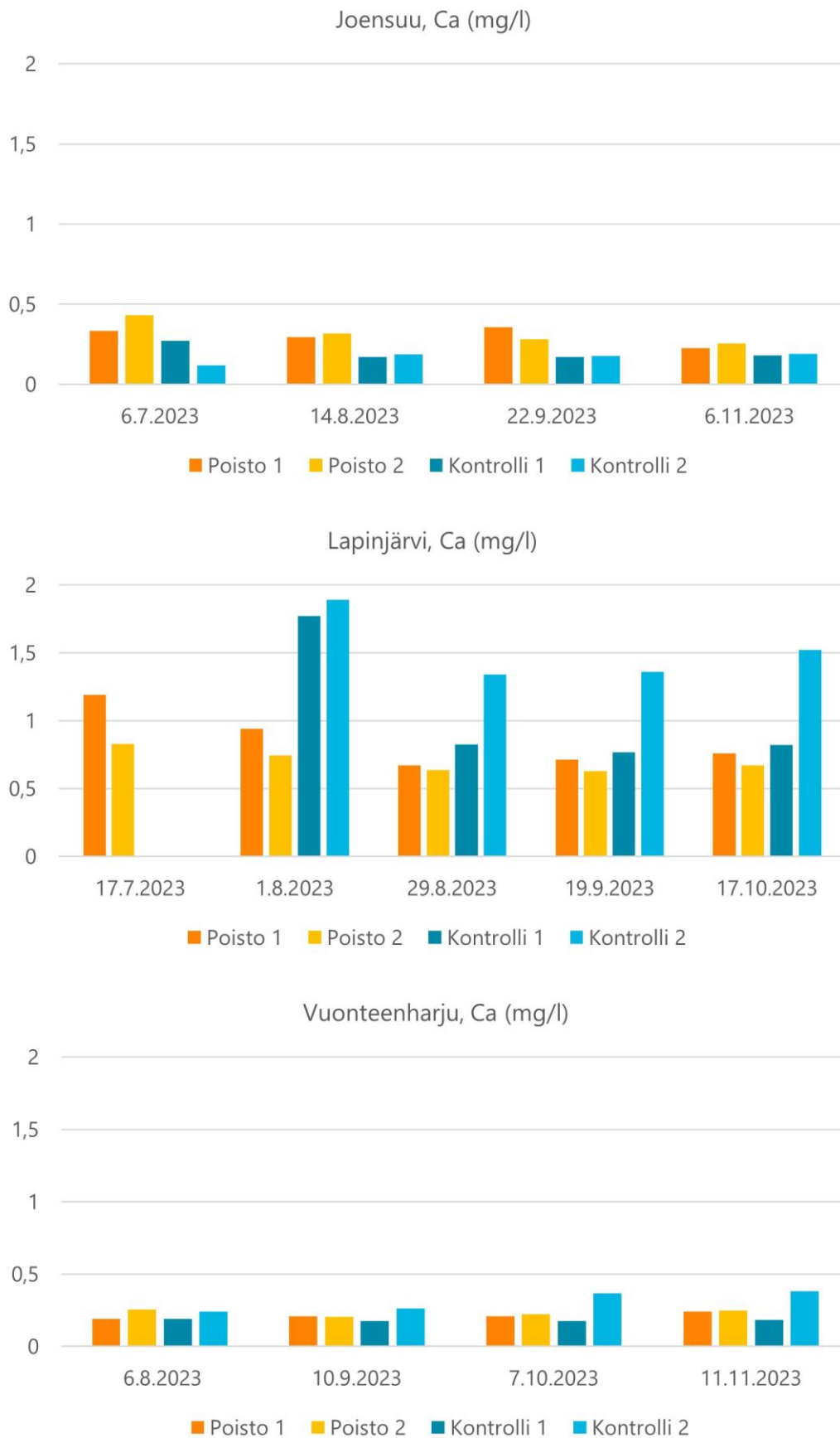
Joensuussa Ca-pitoisuudet olivat hieman korkeampia molemmilla poistoruuduilla verrattuna kontrolliruutuihin kaikilla näytteenottokerroilla. Lapinjärvellä korkeimmat Ca-pitoisuudet mitattiin kontrolli 2-ruudulla. Vuonteenharjulla Ca-pitoisuudet olivat muutoin varsin samanlaisia poisto- ja kontrolliruuduilla, mutta kahdella viimeisellä näytteenottokerralla pitoisuudet olivat korkeimmat kontrolli 2-ruudulla (Kuva 9).

Joensuussa Mg-pitoisuudet olivat pääasiassa samansuuruisia kaikilla ruuduilla. Lapinjärvellä ja Vuonteenharjulla korkeimmat Mg-pitoisuudet mitattiin toisella kontrolliruuduista (molemmilla kontrolli 2) (Kuva 10).

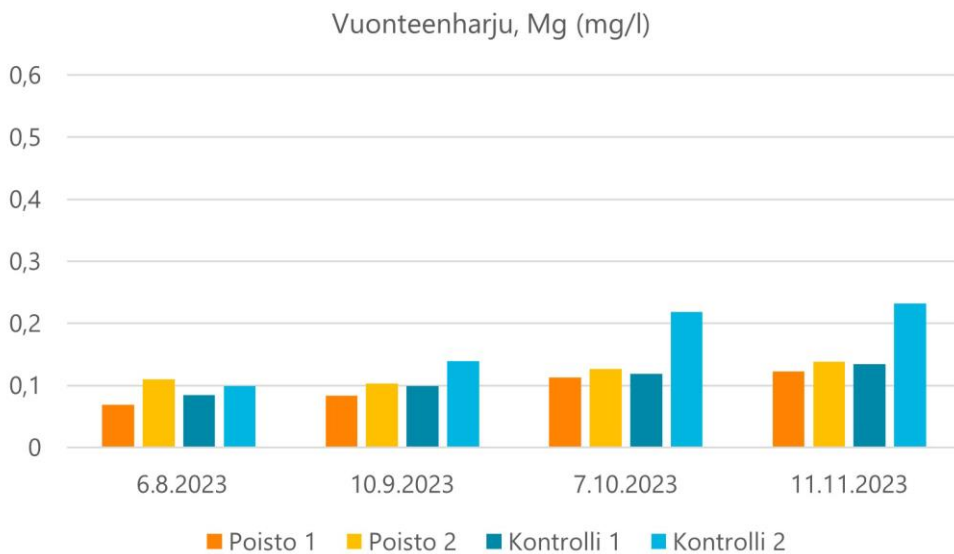
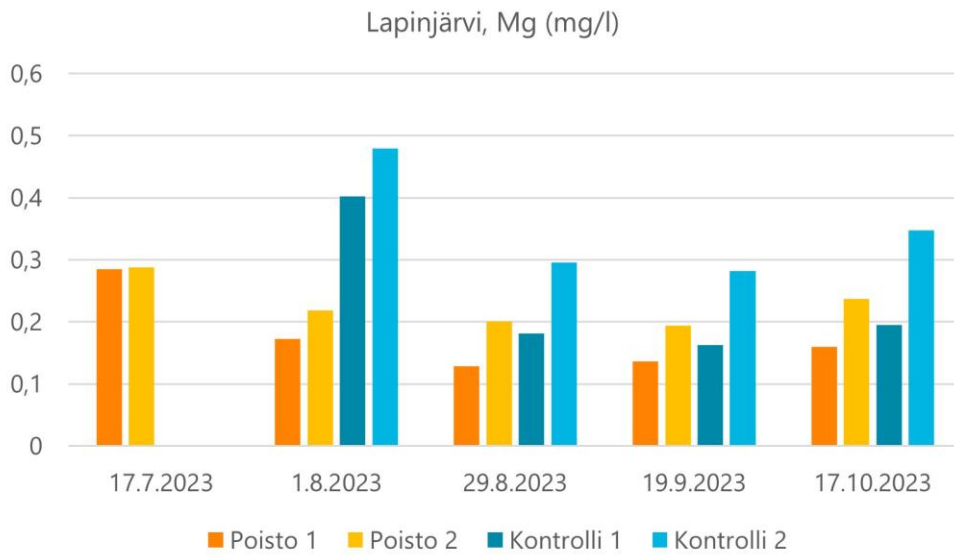
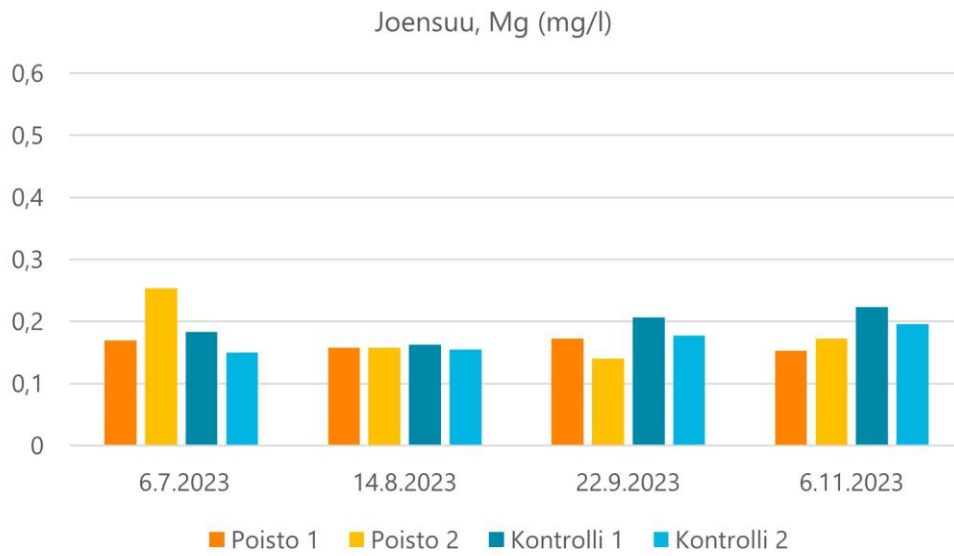
Vajoveden K-määrät ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{kuukausi}$ ) olivat suurempia poistoruuduilla kaikilla kohteilla. Maannoksen poiston vaikutus Ca-määriin sen sijaan vaihteli alueittain. Vajoveden sisältämään Mg-määrään maannoksen poistolla ei näyttänyt olevan vaikutusta, vaan tulokset olivat samansuuruisia poisto- ja kontrolliruuduilla (Kuva 11).



