



Luonnonvara- ja  
biotalouden  
tutkimus 26/2017

## Jämsän metsätiekokeissa käytettävän seostuhkan sisältämien aineiden huuhtoutuminen

Kira Ryhti, Antti-Jussi Lindroos, Tomi Kaakkurivaara, Hannu Ilvesniemi,  
Jori Uusitalo ja Heljä-Sisko Helmisaari

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 26/2017

# **Jämsän metsätiekokeissa käytettävän seostuhkan sisältämien aineiden huuhtoutuminen**

Kira Ryhti, Antti-Jussi Lindroos, Tomi Kaakkurivaara, Hannu Ilvesniemi,  
Jori Uusitalo ja Heljä-Sisko Helmisaari

Luonnonvarakeskus, Helsinki 2017



Ryhti, K., Lindroos, A-J., Kaakkurivaara, T., Ilvesniemi, H., Uusitalo J., Helmisaari, H-S. Jämsän metsätiekokeissa käytettävän seostuhkan sisältämien aineiden huuhtoutuminen. 2017. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 26/2017. 38 s.

ISBN: 978-952-326-397-0 (Painettu)

ISBN: 978-952-326-398-7 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-398-7>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Kira Ryhti, Antti-Jussi Lindroos, Tomi Kaakkurivaara, Hannu Ilvesniemi, Jori Uusitalo ja Heljä-Sisko Helmisaari

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2017

Julkaisuvuosi: 2017

Kannen kuva: Tomi Kaakkurivaara

Painopaikka ja julkaisumyynti: Juvenes Print, <http://luke.juvenesprint.fi>

## Alkusanat

Metsätiet ovat perinteisesti rakennettu käyttämällä paikallisia maa-aineksia. Kuitenkin nykyisin, kun vanhaa metsätietä peruskorjataan, kantavissa rakennekerroksissa käytetään lähes pääsääntöisesti kivimurskaa. Puutuhkaa on pidetty yhtenä hyvänä vaihtoehtona korvaamaan uusiutumaton kivi-murskaa metsäteiden kantavissa rakenteissa. Samanaikaisesti kasvava bioenergian käyttö ja kohoavat kaatopaikkamaksut luovat tarpeita löytää tuhkalle uusia käyttökohteita.

Tämän tutkimuksen metsätiekokeet tehtiin metsäyhtiö UPM-Kymmeneen mailla Jämsän seudulla. Tuhkalla rakennettuja koetieosuuksia perustettiin kahdeksan, joiden lisäksi kaksi vertailukohteiksi pelkällä murskeella kunnostettuja. Tutkimus toteutettiin osana Metsäntutkimuslaitoksen ja Tampereen teknillisen yliopiston yhteisprojektia ”Uudet teknologiat alemman tieverkon rakentamisen ja ylläpidon apuna, 2011–2014”. Hankkeen rahoittajat olivat EU:n maaseuturahasto, Luoteis-Pirkanmaan kehittämissyksikkö, Parkanon kaupunki, UPM-Kymmene Oy, Tornator, Finsilva, Ruukki, L-S:n metsänomistajaliitto sekä Metsähallitus.

Kiitämme yhteistyökumppaneitamme erinomaisesta tuesta tutkimusprojektimme aikana.

Kirjoittajat

## Tiivistelmä

Kira Ryhti<sup>1,2</sup>, Antti-Jussi Lindroos<sup>1</sup>, Tomi Kaakkurivaara<sup>3</sup>, Hannu Ilvesniemi<sup>4</sup>, Jori Uusitalo<sup>5</sup>, Heljä-Sisko Helmisaari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Luonnonvarakeskus (Luke), Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki

<sup>2</sup>Helsingin yliopisto, Metsätieteiden talo, PL 27, 00014 Helsingin Yliopisto

<sup>3</sup>Luonnonvarakeskus (Luke), Koetilantie 5, 00790 Helsinki

<sup>4</sup>Luonnonvarakeskus (Luke), Tietotie 2, 02150 Espoo

<sup>5</sup>Luonnonvarakeskus (Luke), Kaironientie 15, 39700 Parkano

Tutkimushankkeen tavoitteena oli selvittää liukoisten aineiden huuhtoutumista metsäteillä, joiden rakenteissa oli käytetty tuhkaa. Huuhtoutumista tutkittiin lysimetrien avulla tuhkan välittömässä läheisyydessä tien sisällä sekä syvemällä tien rakenteissa. Lisäksi selvitettiin huuhtoutumisen vaikutusta tuhkaa sisältävän tien läpi kulkevan laskuojan veden laatuun. Tavoitteena oli saada tietoa tuhkan reagoimisesta tien läpi valuvan veden kanssa tierakenteessa, jotta tierakennetta voitaisiin mahdollisesti kehittää siihen suuntaan, että kemiallisia aineita vapautuisi tuhkakerroksista mahdollisimman vähän. Tuloksia voidaan jossain määrin käyttää taustatietona arvioitaessa laajemmin tuhkan käytön ympäristövaikutuksia, mutta tämä työ on ennen kaikkea ns. case-tutkimus ja edustaa vain tutkittuja aloja liittyen tierakenteiden tutkimukseen ja kehittämiseen.

Tierakenteissa käytettiin lentotuhkaa, joka oli seostuhkaa. Tutkittavat metsätiet, joiden rakenteissa tuhkaa oli käytetty, sijaitsivat Jämsässä. Metsäteillä oli yhteensä 10 koealaa, joista viisi sijaitsi ensimmäisellä tiellä (Tie 1) ja viisi toisella tiellä (Tie 2). Metsätiekoealat koostuivat kontrollialasta, joka ei sisältänyt tierakenteessa tuhkaa, sekä neljästä erilaisesta tuhkarakenteesta: 15 cm:n paksuinen kerros tuhkaa ja mursketta suhteessa 33/66, 20 cm:n kerros tuhkaa ja mursketta suhteessa 50/50, 25 cm:n kerros tuhkaa, 50 cm:n kerros tuhkaa. Molemmilla teillä oli yksi ala kutakin käsittelyä.

Teiden tuhkaa sisältävistä kerroksista vapautui ravinteita (B, Na, Ca, Mg, K) sekä sulfaattia ja kloridia tien sisällä alaspäin vajoavaan veteen. Näiden aineiden vapautuminen tuhkasta tulee huomioida tuhkaa käytettäessä. Tuhkan laadulla on vaikutusta ravinteiden ja suolojen vapautumiseen.

Pitoisuuksien suuri vaihtelu tien sisäisissä vajovesissä vaikeutti yleistettävien tulosten saamista aineiden vapautumisesta vajoveteen. Myös erilaisten tuhkamäärien ja -rakenteiden eroja oli vaikea saada selville. Bariumin ja joidenkin raskasmetallien pitoisuudet olivat kuitenkin tien sisällä vajovesissä joissain tien kohdissa korkeita tuhka-aloilla verrattuna pelkkää mursketta sisältävään alaan. Toisaalta tiessä oli myös tuhka-aloilla samanlaisia pitoisuuksia kuin pelkän murskeen alalla, ja tällaiseen tilanteeseen olisi hyvä päästä tasaisesti kaikissa tien kohdissa. Tuhkan hyvä- ja tasalaatuisuus lienee avaintekijä matalille pitoisuuksille.

Tuhkaa sisältävän tien vaikutukset ympäristöön riippuvat paitsi aineiden vapautumisesta vajoveteen, myös niiden uudelleen saostumisesta sekä vajoveden sekoittumisesta ympäröiviin vajo-, pohja- ja ojavesiin.

Tässä työssä ympäristövaikutuksia ei tutkittu laajemmin, vaan huuhtoutumisen vaikutusta tutkittiin teiden läpi kulkevien laskuojien veden laadun osalta. Tuhkatien omat ojavedet yhtyivät näihin laskuojiin. Tuhkateiden läpi valuneen laskuojan veden laatuun tuhkatie ei vaikuttanut seurantajakson aikana bariumin ja mitattujen raskasmetallien osalta. Ravinnepitoisuudet (B, Na, Ca, Mg, K) sekä sulfaatin ja kloridin pitoisuudet sen sijaan nousivat laskuojassa tuhkatien vaikutuksesta, mutta veden laatu laskuojissa oli kuitenkin edelleen hyvä vaikutuksen jälkeenkin. Ojan hydrologiset olosuhteet vaikuttavat tuloksiin merkittävästi.

Tuloksia voidaan pitää monilta osiltaan lupaavina tuhkarakenteiden kehittämisen kannalta, koska monien raskasmetallien keskimääräiset pitoisuudet olivat suhteellisen matalia useilla tuhkaa sisältävillä aloilla tai keskimääräiset pitoisuudet alenivat tierakenteessa veden kulkiessa alaspäin. Huomiota tulee kiinnittää niihin aineisiin, joissa esiintyi korkeita pitoisuuksia yksittäisinäkin arvoina tai yksittäisissäkin tien kohdissa (esim. Ba, As, Ni, Mo). Huuhtoutumisriski on mahdollisesti olemassa, mikäli korkeita pitoisuuksia tuottavia kohtia on tiessä monin paikoin, ja huuhtoutumista tapahtuu näistä paikoista suoraan ojiin tai pohjaveteen. Tierakenteita voidaan kehittää, jotta huuhtoutuminen olisi aina kaikista tien kohdista tasaista ja vähäistä. Tärkeitä kehittämis- ja tutkimuskohteita voivat olla mm. tuhkan tasalaatuisuuden ja tierakenteiden tiivistämisen merkitys huuhtoumille (tässä tutkimuksessa teitä ei tiivistetty erikseen rakentamisen yhteydessä).

Rauta-, mangaani- ja kobolttipitoisuudet olivat korkeita teiden pohjatasoilla kaikilla aloilla, myös tuhkattomilla aloilla.

Asiasanat: huuhtoutuminen, metsätie, tuhka, raskasmetallit, ravinteet, suolat

# Sisällys

<b>Alkusanat</b> .....	<b>3</b>
<b>Tiivistelmä</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Työn tausta ja tavoitteet</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Aineisto ja menetelmät</b> .....	<b>8</b>
2.1. Tierakenteissa käytetty seostuhka.....	8
2.2. Tutkimusalue ja koealat .....	8
2.3. Vajovesinäytteiden keruu .....	9
2.4. Ojavesinäytteet .....	9
2.5. Vesinäytteiden analysointi.....	9
<b>3. Tulokset</b> .....	<b>10</b>
3.1. pH ja metallien (Cr, As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Ba, Co, Mo) pitoisuudet .....	10
3.2. Ravinteiden (B, Na, Ca, Mg, K, NO <sub>3</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N, PO <sub>4</sub> -P, P <sub>tot</sub> ), sulfaattirikin (SO <sub>4</sub> -S), kloridin (Cl), raudan (Fe), alumiinin (Al), mangaanin (Mn) ja liukoisen orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuudet.....	22
<b>4. Tulosten tarkastelu</b> .....	<b>35</b>
<b>5. Johtopäätökset</b> .....	<b>37</b>
<b>Viitteet</b> .....	<b>38</b>

# 1. Työn tausta ja tavoitteet

Tämän tutkimushankkeen tavoitteena oli selvittää liukoisten aineiden huuhtoutumista metsäteillä, joiden rakenteissa oli käytetty tuhkaa (Ryhti 2016). Huuhtoutumista tutkittiin lysimetrien avulla tuhkan välittömässä läheisyydessä tien sisällä sekä syvemmillä tien rakenteissa. Lisäksi selvitettiin huuhtoutumisen vaikutusta tien viereisiin ojavesiin.

Lysimetritutkimuksissa selvitettiin vuosina 2011–2014, kuinka suurina pitoisuuksina huuhtoutuvia aineita esiintyy vajovedessä tien eri syvyytasoilla. Teiden viereisistä ojista kerättyjen vesinäytteiden avulla tutkittiin huuhtoutumisen vaikutusta aineiden pitoisuuksiin ojavesissä vuosina 2012–2014.

Tutkimuksessa keskityttiin erityisesti vajo- ja ojavesien raskasmetallipitoisuuksiin, koska korkeita raskasmetallipitoisuuksia pidetään ympäristön kannalta haitallisina. Lisäksi tutkittiin laajasti muidenkin aineiden pitoisuuksia, kuten eri ravinteiden ja suolojen pitoisuuksia.



## 2. Aineisto ja menetelmät

### 2.1. Tierakenteissa käytetty seostuhka

Tierakenteissa käytettiin lentotuhkaa. Lentotuhka oli seostuhkaa, joka oli peräisin voimalaitoksesta, jossa käytetään leijupetikattilaa, jonka polttolämpötila on noin 850 °C. Voimalaitoksen polttoaineena käytetään mm. puuta, turvetta ja jätelietteitä eri seossuhteina riippuen esimerkiksi vuodenajoista. Turpeen käyttö lisääntyy yleensä talvikautena ja kuitulietteen kesäkautena.

Tuhka varastoitiin voimalaitoksen piha-alueella läjittettynä, jolloin osa tuhkasta altistuu kosteudelle ja osa saattaa jäädä kuivaksi. Koska kokeessa käytetty tuhka koostuu todennäköisesti monien polttokertojen aikana syntyneistä tuhista, koeteissä käytettyjen tuhkien tarkkoja seossuhteita tai niiden sisältämiä ainepitoisuuksia ei voitu määrittää.

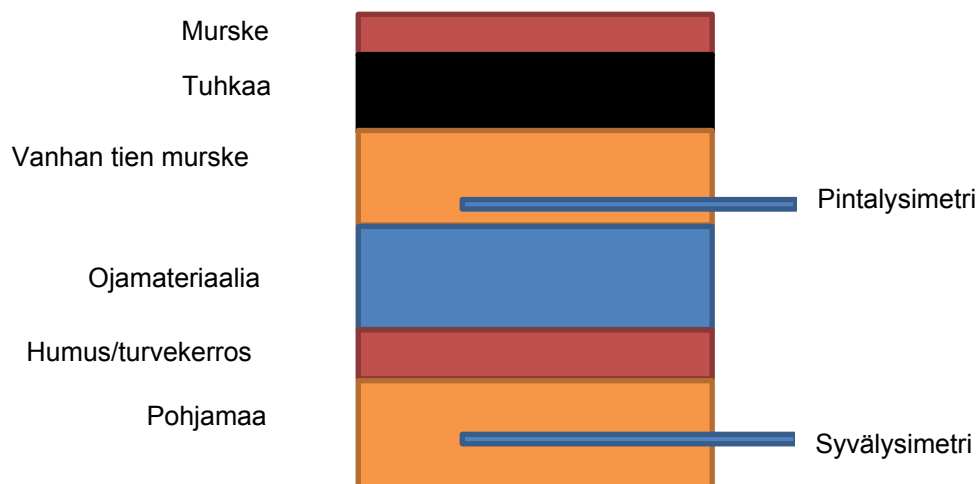
Tuhka-analyysit voimalaitoksessa syntyvästä tuhkasta olivat kuitenkin käytettävissä kolmelta eri ajankohdalta ennen tuhkan levittämistä kokeelle. Näiden tuhka-analyysien perusteella tärkeitä tutkittavia aineita maastokokeissa olivat bariumin (Ba) (1. tuhka-analyysi), barium ja kadmium (Cd) (2. tuhka-analyysi), sekä useampia aineita (Ba, Cr, Mo, SO<sub>4</sub>, Cd - 3. tuhka-analyysi). Fluoridia (F) ei tässä työssä voitu mitata.

### 2.2. Tutkimusalue ja koealat

Tutkittavat metsätiet, joiden rakenteissa tuhkaa oli käytetty, sijaitsivat Jämsässä. Metsäteillä oli yhteensä 10 koealaa, joista viisi sijaitsi ensimmäisellä tiellä (Tie 1) ja viisi toisella tiellä (Tie 2). Metsäteitä ympäröivä maasto on metsämaata, josta pääosa on ohutturpeista korpea ja osa kivennäismaan kangasmetsää. Ympäröivien metsien puusto vaihteli taimikosta varttuneeseen kasvatusmetsään.

Tierakenteen sivuprofiili on esitetty kuvassa 1. Molemmat tiet (Tie 1, Tie 2) rakennettiin samantyyppiseksi.

Metsäteitä kunnostettaessa ja tuhkakerrosten rakentamisen yhteydessä teitä ei tiivistetty erillisellä toimenpiteellä. Tuhkaa sisältävä kerros tien sisällä koostui pelkästään tuhkasta tai tuhkan ja murskeen sekoituksesta eri suhteissa. Tutkitut käsittelyt olivat: 10 cm pelkkää mursketta, 15 cm:n paksuinen kerros tuhkaa ja mursketta suhteessa 33/66, 20 cm:n kerros tuhkaa ja mursketta suhteessa 50/50, 25 cm:n kerros tuhkaa, 50 cm:n kerros tuhkaa. Molemmilla teillä oli yksi ala kutakin käsittelyä.



**Kuva 1.** Tierakenteessa ylimpänä kerroksena oli 10 cm:n paksuinen murskekerros, jonka alapuolella sijaitsi tuhkaa sisältävä kerros. Tämän alapuolella oli vanhan tiepohjan mursketta. Pintalysimetri, joka keräsi tuhkaa sisältävän kerroksen läpi vajonnutta vettä heti tuhkan läheisyydessä, sijaitsi siten tien pintaosassa tien sisällä. Syvälysimetri keräsi koko tierakenteen läpi vajonnutta vettä ojan pohjan tasalla tien syvemmistä osista tien sisältä.