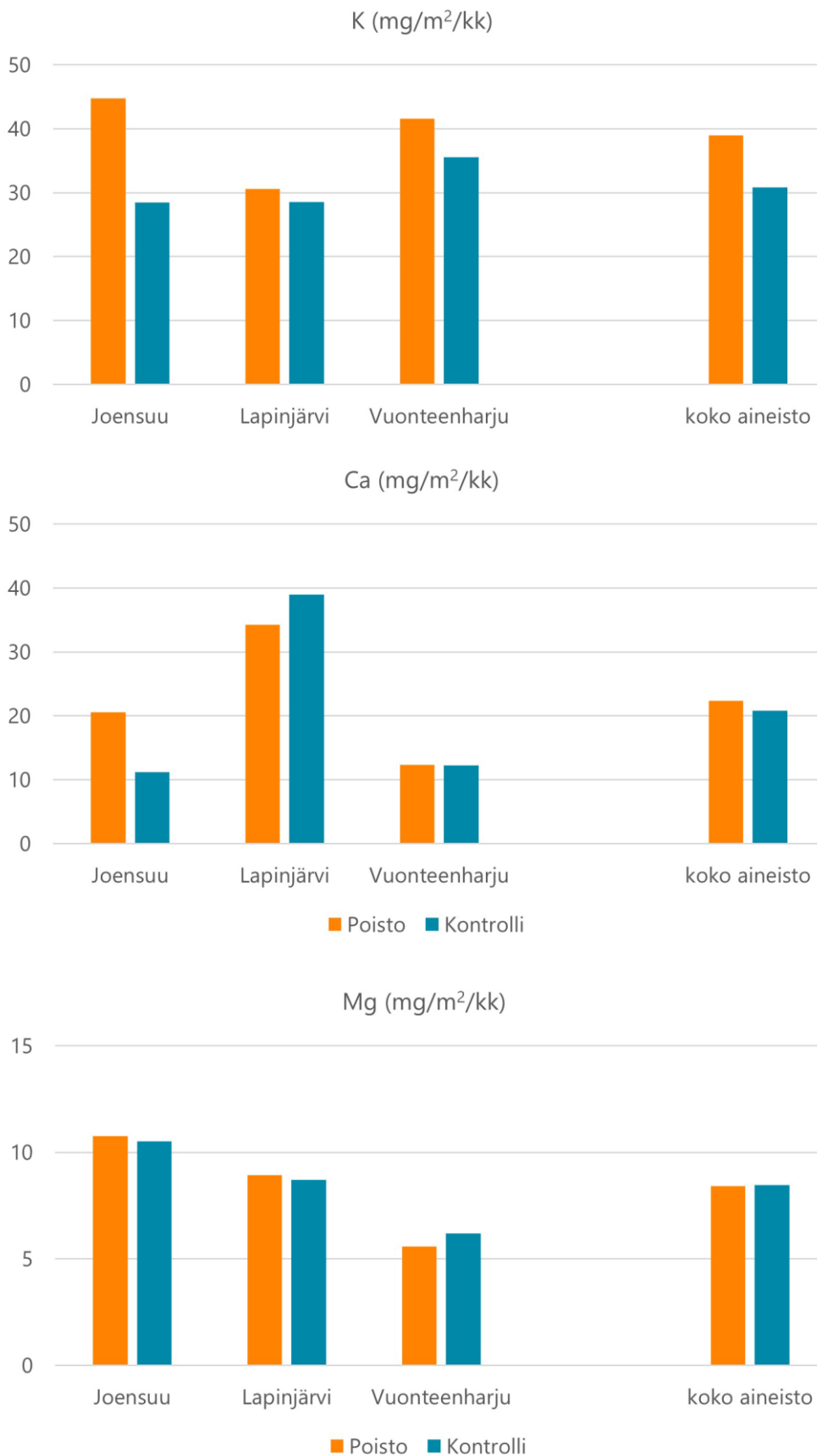
**Kuva 8.** Vajoveden K-pitoisuus eri kohteilla ja näytteenottokerroilla.



**Kuva 9.** Vajoveden Ca-pitoisuus eri kohteilla ja näytteenottokerroilla.



**Kuva 10.** Vajoveden Mg-pitoisuus eri kohteilla ja näytteenottokerroilla.



**Kuva 11.** Vajoveden sisältämä K-, Ca- ja Mg-määrä (mg/m<sup>2</sup>/kuukausi) tutkimuskohteittain sekä koko aineiston keskiarvona.

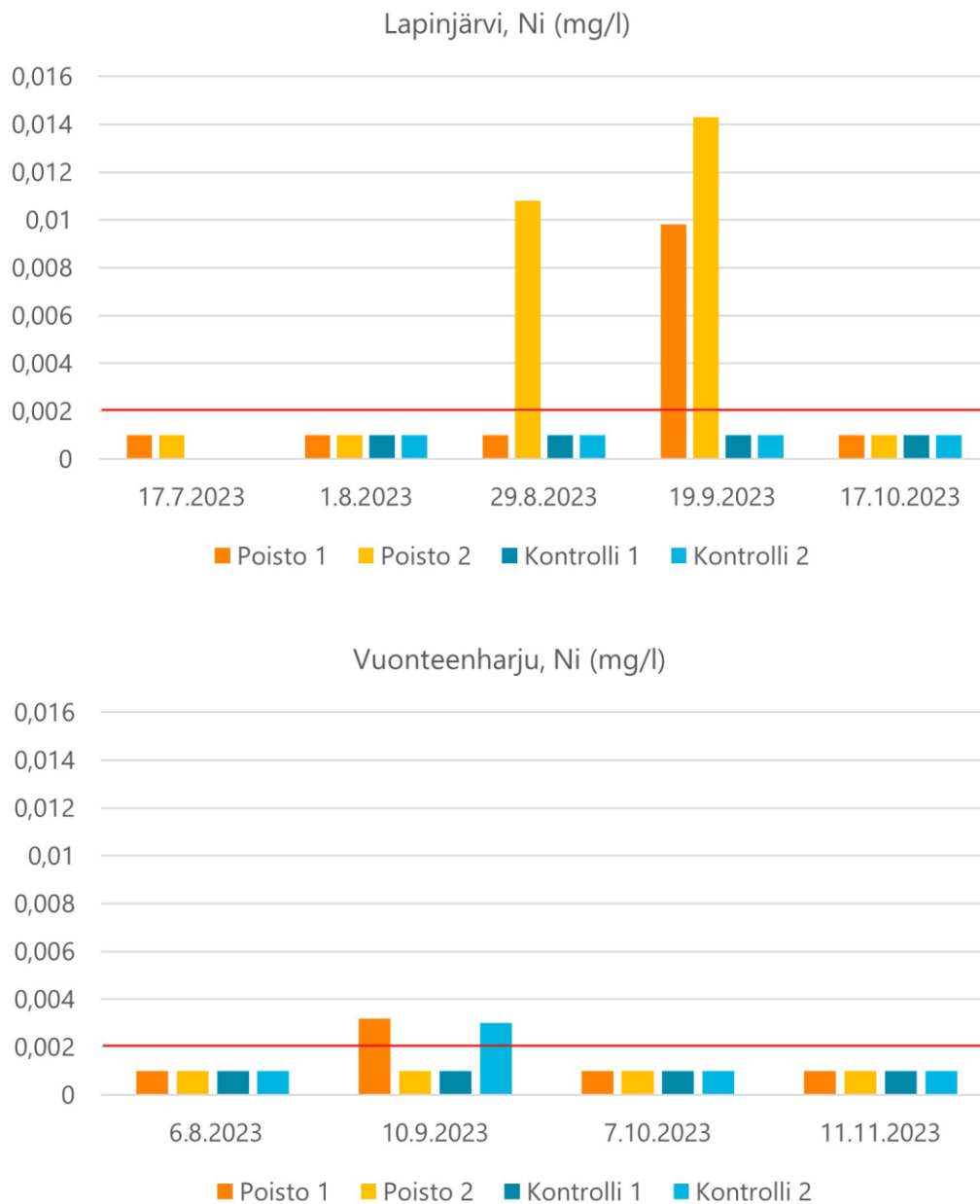
### **Nikkeli (Ni), sinkki (Zn), kupari (Cu), kadmium (Cd) ja lyijy (Pb)**

Lapinjärvellä esiintyi korkeita Ni-pitoisuuksia poisto 2-ruudulla elokuussa ja syyskuussa sekä poisto 1-ruudulla syyskuussa. Ni-pitoisuudet ylittivät määrittäjärajaa Vuonteenharjulla vain syyskuun näytteenottokerralla poisto 1 ja kontrolli 2-ruuduilla (Kuva 12). Joensuussa kaikki Ni-havainnot olivat alle määrittäjärajaa, joten kuvaa havainnoista ei ole esitetty.

Joensuussa Cu-pitoisuudet olivat yleisesti matalia, ja samansuuruisia pitoisuuksia esiintyi sekä poisto- että kontrolliruuduilla. Lapinjärvellä esiintyi muita havaintoja korkeampia Cu-pitoisuuksia molemmilla poistoruuduilla ensimmäisellä näytteenottokerralla ja molemmilla kontrolliruuduilla toisella kerralla. Vuonteenharjulla esiintyi yksi korkea Cu-pitoisuus poisto 1-ruudulla toisella näytteenottokerralla ja muutoin pitoisuudet olivat matalia, alle määrittäjärajaa tai hieman sen yli (Kuva 13).

Kaikki Cd- ja Pb-pitoisuudet olivat alle määrittäjärajojen (Cd: <0,0007 mg/l, Pb: <0,005 mg/l) sekä maannoksen poisto- että kontrolliruuduilla. Myös kaikki Zn-pitoisuudet olivat alle määrittäjärajaa (Zn: 0,005 mg/l) Vuonteenharjulla ja Joensuussa. Myös Lapinjärvellä suurin osa pitoisuuksista oli alle määrittäjärajaa, ja korkeimmatkin Zn-pitoisuudet kontrolliruuduilla 1 ja 2 toisella näytteenottokerralla olivat matalia (<0,015 mg/l). Matalien ja alle määrittäjärajojen olevien pitoisuuksien vuoksi kuvia ei ole esitetty.

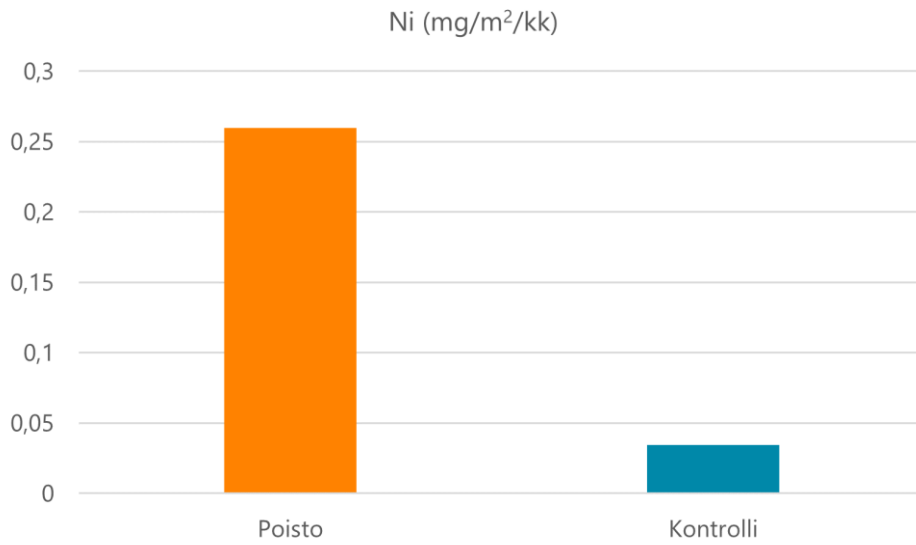
Vajoveden sisältämä Ni-määrä (mg/m<sup>2</sup>/kuukausi) oli Lapinjärven kohteella suurempi poistoruuduilla verrattuna kontrolliin (Kuva 14). Muilla kohteilla Ni-pitoisuus oli matala sekä maannoksen poisto- että kontrolliruuduilla, eikä pinta-alakohtaista laskentaa tehty arvojen ollessa tyypillisesti alle määrittäjärajaa tai hyvin matalia. Vajoveden sisältämä Cu-määrä (mg/m<sup>2</sup>/kuukausi) oli Joensuun kohteella pienempi, Lapinjärvellä lähes samansuuruisen ja Vuonteenharjulla suurempi poistoruuduilla verrattuna kontrolliin (Kuva 15).



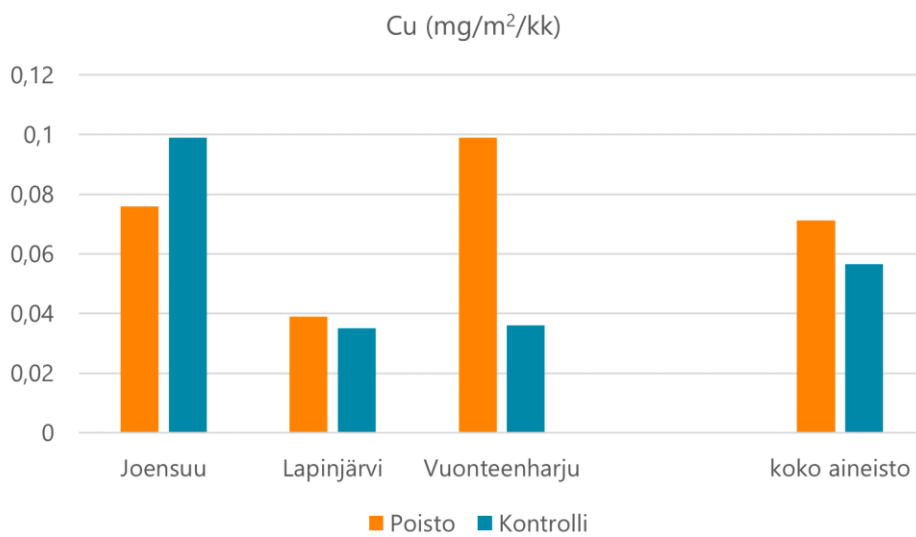
**Kuva 12.** Vajoveden Ni-pitoisuus eri kohteilla ja näytteenottokerroilla. Määrittäysraja 0,002 mg/l (punainen viiva), tulos alle määrittäysrajan on esitetty 0,5 x määrittäysraja. Joensuun kohteella kaikki arvot olivat alle määrittäysrajan eikä kuvaa ole esitetty.



**Kuva 13.** Vajoveden Cu-pitoisuus eri kohteilla ja näytteenottokerroilla. Määrittysraja 0,001 mg/l (punainen viiva), tulos alle määrittysrajan on esitetty 0,5 x määrittysraja.



**Kuva 14.** Vajoveden sisältämä Ni-määrä Lapinjärvellä (mg/m<sup>2</sup>/kuukausi).

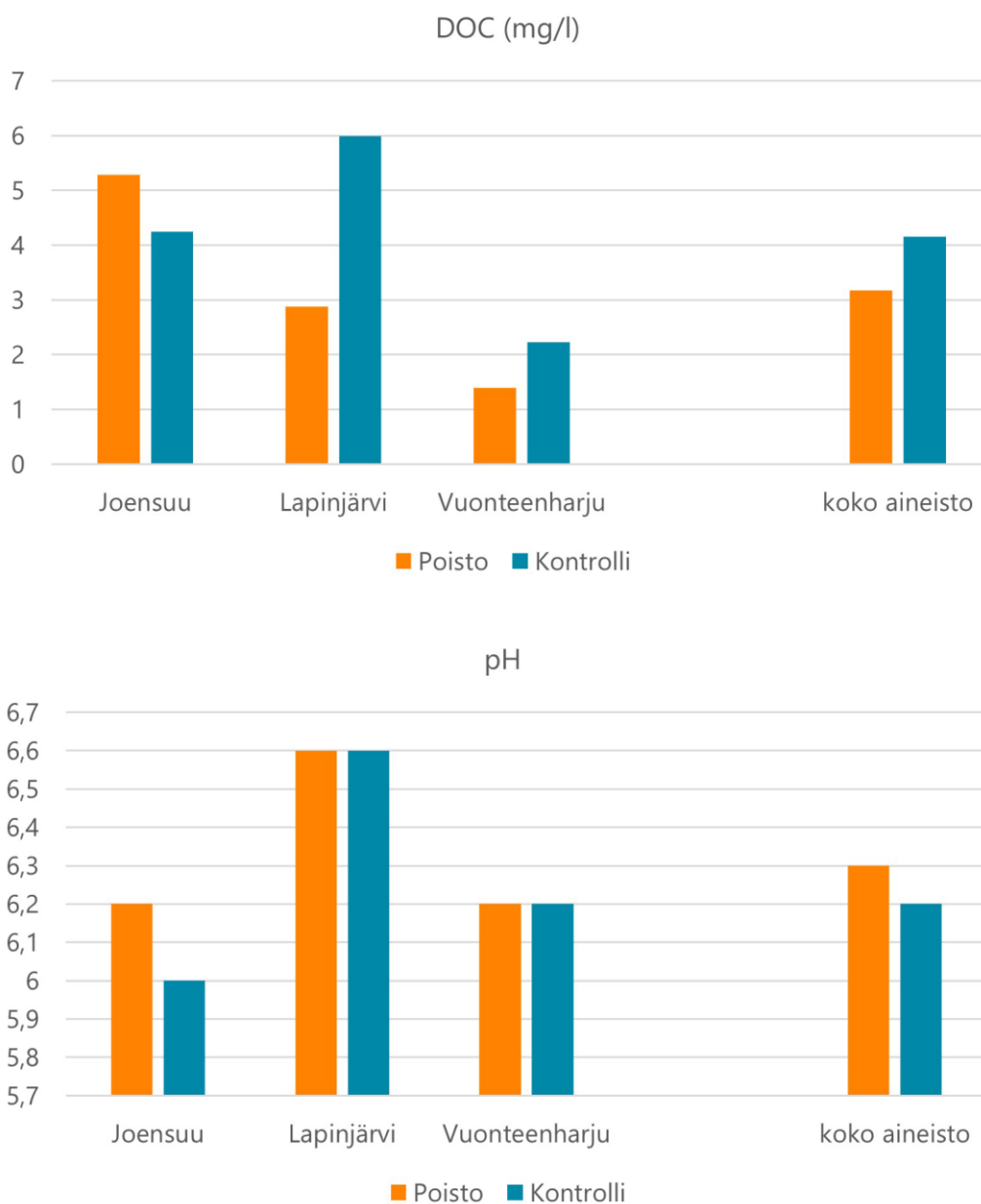


**Kuva 15.** Vajoveden sisältämä Cu-määrä (mg/m<sup>2</sup>/kuukausi) tutkimuskohteittain sekä koko aineiston keskiarvona.

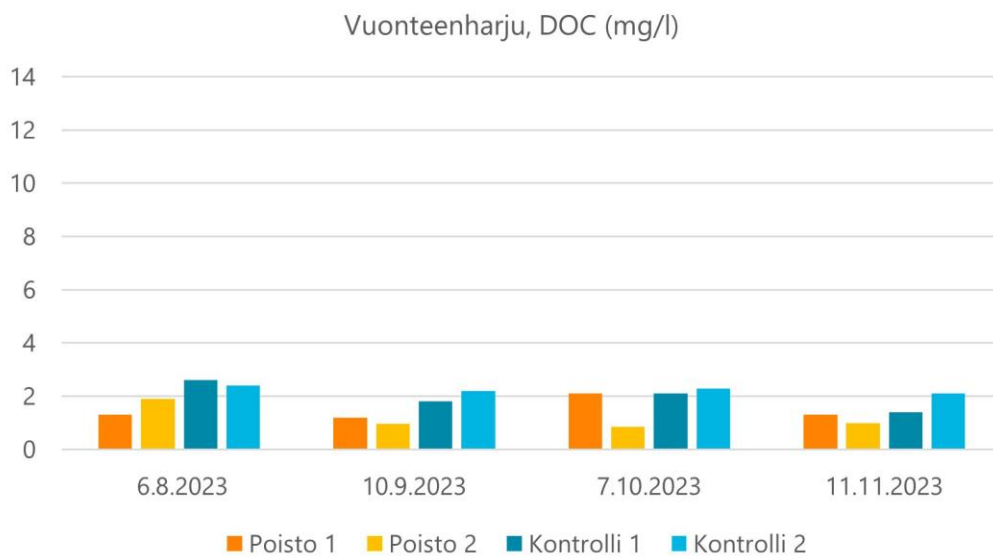
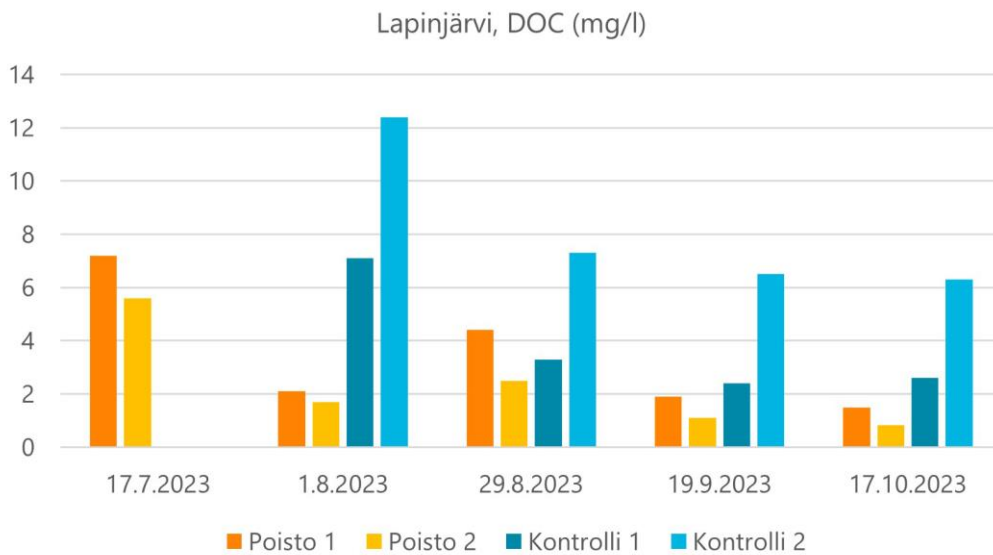
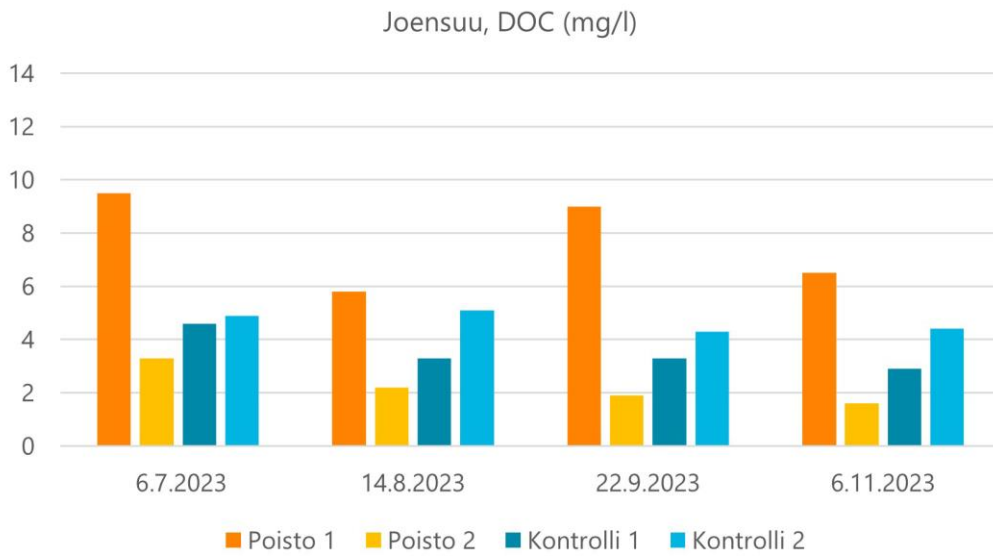
### Liennut orgaaninen hiili (DOC) ja pH

Vajoveden DOC-pitoisuudet olivat matalia sekä maannoksen poisto- että kontrolliruuduilla (Kuva 16, 17). Lapinjärvellä ja Vuonteenharjulla maannoksen poisto oli keskimäärin alentanut pitoisuuksia, vaikka vaihtelu olikin suurta. Joensuussa tilanne näyttää päinvastaiselta, mutta sitä selittää toisen poistoruudun korkeat pitoisuudet.