### 2.3. Vajovesinäytteiden keruu

Jokaisella koealalla oli 2–3 lysimetriä tuhkaa sisältävän kerroksen läheisyydessä tien pinnassa ja 2–3 lysimetriä tien pohjatasolla. Pinta- ja pohjalysimetrit sijaitsivat aina lähekkäin toisiaan, mutta eivät kuitenkaan täysin päällekkäin. Lysimetrit sijaitsivat kullakin koealalla horisontaalisessa suunnassa 20 metrin etäisyydellä toisistaan. Lysimetrit olivat tyypiltään ns. levylysimetrejä, ja yhden lysimetrin veden keruupinta-ala oli 0,1 m<sup>2</sup>.

### 2.4. Ojavesinäytteet

Vesinäytteitä kerättiin myös molempien teiden läpi kulkevista laskuojista. Molempien teiden poikki kulki laskuoja, johon yhdistyivät tuhkaa sisältävän tien omat ojavedet. Vertailunäyte otettiin tietä kohti laskevasta ojasta (ojan ”yläosa”), johon vettä kerääntyi muusta ympäristöstä eikä tuhkaa sisältävillä teillä ollut tähän ojaveteen vaikutusta. Varsinainen tuhkan vaikutusta ilmentävä vesinäyte otettiin sellaisesta kohtaa tuhkatien läpi kulkevaa laskuojaa (”alaosa”), johon vettä oli kerääntynyt tuhkatien omista ojista eli jossa oli mahdollisesti tuhkan vaikutusta.

Tuhkatien läpi kulkeva laskuoja meni tien läpi ja siihen yhdistyivät tuhkatien omat ojavedet kohdassa, missä tiessä oli kaikkein suurin tuhkakäsittely (50 cm pelkkää tuhkaa). Tuhkatien omat ojavedet toivat lisäksi vettä kohti laskuojaa myös kaikkien muidenkin tuhkakäsittelykoealojen kohdilta. Ojavesinäytteet kerättiin vain tien 1 ja 2 laskuojien ylä- ja alaosaan, johon vaikuttivat kaikki kyseisen tien tuhkakäsittelyt yhdessä, mutta ei jokaisen tuhkakäsittelyalan vierestä erikseen. Ojavesien paikalliset virtausolosuhteet vaihtelivat voimakkaasti kuivuudesta runsasvetisyyteen, ja näillä paikallisilla olosuhteilla oli väistämättä erittäin suuri vaikutus ojavesien tuloksiin.

### 2.5. Vesinäytteiden analysointi

Vesinäytteet kerättiin lumettomana aikana noin kuukauden välein. Vajovesilysimetrit tyhjennettiin viikkoa ennen keräystä, joten vajovesinäytteisiin kertyi vettä kukin kuukauden viimeiseltä viikolta. Näytteet lähetettiin heti näytteenoton jälkeen Metsäntutkimuslaitoksen laboratorioon analysoitavaksi. Kaikista vesinäytteistä (tien vajovesi, ojavesi) määritettiin liuenneet aineet (näytteet suodatettiin 0,45 µm suodattimilla).

## 3. Tulokset

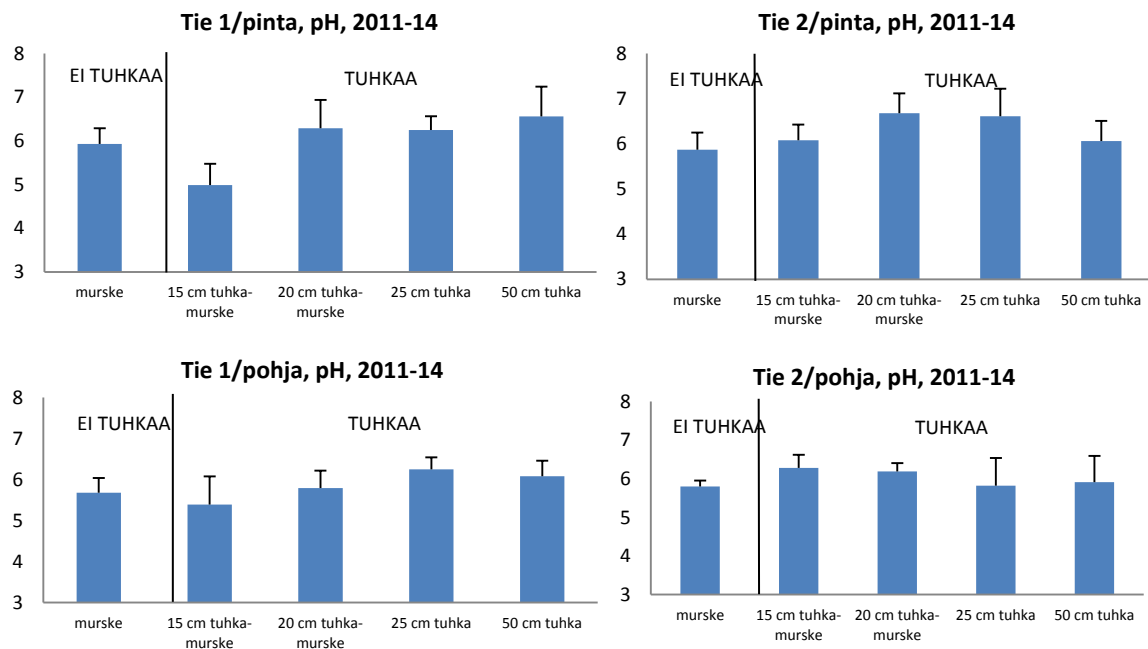
### 3.1. pH ja metallien (Cr, As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Ba, Co, Mo) pitoisuudet

Joidenkin metallien pitoisuudet olivat tuhkatien sisällä vajovesissä yksittäisissä tien kohdissa varsin korkeita verrattuna pelkästä murskeesta rakennettuun tieosaan, mutta teissä oli myös kaikilla koealoilla matalia pitoisuuksia. Tulokset antoivat viitteitä, että suurempaan tuhkamäärään voisi liittyä useammin korkeampia yksittäisiä pitoisuuksia tien sisäisissä vajovesissä. Pitoisuuksissa esiintyi kuitenkin erittäin suurta vaihtelua.

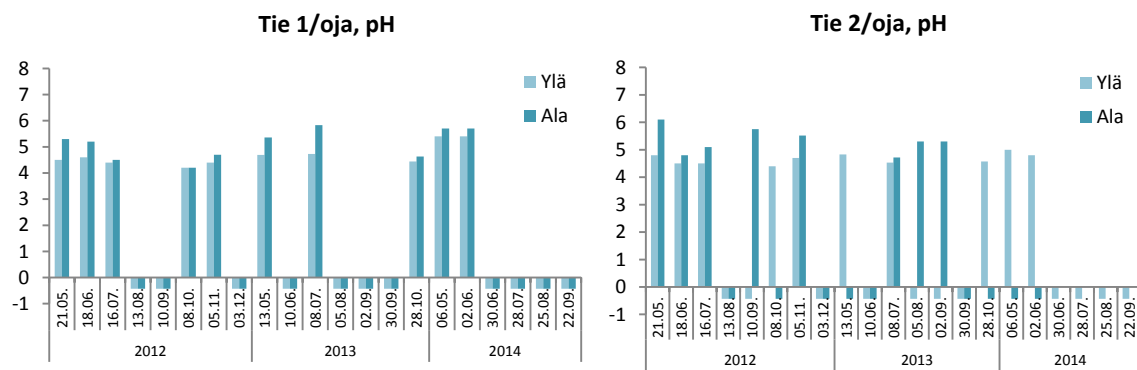
Tutkittujen metallien pitoisuudet eivät muuttuneet teiden läpi kulkevien laskuojien vesissä tuhkatien vaikutuksesta seurantajaksolla 2012–2014. Vuonna 2014 ojavesiä saatiin tosin vain keväällä ja kesän alussa, joten pääosa tuloksista kertyi vain kahtena vuonna. Laskuojan vesi, johon tuhkatie ei alun perin vaikuttanut, sekoittui tuhkatien ojavesiin suurimman tuhkakäsittelyn kohdalla. Ojavedestä otettiin näytteitä ennen veden sekoittumista tuhkatien vesiin, ja näytteet otettiin myös tuhkatien vesiin sekoittuneesta vedestä tuhkatiealueelta poistuvasta laskuojasta. Ojavesien pitoisuudet olivat myös kokonaisuudessaan matalampia kuin talousveden sallitut pitoisuudet tai mikäli jollekin aineelle ei ole talousvesirajaa, niin pitoisuudet olivat kuitenkin alle kohonneena pidettävän pitoisuuden. Vertailuna käytetyt pitoisuudet on merkitty tuloskuviin. Seuranta-aika oli varsin lyhyt, hieman yli kaksi vuotta teiden rakentamisesta. Tässä työssä ei ollut mahdollisuutta tutkia pitoisuuksia pidemmällä ajanjaksolla.

Tuhkalla oli vettä neutraloiva vaikutus. Tämä ilmeni ojavesien pH-arvojen nousuna, kun tuhkatien ojavedet sekoittuivat laskuojaan.

Kuvissa kullekin mitatulle parametrille on esitetty tulokset teiden sisäiselle vajovedelle sekä teiden läpi kulkevan laskuojan vedelle (kuvat 2–23). Kuvissa on esitetty pitoisuuden keskiarvo keskihajonnan kanssa koko seurantajaksolle tien 1 ja 2 sisäiselle pintaosan sekä pohjaosan vajovedelle. Tulokset on esitetty pelkästä murskeesta tehdyille tiekoealalle sekä erilaisia tuhkakäsittelyjä sisältäville tiekoealoille molemmille teille erikseen. Ojavesien pitoisuudet on esitetty kullekin näytteenottokeralle ja teille 1 ja 2 erikseen. Laskuojan yläosan veteen (YLÄ) ei tuhkatieillä ole ollut vaikutusta, ja mahdollinen vaikutus näkyy laskuojan alaosassa (ALA), kun tuhkatien omat ojavedet ovat sekoittuneet tien läpi kulkevaan laskuojaan.



Kuva 2. Vajoveden pH tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



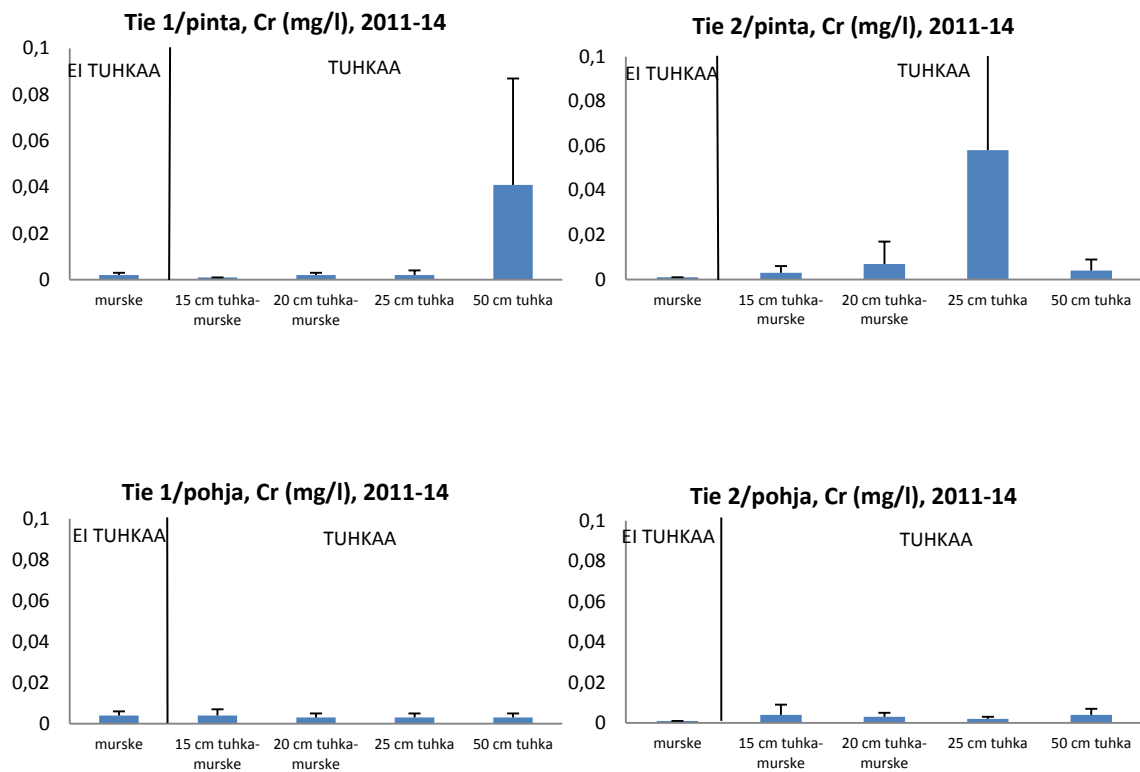
YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhalla vaikutus

Kuva 3. Ojaveden pH näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014 (negatiivinen arvo = ei näytettä).

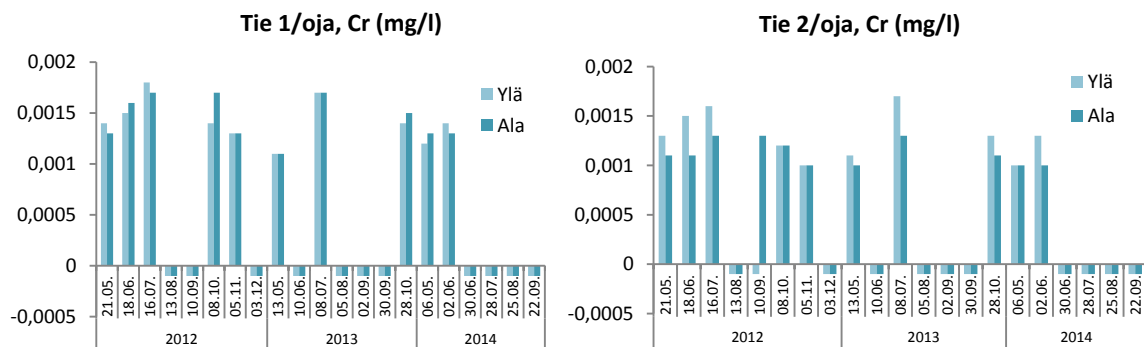
Vertailuna:

Pohjavesi/kaivot, Suomi: keskiarvo 6,5 (Lahermo ym. 2002);

Vajovesi (syvyys 40 cm), metsämaa/kuusikot, ICP-Forests –verkosto: keskiarvo 4,7–5,9 (Derome ym. 2002)



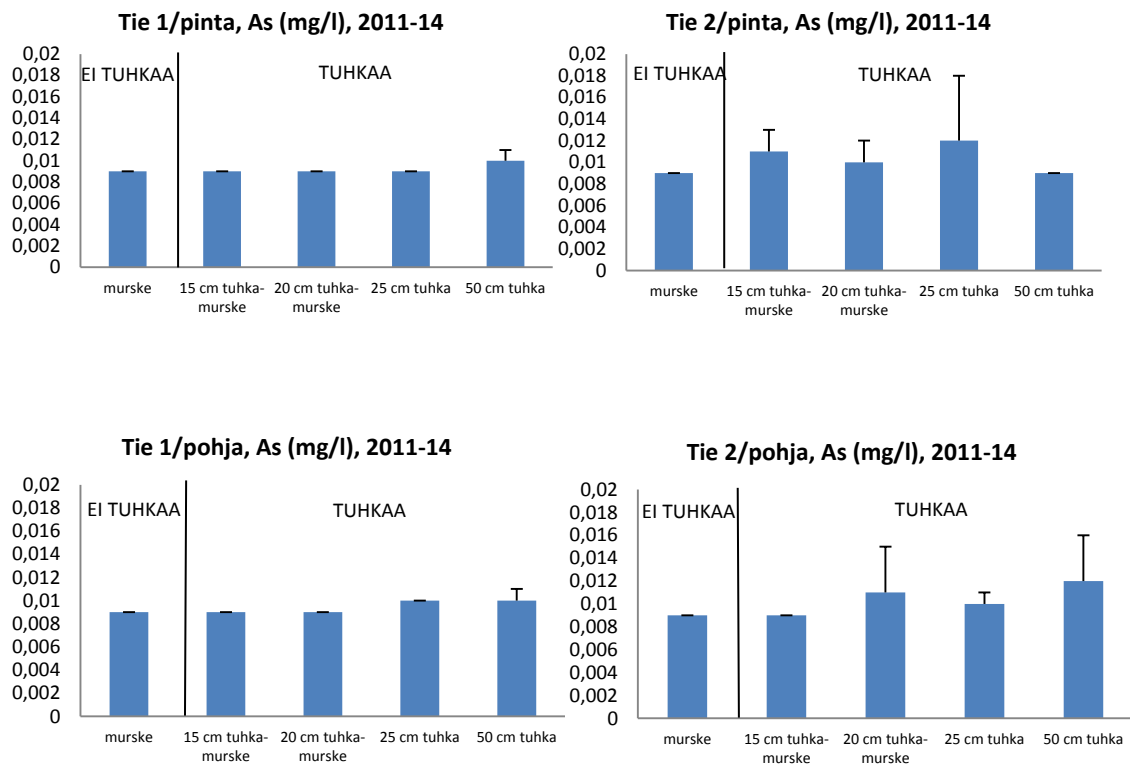
Kuva 4. Vajoveden Cr (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



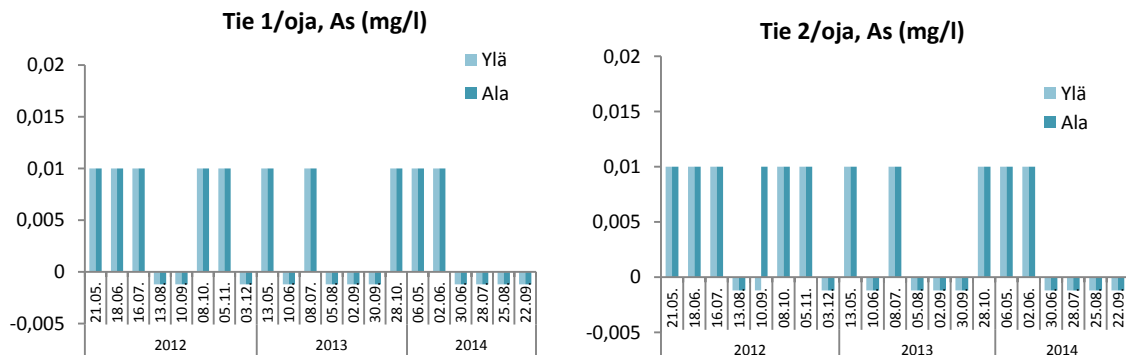
YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhkalla vaikutus

Kuva 5. Ojaveden Cr (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Määrittysraja 0,001 mg/l, talousveden laaturaja 0,050 mg/l (Finlex 2001)



Kuva 6. Vajoveden As (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.

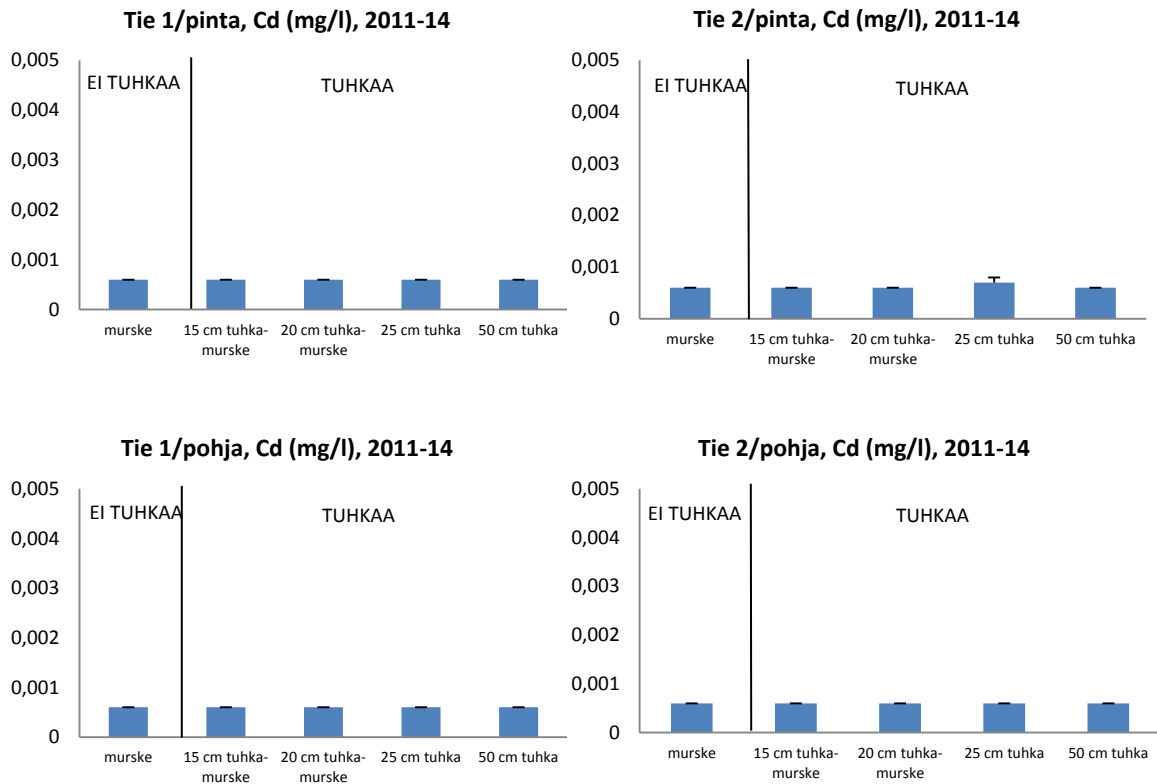


YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhkalla vaikutus

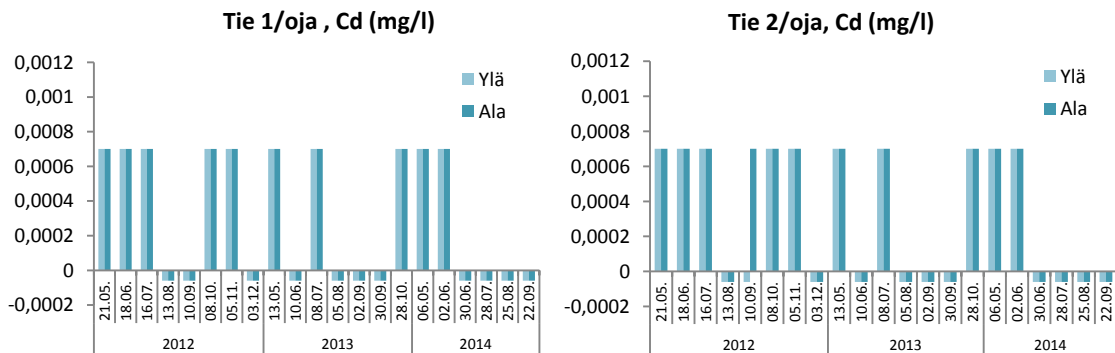
Kuva 7. Ojaveden As (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Talousveden laaturaja ja määrittysraja 0,010 mg/l (Finlex 2001)

**HUOM.** Mikäli tutkitun aineen pitoisuus oli alle määrittysrajan, on se merkitty yhtä suureksi kuin määrittysraja



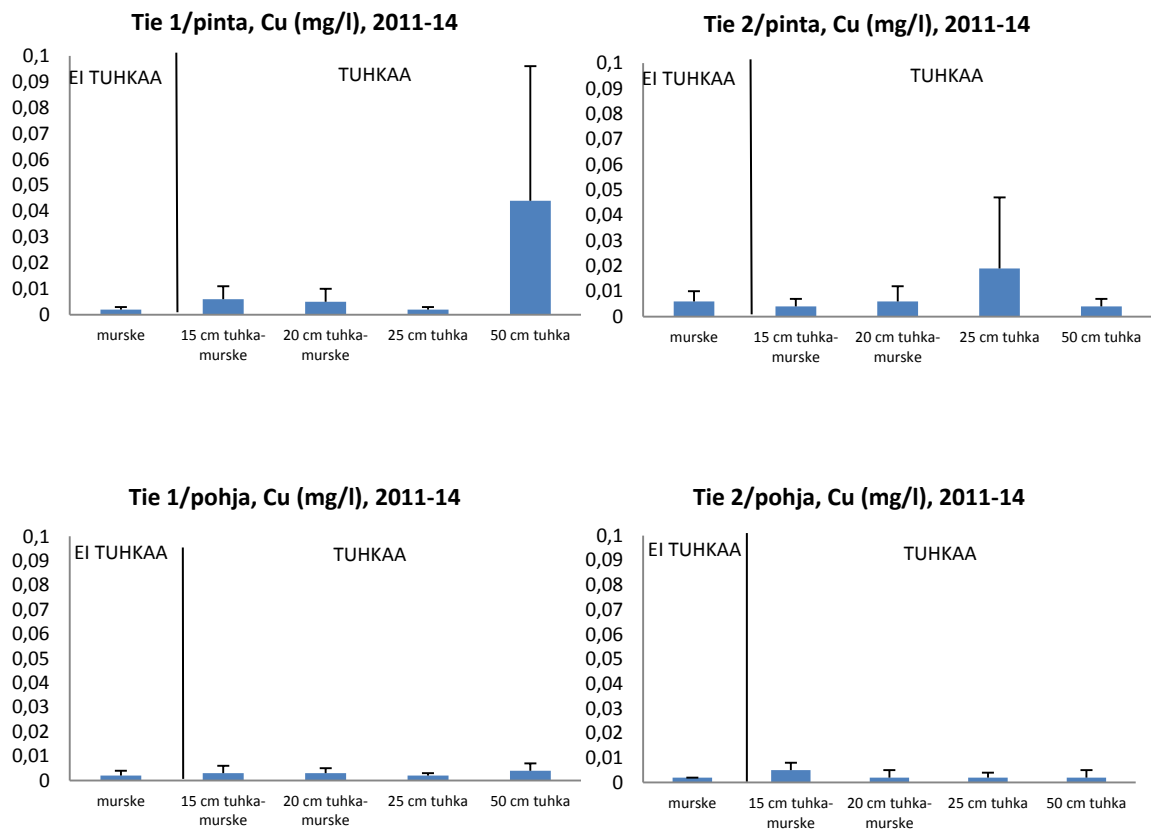
**Kuva 8.** Vajoveden Cd (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



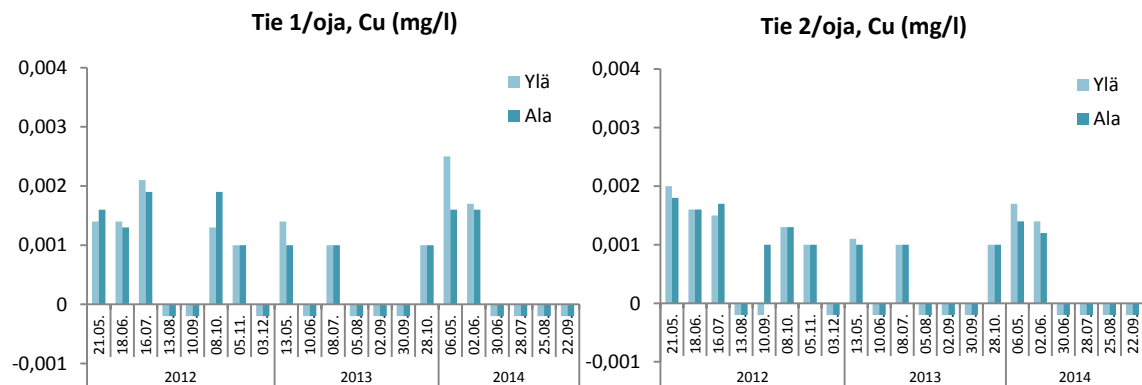
**YLÄ** = ei tuhkan vaikutusta; **ALA** = tuhalla vaikutus

**Kuva 9.** Ojaveden Cd (mg/l) näytteenottokerroittain vuosina 2012–2014.

Talovesiden laaturaja 0,005 mg/l (Finlex 2001), määrittäysraja 0,0007 mg/l  
 Maavesi (syvyys 35 cm), Evo: mediaani 0,00091 mg/l (Ukonmaanaho ym. 1998)



**Kuva 10.** Vajoveden Cu (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.

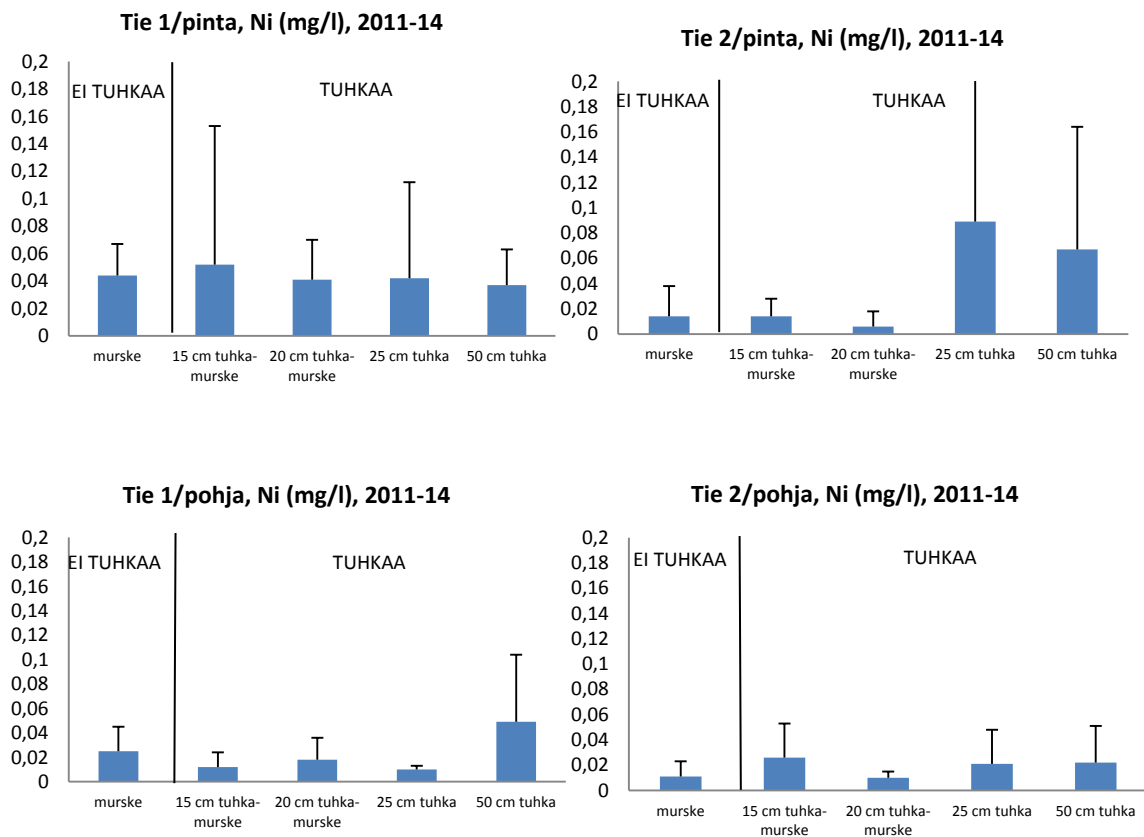


**YLÄ** = ei tuhkan vaikutusta; **ALA** = tuhkalla vaikutus

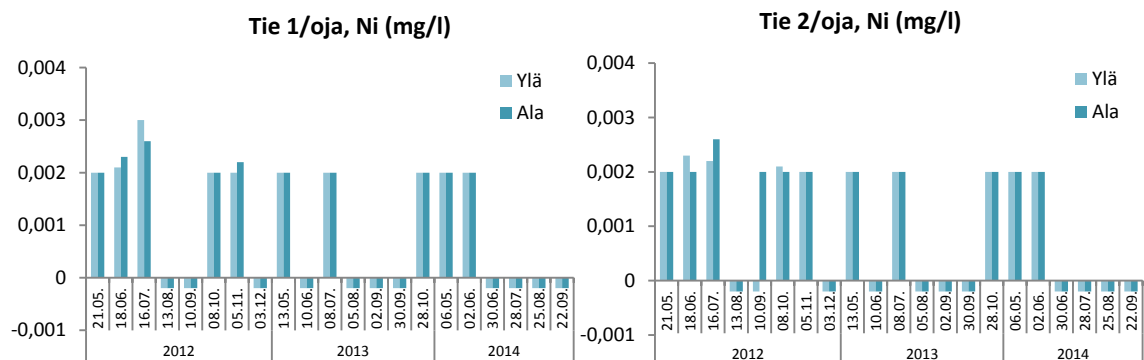
**Kuva 11.** Ojaveden Cu (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Talovesiden laaturaja 2 mg/l (Finlex 2001), määrittäysraja 0,001 mg/l  
 Metsämaan maavesi (syvyys 35 cm), Evo: mediaani 0,0046 mg/l (Ukonmaanaho ym. 1998)  
 Kaivosvesi/Suomi: 0,0141 mg/l (Lahermo ym. 2002)





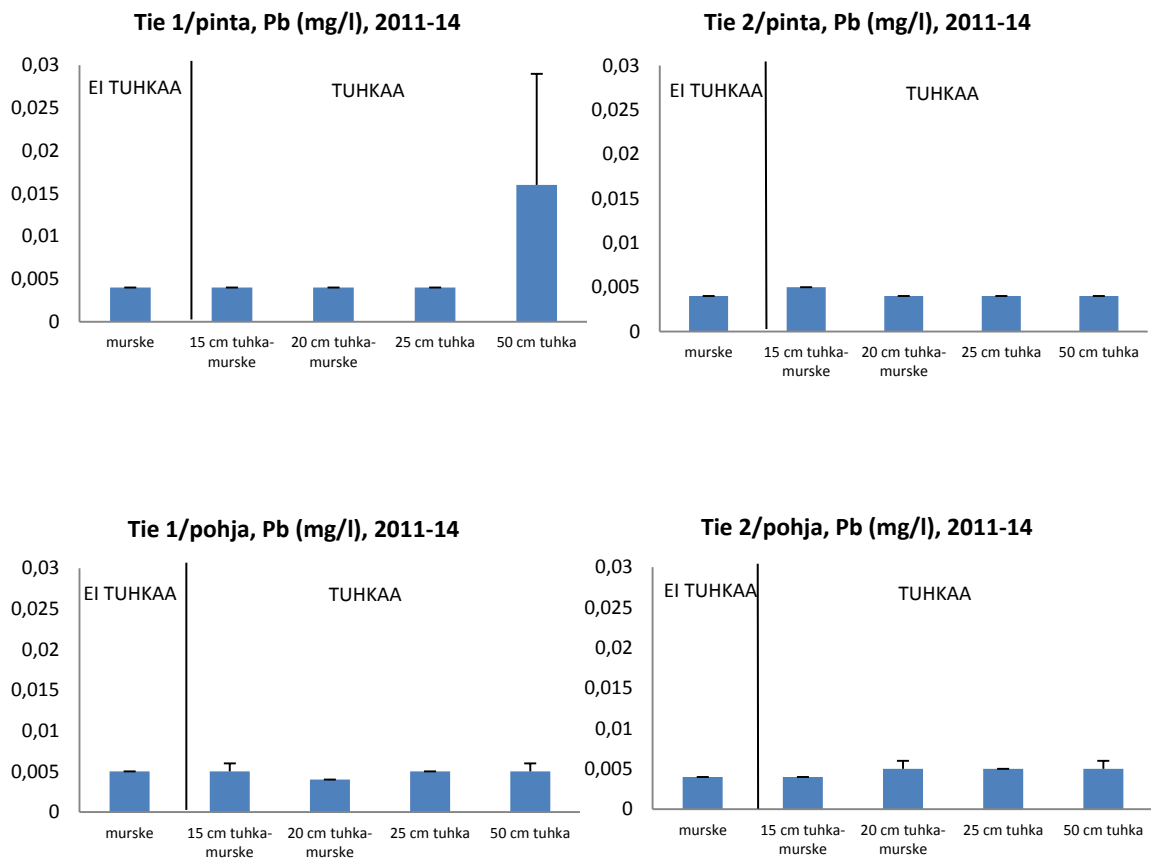
**Kuva 12.** Vajoveden Ni (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