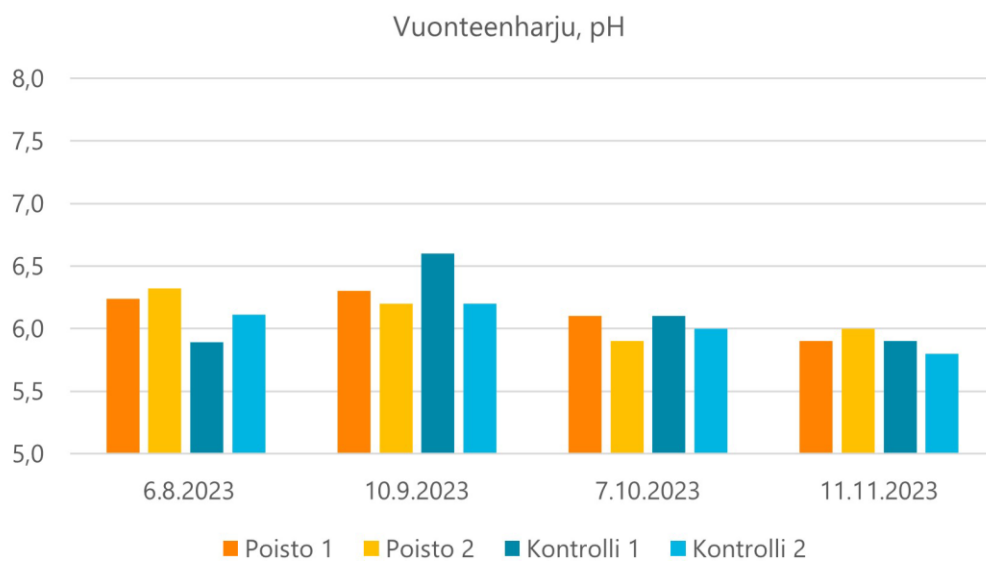
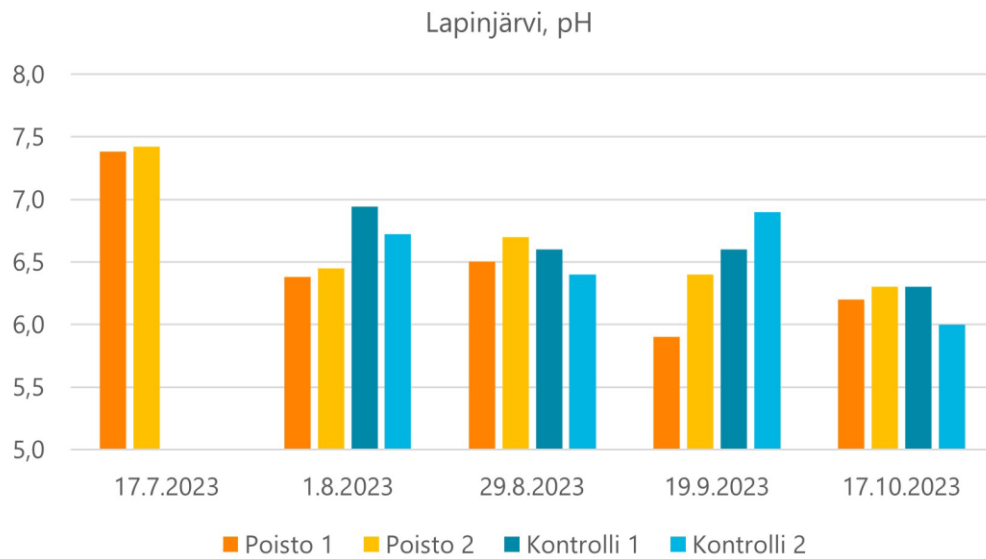
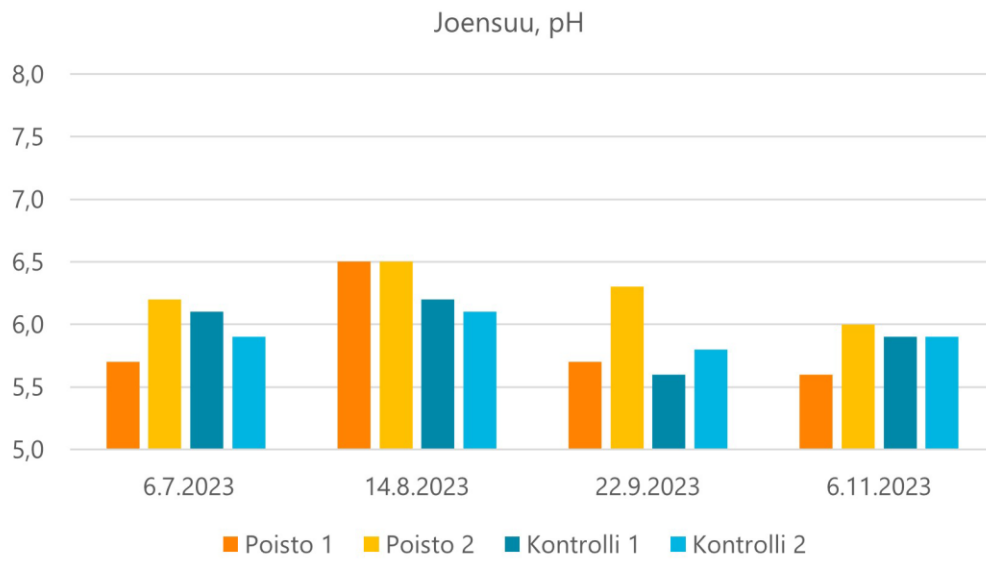
Vajoveden pH oli keskimäärin noin 0,5 pH-yksikköä korkeampi Lapinjärven kokeella verrattuna Joensuun ja Vuonteenharjun kokeeseen (Kuva 16, 18). Maannoksen poisto ei vaikuttanut selvästi keskiarvotuloksiin millään kohteella. Joensuun kokeella maannoksen poisto oli kohottanut keskimääräistä pH-arvoa, mutta vain 0,2 pH-yksikköä, ja poistoruutujen vaihtelun vuoksi eroon on suhtauduttava varauksella.



**Kuva 16.** Vajoveden DOC-pitoisuus (mg/l) ja pH tutkimuskohteittain sekä koko aineiston keskiarvona.



**Kuva 17.** Vajoveden DOC-pitoisuus eri kohteilla ja näytteenottokerroilla.



**Kuva 18.** Vajoveden pH eri kohteilla ja näytteenottokerroilla.

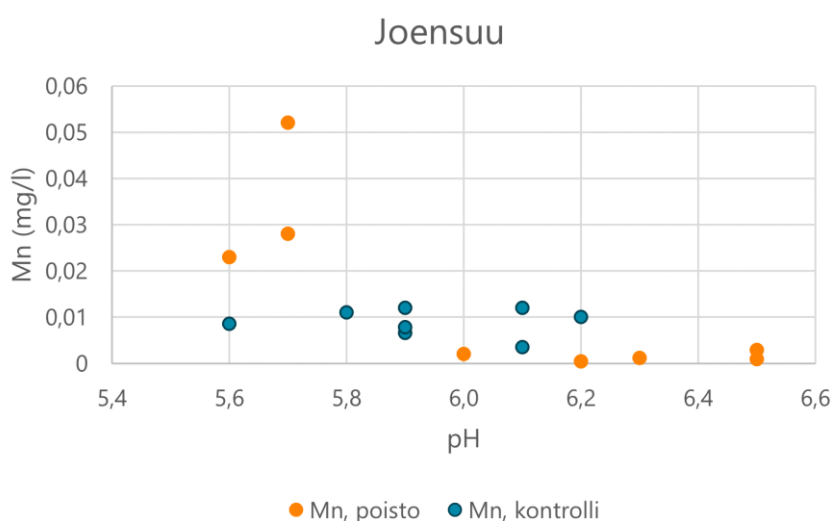
### Liukoisen orgaanisen hiilen ja pH:n suhde metallipitoisuuksiin

Vajoveden pH:n ja metallipitoisuuksien välinen suhde kullakin tutkimuskohteella on esitetty Taulukossa 1 lineaarisena korrelaationa. Korrelaatiotesti tehtiin kullekin tutkimuskohteelle koko aineiston perusteella (poisto- ja kontrolliruutujen tulokset käsitelty yhdessä), koska näytämäärä on liian pieni ruutukohtaiselle tarkastelulle paikkakunnittain. Korrelaatiotestissä testattiin yksisuuntaista vaihtoehdohypoteesia, jonka mukaan matalat pH-arvot liittyvät korkeisiin metallipitoisuuksiin. Negatiivinen korrelaatio löydettiin vain Joensuun kohteelle pH:n ja Mn:n välillä (Kuva 19). Lapinjärvellä havaittiin positiivinen korrelaatio pH:n ja Cu-pitoisuuden välillä, mutta positiivinen korrelaatio ei tue testattua hypoteesia, jossa happamuuden lisääntyminen liittyy metallipitoisuuksien kohoamiseen. Muutoin merkitseviä korrelaatioita ei havaittu, ja näiltä osin ei saatu tukea hypoteesille.

Vajoveden DOC:n ja metallipitoisuuksien välinen suhde kullakin tutkimuskohteella on esitetty Taulukossa 2. Korrelaatiotesti tehtiin kullekin tutkimuskohteelle koko aineiston perusteella (poisto- ja kontrolliruutujen tulokset käsitelty yhdessä), koska näytämäärä on liian pieni ruutukohtaiselle tarkastelulle paikkakunnittain. Korrelaatiotestissä testattiin yksisuuntaista vaihtoehdohypoteesia, jonka mukaan korkeat DOC-arvot liittyvät korkeisiin metallipitoisuuksiin. Joensuun kohteella havaittiin positiivinen korrelaatio DOC-pitoisuuksien ja Fe- ja Mn-pitoisuuksien välillä (Taulukko 2, Kuva 20). Lapinjärven kohteella havaittiin myös positiivisia korrelaatioita DOC- ja Cu-pitoisuuksien sekä DOC- ja Zn-pitoisuuksien välillä, ja nämä tukevat testattua hypoteesia (Kuva 21). Muutoin merkitseviä korrelaatioita ei havaittu, ja näiltä osin ei saatu tukea hypoteesille.

**Taulukko 1.** Vajoveden pH:n ja metallipitoisuuksien väliset Pearsonin korrelaatiokertoimet. Tilastollisesti merkitsevät korrelaatiot merkitty punaisella:  $p < 0,05$  2-suuntainen testi,  $p < 0,025$  1-suuntainen testi.

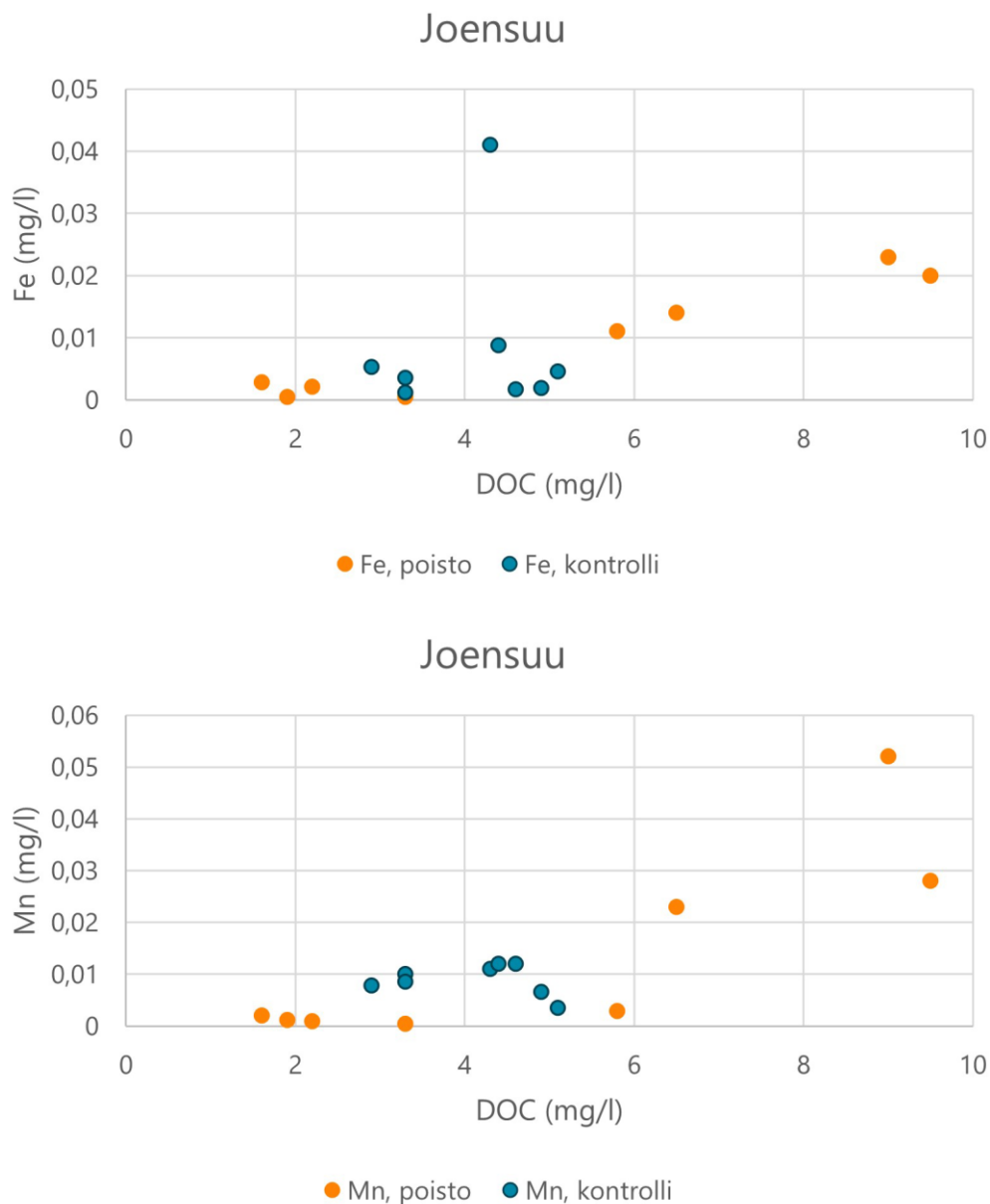
	Fe	Mn	Ni	Cu	Zn	n
pH, Joensuu	-0,43	<b>-0,61</b>	0,00	-0,02	0,00	16
pH, Lapinjärvi	-0,14	-0,05	-0,23	<b>0,55</b>	0,46	18
pH, Vuonteenharju	0,26	-0,31	0,29	0,23	0,00	16