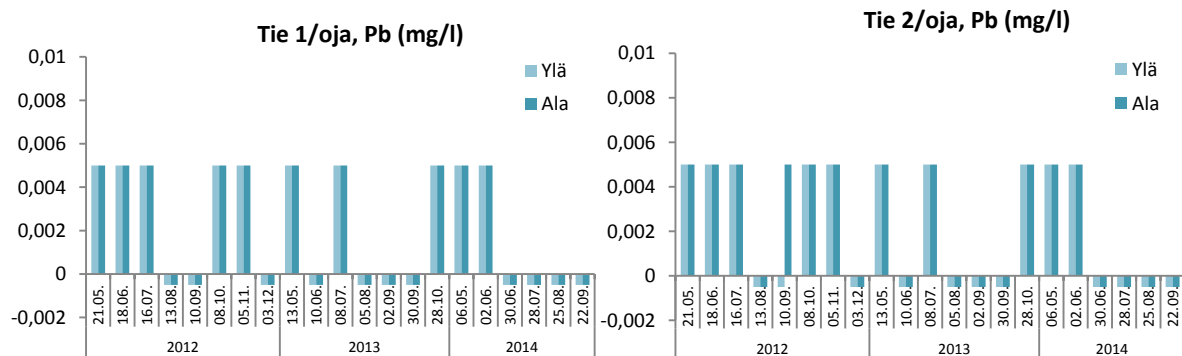
**YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhalla vaikutus**

**Kuva 13.** Ojaveden Ni (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Talovesiden laaturaja 0,020 mg/l (Finlex 2001), määrittäysraja 0,002 mg/l  
 Metsämaan maavesi (syvyys 35 cm), Evo: mediaani 0,0119 mg/l (Ukonmaanaho ym. 1998)  
 Kaivosvesi/Suomi: 0,0033 mg/l (Lahermo ym. 2002)



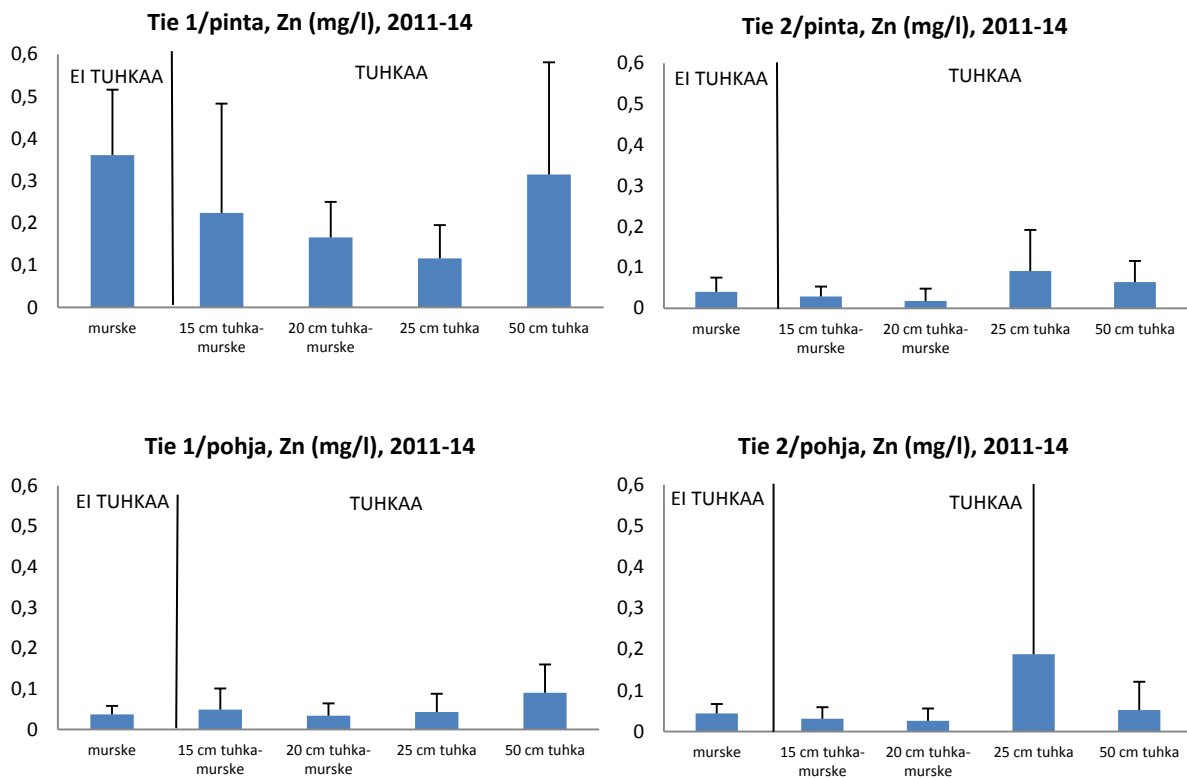
**Kuva 14.** Vajoveden Pb (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



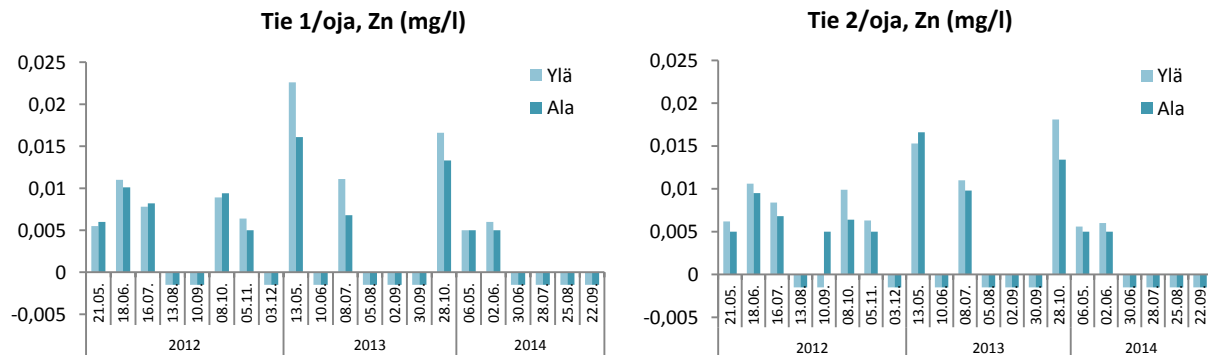
**YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhalla vaikutus**

**Kuva 15.** Ojaveden Pb (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Talousveden laaturaja 0,010 mg/l (Finlex 2001), määrittäysraja 0,005 mg/l  
 Metsämaan maavesi (syvyys 35 cm), Evo: mediaani 0,0146 mg/l (Ukonmaanaho ym. 1998)  
 Kaivosvesi/Suomi: 0,0002 mg/l (Lahermo ym. 2002)



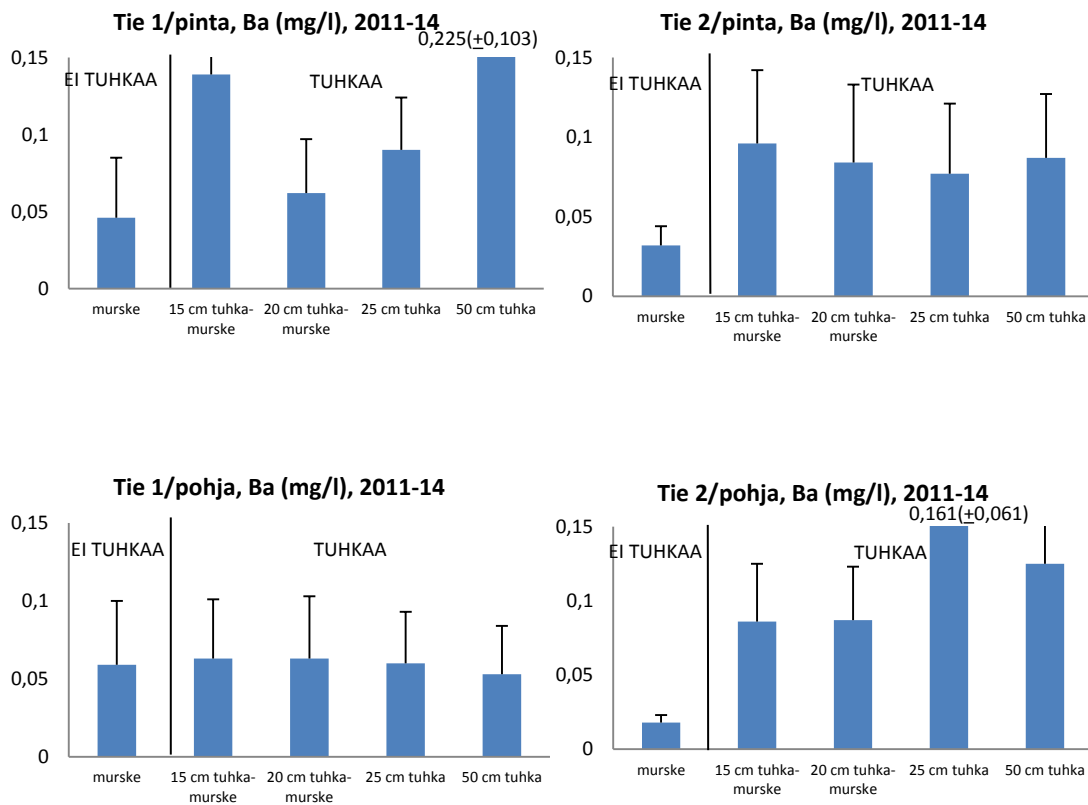
**Kuva 16.** Vajoveden Zn (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



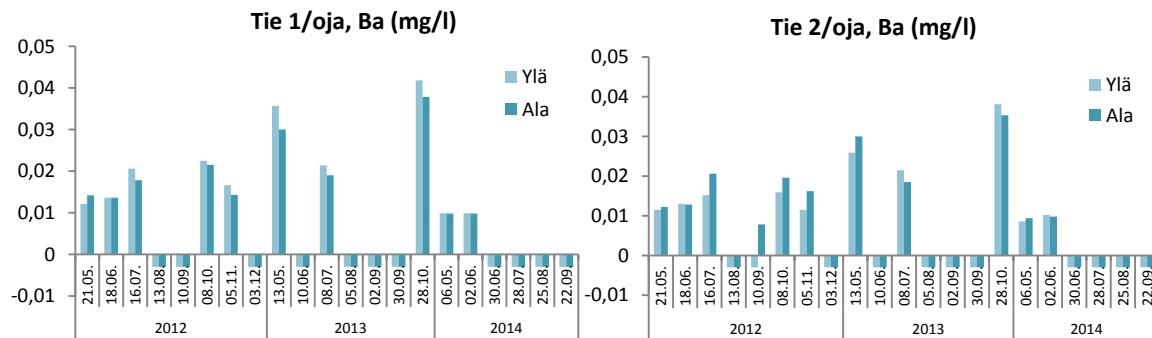
**YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhkalla vaikutus**

**Kuva 17.** Ojaveden Zn (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Talousveden laaturaja 3 mg/l (Finlex 2001), määrittäysraja 0,005 mg/l  
 Metsämaan maavesi (syvyys 35 cm), Evo: mediaani 0,0273 mg/l (Ukonmaanaho ym. 1998)  
 Kaivosvesi/Suomi: 0,0442 mg/l (Lahermo ym. 2002)



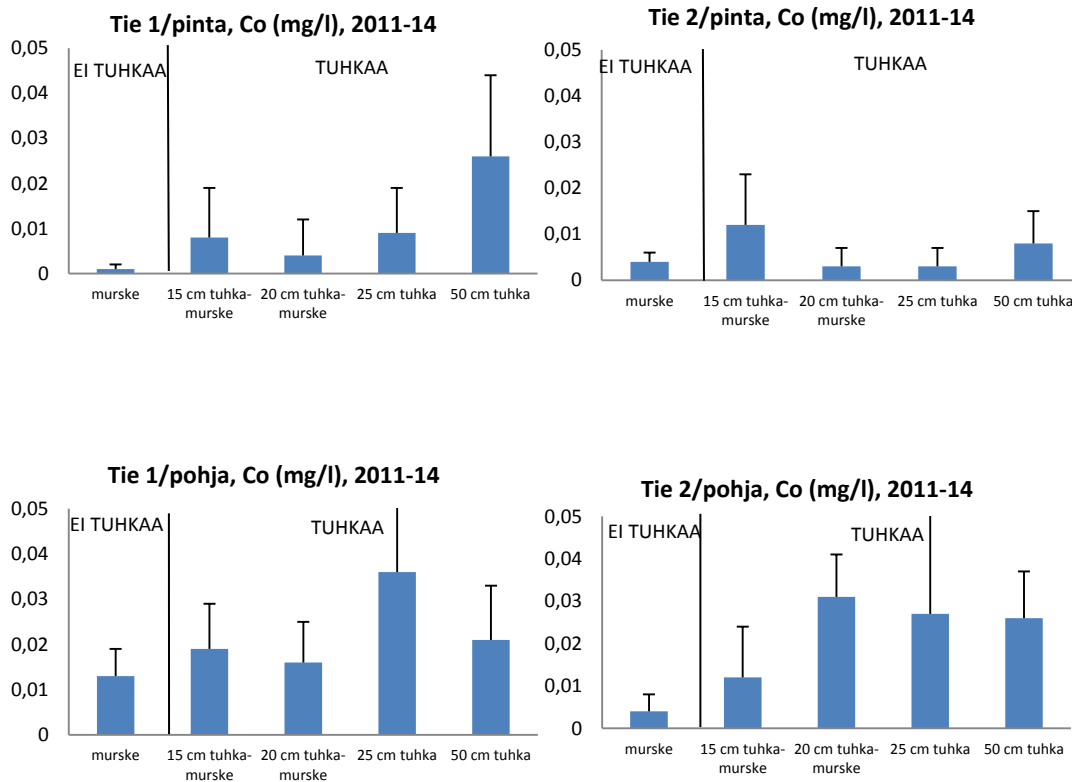
Kuva 18. Vajoveden Ba (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



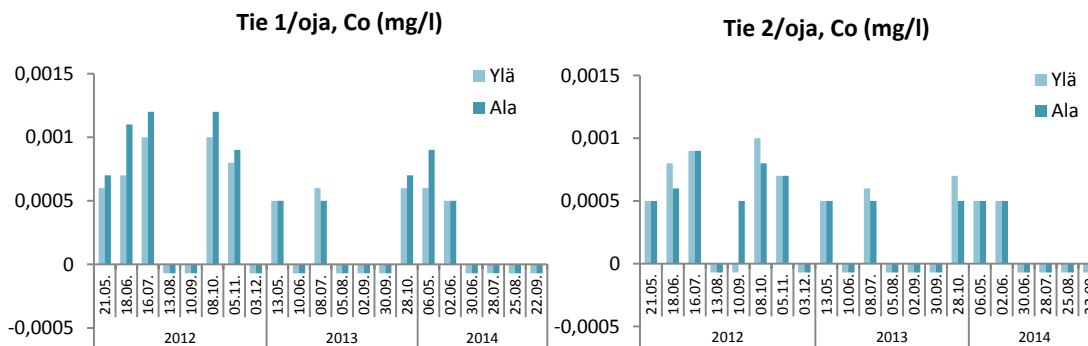
YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhkalla vaikutus

Kuva 19. Ojaveden Ba (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

”Kohonnut” pitoisuus >0,1 mg/l (Lahermo ym. 2002)  
 Kaivosvesi/Suomi: 0,028 mg/l (Lahermo ym. 2002)