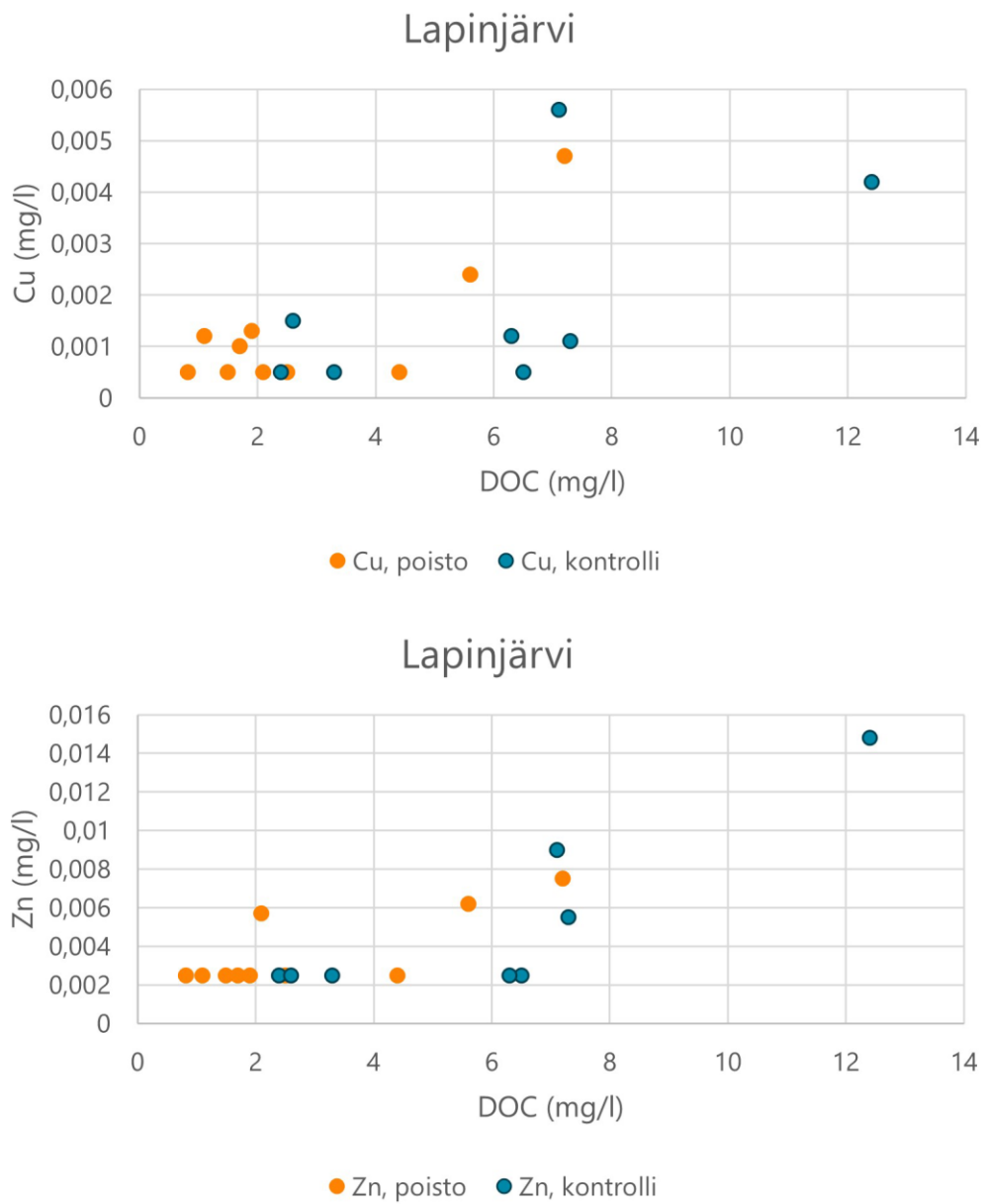
**Kuva 19.** Vajoveden pH-arvojen ja Mn-pitoisuuksien suhde Joensuun kohteella.

**Taulukko 2.** Vajoveden DOC- ja metallipitoisuuksien väliset Pearsonin korrelaatiokertoimet. Tilastollisesti merkitsevät korrelaatiot merkitty punaisella:  $p < 0,05$  2-suuntainen testi,  $p < 0,025$  1-suuntainen testi.

	Fe	Mn	Ni	Cu	Zn	n
DOC, Joensuu	<b>0,54</b>	<b>0,81</b>	0,00	0,25	0,00	16
DOC, Lapinjärvi	-0,17	-0,04	-0,37	<b>0,67</b>	<b>0,81</b>	18
DOC, Vuonteenharju	-0,22	0,33	-0,03	-0,26	0,00	16