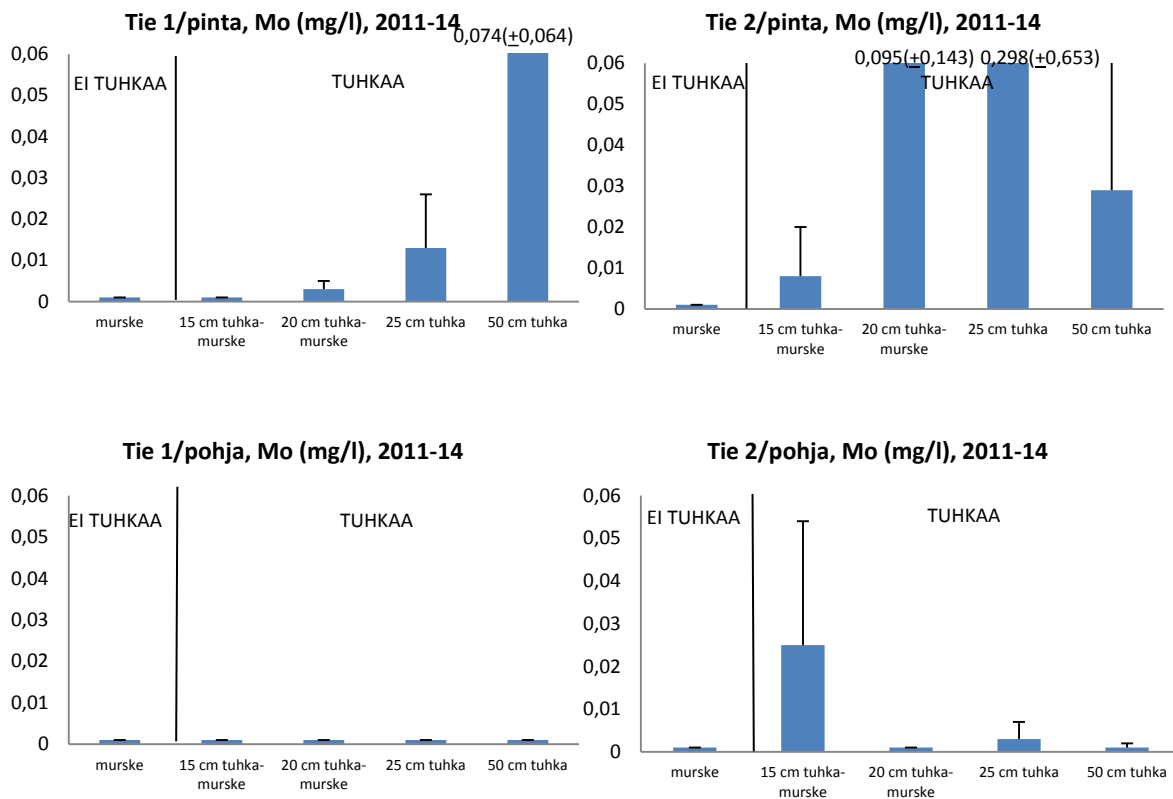
Kuva 20. Vajoveden Co (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



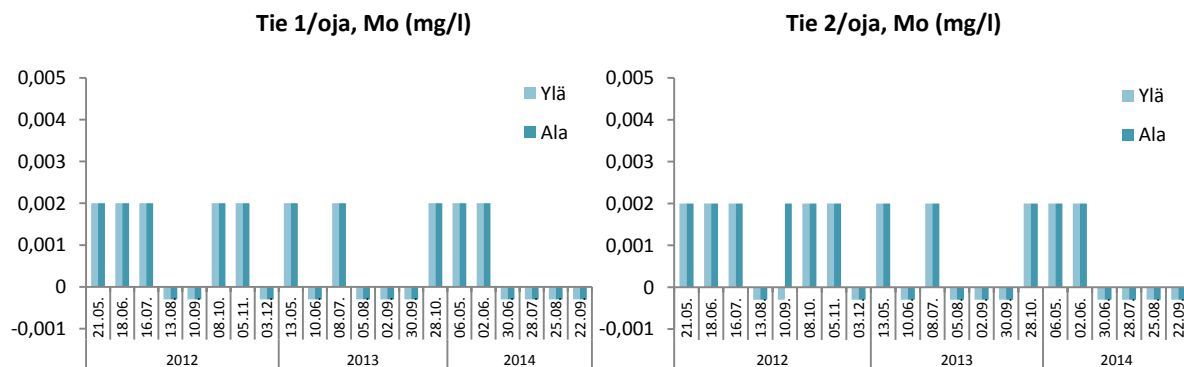
YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhalla vaikutus

Kuva 21. Ojaveden Co (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

”Kohonnut” pitoisuus >0,001 mg/l (Lahermo ym. 2002), määrittäysraja 0,0005 mg/l  
Kaivosvesi/Suomi: 0,0008 mg/l (Lahermo ym. 2002)



Kuva 22. Vajoveden Mo (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhkalla vaikutus

Kuva 23. Ojaveden Mo (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Talovesiden vanha laaturaja 0,070 mg/l, määrittäysraja 0,002 mg/l  
Kaivosvesi/Suomi: 0,0003 mg/l (Lahermo ym. 2002)

### 3.2. Ravinteiden (B, Na, Ca, Mg, K, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, P<sub>tot</sub>), sulfaattirikin (SO<sub>4</sub>-S), kloridin (Cl), raudan (Fe), alumiinin (Al), mangaanin (Mn) ja liukoisen orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuudet

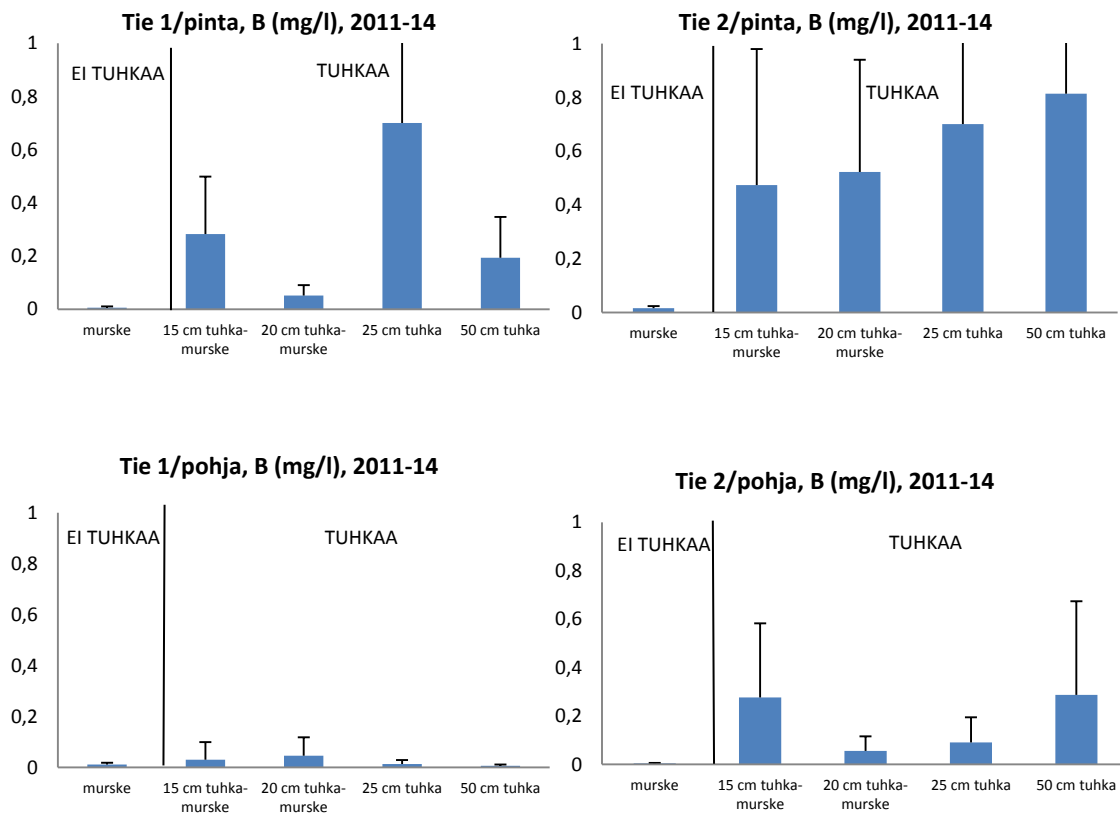
Teiden tuhkaa sisältävistä kerroksista vapautui vajoveteen ravinteita (B, Na, Ca, Mg, K) sekä sulfaattia ja kloridia. Tuhkaa sisältävien tiekohtien vajovesissä oli paikoin korkeita pitoisuuksia näille parametreille verrattuna pelkkää murskettä sisältäviin tieosuuksiin. Teiden vajovesien pitoisuuksissa esiintyi kuitenkin erittäin suurta vaihtelua, kuten myös teiden välillä, vaikka ne oli rakennettu samanlaisiksi. Vaihtelun syytä ei tiedetä. Viitteitä saatiin kuitenkin siitä, että suurempaan tuhkamäärään voisi liittyä korkeampia pitoisuuksia.

Ravinteiden (B, Na, Ca, Mg, K) ja suolojen (SO<sub>4</sub>, Cl) vapautuminen tuhkaa sisältävien teiden vajoveteen näkyi myös laskuojien vesien pitoisuuksissa nousseina arvoina tuhkatien vaikutuksen jälkeen. Ojavesien pitoisuudet näille aineille olivat kuitenkin tuhcateiden vaikutuksen jälkeenkin pienempiä kuin talousveden ylimmät sallitut pitoisuudet.

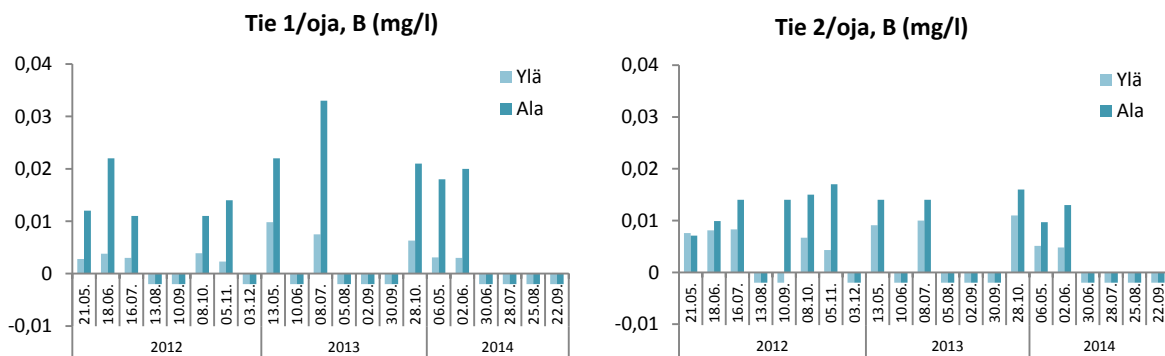
Korkeita raudan ja mangaanin pitoisuuksia mitattiin vajovesissä teiden pohjatasoilla kaikilla aloilla (myös pelkän murskeen alalla).

Typen ja fosforin (NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, P<sub>tot</sub>) pitoisuuksiin tuhkalla ei ollut merkittävää vaikutusta (näistä tuloksista esitetty kuvina vain ojatulokset).

Kuvissa kullekin mitatulle parametrille on esitetty tulokset teiden sisäiselle vajovedelle sekä teiden läpi kulkevan laskuojan vedelle (kuva 24–48). Kuvissa on esitetty pitoisuuden keskiarvo keskihajonnan kanssa koko seurantajaksolle tien 1 ja 2 sisäiselle pintaosan sekä pohjaosan vajovedelle. Tulokset on esitetty pelkästä murskeesta tehdyille tiekoealalle sekä erilaisia tuhkakäsittelyjä sisältäville tiekoealoille molemmille teille erikseen. Ojavesien pitoisuudet on esitetty kullekin näytteenottokeralle ja teille 1 ja 2 erikseen. Laskuojan yläosan veteen (YLÄ) ei tuhcateillä ole ollut vaikutusta, ja mahdollinen vaikutus näkyy laskuojan alaosassa (ALA), kun tuhkatien omat ojavedet ovat sekoittaneet tien läpi kulkevaan laskuojaan.



**Kuva 24.** Vajoveden B (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.

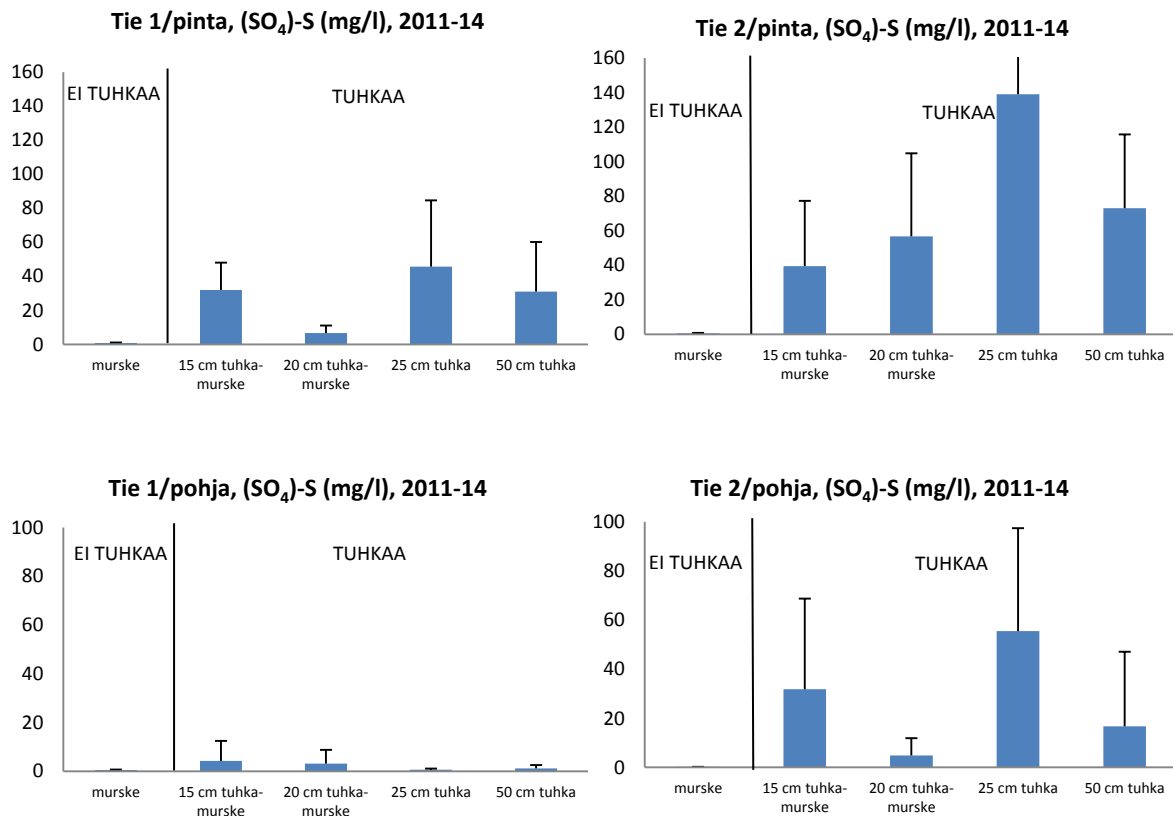


**YLÄ** = ei tuhkan vaikutusta; **ALA** = tuhalla vaikutus

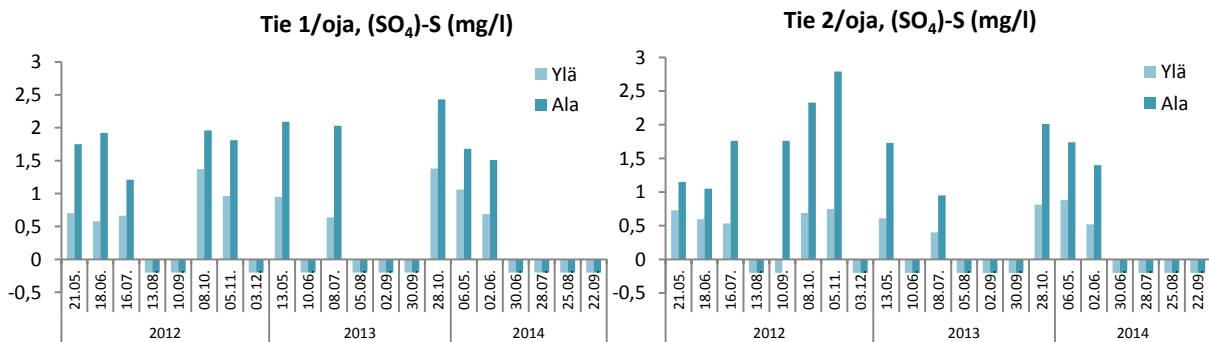
**Kuva 25.** Ojaveden B (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Talousveden laaturaja 1,0 mg/l (Finlex 2001)  
 Kaivosvesi/Suomi: 0,0228 mg/l (Lahermo ym. 2002)





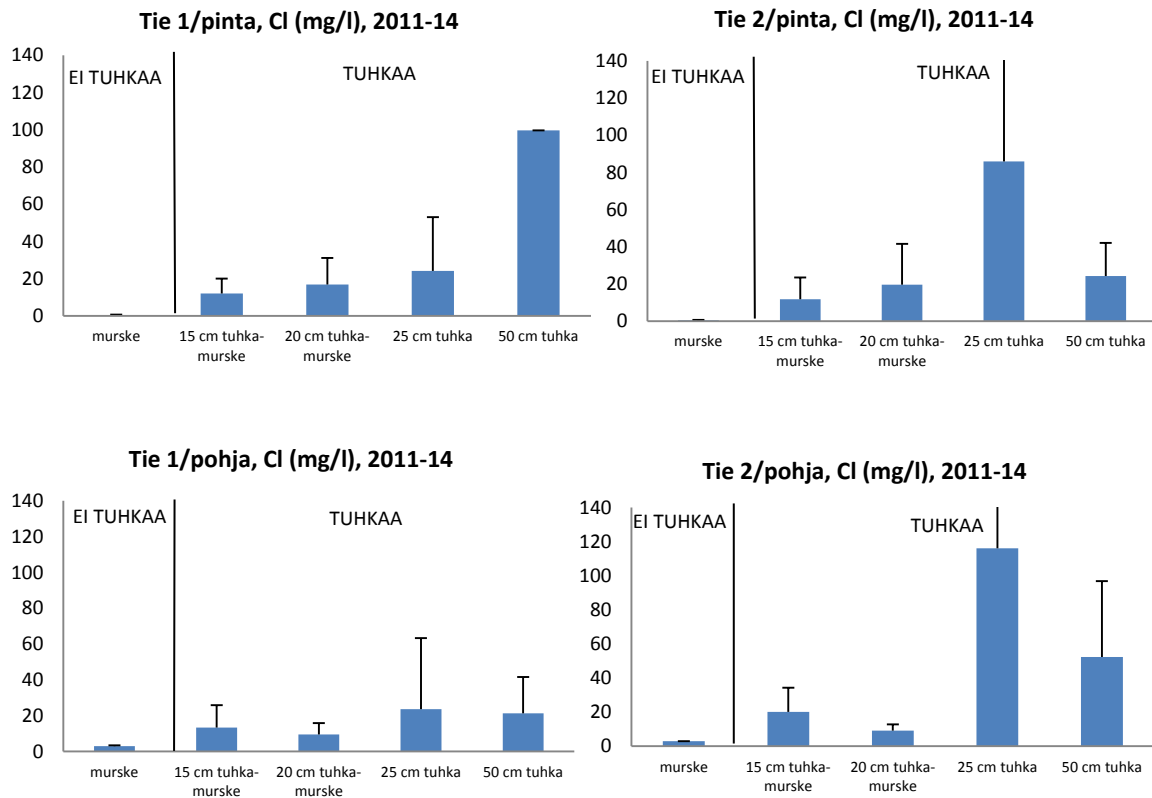
**Kuva 26.** Vajoveden S (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



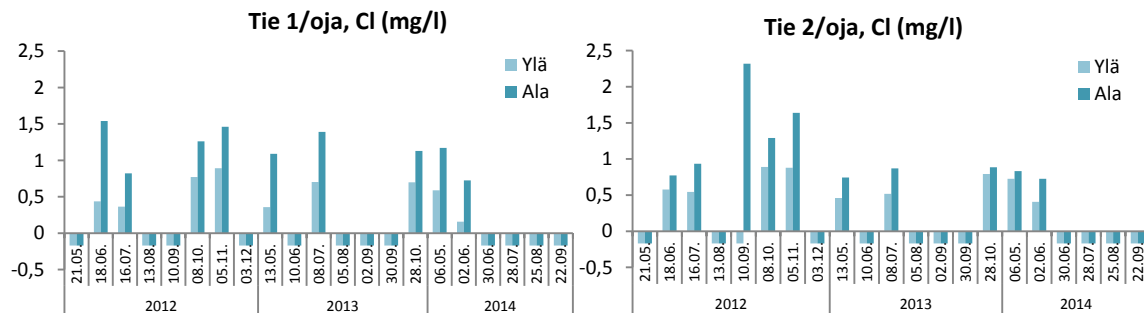
**YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhkalla vaikutus**

**Kuva 27.** Ojaveden S (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Talousveden laaturaja 83 mg/l (Finlex 2001)  
 Kaivosvesi/Suomi: 5,0 mg/l (Lahermo ym. 2002)  
 ICP Forests, metsämaan maavesi (syvyys 40 cm, moreeni): 1,6 - 8,7 mg/l (Derome ym. 2002)



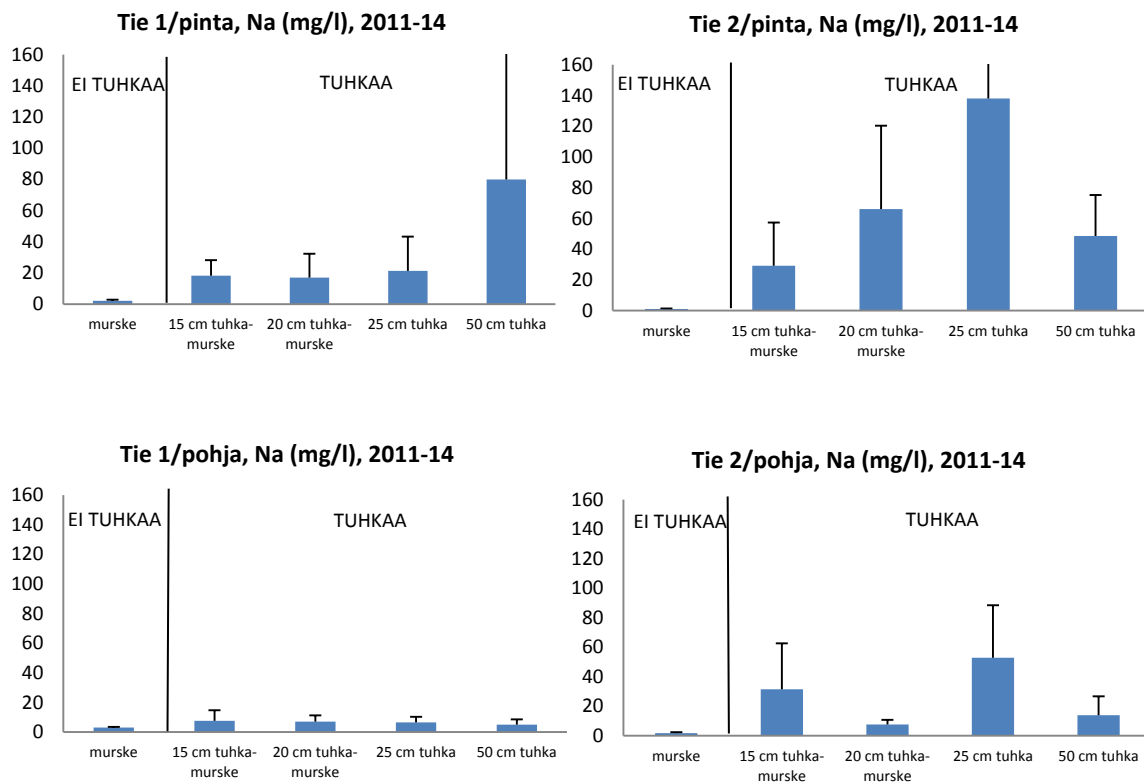
**Kuva 28.** Vajoveden Cl (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



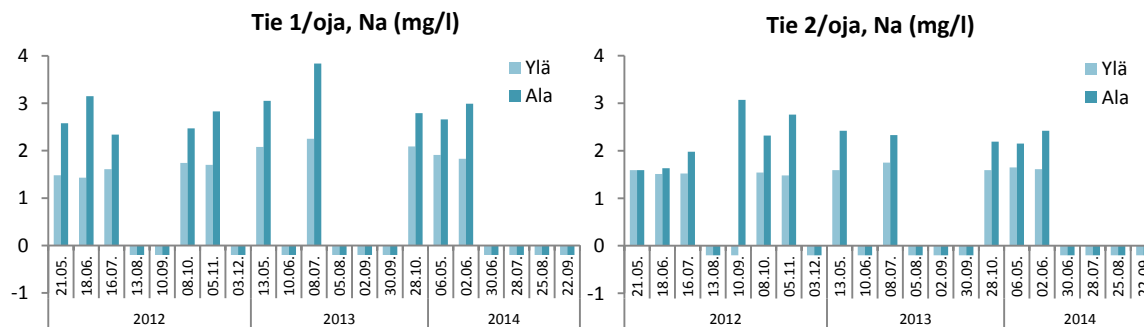
**YLÄ** = ei tuhkan vaikutusta; **ALA** = tuhkalla vaikutus

**Kuva 29.** Ojaveden Cl (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Talousveden laaturaja 100 mg/l (Finlex 2001)  
 Kaivosvesi/Suomi: 8,6 mg/l (Lahermo ym. 2002)  
 ICP-Forests, metsämaan maavesi (syvyys 40 cm, moreeni): 0,5–1,9 mg/l (Derome ym. 2002)



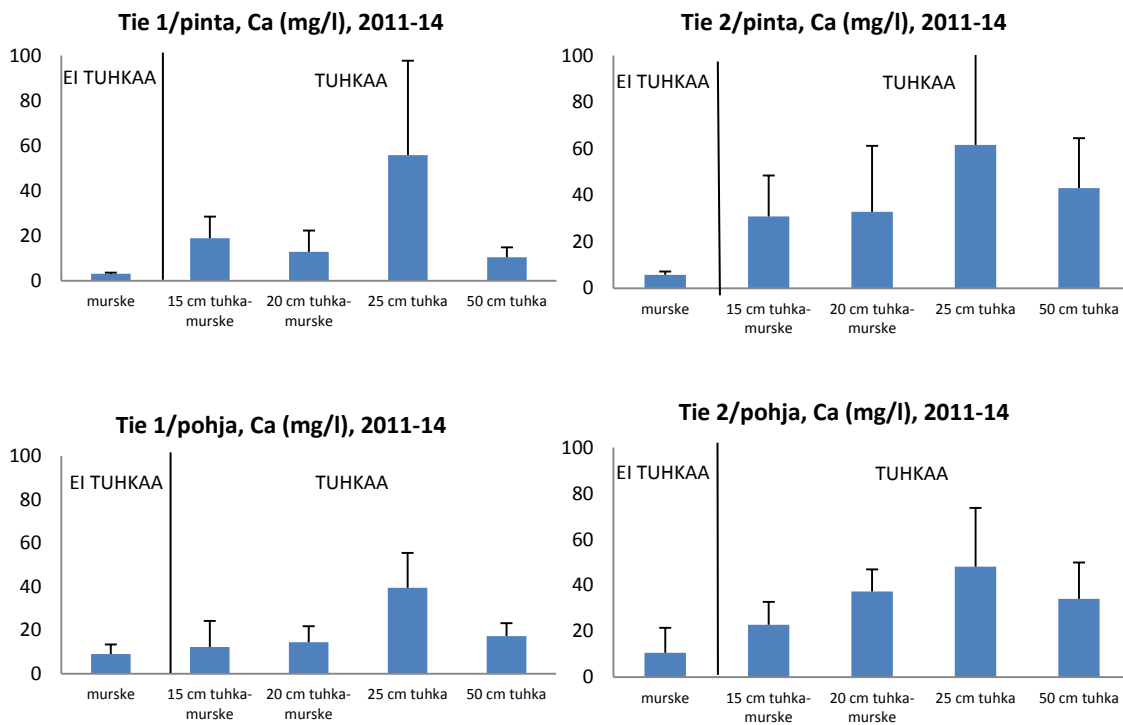
**Kuva 30.** Vajoveden Na (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



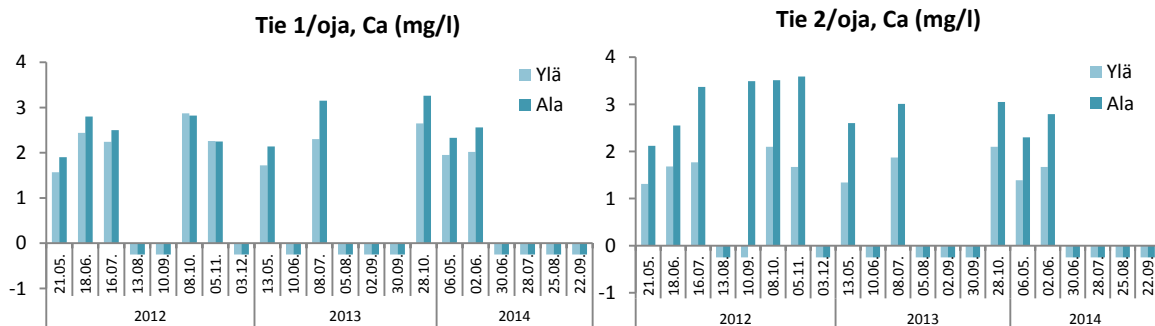
**YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhkalla vaikutus**

**Kuva 31.** Ojaveden Na (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Talousveden laaturaja 200 mg/l (Finlex 2001)  
 Kaivosvesi/Suomi: 7,0 mg/l (Lahermo ym. 2002)  
 ICP-Forests, metsämaan maavesi (syvyys 40 cm, moreeni): 0,7–4,7 mg/l (Derome ym. 2002)



**Kuva 32.** Vajoveden Ca (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.

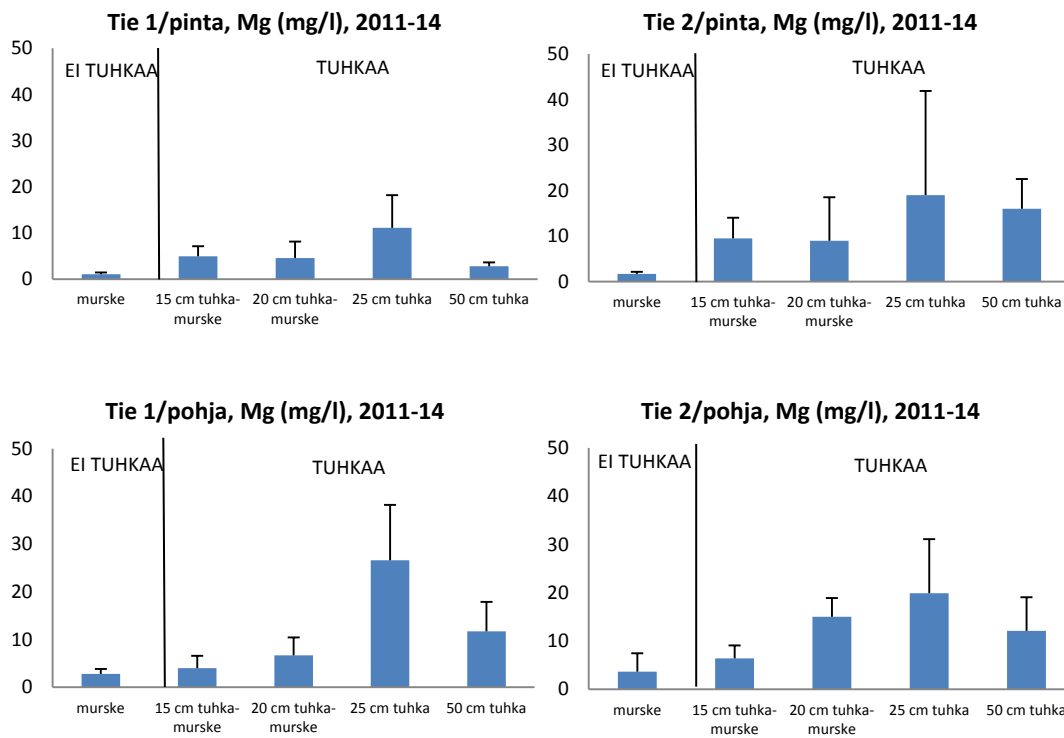


**YLÄ** = ei tuhkan vaikutusta; **ALA** = tuhalla vaikutus

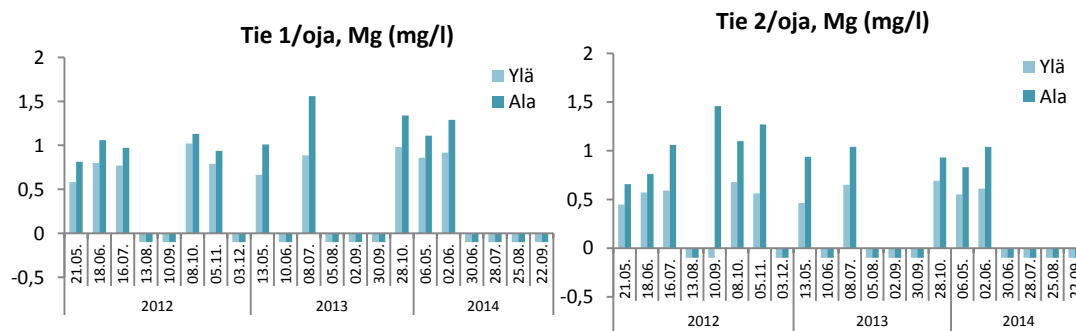
**Kuva 33.** Ojaveden Ca (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Kaivosvesi/Suomi: 15,2 mg/l (Lahermo ym. 2002)

ICP-Forests, metsämaan maavesi (syvyys 40 cm, moreeni): 1,1–3,9 mg/l (Derome ym. 2002)



Kuva 34. Vajoveden Mg (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.

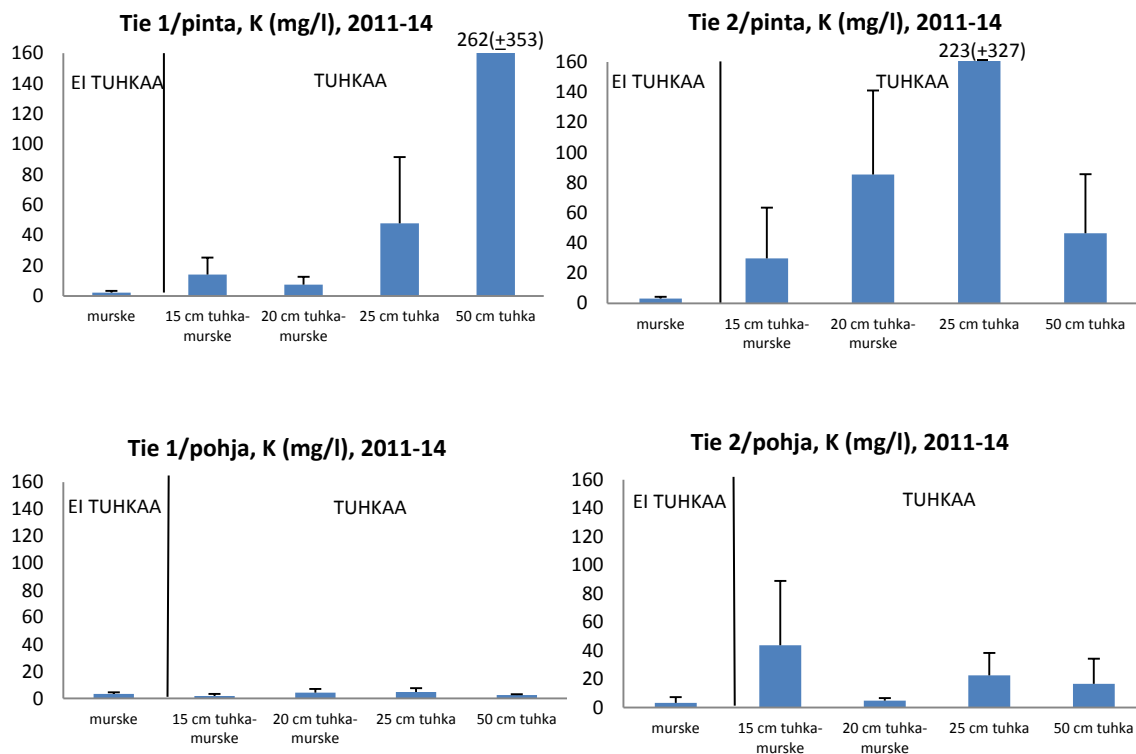


YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhalla vaikutus

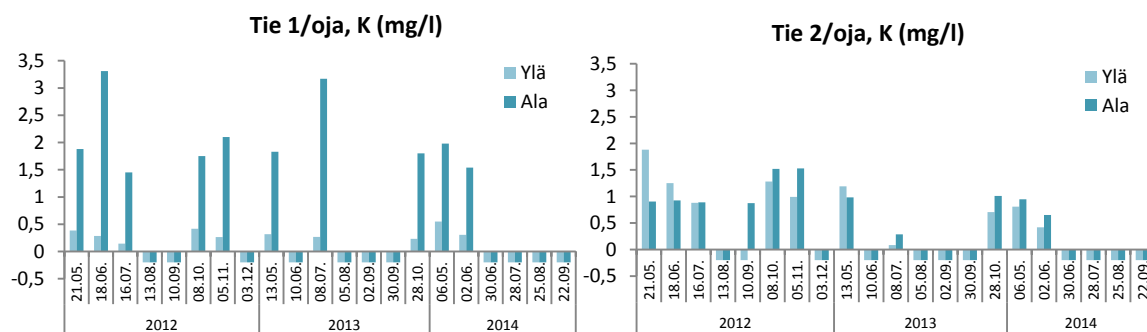
Kuva 35. Ojaveden Mg (mg/l) näytteenottoeroittain vuosina 2012–2014.

Kaivosvesi/Suomi: 3,8 mg/l (Lahermo ym. 2002)

ICP-Forests, metsämaan maavesi (syvyys 40 cm, moreeni): 0,2–1,6 mg/l (Derome ym. 2002)



Kuva 36. Vajoveden K (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.

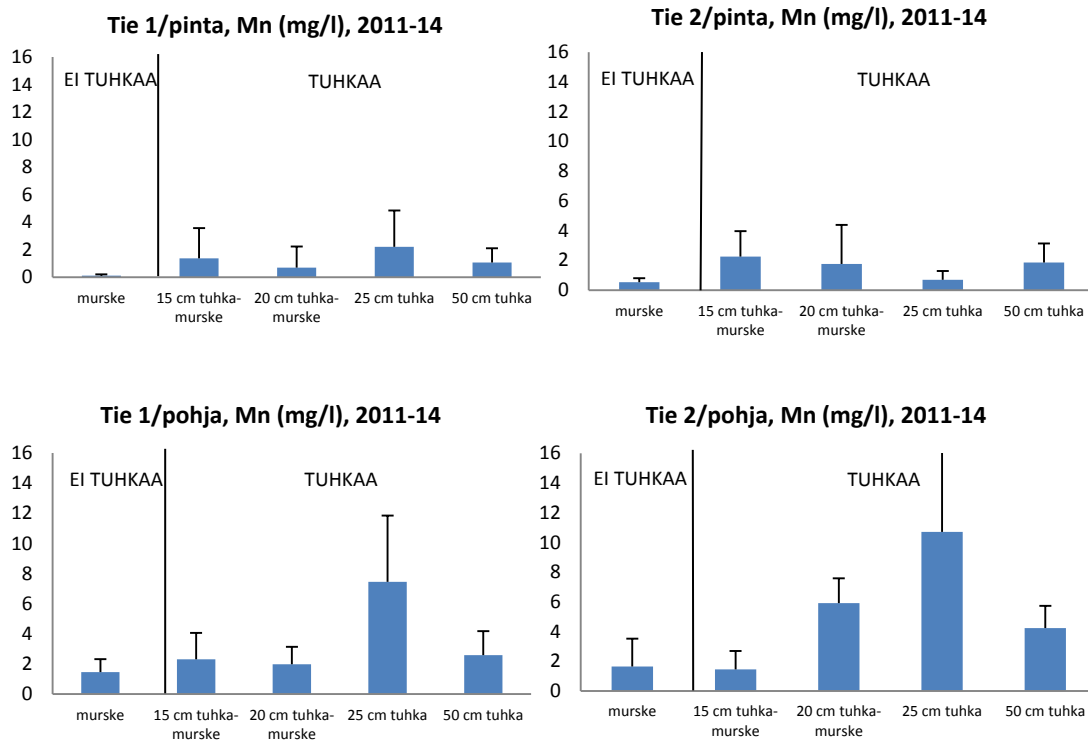


YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhalla vaikutus

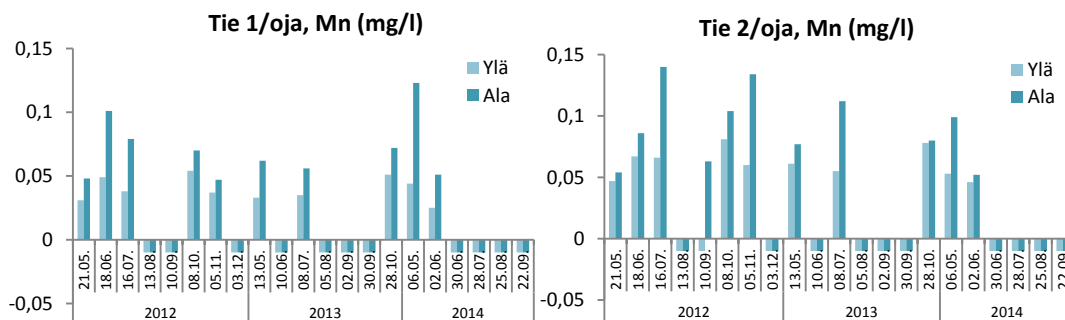
Kuva 37. Ojaveden K (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Kaivosvesi/Suomi: 5,0 mg/l (Lahermo ym. 2002)

ICP-Forests, metsämaan maavesi (syvyys 40 cm, moreeni): 0,2–2,7 mg/l (Derome ym. 2002)



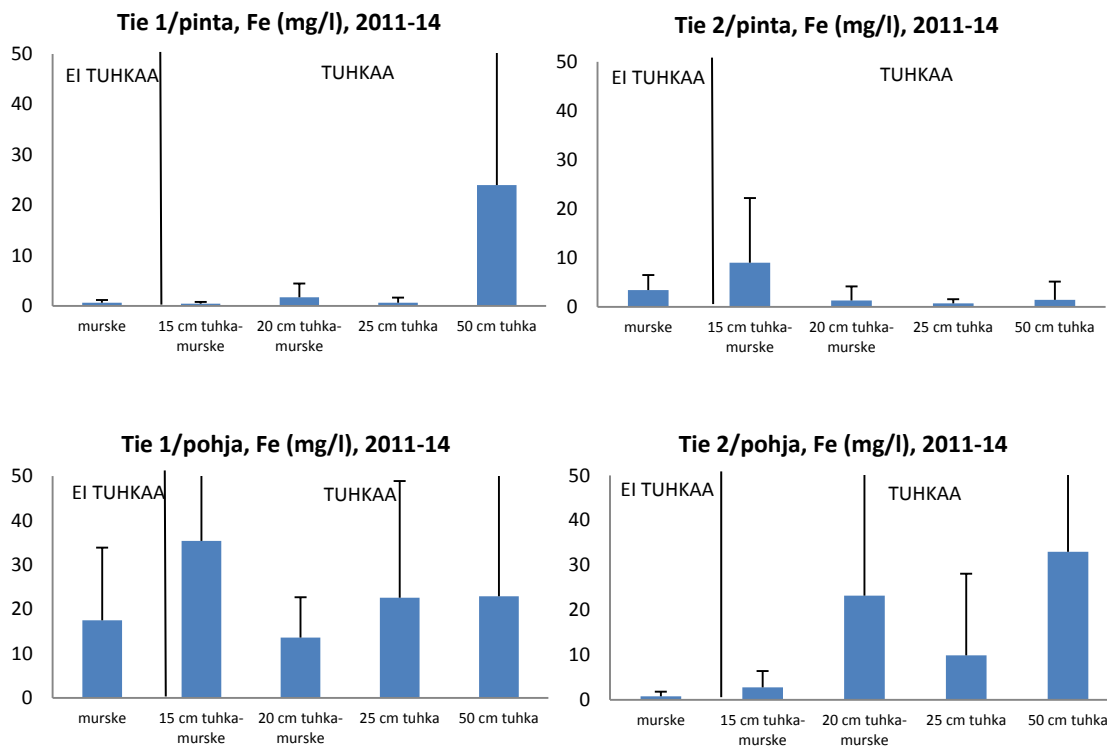
Kuva 38. Vajoveden Mn (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



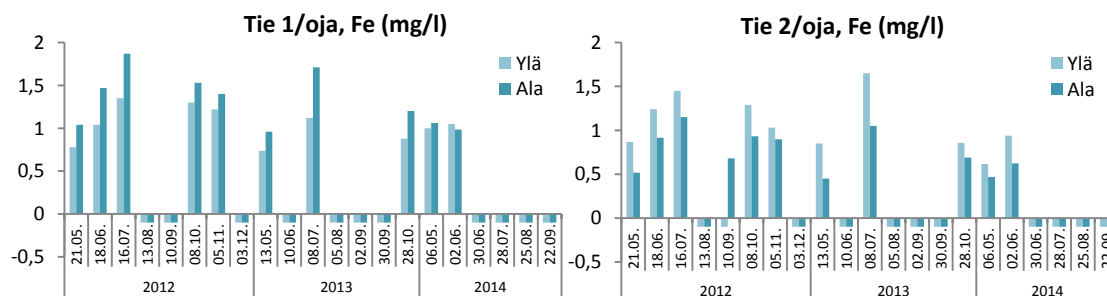
YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhalla vaikutus

Kuva 39. Ojaveden Mn (mg/l) näytteenottokerroittain vuosina 2012–2014.

Talousveden laaturaja 0,05 mg/l (Finlex 2001)  
 Kaivosvesi/Suomi: 0,059 mg/l (Lahermo ym. 2002)  
 ICP-Forests, metsämaan maavesi (syvyys 5 cm, moreeni): 0,11–0,55 mg/l (Derome ym. 2002)



**Kuva 40.** Vajoveden Fe (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.

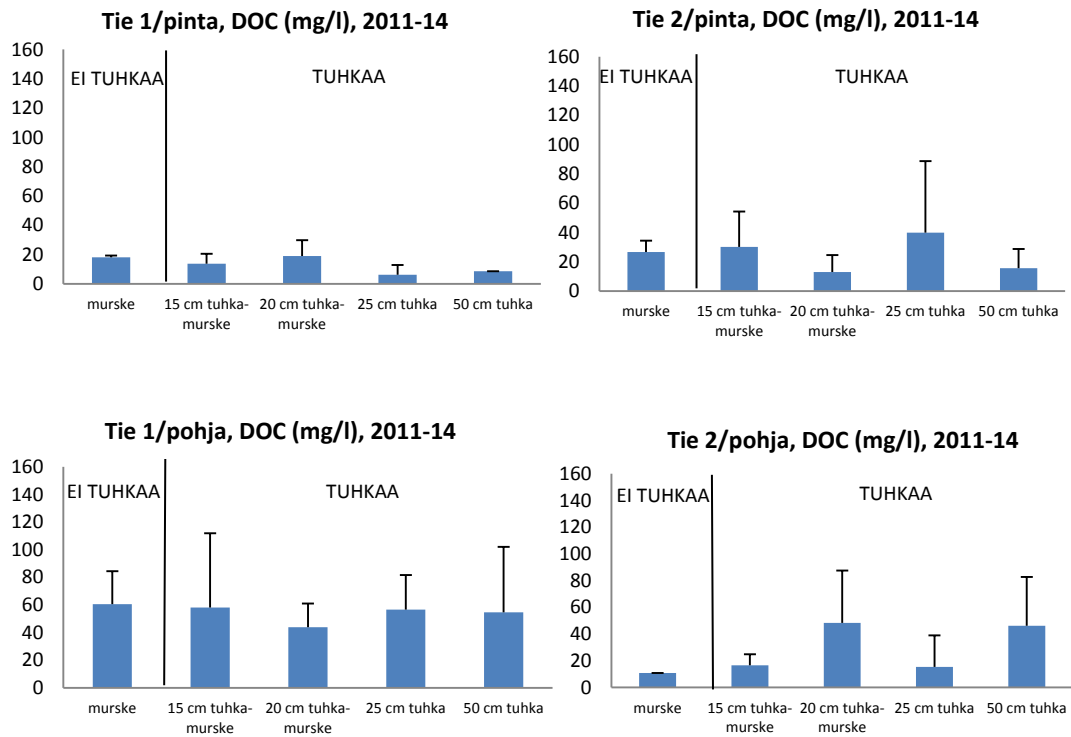


**YLÄ** = ei tuhkan vaikutusta; **ALA** = tuhkalla vaikutus

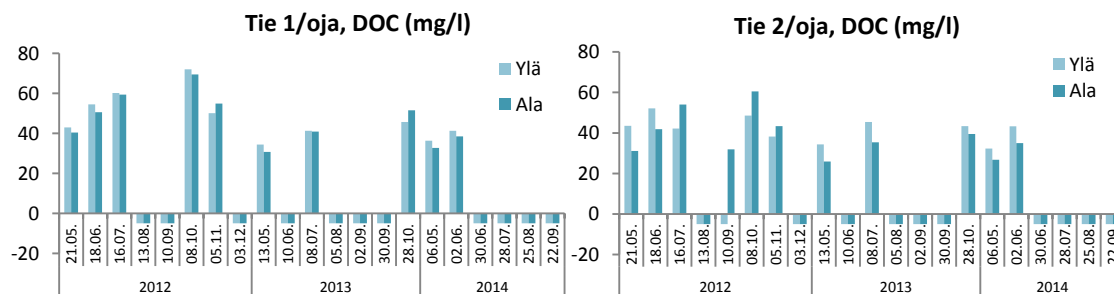
**Kuva 41.** Ojaveden Fe (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Talovesiden laaturaja 0,2 mg/l (Finlex 2001)  
 Kaivosvesi/Suomi: <0,03 mg/l (Lahermo ym. 2002)  
 ICP-Forests, metsämaan maavesi (syvyys 5 cm, moreeni): 0,4–1,4 mg/l (Derome ym. 2002)  
 Ojavedet 1,5–2,3 mg/l (Ahti ym. 1999); Ojavedet 1,59 mg/l (Joensuu ym. 1999)





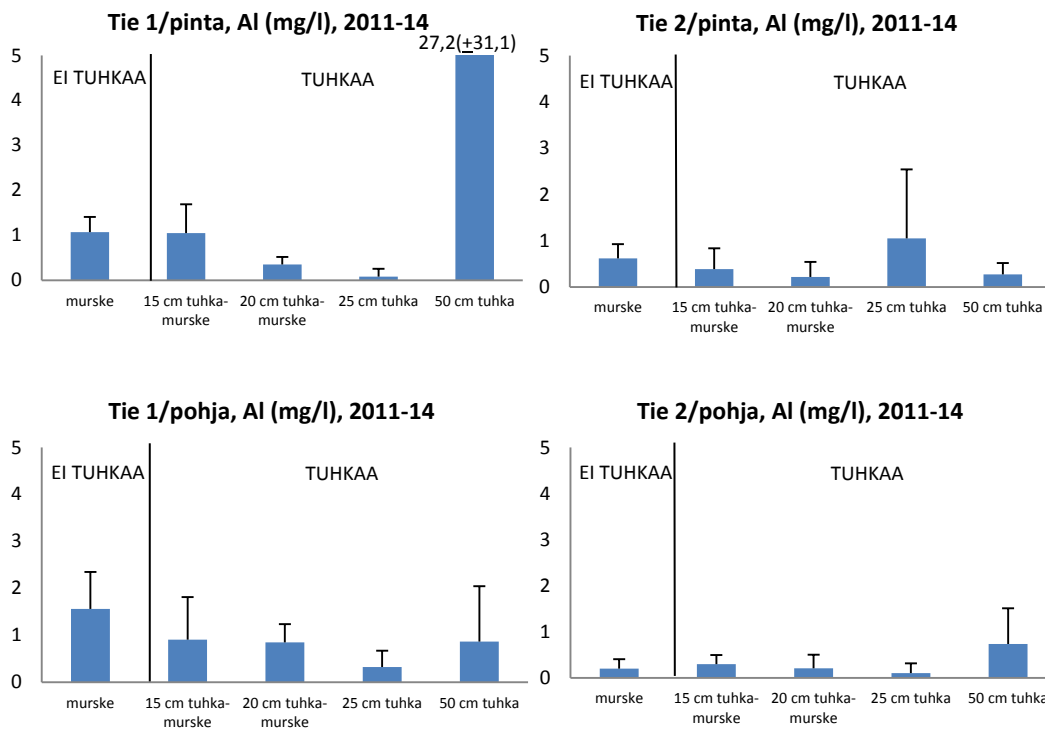
Kuva 42. Vajoveden DOC (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



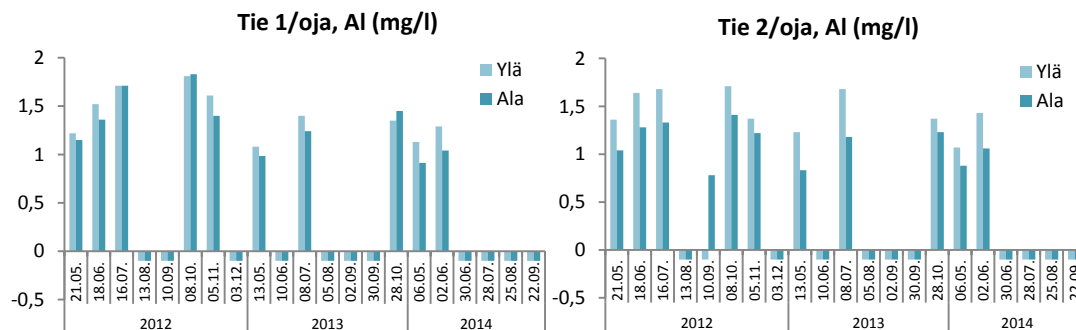
YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhkalla vaikutus

Kuva 43. Ojaveden DOC (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

ICP-Forests, metsämaan maavesi (syvyys 5 cm, moreeni): 32,7–69,4 mg/l (Derome ym. 2002)  
 Ojavedet 22,9–34,7 mg/l (Ahti ym. 1999); Ojavedet 29,79 mg/l (Joensuu ym. 1999)



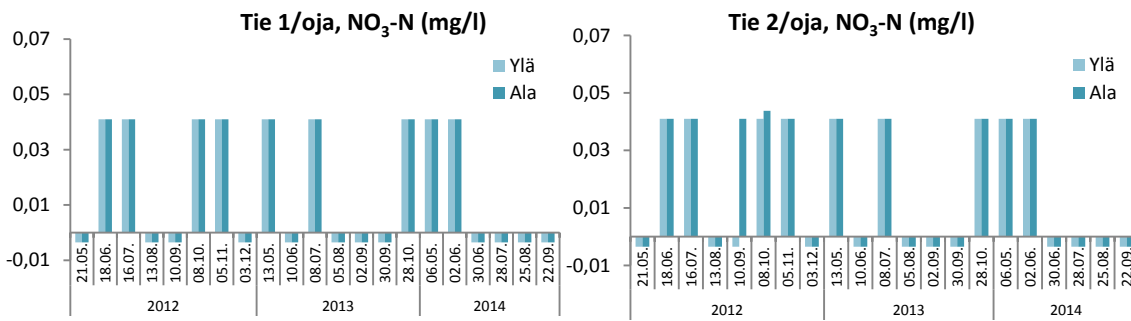
**Kuva 44.** Vajoveden Al (mg/l) tien pinnassa ja pohjatasolla, keskiarvo ja keskihajonta vuosilta 2011–2014.



**YLÄ** = ei tuhkan vaikutusta; **ALA** = tuhkalla vaikutus

**Kuva 45.** Ojaveden Al (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

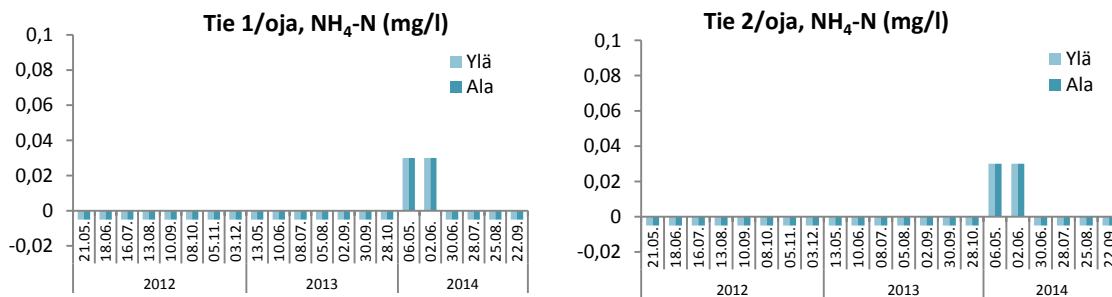
Talovesiden laaturaja 0,2 mg/l (Finlex 2001)  
 ICP-Forests, metsämaan maavesi (syvyys 5 cm, moreeni): 0,3–2,9 mg/l (Derome ym. 2002)  
 Ojavedet 0,41–1,68 mg/l (Ahti ym. 1999); Ojavedet 0,43 mg/l (Joensuu ym. 1999)



**YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhkalla vaikutus**

**Kuva 46.** Ojaveden NO<sub>3</sub>-N (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

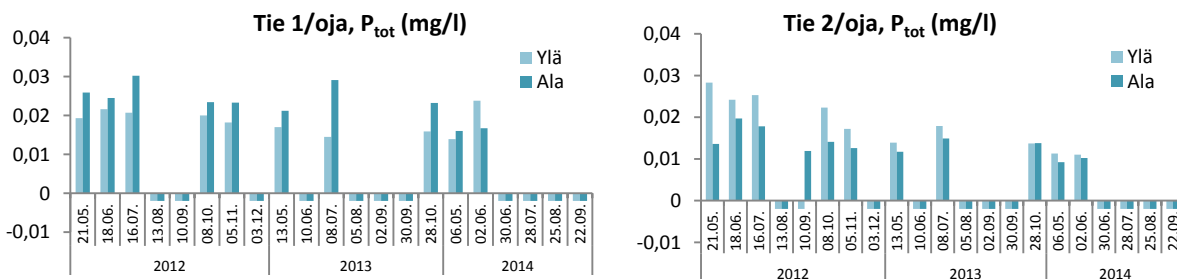
Ojavedet 0,03–0,07 mg/l (Ahti ym. 1999); Ojavedet 0,06 mg/l (Joensuu ym. 1999); Määrittäysraja 0,041 mg/l



**YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhkalla vaikutus**

**Kuva 47.** Ojaveden NH<sub>4</sub>-N (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Ojavedet 0,02–0,10 mg/l (Ahti ym. 1999); Ojavedet 0,04 mg/l (Joensuu ym. 1999); Määrittäysraja 0,03 mg/l



**YLÄ = ei tuhkan vaikutusta; ALA = tuhkalla vaikutus**

**Kuva 48.** Ojaveden P (mg/l) näytteenottoerittäin vuosina 2012–2014.

Ojavedet 0,05–0,06 mg/l (Ahti ym. 1999); Ojavedet 0,06 mg/l (Joensuu ym. 1999); Määrittäysraja 0,007 mg/l

## 4. Tulosten tarkastelu

Teiden tuhkaa sisältävistä kerroksista vapautui ravinteita (B, Na, Ca, Mg, K) sekä sulfaattia ja kloridia tien sisällä alaspäin vajoavaan veteen. Näiden aineiden vapautuminen tuhkasta tulee huomioida tuhkaa käytettäessä. Tuhkan laadulla on vaikutusta ravinteiden ja suolojen vapautumiseen.

Pitoisuuksien suuri vaihtelu tien sisäisissä vajovesissä vaikeutti yleistettävien tulosten saamista aineiden vapautumisesta vajoveteen. Myös erilaisten tuhkamäärien ja –rakenteiden eroja oli vaikea saada selville. Bariumin ja joidenkin raskasmetallien pitoisuudet olivat kuitenkin tien sisällä vajovesissä joissain tien kohdissa korkeita tuhka-aloilla verrattuna pelkkää murskettua sisältävään alaan. Toisaalta tiessä oli myös tuhka-aloilla samanlaisia pitoisuuksia kuin pelkän murskeen alalla, ja tällaiseen tilanteeseen olisi hyvä päästä tasaisesti kaikissa tien kohdissa. Tuhkan hyvä- ja tasalaatuisuus lienee avaintekijä matalille pitoisuuksille.

Tuhkaa sisältävän tien vaikutukset ympäristöön riippuvat paitsi aineiden vapautumisesta vajoveteen, myös niiden uudelleen saostumisesta sekä vajoveden sekoittumisesta ympäröiviin vajo-, pohja- ja ojavesiin.

Tässä työssä ympäristövaikutuksia ei tutkittu laajemmin, vaan huuhtoutumisen vaikutusta tutkittiin teiden läpi kulkevien laskuojien veden laadun osalta. Tuhkatien omat ojavedet yhtyivät näihin laskuojiin. Tuhkateiden läpi valuneen laskuojan veden laatuun tuhkatie ei vaikuttanut seurantajakson aikana bariumin ja mitattujen raskasmetallien osalta. Ravinnepitoisuudet (B, Na, Ca, Mg, K) sekä sulfaatin ja kloridin pitoisuudet sen sijaan nousivat laskuojassa tuhkatien vaikutuksesta, mutta veden laatu laskuojissa oli kuitenkin edelleen hyvä vaikutuksen jälkeenkin. Ojan hydrologiset olosuhteet vaikuttavat tuloksiin merkittävästi.

Tutkimus tuotti uutta tietoa suhteellisen vähän kenttäoloissa tutkitusta aiheesta. Tutkimus sisälsi kuitenkin myös rajoituksia. Tässä työssä oli mahdollista selvittää vain liuenneiden aineiden pitoisuuksia, mutta ei partikkelimuodossa olevia aineita. Työssä tutkittiin vajoveden ja teiden läpi kulkevien laskuojien veden laatua, mutta huuhtoutumiskuormitusta ei tässä työssä tutkittu laajemmin (esim. ei tutkittu pohjavettä tai valuma-aluetta laajemmin), ja tutkimusjakso oli varsin lyhyt (hieman yli 2 vuotta). Tämä työ oli ns. case-tutkimus, johon vaikuttivat paljon mm. paikalliset olosuhteet, tuhkan koostumus ja sen mahdolliset vaihtelut teiden sisällä ja välillä, käytetyt tierakenteet (teitä ei tiivistetty erikseen rakentamisen yhteydessä) sekä paikalliset valunolosuhteet. Näiden seikkojen tutkimus on tärkeää tulevaisuudessa, kun halutaan edelleen kehittää tuhkan käyttöä metsäteissä. Tutkimus tuotti perustietoa veden ja tuhkan välisistä reaktioista tien sisällä, ja tuloksia voidaan hyödyntää jatkossa, kun halutaan kehittää tierakenteita ja tuhkan käyttöä aineiden vapautumisen minimoimisen näkökulmasta.

Tulosten mukaan monien ympäristön kannalta keskeisten raskasmetallien keskimääräiset pitoisuudet olivat samaa tasoa tuhka-aloilla kuin pelkän murskeen alalla (esim. Cd, Pb, Cr, As, Cu, Zn) teiden pohjatasoilla, vaikka tuhkasta tien pintaosasta olisikin paikoin tapahtunut vapautumista. Mikäli pohjatason vesi edustaa sadantaa, josta pääosa kulkee tien läpi vertikaalisesti ja reagoi tiemateriaalin kanssa, tällöin monien raskasmetallien osalta tiemateriaalilla näyttäisi olevan raskasmetalleja pidättäviä ominaisuuksia, mikäli vapautumista vajoveteen ylipäänsä tuhkarakenteesta oli tapahtunut.

Joidenkin metallien (esim. Ba) ja raskasmetallien osalta joissain tien paikoissa esiintyi korkeita pitoisuuksia tuhkarakenteen lähellä tien pintaosassa, mutta tuhkarakenteessa oli usein myös paljon matalia pitoisuuksia tuottavia kohtia. Mikäli vettä kulkeutuisi tuhkarakenteesta suoraan ojiin tai vajoveteen, niin tällöin yksittäisiinkin korkeisiin ainepitoisuuksiin tulee kiinnittää huuhtoutumismahdollisuuden näkökulmasta huomiota.

Tuhkan käyttöä kehitettäessä tavoitteena tulisi olla, että kaikkien merkittävien aineiden vapautuminen on vähäistä ja mahdollisimman tasaista koko tuhkarakenteessa. Tuhkan korkea laatu kaikkien aineiden huuhtoutumisen näkökulmasta on tärkeää, ja tuhkan käyttöä arvioitaessa ja kehitettäessä on syytä keskittyä niiden aineiden pitoisuuksiin, joissa voi esiintyä korkeita pitoisuustasoja tai yksittäisiä arvoja. Myös ravinteiden ja suolojen vapautumiseen tulee kiinnittää huomiota. Fe-, Mn- ja Co-pitoisuudet olivat korkeita teiden pohjatasoilla kaikilla aloilla, myös tuhkatomilla aloilla.

Tuhkasta tehtyjen kemiallisten analyysien perusteella tärkeitä aineita tierakenteissa olivat Ba, Cd, Cr, Mo ja  $\text{SO}_4\text{-S}$ .

Barium (Ba). Ba vapautui tuhkasta tien pintaosasta kaikilla tuhkaa sisältävillä aloilla verrattuna pelkkää murskettä sisältävään alaan. Veden kulkiessa tierakenteen läpi tien pohjatasolle Ba-pitoisuudet alenivat ja olivat tiellä 1 samaa tasoa kuin pelkkää murskettä sisältävällä alalla, mutta tiellä 2 kahdella eniten tuhkaa sisältävällä alalla Ba-pitoisuudet olivat tuhkatonta alaa korkeampia (kahdella muulla tuhka-alalla kuitenkin tuhkatottoman alan tasolla).

Cadmium (Cd). Cd-pitoisuudet eivät poikenneet tuhkaa sisältävillä ja pelkän murskeen aloilla toisistaan tien pintaosassa eikä pohjaosassa. Cd-pitoisuudet olivat myös kauttaaltaan matalia.

Kromi (Cr). Cr vapautui tien läpi valuvaan veteen tien pintaosassa molemmilla teillä pelkkää tuhkaa sisältävien kerrosten aloilla, mutta vapautumista ei tapahtunut merkittävästi tuhka/murske-sekoitus -aloilla. Vapautuminen havaittiin kuitenkin molemmilla teillä vain yhden lysimetrin (vedenkeräimen) osalta. Cr-pitoisuudet olivat kuitenkin matalia kaikilla tuhka-aloilla tien pohjatasolla.

Molybdeeni (Mo). Mo vapautui selvästi monilla tuhka-aloilla tien läpi kulkevaan veteen tien pintaosassa tuhkerokksen lähellä. Mo-pitoisuudet olivat kuitenkin matalia kaikilla tuhka-aloilla veden kulkiessa tien läpi pohjatasolle. Yhdellä tuhka-alalla Mo-pitoisuus oli pelkän murskeen alaa korkeampi myös pohjatasolla, mutta keskimääräinen pitoisuus oli myös tällä tuhka-alalla selvästi alle talousveden enimmäispitoisuuden rajan (vanha laaturaja, nykyisissä ohjeissa ei ole rajaa).

Sulfaattirikki ( $\text{SO}_4\text{-S}$ ). Sulfaattirikkiä vapautui tuhkasta tien läpi kulkevaan veteen selvästi tien pintaosasta kaikilla tuhka-aloilla. Koetiellä 1 pitoisuudet alenivat voimakkaasti veden kulkiessa tierakenteen läpi pohjatasolle kaikilla tuhka-aloilla, mutta koetiellä 2 pitoisuudet olivat korkeita kahdella tuhka-alalla (kahdella alalla pitoisuudet olivat alentuneet).

## 5. Johtopäätökset

Tuloksia voidaan pitää monilta osiltaan lupaavina tuhkarakenteiden kehittämisen kannalta, koska monien raskasmetallien keskimääräiset pitoisuudet olivat suhteellisen matalia useilla tuhkaa sisältävillä aloilla tai keskimääräiset pitoisuudet alenivat tierakenteessa veden kulkiessa alaspäin. Huomiota tulee kiinnittää niihin aineisiin, joissa esiintyi korkeita pitoisuuksia yksittäisinäkin arvoina tai yksittäisissäkin tien kohdissa (esim. As, Ni, Mo). Huuhtoutumisriski on mahdollisesti olemassa, mikäli korkeita pitoisuuksia tuottavia kohtia on tiessä monin paikoin, ja huuhtoutumista tapahtuu näistä paikoista suoraan ojiin tai pohjaveteen. Tierakenteita voidaan kehittää, jotta huuhtoutuminen olisi aina kaikista tien kohdista tasaista ja vähäistä. Tärkeitä kehittämis- ja tutkimuskohteita voivat olla mm. tuhkan tasalaatuisuuden ja tierakenteiden tiivistämisen merkitys huuhtoumille.

## Viitteet

- Ahti, E., Joensuu, S. & Vuollekoski, M. 1999. Kunnostusojituksen vaikutus metsäojitusalueiden valumaveden kemiallisiin ominaisuuksiin. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 745: 79-90.
- Derome, J., Lindroos, A.-J., Derome, K. & Niska, K. 2002. Soil solution quality during 1998-2000 on 13 of the Level II plots. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 879: 70-88.
- Finlex. 2001. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus pienten yksiköiden talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. 401/2001.
- Joensuu, S., Ahti, E. & Vuollekoski, M. 1999. Vanhoilta metsäojitusalueilta valuvan veden kemialliset ominaisuudet. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 745: 63-78.
- 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 kaivo-vesien fysikaalis-kemiallinen laatu vuonna 1999. *Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti* 155.
- Ryhti, K. 2016. Aineiden huuhtoutuminen metsätiekokeiden rakenteissa käytettävästä tuhkasta. Progradu tutkielma. Helsingin yliopisto. Metsätieteiden laitos.
- Ukonmaanaho, L., Starr, M., Hirvi, J.-P., Kokko, A., Lahermo, P., Mannio, J., Paukola, T., Ruoho-Airola, T. & Tanskanen, H. 1998. Heavy metal concentrations in various aqueous and biotic media in Finnish Integrated Monitoring catchments. *Boreal Environment Research* 3: 235-249.



luke.fi

Luonnonvarakeskus  
Latokartanonkaari 9  
00790 Helsinki  
puh. 029 532 6000