**Kuva 20.** Vajoveden DOC- ja Fe-pitoisuuksien sekä DOC- ja Mn-pitoisuuksien suhde Joensuu-kohteella.

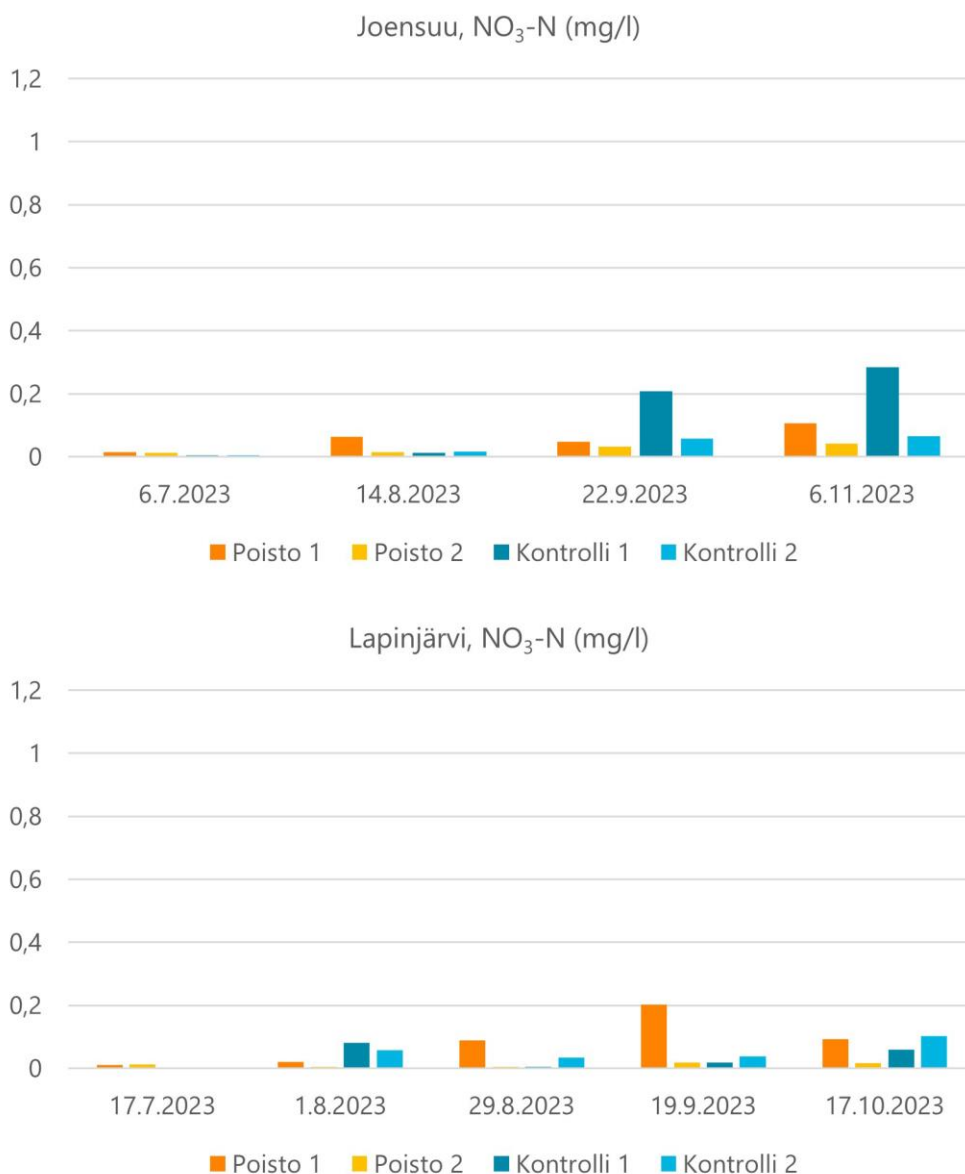


**Kuva 21.** Vajoveden DOC- ja Cu-pitoisuuksien sekä DOC- ja Zn-pitoisuuksien suhde Lapinjärven kohteella.

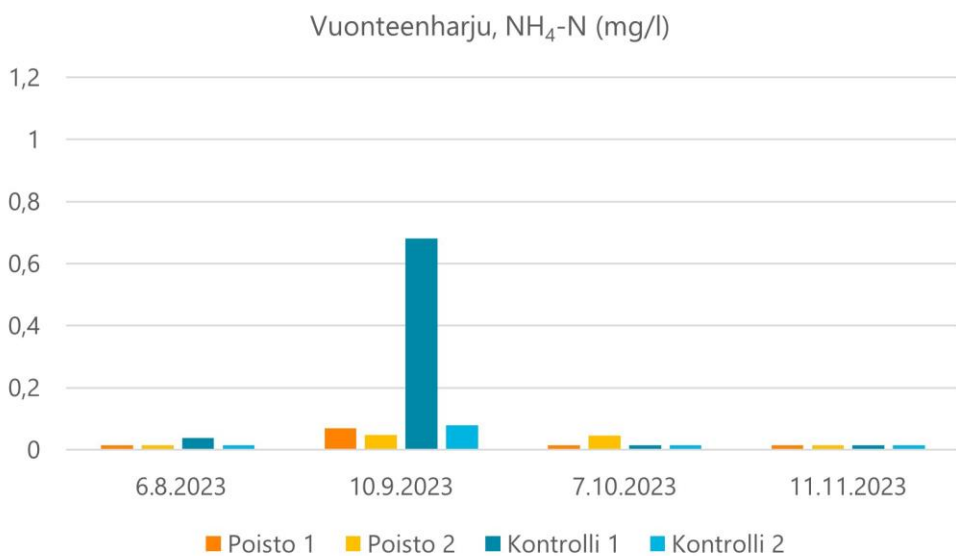
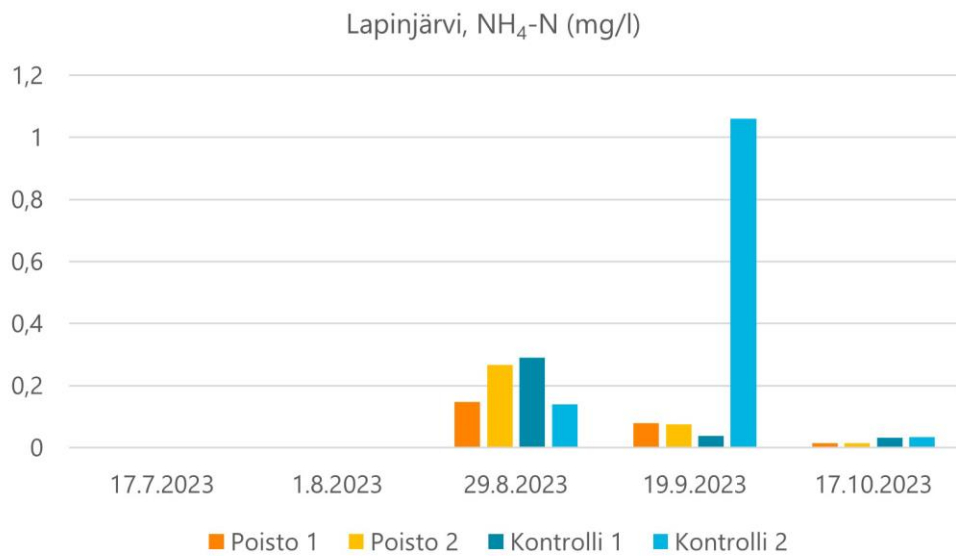
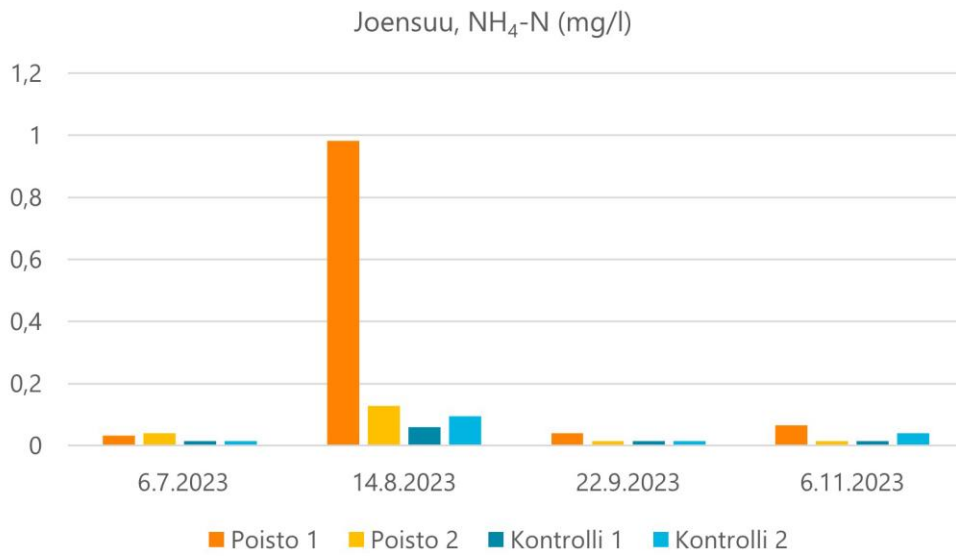
### 4.3. Maannoksen poiston vaikutus vajoveden typpipitoisuuksiin

Kaikilla kohteilla sekä maannoksen poisto- että kontrolliruuduilla ammonium- ja nitraattitypen pitoisuuksien summa jäi yleisesti reilusti alle 1 mg/l (Kuvat 22 ja 23). Kuitenkin pitoisuudet olivat ajoittain korkeampia:  $\text{NH}_4\text{-N}$ -pitoisuudet yhdellä näytteenotokerralla sekä Joensuussa (toinen poistoruutu) että Lapinjärvellä (toinen kontrolliruutu).  $\text{NO}_3\text{-N}$ -pitoisuudet olivat aina pieniä.

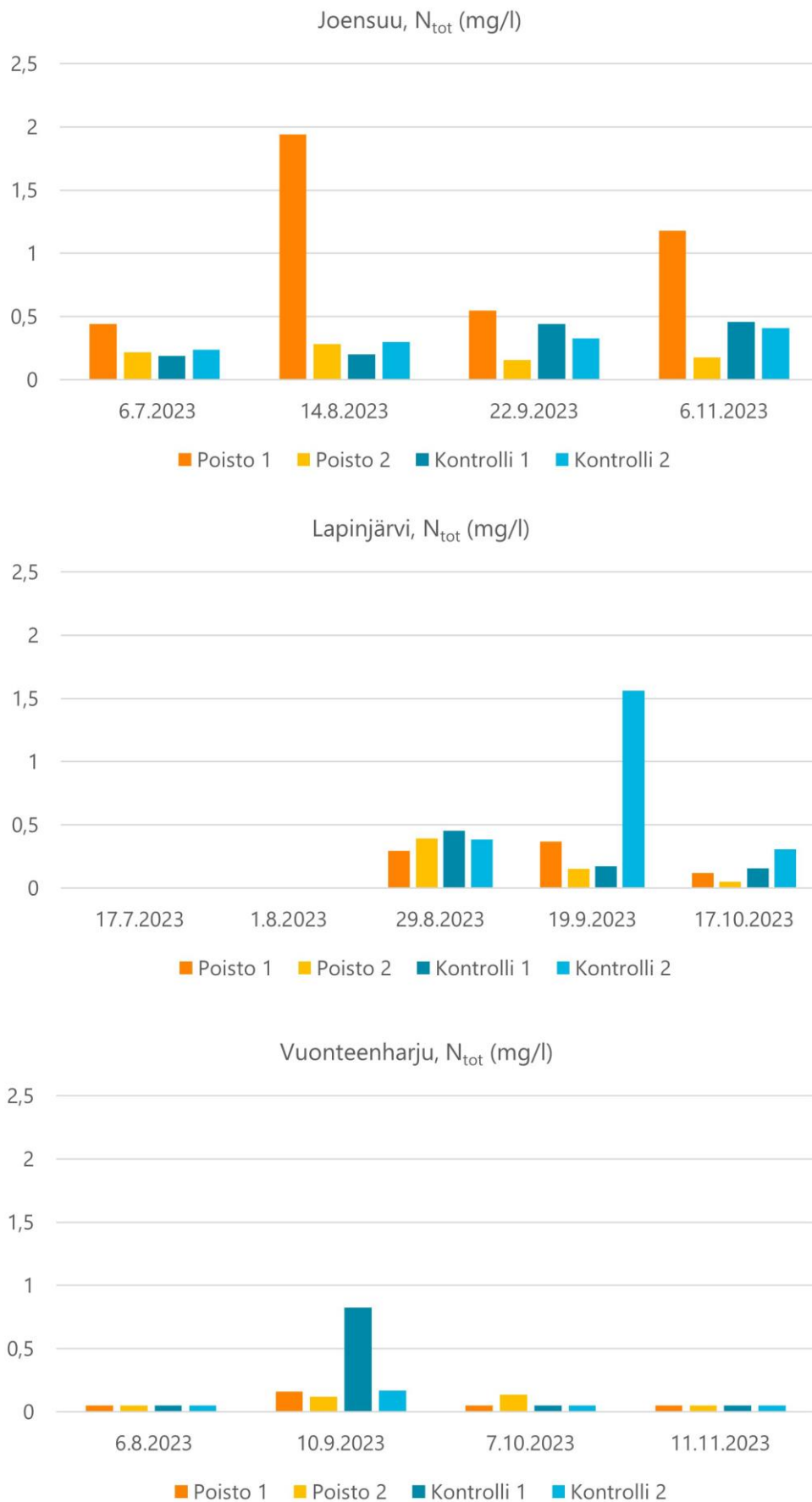
Vajoveden kokonaistyyppipitoisuudet olivat keskimäärin pieniä, mutta niissäkin esiintyi ajoittaisia korkeampia arvoja. Joensuun toisella poistoruudulla esiintyi muita ruutuja korkeampia kokonaistyyppipitoisuuksia ( $\text{N}_{\text{tot}}$ ) (Kuva 24), mitkä selittyvät osittain tällä ruudulla havaittujen korkeampien DOC-pitoisuuksien ja yhdellä kerralla havaitun korkeamman  $\text{NH}_4\text{-N}$ -pitoisuuden perusteella.  $\text{N}_{\text{tot}}$  sisältää  $\text{NO}_3\text{-N}$ - ja  $\text{NH}_4\text{-N}$ -pitoisuuksien lisäksi liukoisen orgaanisen typen (DON) pitoisuuden, mikä on usein korkea DOC-pitoisuuden ollessa korkea.



**Kuva 22.** Vajoveden  $\text{NO}_3\text{-N}$ -pitoisuus eri kohteilla ja näytteenotokerroilla. Vuonteenharjun kohteella kaikki havainnot olivat alle määritysrajan (0,005 mg/l) eikä kuvaa ole esitetty.



**Kuva 23.** Vajoveden NH<sub>4</sub>-N-pitoisuus eri kohteilla ja näytteenottokerroilla.



**Kuva 24.** Vajoveden  $N_{tot}$  -pitoisuus eri kohteilla ja näytteenottokerroilla.

## 5. Tulosten tarkastelu

### 5.1. Maannoksen poiston vaikutus vajoveden määrään

Tulosten mukaan maannosvyöhykkeen poisto voi lisätä vajoveden määrää. Selvimmin tämä näkyi Lapinjärven kohteella kesällä. Syksyllä maannoksen poiston vaikutus heikkeni. Samanlainen maannoksen poiston vajovettä lisäävä vaikutus nähtiin osittain myös Vuonteenharjulla, mutta vastaavaa ei havaittu Joensuun kohteella.

Maannoksen vajoveden määrää vähentävä vaikutus perustuu kasvillisuuden veden ottoon, sitomiseen ja haihduntaan (transpiraatio). Lisäksi orgaaninen humuskerros sitoo vettä itseensä ja osa vedestä haihtuu siitäkin (Piirainen ym. 2007, Piirainen 2019). Maannoksen poisto voi siten lisätä vajoveden määrää etenkin alueilla, missä humuskerros ja pintakasvillisuus on kehittynyt hyvin. Joensuun kohteella humuskerros oli ohut ja pintakasvillisuus vähäistä, mikä voi vaikuttaa siihen, että maannoksen poisto ei heijastunut vajoveden määrän lisääntymisenä.

Samankaltainen maannoksen poiston vajoveden määrää lisäävä vaikutus on todettu aikaisemminkin: Sandborgin (1993b) mukaan maannoksen poisto lisäsi sade- ja sulamisvesistä maaperään imeytyvän vajoveden määrää. Tämä liittyi puuston ja kasvillisuuden poistamiseen ja niiden kautta tapahtuvan haihdunnan loppumiseen sekä siihen, että veden haihtuminen on erilaista pelkstä mineraalimaan pinnasta verrattuna maannoksen karike- ja kasvillisuuspintoihin (Sandborg 1993b). Sandborgin (1993b) mukaan humuskerros ja rikastumiskerros myös tasavat veden virtausta maassa.

Tässä työssä maannoksen läpi kulkeutuvaan vesimäärään ei vaikuttanut puuston veden otto, koska eläviä puiden juuria ei ollut lysimetrien kattamalla pinta-alalla maannosruuduilla. Puuston veden otto vähentää tavanomaisessa tilanteessa kuitenkin maannoksen läpi valuvaa vesimäärää vielä lisää, ja myös puuston aiheuttama haihdunta on merkittävää (Seuna 1990). Lisäksi latvuskerros vähentää metsämaahan tulevaa sadantamäärää (Lindroos ym. 2007, Ide ym. 2013). Näin ollen maannoksen poistoon liittyvä puuston poisto lisää sekkin vajoveden määrää.

### 5.2. Kivennäismaan paljastumisen vaikutus ravinteiden ja metallien huuhtoutumiseen

Tässä tutkimuksessa tutkittiin arenosolimaannoksen poistoa. Arenosoli on osittain samantyyppinen maannos kuin podsoli, mutta arenosolissa humuskerros ja rikastumiskerros eivät ole yhtä voimakkaasti maannostumisen muokkaamia kuin podsolissa, ja arenosolin kivennäismaan rakenne on lähempänä muuttumatonta maaperää kuin podsolissa. Tämän tutkimuksen tulokset kolmelta yksittäiseltä maannoskohteelta osoittivat, että maannosvyöhykkeen poisto ja sitä seuraava kivennäismaan paljastuminen voivat lisätä vajoveden mukana kulkeutuvia kemiallisten aineiden pitoisuuksia ja määriä. Lisääntyneitä vajoveden pinta-alakohtaisia määriä havaittiin raudalle, mangaanille ja kaliumille maannoksen poistossa. Ero ainemäärissä maannoksen poiston ja maannoksen välillä olisi todennäköisesti vieläkin selvempi, jos maannoksen osalta puuston vaikutus olisi mukana. Puusto vähentää tavanomaisessa tilanteessa maannoksessa vajoveden ainemääriä mm. veden ja ravinteiden oton kautta. Vajoveden pH ja DOC säilyivät yleisesti ottaen samoina poisto- ja kontrolliruuduilla, mutta Joensuun toisella poistoruudulla esiintyi muita havaintoja alempia pH-arvoja ja korkeampia DOC-pitoisuuksia.

Raskasmetallien pitoisuudet olivat yleisesti ottaen matalia. Maannoksen poistolla ei ollut niihin vaikutusta muutoin kuin, että Lapinjärven kohteella Ni-pitoisuudet ja -määrät kohosivat poistoruuduilla.

Sandborg (1993b) on aiemmin tutkinut podsolimaannoksen poistamisen vaikutusta vajoveden laatuun. Keskeisiä tuloksia olivat: vajoveden pH laski ja liukoisen orgaanisen aineen pitoisuus kohosi paljastuneessa kivennäismaassa (Sandborg 1993b). Paljastuneessa kivennäismaassa tapahtui emäskationien (Ca, Mg, K) pitoisuuksien nousua. Sen sijaan raskasmetallipitoisuuksissa ei havaittu merkittäviä muutoksia. Sandborg (1993b) mukaan happamoittavalla laskeumalla oli 1980-luvulla tärkeä rooli tulosten kannalta, mikä voi selittää eroa nyt tehdyn tutkimuksen pH-tulosten osalta.

Metsämaassa rautaa ja mangaania pidättyy sekundäärisiin saostumiin, joita esiintyy etenkin maannoksen rikastumiskerroksessa (Lahermo ym. 2002). Kalium on puolestaan helposti huuhtoutuva yksiarvoinen kationi. Näiden aineiden lisääntyminen vajovedessä maannoksen poiston yhteydessä saattoi tässä työssä liittyä rikastumiskerroksen poistumiseen, koska sen tiedetään pidättävän alkuaineita maannoksessa.

Orgaanisen kerroksen rikkoutumisen on myös muissa tutkimuksissa raportoitu vaikuttavan kemiallisten aineiden huuhtoutumiseen metsämailta kuten havaittiin raudan, mangaanin ja kaliumin osalta tässä työssä. Kun metsämaan kivennäismaata paljastetaan avohakkuun jälkeisessä maan muokkauksessa, maaperä altistuu eroosiolle ja kiintoaineen huuhtoutumiselle ennen kuin kasvillisuus kehittyy uudestaan (Ahtiainen & Huttunen 1999, Palviainen ym. 2014, Piirainen 2019). Tällöin alkuaineiden ja ravinteiden huuhtoutuminen saattaa hetkellisesti lisääntyä. Lindroos ym. (2016b) raportoivat mm. Fe:n lisääntyntä rapautumista maan pintaan paljastuneissa kivennäismaakerroksissa.

### **5.3. Maannoksen poiston vaikutus vajoveden typpipitoisuuksiin**

Yleisesti ottaen vajoveden epäorgaanisten typen muotojen pitoisuudet olivat matalia ja ylittivät harvoin pitoisuustason 1 mg/l (ammoniumtypen ja nitraattitypen summa), jota on käytetty laajasti kansainvälisissä tutkimuksissa viittaamaan lisääntyneeseen typen huuhtoutumiseen (UNECE 2007, lost ym. 2012). Tämän perusteella typen huuhtoutuminen oli tässä työssä vähäistä sekä poisto- että kontrolliruuduilla, eikä poiston ja kontrollin välillä ollut selkeää eroa.

Maannoksen poiston seurauksena paljastuneessa kivennäismaassa on raportoitu kuitenkin myös nitraatin voimakasta huuhtoutumista 1980-luvulla (Sandborg 1993b). Nitraattitypen huuhtoutuminen oli kuitenkin vähäistä tässä työssä eikä maannoksen poisto lisännyt nitraattitypen pitoisuuksia. Syynä lienee kohteiden karuus (puolukka- ja jäkälätyyppejä) ja nykyinen typpilaskeuman pienuus. Tulevaisuudessa on kuitenkin mielenkiintoista seurata kohoavatko nitraattitypen pitoisuudet maannoksen poiston seurauksena. Nitrifikaatio eli nitraattitypen muodostuminen on mahdollista kivennäismaassa, mikäli ammoniumtyypeä on saatavilla. Kasvillisuuden poisto maannoksen poiston yhteydessä voi siis periaatteessa lisätä mahdollisuutta nitraatin huuhtoutumiselle, mikäli sen muodostuminen käynnistyy maassa.

## 5.4. Tutkimuksen luotettavuus ja jatkotutkimustarpeet

Maa- ja vajovesitutkimuksille on tyypillistä pitoisuuksien suuri vaihtelu (Derome ym. 2002). Lyhytaikaisen tutkimuksen aikana on mahdollista, että kaikkea vaihtelua pitoisuuksissa ei saada mitattua. Tutkimusjakso oli lyhyt yleensä lysimetreillä tehtäviin tutkimuksiin verrattuna. Esimerkiksi avohakkuun jälkeistä ravinteiden huuhtoutumista on seurattu 2–5 vuotta kestäville tutkimuksilla käyttäen samaa lysimetrityyppiä kuin tässä työssä (Lindroos ym. 2016, Smolander ym. 2019, Törmänen ym. 2020). Myös aikaisemmin maannoksen poiston vaikutusta vajoveden laatuun on tutkittu useampi vuotisella tutkimuksella (Sandborg 1993b). Näin ollen pidempi aikainen seuranta on tarpeen kehityksen seuraamiseksi.

Havaittujen suurten pitoisuusvaihtelujen hallitsemiseksi jatkotyö olisi tehtävä useammilla toistoilla. Kemiallisten parametrien ainetasetarkastelu, mikä ottaa huomioon maassa valuvan vesimäärän, on myös tärkeä toteuttaa vielä laajempaan. Jatkossa vesitutkimusten lisäksi on syytä tarkastella maaperän kemiallista koostumusta mahdollisena selittäjänä.

Jatkossa on tärkeää tutkia myös kasvupaikkojen välistä vaihtelua. Lapinjärven maannos on selvemmin kehittynyt kuin muiden tutkimuskohteiden maannos: se sisältää paksumman orgaanisen kerroksen kuin muut kohteet. Maannos oli myös ravinnerikkaampi, mikä heijastui vajoveden korkeampina ravinnepitoisuuksina kohteita verrattaessa. Maaperän orgaanisen aineen, typen ja emäsravinteiden (Ca, Mg, K) määrien lisääntyessä metsäekosysteemit muuttuvat ravinteikkaammiksi, mikä heijastuu kasvupaikan viljavuuden lisääntymisenä (Tamminen 1998). Kasvupaikkoihin liittyvän luontaisen vaihtelun heijastuminen vajoveden koostumukseen ja vaihtelun hallitseminen on siten tärkeää jatkotutkimuksissa.

Tuloksiin voi vaikuttaa myös lysimetrien rakenne, sillä sekä maannosruudut että poistoruudut koottiin siirtämällä maa-ainesta. Kontrolliruuduilla maannoshorisontit ensin irrotettiin maasta ja laitettiin lysimetriin takaisin. Poistokäsittelyssä maannosvyöhykkeen tilalle siirrettiin syvemältä pohjamaata. Lysimetrien asentaminen häiritsee maannosta aina jonkin verran lysimetrityyppistä riippumatta (Derome ym. 2001), mutta tässä käytettyjen lysimetrien on kuitenkin aiemmin havaittu asettuvan normaaliin maaperän olosuhteita vastaavaan tilaan suhteellisen nopeasti ja tuottavan vertailukelpoisia tuloksia kauemmin maassa olleisiin kansainvälisissä seurantatutkimuksissa käytettyihin lysimetrityyppisiin nähden (Derome ym. 2002, Lindroos ym. 2016).

Haihdunta näytesäiliöistä arvioitiin vähäiseksi, koska säiliöt oli sijoitettu maanpinnan alapuolelle kaivantoon, säiliöt oli peitetty kannella ja kaivannot oli suojattu levyillä. Jatkossa olisi syytä selvittää, pitäisikö näytteenottoväli olla lyhyempi mahdollisen vähäisenkin haihdunnan estämiseksi. Kaikkein suurimpien vesimäärien osalta lysimetrien ylivalunta on teoriassa mahdollista, mutta sen toteaminen ja merkityksen arviointi on vaikeaa. Näytteenottovälin lyhentäminen vähentää myös ylivalunnan riskiä.

Näytteissä voi tapahtua myös muutoksia silloin, kun ne ovat näytteenottokertojen välillä näytesäiliössä. Tämä koskee etenkin ammoniumtypen muuntumista nitraattitypeksi (Guerrieri ym. 2024). Kansainvälinen tutkimus on kuitenkin osoittanut hapen stabiileihin isotooppimuutoksiin pohjautuen, että tällainen nitrifikaatioon liittyvä muutos on kenttäoloissa todennäköisesti vähäistä (Guerrieri ym. 2024).

## 6. Johtopäätökset

Tulokset tukivat tutkimushypoteesia ja kirjallisuudessa esitettyjä tuloksia, että maannosvyöhykkeen poisto ja sitä seuraava kivennäismaan paljastuminen voi lisätä vajoveden määrää ja vajoveden mukana kulkeutuvien aineiden määriä.

Maannoksen poistossa havaittiin lisääntyneitä vajoveden pinta-alakohtaisia määriä raudalle, mangaanille ja kaliumille. Pelkästään ainepitoisuuksien perusteella maannoksen poiston vaikutuksen arviointi oli vaikeaa, ja vesimäärien huomioiminen aineiden määrissä osoittautui tärkeäksi.

Vajoveden raskasmetallien pitoisuudet olivat yleisesti matalia ja monesti alle määritysrajan, mutta yhdellä maannoskohteella vajoveden sisältämä pinta-alakohtaisesti laskettu nikkeli lisääntyi maannoksen poistossa.

Typen huuhtoutuminen vajoveden mukana oli tässä työssä vähäistä sekä maannoksen poistossa että maannosruuduilla.

Tulokset osoittivat jatkotutkimustarpeen, koska vaihtelu monien mitattujen parametrien pitoisuuksissa oli suurta.

## Viitteet

- Ahtiainen, M. & Huttunen, M. 1999. Long-term effects of forestry managements on water quality and loading in brooks. *Boreal Environment Research* 4: 101–114.
- Backman, B. & Väisänen, U. 2001. Pohjaveden laadun seuranta. Teoksessa: Salonen, V.-P. & Korkka-Niemi, K. (toim.). Kirjoituksia pohjavedestä. Turun yliopisto, Geologian laitos. s. 123–128.
- Cajander, A.K. 1949. Forest types and their significance. *Acta Forestalia Fennica* 1: 1–175.
- Derome, J., Lindroos, A.-J. & Niska, K. 1998. Effects of SO<sub>2</sub> and heavy metal emissions from the Kola Peninsula, NW Russia, on soil acidity parameters in NW Russia and Finnish Lapland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13(4): 421–428.
- Derome, J., Lindroos, A.-J., Derome, K. & Niska, K. 2001. Soil solution – an indicator of nutrient availability, soil acidification, and soil-forming processes. The Finnish Forest Research Institute. *Research Papers* 824: 89–100.
- Derome, J., Lindroos, A.-J., Derome, K. & Niska, K. 2002. Soil solution quality during 1998–2000 on 13 of the Level II plots. The Finnish Forest Research Institute, *Research Papers* 879: 70–88.
- Geissen, V., Wang, S., Oostindie, K., Huerta, E., Zwart, K.B., Smit, A., Ritsema, C.J. & Moore, D. 2013. Effects of topsoil removal as a nature management technique on soil functions. *Catena* 101: 50–55.
- Guerrieri, R., Caliz, J., Mattana, S., Barcelo, A., Candela, M., Elustondo, D., Fortmann, H., Hellsten, S., Koenig, N., Lindroos, A.-J., Matteucci, G., Merilä, P., Michalski, G., Nicolas, M., Thimonier, A., Turrioni, S., Vanguelova, E., Verstraeten, A., Waldner, P., Watanabe, M., Casamayor, E.O., Penuelas, J. & Mencuccini, M. 2024. Substantial contribution of tree canopy nitrifiers to nitrogen fluxes in European forests. *Nature Geoscience* 17 2: 130–136.
- Hatva, T. 1993. Soranotto pohjavesien uhkana. Maankamara ja pohjavedet. Vesi- ja ympäristöhallitus. Ympäristötietokeskus. *Ympäristökatsaus* 1: 19–20.
- Helmisaari, H.-S. & Mälkönen, E. 1989. Acidity and nutrient content of throughfall and soil leachate in three *Pinus sylvestris* stands. *Scandinavian Journal of Forest Research* 4: 13–28.
- Huang, Z., Clinton, P.W. & Davis, M.R. 2010. Post-harvest residue management effects on recalcitrant carbon pools and plant biomarkers within the soil heavy fraction in *Pinus radiata* plantations. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 404–412.
- Hyyppä, J. & Penttinen, H. 1993. Soranoton vaikutus pohjaveteen. Tutkimusraportti 2. Osa A, Tutkimustulokset: alueelliset pohjavesitutkimukset. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja 329.

- IM Manual. 1998. Manual for Integrated Monitoring, August 1998. UN-ECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. ICP IM Programme Centre. Finnish Environment Institute, Helsinki, Finland.
- Ide, J., Finer, L., Lauren, A., Piirainen, S. & Launiainen, S. 2013. Effects of clear-cutting on annual and seasonal runoff from a boreal forest catchment in eastern Finland. *Forest Ecology and Management* 304: 482–491.
- Iost, S., Rautio, P. & Lindroos, A.-J. 2012. Spatio-temporal trends in soil solution Bc/Al and N in relation to critical limits in European forest soils. *Water, Air, and Soil Pollution* 223: 1467–1479.
- IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources 2006. 2<sup>nd</sup> ed. World Soil Resources Reports No 103, FAO, Rome.
- Jordan, D., Hubbard, V., Ponder Jr, F. & Berry, E.C. 2000. The influence of soil compaction and the removal of organic matter on two native earthworms and soil properties in an oak-hickory forest. *Biology and Fertility of Soils* 31: 323–328.  
<https://doi.org/10.1007/s003740050663>
- Laine, T., Luoranen, J. & Ilvesniemi, H. 2019. Metsämaan muokkaus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki.
- Lahermo, P., Tarvainen, T., Hatakka, T., Backman, B., Juntunen, R., Kortelainen, N., Lakomaa, T., Nikkarinen, M., Vesterbacka, P., Väisänen, U. & Suomela, P. 2002. Tuhat kaivoa – Suomen kaivovesien fysikaalis-kemiallinen laatu vuonna 1999. Tutkimusraportti 155. Geologian tutkimuskeskus.
- Li, Q., Allen, H. & Wilson, C.A. 2003. Nitrogen mineralization dynamics following the establishment of loblolly pine plantation. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 364–374.
- Li, Q., Allen, H.L. & Wollum II, A.G. 2004. Microbial biomass and bacterial functional diversity in forest soils: effects of organic matter removal, compaction, and vegetation control. *Soil Biology and biochemistry* 36: 571–579.
- Lindroos, A.-J., Derome, J. & Derome, K. 2007. Open area bulk deposition and stand throughfall in Finland during 2001–2004. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 45: 81–92.
- Lindroos, A.-J., Derome, J., Mustajärvi, K., Nöjd, P., Beuker, E. & Helmisaari, H.-S. 2008. Fluxes of dissolved organic carbon in stand throughfall and percolation water in 12 boreal coniferous stands on mineral soils in Finland. *Boreal Environment Research* 13: 22–34.
- Lindroos, A.-J., Derome, K., Piispanen, J. & Ilvesniemi, H. 2016b. Geochemical changes in podzolic forest soil 17 years after deep tilling. *Boreal Environment Research* 21: 504–512.
- Lindroos, A.-J. & Ilvesniemi, H. 2023. Weathering rates of Ca and Mg related to granitic and gabbro mineralogy in boreal forest soils and the effect of mechanical soil disturbance on weathering release. *Silva Fennica* 57(1): 10648.

- Lindroos, A.-J., Tamminen, P., Heikkinen, J. & Ilvesniemi, H. 2016. Effect of clear-cutting and the amount of logging residue on chemical composition of percolation water in spruce stands on glaciofluvial sandy soils in southern Finland. *Boreal Environment Research* 21: 134–148.
- Mariani, L., Chang, S.X. & Kablems, R. 2006. Effects of tree harvesting, forest floor removal, and compaction on soil microbial biomass, microbial respiration, and N availability in a boreal aspen forest in British Columbia. *Soil Biology and Biochemistry* 38:1734–1744.
- Mjöfors, K., Strömgren, M., Nohrstedt, H.-Ö. & Gärdenes, A.I. 2015. Impact of site-preparation on soil-surface CO<sub>2</sub> fluxes and litter decomposition in a clear-cut in Sweden. *Silva Fennica* 49: 1–20.
- Mustajärvi, K., Merilä, P., Derome, J., Lindroos, A.-J., Helmisaari, H.-S., Nöjd, P. & Ukonmaa-aho, L. 2008. Fluxes of dissolved organic and inorganic nitrogen in relation to stand characteristics and latitude in Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Boreal Environment Research* 13: 3–21.
- Mälkönen, E. & Tamminen, P. 2003. Maannostuminen ja maannosten kuvaus. Teoksessa: Mälkönen, E. (toim.). *Metsämaa ja sen hoito*. Metsäntutkimuslaitos, Metsälehti Kustannus.
- Palviainen, M., Finer, L., Lauren, A., Launiainen, S., Piirainen, S., Mattsson, T. & Starr, M. 2014. Nitrogen, phosphorus, carbon, and suspended solids loads from forest clear-cutting and site preparation: Long-term paired catchments studies from Eastern Finland. *Ambio* 43: 218–233.
- Piatek, K.B. & Allen, H.L. 1999. Nitrogen mineralization in a pine plantation fifteen years after harvesting and site preparation. *Soil Science Society of America Journal* 63: 990–998. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1999.634990x>
- Piirainen, S. 2002. Nutrient fluxes through a boreal coniferous forest and the effects of clear-cutting. The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 859.
- Piirainen, S. 2015. Vesi ja vesivarat. Teoksessa: Salo, K. (toim.). *Metsä. Monikäyttö ja ekosysteemipalvelut*. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 61–64.
- Piirainen, S. 2019. Maanmuokkauksen vaikutukset vesistöihin. Teoksessa: Laine, T., Luoranen, J. & Ilvesniemi, H. (toim.). *Metsämaan muokkaus*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 50–54.
- Piirainen, S., Finer, L., Mannerkoski, H. & Starr, M. 2002. Effects of forest clear-cutting on the carbon and nitrogen fluxes through podzolic soil horizons. *Plant and Soil* 239: 301–311.
- Piirainen, S., Finer, L., Mannerkoski, H. & Starr, M. 2007. Carbon, nitrogen and phosphorus leaching after site preparation at a boreal forest clear-cut area. *Forest Ecology and Management* 243: 10–18.
- Piirainen, S., Finer, L., Mannerkoski, H. & Starr, M. 2009. Leaching of cations and sulphate after mechanical site preparation at a boreal forest clear-cut area. *Geoderma* 149: 386–392.

- Powers, R.F., Scott, D.A., Sanchez, F.G., Voldseth, R.A., Page-Dumroese, D., Elioff, J.D. & Stone, D.M. 2005. The North American long-term soil productivity experiment: findings from the first decade of research. *Forest Ecology and Management*. 220: 31–50.  
<https://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.003>.
- Reuss, J.D. & Johnson, D.W. 1986. Deposition and the acidification of soils and waters. *Ecological studies* 59. Springer-Verlag, s. 33–54.
- Sandborg, M. 1993a. Soranoton vaikutus pohjaveteen. Tutkimusraportti 1, Pohjaveden laatuun vaikuttavien aineiden geokemiallisia ominaisuuksia. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja. ISSN 0783-3288, nro 328.
- Sandborg, M. 1993b. Soranoton vaikutus pohjaveteen. Tutkimusraportti 3, Vajovesitutkimukset. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja, ISSN 0783-3288, nro 330.
- Seuna, P. 1990. Metsätalouden toimenpiteet hydrologisina vaikuttajina. *Vesitalous* 31: 38–41.
- Slesak, R.A., Palik, B.J., D'Amato, A.W. & Kurth, V.J. 2017. Changes in soil physical and chemical properties following organic matter removal and compaction: 20-year response of the aspen Lake-States Long Term Soil Productivity installations. *Forest Ecology and Management* 392: 68–77.
- Smolander, A., Törmänen, T., Kitunen, V. & Lindroos, A.-J. 2019. Dynamics of soil nitrogen cycling and losses under Norway spruce logging residues on a clear-cut. *Forest Ecology and Management* 449: 117444
- Smolander, A., Kukkola, M., Helmisaari, H.-S., Mäkipää, R. & Mälkönen, E. 2000a. Functioning of forest ecosystems under nitrogen loading. Teoksessa: Mälkönen, E. (ed.). *Forest condition in a changing environment – the Finnish case*. *Forestry Sciences*, Vol. 65. Kluwer Academic Publishers. s. 229–247.
- Smolander, A., Paavolainen, L. & Mälkönen, E. 2000b. C and N transformation in forest soil after mounding for regeneration. *Forest Ecology and Management* 134: 17–28.
- Smolander, A. 2019. Typpilannoitus metsämaan viljavuuden parantajana – kestävyysnäkökohtia maan ja ympäristön kannalta. *Metsätieteen aikakauskirja* 2018-10080. Tieteen tori 8 s.
- Starr, M. & Lindroos, A.-J. 2006. Changes in the rate of release of Ca and Mg and normative mineralogy due to weathering along a 5300-year chronosequence of boreal forest soils. *Geoderma* 133: 269–280.
- Starr, M., Lindroos, A.-J. & Ukonmaanaho, L. 2014. Weathering release rates of base cations from soils within a boreal forested catchment: variation and comparison to deposition, litterfall and leaching fluxes. *Environmental Earth Sciences* 72: 5101–5111.
- Strömberg, M. & Mjöfors, K. 2012. Soil-CO<sub>2</sub> flux after patch scarification, harrowing and stump harvest in a hemi-boreal forest. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27: 754–761.
- Strömberg, M., Mjöfors, K. & Olsson B.A. 2017. Soil-surface CO<sub>2</sub> flux during the first 2 years after stump harvesting and site preparation in 14 Swedish forests. *Scandinavian Journal of Forest Research* 32: 213–221.

- Tamminen, P. 1998. Maaperätekijät. Teoksessa: Mälkönen, E. (toim.). Ympäristömuutos ja metsien kunto. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 691.
- Tamminen, P. & Mälkönen, E. 1999. Näytteenotto metsämaan ominaisuuksien määrittämistä varten. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 729.
- Tamminen, P. & Tomppo, E. 2008. Finnish forest soils. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 100: 1–21.
- Tanskanen, N. & Ilvesniemi, H. 2004. The amount of secondary Al in two ploughed podzolic forest soils. *Geoderma* 119: 249–260.
- Törmänen, T., Lindroos, A.-J., Kitunen, V. & Smolander, A. 2020. Logging residue piles of Norway spruce, Scots pine and silver birch in a clear-cut: Effects on nitrous oxide emissions and soil percolate water nitrogen. *Science of the Total Environment* 738: 139743
- Ukonmaanaho, L. 2001. Canopy and soil interaction with deposition in remote boreal forest ecosystems: a long-term integrated monitoring approach. The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 818.
- Ukonmaanaho, L., Starr, M., Mannio, J. & Ruoho-Airola, T. 2001. Heavy metal budgets for two headwater forested catchments in background areas of Finland. *Environmental Pollution* 114: 63–75.
- UNECE 2007. Modelling critical loads for terrestrial ecosystems. Teoksessa: UNECE, Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels, and air pollution effects, risks and trends.



**Löydät meidät  
verkosta**

**luke.fi**



Luonnonvarakeskus (Luke) Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki