

# Hybridihaapa metalleilla pilaantuneen alueen kasvikunnostuksessa

Veli-Matti Vallinkoski, Viivi Hassinen ja Kristina Servomaa







RAPORTTEJA 2 | 2007

# Hybridihaapa metalleilla pilaantuneen alueen kasvikunnostuksessa

**Veli-Matti Vallinkoski, Viivi Hassinen ja Kristina Servomaa**

Kuopio 2007

**Pohjois-Savon ympäristökeskus**



**POHJOIS-SAVON  
YMPÄRISTÖKESKUS**

RAPORTTEJA 2 | 2007  
Pohjois-Savon ympäristökeskus

Taitto: Leena Tiukka  
Kuvat: Veli-Matti Vallinkoski

Julkaisu on saatavana myös internetistä:  
[www.ymparisto.fi/julkaisut](http://www.ymparisto.fi/julkaisut)

Kainuun Sanomat Oy, Kajaani 2007

ISBN 978-952-11-2659-8 (nid.)  
ISBN 978-952-11-2660-4 (PDF)  
ISSN 1796-1858 (pain.)  
ISSN 1796-1866 (verkköj.)

## ESIPUHE

Maaperän pilaantuminen erilaisilla haitta-aineilla, kuten öljyillä ja raskasmetalleilla, on globaali ympäristöongelma. Saastuneiden maa-alueiden SAMASE- selvitysprojektin mukaan Suomessa arvioitiin 1980-luvulla olevan yli 10 000 mahdollisesti pilaantunutta maa-aluetta (Puolanne ym. 1994). Tarkentuneiden tietojen myötä arviot pilaantuneiden maiden lukumäärästä ovat kasvaneet ja tällä hetkellä Suomessa arvioidaan olevan noin 20 000 mahdollisesti pilaantunutta maa-aluetta. Viimeisen viidentoista vuoden aikana Suomessa on kunnostettu yhteensä noin 2600 kohdetta.

Lievemmin pilaantuneissa laaja-alaisissa kohteissa fytoimediaatio, eli kasvien avulla tapahtuva kunnostus, saattaisi olla vaihtoehtoinen tai perinteisiä kunnostusmenetelmiä täydentävä kunnostustapa (Hassinen 2002). Kasveja voitaisiin käyttää hyväksi esimerkiksi pilaantuneen maaperän stabiloinnissa (fytoestabilointi) tai haitta-aineiden keräämisessä (fytoekstraktio). Vaikka fytoimediaatio soveltuu myös orgaanisilla aineilla pilaantuneisiin alueisiin, keskitytään tässä selvityksessä ainoastaan metalleihin. Erityisen ongelmalliseksi metallipilaantumisen tekee metallien pysyvyys. Millään kunnostusmenetelmällä niitä ei saada häviämään ja myös fytoekstraktiossa muodostuvat metallipitoiset kasvinosat tulee hävittää.

Fytoimediaatio ei ole vakiintunut kunnostusmenetelmä, osittain siksi että kasvien haitta-aineiden siedosta tai keräämisestä ei tiedetä riittävän paljon. Useat kansainväliset tutkimukset on tehty laboratorio-olosuhteissa. Tässä projektissa tutkittiin pilaantuneella alueella kasvatettujen haapojen metallipitoisuuksia juurista, varresta ja lehdistä kahden vuoden ajan. Raportissa tutkitaan pilaantuneelle alueelle istutettujen hybridihaapojen metallien sietoa sekä niiden sisältämiä metallipitoisuuksia. Tietojen avulla pohditaan hybridihaapojen soveltuvuutta pilaantuneen alueen kasvikunnostukseen.

Kuopiossa maaliskuussa 2007

Tekijät



## SISÄLLYS

Esipuhe.....	3
Sisällys.....	5
<b>I Johdanto.....</b>	<b>7</b>
1.1 Maaperän pilaantuminen ja kunnostus .....	7
1.2 Kasvit ja metallit.....	9
1.3 Fytoremediaatio kunnostusmenetelmänä.....	10
1.4 Haapa fytoremediaatiolajina.....	11
<b>2 Tutkimuksen aineisto ja menetelmät.....</b>	<b>12</b>
2.1 Koealueen yleiskuvaus ja pilaantuneisuus.....	12
2.2 Tutkimuksen koekenttä .....	12
2.3 Näytteenotto .....	13
2.4 Metallianalyysit.....	14
2.5 Aineiston analysointi .....	14
<b>3 Tulokset.....</b>	<b>15</b>
3.1 Maaperän laatu .....	15
3.2 Maaperän metallipitoisuudet.....	15
3.2.1 Metallien pitoisuudet maaperässä.....	15
3.2.2 Maaperän metallien väliset yhteydet.....	18
3.3 Kasvit .....	19
3.3.1 Kasvien metallipitoisuudet .....	19
3.3.2 Metallien vaikutus haapojen kasvuun .....	21
3.3.3 Metallien kulkeutuminen kasvissa.....	21
3.4 Maaperä ja kasvit.....	23
3.4.1 Maaperän metallipitoisuuksien ja happamuuden vaikutus bioakkumulaatioon.....	23
3.4.2 Bioakkumulaatio .....	27
3.5 Metallien poistuma.....	29
<b>4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset.....</b>	<b>30</b>
4.1 Pilaantunut alue ja koeasetelma.....	30
4.2 Kasvien metallipitoisuudet .....	31
4.3 Haapojen soveltuvuus fytoremediaatioon.....	32
<b>5 Yhteenveto.....</b>	<b>33</b>
Lähteet.....	34
Liitteet.....	35
Kuvailulehti.....	39





# 1 Johdanto

## 1.1

### **Maaperän pilaantuminen ja kunnostus**

Maaperän suojeleminen pilaantumiselta ja eroosiolta on yksi Euroopan unionin kuudennen ympäristön toimintaohjelman keskeisistä tavoitteista. Ravinnon ja energiabiomassan tuotannon vaarantuminen maaperän pilaantumisen vuoksi ja aineiden kiertokulun häiriintyminen on tunnistettu vakavaksi ja laajamittaiseksi uhkatekijäksi. Perustuotannon ja ainevirtojen ylläpidon lisäksi maaperällä on keskeinen rooli myös lukemattomien organismien elinympäristönä ja geneettisen monimuotoisuuden ylläpitäjänä. Maaperänsuojelun ja -hoidon taustalla ovatkin sekä sosio-ekonomiset että ekologiset tavoitteet. Tavoitteiden turvaamiseksi Euroopan komissio hyväksyi syyskuussa 2006 kattavan strategian maaperän suojelemiseksi. Keskeinen osa strategian toteutusta tulee olemaan maaperänsuojeludirektiivi, jolla tullaan yhtenäistämään eri jäsenvaltioiden käytäntöjä ja antamaan puitteet maaperän suojelun tulevaisuudelle.

Suomessa pilaantuneita maa-alueita ryhdyttiin kartoittamaan 1980-luvun loppupuolella Saastuneiden maa-alueiden selvitysprojektin myötä (Puolanne ym. 1994). Niin kutsutun SAMASE-projektin aikana ympäristöhallinto kokosi rekisteriin tietoja pilaantuneista tai pilaantuneiksi epäillyistä kohteista. Lisäksi projektissa laadittiin haitta-aineiden pitoisuuksien ohje- ja raja-arvoja sekä arvioitiin pilaantuneiden maiden kunnostuskustannuksia. SAMASE-rekisteri sisälsi tiedot yli 10 000:sta pilaantuneesta tai pilaantuneeksi epäillystä kohteesta.

SAMASE-selvityksessä maa-alue määriteltiin pilaantuneeksi, mikäli se aiheutti merkittävää välillistä tai välitöntä vaaraa luonnolle, ympäristölle tai terveydelle. Selvityksessä määritettiin maaperän pilaantuneisuuden raja- ja ohjearvot myös useimmille raskasmetalleille (taulukko 1). SAMASE-raportissa ohjearvoksi määritettiin haitta-ainepitoisuus, jota pidettiin ihmiselle ja ympäristölle vaarattomana ja alueen maankäytölle tai

maamassojen sijoittamiselle ei ollut tarvetta asettaa rajoituksia. Ohjearvoja lievempiä raja-arvoja sovellettiin esimerkiksi teollisuuskäytössä olevilla alueilla. Tällöin maaperän käyttöä rajoitettiin siten, etteivät kohonneet haitta-aineiden pitoisuudet aiheuttaneet vaaraa terveydelle tai ympäristölle.

Pilaantuneiksi epäiltyjen maa-alueiden kartoitus- ja selvitystyötä on sittemmin jatkettu ja tietoja tallennettu aluksi SAMASE-rekisteriin (Mahdollisesti saastuneiden maa-alueiden rekisteri) ja myöhemmin PIMA-rekisteriin (Mahdollisesti pilaantuneiden maa-alueiden tietojärjestelmä).

Vuodesta 2005 alkaen pilaantuneiden ja mahdollisesti pilaantuneiden maa-alueiden sijainti- ja ominaisuustiedot on siirretty ympäristöhallinnon ylläpitämään MATTI-maaperän tilan tietojärjestelmään. Rekisterin avulla pyritään ehkäisemään ja vähentämään maaperän pilaantumisesta aiheutuvia terveys- ja ympäristöhaittoja. Tietoja käytetään viranomaistoiminnassa maankäytön suunnittelussa ja pilaantuneiden alueiden tutkimusten ja kunnostusten suunnittelussa sekä toteutuksessa. MATTI-tietojärjestelmä sisältää tiedot noin 20 000 kohteesta, joista riskialueilla (asutusalueilla, pohjavesialueilla ja vesistöjen rannoilla) sijaitsee noin 10 000 kohdetta.

Pilaantuneen maa-alueen aiheuttamia ympäristö- ja terveysriskejä sekä mahdollista kunnostustarvetta on tarkasteltu useimmiten SAMASE-työryhmän laatimien raja- ja ohjearvojen mukaisesti. Joidenkin haitta-aineiden osalta pitoisuusarvoja on sittemmin tarkennettu (esim. Assmuth 1997) (taulukko 1). Uuden, vielä luonnosvaiheessa olevan maaperän pilaantumisesta ja puhdistustarpeen arvioinnista annetun asetuksen (jatkossa PIMA-asetus) ja asetusta täydentävän sovellusoppaan myötä useiden haitta-aineiden raja-arvot muuttuvat (taulukko 1). Jatkossa tullaan käyttämään kolmiportaista luokittelua (tavoitearvo – alempi ohjearvo – ylempi ohjearvo) ja raja-arvojen soveltamisessa käytetään aiempaa enemmän tapauskohtaista harkintaa. Asetusluonnoksen 3 § mukaan maaperää pidetään pilaantuneena, mikäli

teollisuus-, varasto- tai liikennealueen maaperässä yhden tai useamman haitallisen aineen pitoisuus ylittää säädetyn ylempien ohjearvojen. Muualla kuin edellä mainituilla alueilla maaperä on pilaantunut, mikäli yhden tai useamman haitallisen aineen pitoisuus ylittää alemman ohjearvon.

Suomessa on kunnostettu viimeisen viidentoista vuoden aikana noin 2600 pilaantunutta maa-alueita (www.ymparisto.fi). Tällä hetkellä kunnostushankkeita toteutetaan vuosittain noin 400 ja kunnostuksiin käytetään vuosittain 50-70 miljoonaa euroa (Sorvari ja Antikainen 2004, Sorvari 2005). Kunnostustarve ja toteutettujen hankkeiden määrää lisääntyi merkittävästi 1990-luvun puolivälissä SAMASE-hankkeen valmistumisen myötä. Kunnostustarpeen kasvuun ovat lisäksi vaikuttaneet muun muassa vanhojen kaatopaikkojen sulkeminen, polttoaineen jakelutoiminnan rakennemuutos ja uudisrakentamisen yhteydessä tehtävien maaperäkunnostusten lisääntyminen.

Maaperän kunnostusmenetelmät vaihtelevat tapauskohtaisesti, mutta noin 90%:ssa kunnostuskohteista on käytetty massanvaihtoa (Sorvari 2005). Näissä niin sanotuissa *off-site* kunnostuksissa ongelmaksi muodostuvat poistettujen ja jatkokäsiteltävien massojen suuri määrä. Viime aikoina vuosittainen lisäys on ollut 60 000-70 000 tonnia vuodessa ja esimerkiksi vuonna 2004 jatkokäsittelyyn ohjattiin lähes 400 000 tonnia pilaantunutta maata (www.ymparisto.fi). Tilastoista puuttuu lisäksi osa välivarastoiduista pilaantuneista maista, joita myös on huomattava määrä. Paikanpäällä tapahtuvilla *on site* kunnostusmenetelmillä, kuten fytoimediaatiolla, jatkokäsiteltävien siirrettyjen massojen määrää voitaisiin kenties vähentää.

Taulukko 1. Maaperän pilaantuneisuuden arvioinnissa käytettyjä ohjearvoja metalleille ja arseenille.

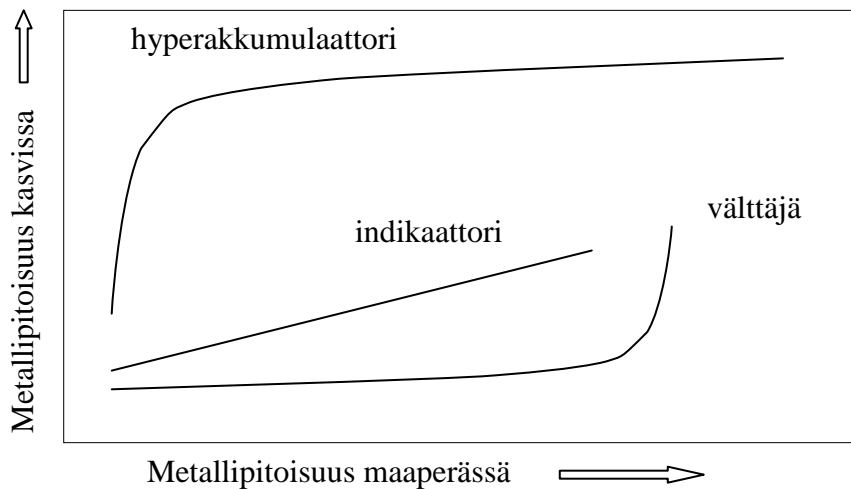
	SAMASE-ohjearvot (Puolanne ym. 1994)		Assmuth 1997		PIMA-asetusluonnos (2006)		
	Ohjearvo (mg/kg)	Raja-arvo (mg/kg)	Tavoitearvo (mg/kg)	Raja-arvo (mg/kg)	Taustapitoisuus (mg/kg)	Alempi ohjearvo (mg/kg)	Ylempi ohjearvo (mg/kg)
Arseeni (As)	10	50	13	60	2,6	50	100
Kadmium (Cd)	0,5	10	0,3	10	0,2	10	20
Kromi (Cr)	100	400	80	500	60	200	300
Kupari (Cu)	100	400	32	400	20	150	200
Elohopea (Hg)	0,2	5	0,2	5	0,05	1	5
Nikkeli (Ni)	60	200	40	300	24	100	150
Lyijy (Pb)	60	300	38	300	2,5	200	750
Vanadiini (V)	50	500	-	-	80	150	250
Sinkki (Zn)	150	700	90	700	57	250	400

## Kasvit ja metallit

Kasvit keräävät itseensä monenlaisia yhdisteitä auringon energian avulla. Osa metalleista, kuten sinkki, kupari ja nikkeli, ovat kasveille välttämättömiä hivenaineita toimien mm. entsyymien aktiivisissa keskuksissa ja solujen hapetus-pelkistysreaktiossa. Osa metalleista, kuten kadmium, eivät ole tietävästi kasveille tarpeellisia. Sekä välttämättömät että tarpeettomat metallit ovat suurina pitoisuuksina kasveille haitallisia.

Eri kasvilajit suhtautuvat eritavalla ympäristön metallipitoisuuksiin, ja kasvit voidaankin luokitella karkeasti kolmeen päätyyppiin: välttäjiin, kerääjiin ja bioindikaattoreihin (kuva 1). Välttäjillä (eng. excluders) metallit eivät keräänny kasviin, vaikka maaperässä olisi suhteellisen runsaasti metalleja. Tämä on mahdollista juuristossa toimivien, metal-

leja aktiivisesti ulos pumpppaavien valkuaisaineiden ansiosta. Metallit alkavat kerääntyä vasta suurilla maaperän pitoisuuksilla kun kasvin puolustus ei enää toimi kunnolla. Indikaattorikasveilla puolestaan metallien sisäänotto ja metallien määrä kasvis- sa ovat verrannolliset maaperän metallipitoisuuksiin, ja tällaisia kasveja voidaan käyttää maaperän pilaantuneisuuden seurannassa. Kolmas ryhmä ovat kerääjät, jotka ottavat maasta suuria määriä metalleja, vaikka metallipitoisuudet maaperässä eivät olisikaan kovin suuria. Kerääjistä äärimmäinen muoto ovat ns. hyperakkumulaattorikasvit, jotka keräävät itseensä huomattavan suuria, muille kasveille myrkyllisiä määriä metalleja maanpäällisiin osiinsa. Hyperakkumulaattoriksi kutsutaan kasvia, joka kerää kuivapainostaan vähintään  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  (0,01%) kadmiumia,  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  (0,1%) lyijyä tai nikkeliä tai  $10,000 \text{ mg kg}^{-1}$  (1%) sinkkiä (Baker ja Brooks 1989).



Kuva 1. Kasvien vaste maaperän metallipitoisuuksiin (Ghosh ja Singh 2005).

Eräs esimerkki hyperakkumulaattoriksi luokiteltavasta kasvilajista on Suomessakin yleisenä esiintyvä ristikukkaisten heimoon (*Brassicaceae*) kuuluva kevättaskuruoho (*Thlaspi caerulescens*), joka kerää noin 3% sinkkiä ja 1% kadmiumia kuivapainostaan (Baker ym. 1994). Vielä ei ole tiedossa, miten tällaiset kasvilajit sietävät ja keräävät korkeita metallipitoisuuksia. Hyperakkumulaatio on ilmeisesti kehittynyt tuhohyönteisten torjumiseksi,

sillä hyönteiset välttävät käyttämästä ravinnokseen metallia runsaasti sisältäviä kasvinosia. Esimerkiksi kevättaskuruohon lehtien korkean kadmiumipitoisuuden on havaittu suojelevan kasvia mm. kalifornianripsiaiseltä (*Frankliniella occidentalis*) (Jiang ym. 2005). Kasvien lajikohtaisten akkumulaatioominaisuuksien lisäksi metallien saatavuuteen maaperästä vaikuttaa metallien muoto. Erityisesti maaperän pH vaikuttaa metalli-ionien liukoisuu-

teen maaperässä ja kulkeutumiseen kasviin. Yleisesti korkea pH- arvo immobilisoi metalleja, kun taas happamassa maaperässä metalli-ionit irtoavat helpommin kasvien käytettäväksi. Osa metalleista on nopeasti kulkeutuvia, esimerkiksi kadmium ja sinkki, ja voivat kerääntyä kasveilla lehtiin, kun taas lyijy ja kupari ovat hitaasti kulkeutuvia raskasmetalleja kerääntyen juuristoon.

Kasveissa olevat suuret metallipitoisuudet eivät ole aina toivottu ominaisuus, sillä kasvien kautta haitta-aineet voivat rikastua ravintoketjussa edetessään (kuva 2). Eliöiden taipumus varastoida raskasmetalleja proteiinipitoisiin elimiin useita kertaluokkia ympäristöään korkeampia pitoisuuksia voi aiheuttaa eliölle haitallisia vaikutuksia.

1.3

## Fytoremediaatio kunnostusmenetelmänä

Fytoremediaatiolla tarkoitetaan kohteen kunnostusta tai haitta-aineen inaktivointia *in situ* vihreiden kasvien avulla. Fytoremediaation avulla voidaan kunnostaa maaperää, sedimenttejä sekä pinta- ja pohjavesiä (Hassinen 2002). Menetelmällä on saatu lupaavia tuloksia pilaantuneiden maiden stabiloinnissa (fytostabilisaatio) sekä orgaanisilla että epäorgaanisilla aineilla pilaantuneiden alueiden kunnostuksessa. Fytoremediaatio saattaisi olla laaja-alaisilla lievästi pilaantuneilla alueilla taloudellisesti kannattava vaihtoehto (Kärenlampi ym. 2000, Hassinen 2002).

Fytostabiloinnissa kasveja käytetään kiinnittämään epäorgaaniset tai orgaaniset haitta-aineet maaperään. Haitta-aineet voivat kerääntyä juuristoon tai juurien pinnalle tai ne voivat saostua juurivyöhykkeessä esimerkiksi kasvien tai mikrobien erittämien aineiden vaikutuksesta. Fytostabiloinnilla voidaan vähentää haitta-aineiden liikkuvuutta, ehkäistä pohjaveden pilaantumista ja vähentää haitta-aineen biosaataavuutta. Metalleja hyvin sietäviä kasveja voidaan käyttää pilaantuneiden alueiden uudelleen kasvittamiseen. Tällöin metallien leviäminen estyy pintaeroosion ja metallien liikkuvuuden vähennyksenä. Suomessa kasveja on käytetty muun muassa kaivosalueiden jätekasojen haitta-aineiden stabiloimiseen (Saarela 1990).

Kasveja voidaan käyttää myös metallien tai muiden haitta-aineiden poistamiseen maaperästä (fytoekstraktio). Fytoekstraktiossa kasvit ottavat juurillaan epäorgaanisen haitta-aineen maaperästä ja kuljettavat sen maanpäällisiin osiinsa. Kasvukauden jälkeen kasvit kerätään ja syntyvä kasvijäte



Kuva 2. Kotiloita pilaantuneen koealueen haapojen lehdistä.

joko kompostoidaan tai poltetaan metallien kiertämiseksi. Menetelmän taloudellisuus lisääntyy, mikäli polttamisessa syntyvä energia saadaan otettua talteen. Syntyvä tuhka, jota on määrällisesti murto-osa pilaantuneen alueen massasta, täytyy hävittää ongelmajätteenä. Kasvien keräämät pitoisuudet ovat yleensä pieniä ja maaperään jää yleensä vielä metalleja. Kohteeseen voidaan istuttaa uudet kasvit, jotta haitta-aineen pitoisuudet tulevat sallitulle tasolle. Yleensä kunnostukseen kuluva aika mitataan useissa vuosissa. Fytoremediaatio vaatii huolellista suunnittelua ja tapauskohtaista testaamista. Menetelmää ei ole kuitenkaan pystytty täysin hyödyntämään, osittain siksi että kasvien metallien sietoa ja keräämistä ei tunneta riittävän hyvin (Hassinen ym., in press). Vaikka esimerkiksi hyperakkumulaattorikasvit pystyvät keräämään huomattavia määriä metalleja lehtiinsä, ovat ne yleensä massaltaan pieniä, jolloin pilaantuneiden maiden puhdistus on tehotonta. Kevättaskuruohoa ja muita hyperakkumulaattoreita käytetään mallikasveina tutkittaessa metallien sietoa, sisäänottoa sekä kuljetusta juurista lehtiin. Useimmat 400 tunnetusta hyperakkumuloivasta kasvista keräävät nikkeliä tai sinkkiä, ja siksi nämä metallit ovat parhaita fytoekstraktioon. Myös lyijyä ja arseenia kerääviä kasveja tutkitaan.

Fytoremediaatiolla on useita hyötyjä perinteisiin puhdistusmenetelmiin verrattuna. Eräs suurimmista eduista on menetelmän taloudellisuus muihin vastaaviin menetelmiin verrattuna. Lisäksi menetelmä on ympäristöystävällinen, esteettinen ja sillä voidaan kunnostaa kohteita, joita ei muuten pystyittäisi kunnostamaan (kuten laaja-alaiset kohteet). Toisaalta menetelmällä on rajoituksensa, eikä siitä tule ratkaisua kaikkiin maaperän pilaantumistapauksiin. Haitta-aine voi esiintyä maaperässä kasveille toksisissa pitoisuuksissa tai useamman haitta-aineen esiintyminen tai muut maaperän ominaisuudet saattavat estää kasvien kasvua. Raskasmetallien fytoekstraktiossa suurin este saattaa olla puhdistukseen kuluva aika, jonka yleensä arvellaan olevan useita kasvukausia, jopa kymmeniä vuosia. Metalleja sisältävät kasvinosat tulee lisäksi käsitellä ongelmajätteenä ja hävittää sen mukaisesti.

Fytoremediaation parhaimpia sovelluskohteita tulevat todennäköisesti olemaan laaja-alaiset, lievästi pilaantuneet alueet, joiden perinteinen puhdistaminen on hyvin hankalaa. Itse asiassa fytoremediaatiota on jo käytetty Suomessakin pitkään - esimerkiksi jätekasojen kasvituksessa pölyämisen estämiseksi.

#### 1.4

### Haapa fytoremediaatiolajina

Poppelien suvun (*Populus sp.*) puut ovat melko runsaasti tutkittuja ja käytettyjä kasvilajeja fytoremediaatiohankkeissa. Tähän syynä on *Populus*-suvun puiden laaja-alainen levinneisyys, hyvä kasvupotentiaali erilaisilla kasvupaikoilla, nopea kasvuisuus ja ennen kaikkea haapojen sekä poppelien kyky kerätä metalleja. Haapojen ja poppelien tiedetään keräävän mm. kadmiumia ja sinkkiä lehtiinsä, ja esimerkiksi hopeapoppeli (*P. alba*) on kadmiumin ja sinkin indikaattorikasvi (esim. Madejon ym. 2004, French ym. 2006). Toisaalta haavat ovat myös herkkiä tietyille raskasmetalleille. Esimerkiksi sinkin ja kadmiumin on havaittu rajoittavan haavan kasvua (Hermle ym. 2006)

Suomessa ainoana poppelien suvun luonnonvaraisena lajina esiintyy haapa (*P.tremula*). Viljelylajina tavataan lisäksi metsähaavan ja pohjois-amerikkalaisen haavan (*P. tremuloides*) risteytyksenä syntynyt hybridihaapa (*P.tremula×tremuloides*). Hybridihaapa on erittäin nopeakasvuinen ja voi suotuisissa kasvuolosuhteissa saavuttaa 25 vuodessa yli 20 metrin valtapituuden ja 300 m<sup>3</sup> hehtaarikohtaisen tuoton (Hynynen ym. 2004). Viljelykohteissa hybridihaavan keskipituus lehtomaisen

kankaan metsämaalla on ollut neljän kasvukauden jälkeen jopa 3,2 m, kun vastaavalla kasvupaikalla metsähaavan keskipituus oli 1,8 m (Hynynen ym. 2004). Kuitupuuksi kasvatettavan hybridihaavan kiertoaika onkin muihin puulajeihimme verrattuna erittäin nopea; ainoastaan 20-30 vuotta.

Parhaiten hybridihaapa menestyy rehevillä ja valoisilla kasvupaikoilla. Tiivistyneillä savimailla, turvemailla tai kosteissa painanteissa hybridihaavan kasvu heikentyy ja lahoalttius lisääntyy. Haapa on myös suhteellisen heikko lajien välisessä kilpailussa. Ominaisuuksiensa puolesta haapa onkin eräänlaisen pioneerilaji, jolla on kasvuedellytyksiä lievästi pilaantuneilla, muuten soveliailla kasvupaikoilla. Pilaantuneilla kasvupaikoilla olosuhteet vastaavat tietyssä mielessä suksessiokehityksen alkuvaihetta, jossa menestyvät nopeakasvuiset, lyhytikäiset ja myöhemmän suksessiovaiheen lisääntyneestä kilpailusta kärsivät lajit.

Hybridihaavikko perustetaan istuttamalla perimältään tunnettuja, jalostettuja kloonitaimia. Uudistusvaiheessa voidaan hyödyntää haavan luontaisesti voimakasti vesomiskykyä ja seuraava sukupolvi syntyy tehokkaasti juurivesoista. Tutkimusten mukaan eri kloonien vesomiskyky, juurtumiskyky, kasvu ja puuaineen ominaisuudet poikkeavat toisistaan (Yu ym. 2001 a, b, c, Stenvall ym. 2004). Fytoremediaatioon tulisikin valita sekä kasvuominaisuuksiltaan että metallien akkumulointikyvyltään soveliaimmat haapakloonit.

Hybridihaavikot ovat kasvun alkuvaiheessa riskialttiita erityisesti myyrrien, jänisten ja hirvien aiheuttamille tuhoille (esim. Hynynen 1999, Viherä-Aarnio 1999). Myyrätuhoja voi vähentää käyttämällä tarkoitukseen soveltuvia myyräsuojia. Hirvieläinten aiheuttamilta tuhoilta suojautuminen on sen sijaan vaikeampaa. Havaintojen perusteella asutuksen ja teiden läheisyyteen perustetuissa haavikoissa hirvituhot ovat olleen kuitenkin vähäisempiä. Todennäköisesti hybridihaavan käyttö fytoremediaatiossa keskittyisi edellä mainitun kaltaisille asutuille alueille, jolloin hirvien aiheuttamat tuhot olisivat kohtuudella hallittavissa. Ikääntyessään haavat altistuvat hyönteisten ja sienten (erityisesti mustaversotaudin) aiheuttamille tuhoille. Tämäkään ei fytoremediaatiossa todennäköisesti muodostuisi ongelmaksi, sillä tavoitteena olisi normaalia metsätaloudellista kasvatusta lyhyempi kiertoaika.



## 2 Tutkimuksen aineisto ja menetelmät

### 2.1

#### Koealueen yleiskuvaus ja pilaantuneisuus

Tutkimuksen koealue sijaitsi Helsingin kaupungin alueella Kumpulanpuron alajuoksun varrella. Kumpulanpuro laskee Pasilan ratapiha-alueelta Vallilan kautta Toukolanrantaan päätyen lopulta Vanhankaupungin lahteen. Aluetta ovat menneiden vuosikymmenten aikana kuormittaneet useat eri tekijät, kuten Pasilan vanhan kaatopaikan ja ratapiha-alueen viemäröidyt hulevedet. Puronvarteen tulva-alueelle on lisäksi läjitetty mm. tuhkaa ja öljylietettä sisältäviä massoja (Viatak 2003). Puron alajuoksua, missä tutkimuksen koekenttä sijaitsi, on käytetty myös romujen ja epämääräisten jätteen kaatopaikkana. Satunnaisissa vahinkotilanteissa Kumpulanpuroon tiedetään lisäksi päässeen useita kertoja kevyttä polttoöljyä.

Alueen pilaantumista on selvitetty useaan otteeseen 1990-luvulla (kts. Viatak 2003). Vuonna 1995 alustavassa tutkimuksessa puron alajuoksun todettiin olevan erittäin pilaantunut. Alueella havaittiin öljy-, PCB-, lyijy- ja sinkkipitoisuuksissa SAMASE raja-arvon ylityksiä sekä muiden raskasmetallien ohje- ja raja-arvojen ylityksiä. Vuonna 1997 tehdyssä perustutkimuksessa Kumpulanpuron alajuoksun uoma osoittautui kauttaaltaan öljyntyneeksi (öljyä 1200 – 27000 mg/kg), lisäksi havaittiin PAH- ja PCB-pitoisuuksien ohje- ja raja-arvojen ylityksiä. Metallien (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, V, Hg) pitoisuuksissa oli useita ohje- ja raja-arvojen ylityksiä, yksittäisissä pisteissä oli lyijyn ja sinkin raja-arvojen ylityksiä. Samana vuonna tehtiin alueella jatkotutkimus, jossa kaikkien tutkittujen metallien ohje- ja raja-arvojen ylitykset olivat puron alajuoksun pohjasedimentissä (syvyydelle 0,5 - 1,0 m). Puron eteläpuolinen tulva-alue on koekentän osalta pilaantunut etenkin öljyisellä jäteliitteellä ja lievemmin metalleilla (Cd, Pb, Ni, Zn, V) noin 0,5 metrin paksuisen pintahumus- ja turvekerroksen osalta.

Kumpulanpuron alajuoksun kunnostaminen tuli ajankohtaiseksi Toukolan rantapuiston rakentamissuunnittelun yhteydessä ja vuonna 2004 alueella laadittiin kunnostussuunnitelma (Viatak 2004). Kunnostuksen yhteydessä purouoman ja reuna-alueiden öljyllä, PCB:llä ja metalleilla voimakkaasti pilaantuneet alueet päätettiin poistaa ohje- ja raja-arvojen saakka. Puron pohjois- ja eteläpuoliset lievästi metalli- tai PCB- pilaantuneet alueet jätetään paikoilleen ja peitetään puhtailla mailla, eteläpuolella oleva kiinteä öljy- ja jätteenä jätetään paikoilleen ja suojataan pystyseinillä. Kumpulanpuron alajuoksun kunnostus puistoalueeksi aloitettiin kesällä 2006.

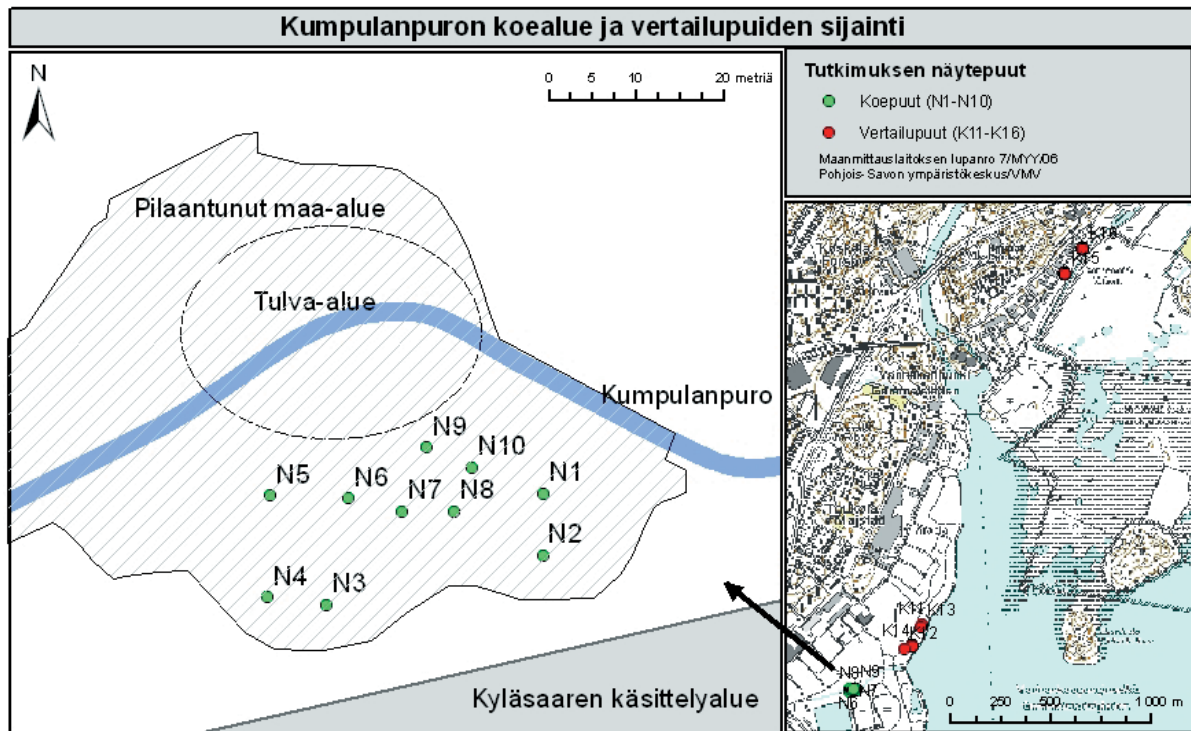
### 2.2

#### Tutkimuksen koekenttä

Tutkimuksen koekenttä sijaitsi Kumpulanpuron alajuoksulla tulva-alueen eteläpuolella (kuva 3). Alue on kasvupaikkatyypiltään lähellä puron vartta rehevää ruoholuhtaa ja vaihettua tuoreeksi, osin lehtomaiseksi lehtimetsäksi. Alueen aluskasvillisuus on erittäin rehevää (kts. kansikuva ja kuva 4). Puronvarren luontainen maaperä on pääosin savea ja liejua, mutta koekentän kohdalla pintamaassa on runsaasti hiekkaa ja tuhkaa sisältäviä täyttömaita. Pienialaisuudesta huolimatta alue on maaperältään hyvin vaihteleva.

Vuonna 2002 Pirkanmaan ympäristökeskus perusti alueelle kaksi koekenttää tavoitteena selvittää nopeakasvuisen haaparisteymän kykyä nopeuttaa öljyllä pilaantuneen alueen puhdistumista (kts. Sillanpää 2007). Koealueella istutettiin kahden vuoden ikäisiä hybridihaavan (*P.tremula*×*tremuloides*) taimia kolmesta eri kloonista. Taimet olivat Metsämännut Oy:n tuottamia juuripistokkaita, joiden koko istutushetkellä oli 75 – 100 cm.





Kuva 3. Koekentän ja vertailupuiden sijainti.

Tämän tutkimuksen kymmenen koepuuta valittiin satunnaisesti kyseiseltä alueelta kesällä 2004. Tällöin puiden pituus vaihteli 250 – 335 cm:n välillä ja rungonpaksuus 0,5 m korkeudella oli keskimäärin 25,4 mm (kuva 4). Koepuiden välimatka toisiinsa oli 6-30 metrin välillä ja koekentän kokonaisala noin 6 aaria. Pirkanmaan ympäristökeskuksen seuranta-tutkimuksen vertailualueelle ei ollut istutettu koepuita ja toisaalta myös heidän käyttämän vertailualueen maaperä oli pilaantunut. Tästä syystä tämän tutkimuksen vertailupuina käytettiin lähiympäristössä kasvavia, likimain vastaavan kokoisia metsähaapoja. Vertailupuita tutkimuksessa oli yhteensä kuusi kappaletta ja niiden kasvuetäisyys koalueelta vaihteli 300-2500 metrin välillä. Vertailupuiden kasvupaikan maaperän puhtaus varmistettiin maaperäanalyysillä.

### 2.3

## Näytteenotto

Näytteitä otettiin kymmenestä pilaantuneella alueella kasvavasta hybridihaavasta ja puiden kasvupaikan maaperästä. Näytteenotto toteutettiin molempina tutkimusvuosina (2004 ja 2005) heinäkuun puolivälissä lukuun ottamatta näytepuuta 9, josta näytteet otettiin vuonna 2005 vasta elokuun lo-

pussa. Puhtaan kasvupaikan vertailunäytteet otettiin samoilla näytekerroilla yhteensä 6 haavasta ja maaperästä. Maaperänäytteenottimena käytettiin Auger-painokairaa, jonka läpimitta oli 35 mm ja vaihdettavan sisäholkin pituus 150 mm. Näytteet otettiin kokoomänäytteenä kolmesta pisteestä jokaisen tutkimuspuun juurelta noin 20 cm etäisyydeltä puun rungosta. Näytekohdista poistettiin ensin kasvillisuus sekä orgaaninen pintakerros, jonka jälkeen näytteet otettiin 20-40 cm syvyydeltä. Maaperän laatu määritettiin näytteenoton yhteydessä silmämääräisesti lähinnä raekokoon perustuen.

Kasvinäytteitä otettiin haapojen lehdistä, juuresta ja varresta (oksasta), joista kaikista määritettiin metallipitoisuudet. Lehtinäytteet otettiin 100-150 cm korkeudelta, yhteensä noin 30 lehteä jokaisesta puusta. Varsinäytteeksi otettiin yksi oksa n. 100-160 cm korkeudelta ja siitä 50 cm pituinen kappale tyvipuolelta. Juurinäytteet otettiin noin 5-20 mm paksuisesta pintajuuresta läheltä puun runkoa. Juurinäytteistä huuhdeltiin laboratoriossa kevyesti irtonainen maa-aines pois, jonka jälkeen kaikki kasvinäytteet kuivattiin 55-60 C° lämpötilassa.

## Metallianalyysit

Metallipitoisuudet analysoitiin Jyväskylän yliopiston ympäristöntutkimuskeskuksen laboratoriossa. Esikäsitellyt ja kuivatut näytteet liuotettiin typpihappoon mikroaaltopolttolaitteessa ja näytteet analysoitiin ICP-OES- monialkuaineanalyysin avulla (SFS-EN ISO 11885: 98 modif). Maaperä- ja kasvinäytteistä analysoitiin alumiinin (Al), arseenin (As), kadmiumin (Cd), kromin (Cr), kuparin (Cu), lyijyn (Pb), nikkelin (Ni), raudan (Fe), sinkin (Zn) ja vanadiinin (V) pitoisuudet. Maaperänäytteistä analysoitiin lisäksi happamuus (pH-arvo) sekä mangaanin (Mn) ja molybdeenin (Mo) pitoisuudet ja kasvinäytteistä lisäksi kokonaisfosforin (P) ja natriumin (Na) pitoisuudet.

## Aineiston analysointi

Tutkimusaineiston tilastolliseen analysointiin käytettiin SPSS 11 ohjelmaa. Maaperän metallipitoisuuksien kohdalla tarkasteltiin vuosien välistä vaihtelua samoissa näytepisteissä (Wilcoxonin testi) ja keskimääräistä eroa kontrollialueilla havaittuihin pitoisuuksiin (Mann-Whitneyn testi). Eri metallien välisiä vuorovaikutuksia tarkasteltiin korrelatiivisesti ja maaperän metallipitoisuuksien sekä happamuuden vaikutusta kasveissa havaittuihin pitoisuuksiin analysoitiin lineaarisella regressioanalyysillä. Eri kasvinosissa havaittuja metallipitoisuuksia havainnollistettiin laatikkojanakuvajilla (boxplot) ja erot vuosien välillä testattiin pareittaisen otosten keskiarvotestillä. Aineiston normalisoimiseksi ja muuttujien välisten suhteiden graafiseksi kuvaamiseksi aineistoa muunnettiin tarvittaessa logaritimuunnoksin ( $\lg(x+1)$ ).



Kuva 4. Koepuu numero 2 heinäkuussa 2004.



## 3 Tulokset

### 3.1

#### Maaperän laatu

Maaperä koekentän näytepisteissä 20-40 cm:n syvyydellä vaihteli karkeasta hiedasta hiesuiseen saveen. Useissa näytteissä pintakerroksessa oli mukana orgaaninen multakerros. Näytepisteestä 5 otetussa näytteessä oli mukana kovaa täyttömaata (tuhkatäyttö), kuten myös näytepisteen 3 syvemmissä kerrostumissa. Näytepisteessä 9 melko puhtaan orgaanisen multakerroksen (20-40 cm) alla maaperä muuttui öljyiseksi mineraalimaaksi (pääosin hietaa). Kokonaisuutena koealueen maaperä oli viereisen puronuoman ja täytemassojen läjityksen vuoksi melko heterogeeninen. Puronuoman läheisyydellä oli todennäköisesti vaikutusta myös alueen kosteusolosuhteiden vaihteluun. Vertailualueiden näytepisteissä K11-K16 maaperä oli kuivempaa ja hieman karkeampaa (pääosin hietahiesua) kuin mitä koealueella.

Koekentän maaperä oli emäksinen pH-arvon vaihdellessa pääosin välillä 8,1-9,0 (ka 8,5). Poikkeuksena oli näytepiste 9, jossa maaperä oli vuonna 2005 selvästi hapan pH-arvon ollessa 5,9 ja vuonna 2004 lievästi hapan pH-arvon ollessa 6,6. Peräkkäisinä seurantavuosina samoista näytepisteistä määritetyissä happamuuksissa ei ollut havaittavissa tilastollista eroa.

### 3.2

#### Maaperän metallipitoisuudet

##### 3.2.1

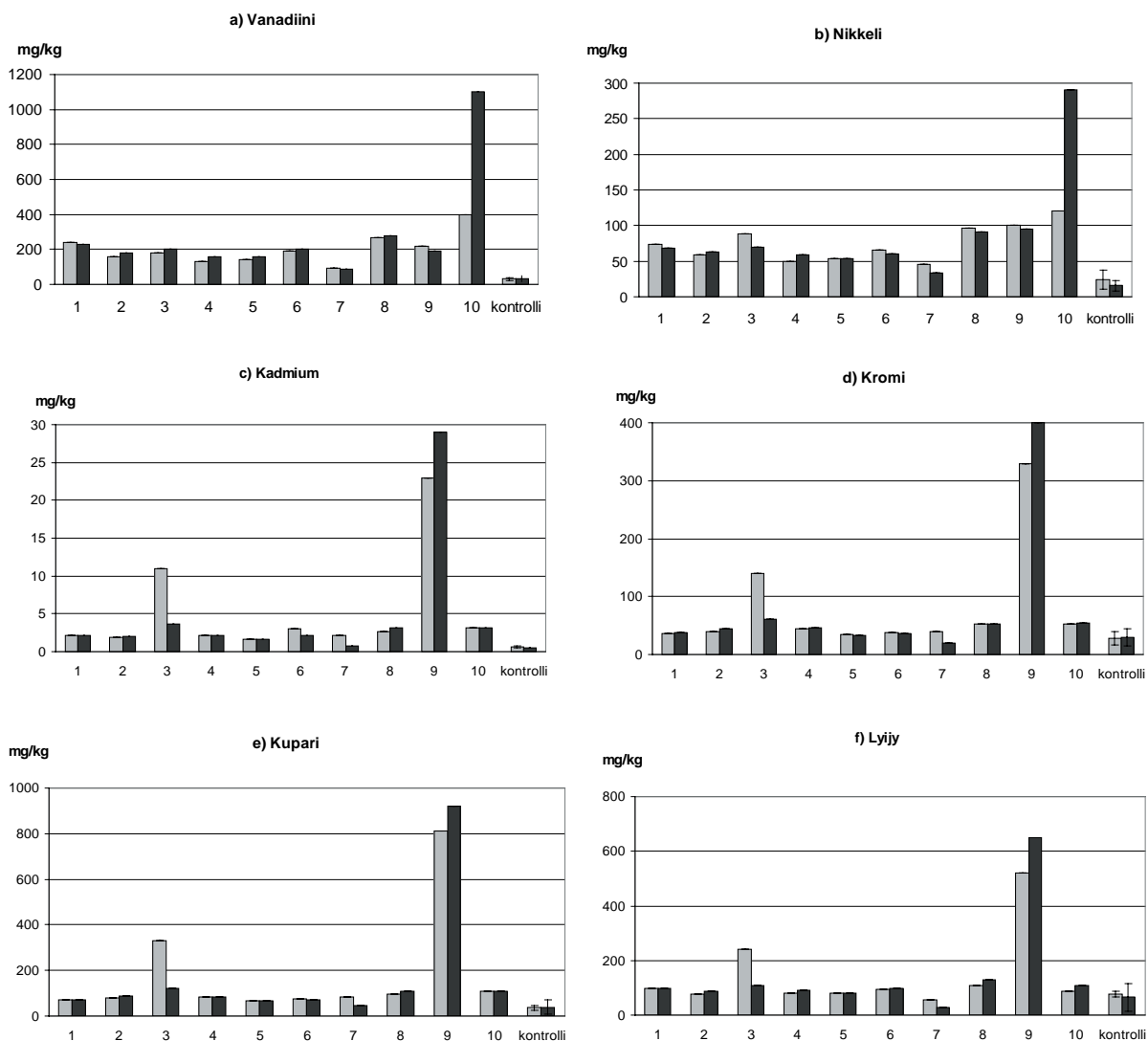
##### Metallien pitoisuudet maaperässä

Kaikkien kymmenen koepuun ja kuuden vertailupuun kasvupaikan maaperästä vuosina 2004 ja 2005 otetuista maaperänäytteistä määritettiin vanadiumin, nikkelin, kadmiumin, kromin, kuparin, lyijyn, molybdeenin, sinkin, arseenin, alumiini, mangaanin ja raudan pitoisuudet. Tulokset on esitetty kuvassa 5.

Vanadiinin alempi ohjearvopitoisuus (150 mg/kg) ylittyi molempina seurantavuosina seitsemässä näytepisteessä (1, 2, 3, 6, 8, 9, 10). Suurimmat vanadiinipitoisuudet havaittiin näytepisteessä 10, vuonna 2005 pitoisuus oli jopa 1100 mg/kg (kuva 5 a). Myös nikkelpitoisuus oli koealueella taustatasoa korkeampia, mutta alempi ohjearvopitoisuus (100 mg/kg) ylittyi kuitenkin ainoastaan näytepisteessä 10 (kuva 5 b).

Kadmiumin alempi ohjearvo (10 mg/kg) ylittyi molempina seurantavuosina näytepisteessä 9 ja vuonna 2004 myös näytepisteessä 3. Muissa näytteissä kadmiumipitoisuudet olivat taustatasoa korkeampia, mutta eivät ylittäneet alemmaa ohjearvoa (kuva 5 c). Myös kromin, kuparin, lyijyn, molybdeenin ja sinkin pitoisuudet olivat suurimmat näytepisteissä 3 ja 9 (kuva 5 d-h). Näytteessä 9 kromin, lyijyn ja sinkin pitoisuudet ylittivät alemman ohjearvon hyvin selvästi molempina seurantavuosina. Sinkillä alemman ohjearvon ylityksiä havaittiin tämän lisäksi myös näytepisteissä 3, 8, 10.

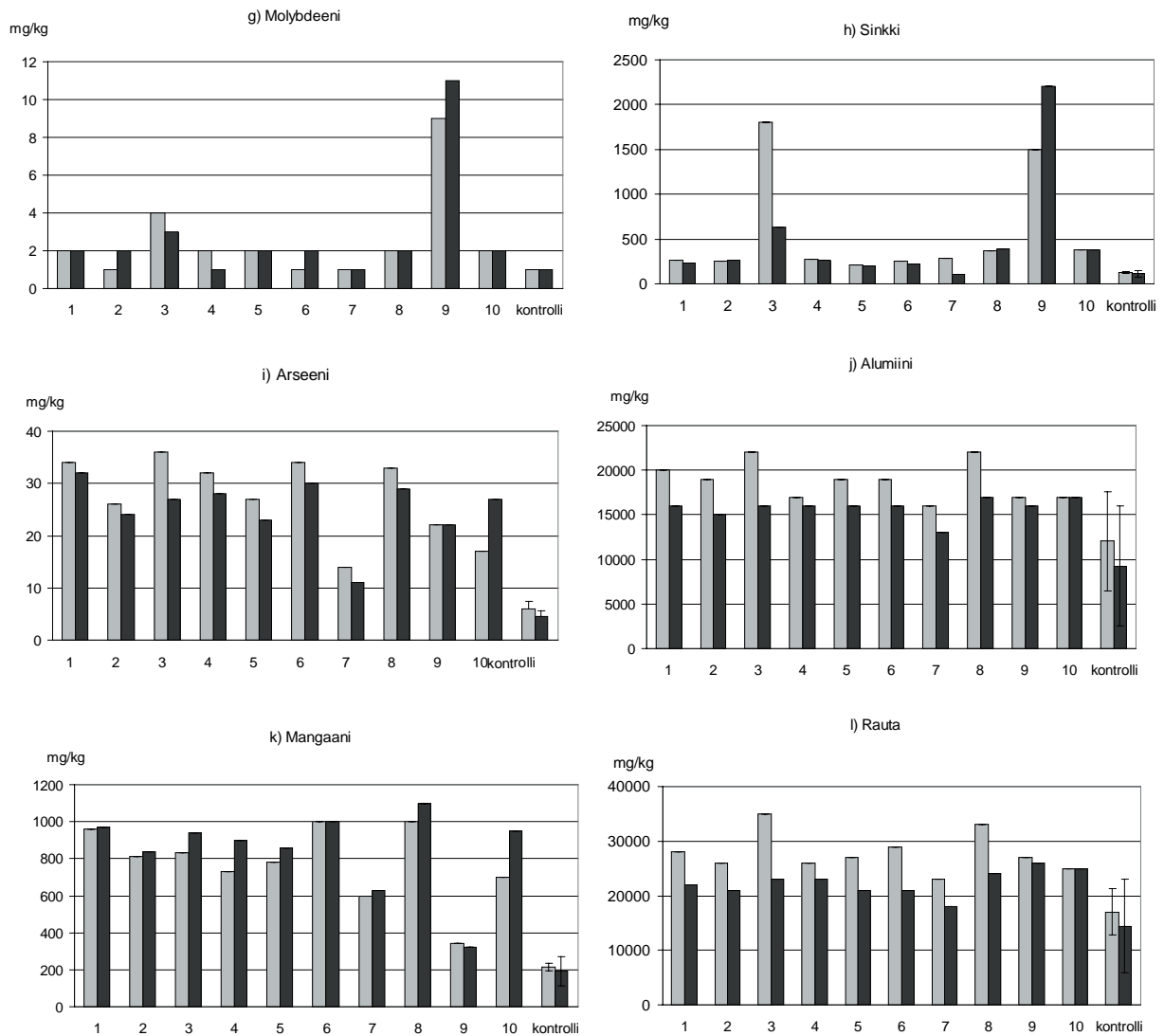
Molybdeenille ei ole annettu PIMA-asetusluonnoksessa ohjearvoja, mutta molybdeenin SAMASERAJA-arvo 5 mg/kg ylittyi näytepisteessä 9. Maaperästä mitattiin myös arseenin, alumiinin, mangaanin ja raudan pitoisuudet. Arseenipitoisuudet olivat alle alemman ohjearvon (50 mg/kg) kaikissa näytepisteissä. Alumiinin, mangaanin ja raudan pitoisuudet maaperässä eivät juurikaan vaihdelleet näytepisteiden välillä, eivätkä myöskään kontrollija koealueiden välillä lukuun ottamatta mangaania. Useimpien metallien pitoisuudet maaperässä olivat yhteydessä näytepaikan maaperän happamuuteen. Erityisen selvä positiivinen yhteys oli maaperän happamuuden ja maaperän kadmium-, kromi-, kupari- ja sinkkipitoisuuden lisääntymisen välillä.



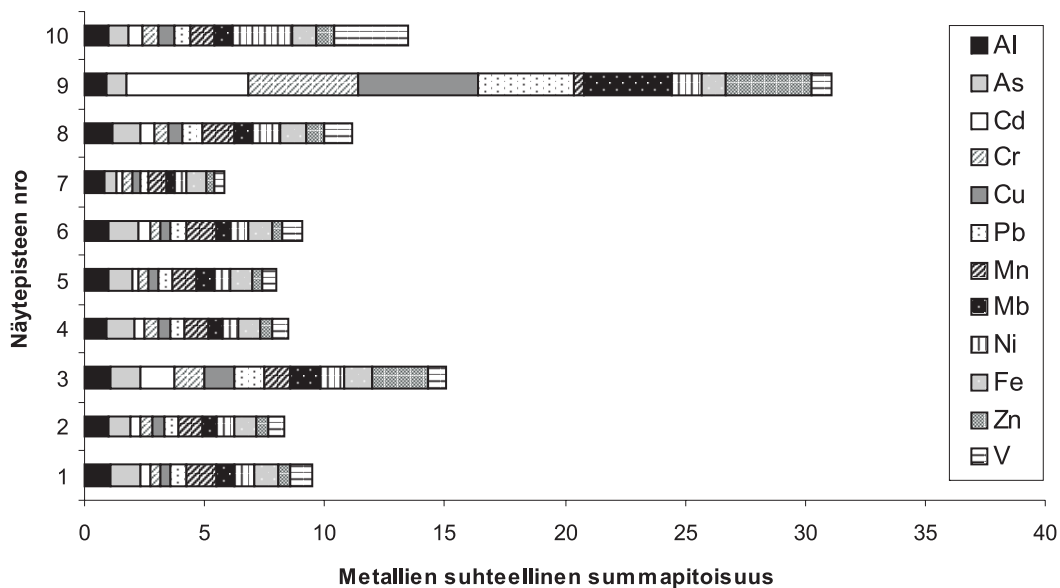
Kuva 5 a-f). Vanadiinin, nikkelin, kadmiumin, kromin, kuparin ja lyijyn pitoisuudet (mg/kg) maaperän näytepisteissä vuosina 2004 (harmaa) ja 2005 (musta). Kontrollialueen arvot (2004 n = 2, 2005 n = 4) esitetty keskiarvoina keskihajontoineen.

Kokonaisuutena koalueen maaperän metallipilaantuneisuus oli melko lievää lukuun ottamatta näytepisteitä 3, 9 ja 10 (kuva 6). Näytepisteessä 9, joka on pahiten pilaantunut, havaittiin neljän metallin (Cd, Cr, Cu, Zn) ylemmän ohjearvon ja kolmen metallin (Ni, Pb, V) alemman ohjearvon ylityksiä. Näytepisteessä 3, joka oli seuraavaksi pahiten pilaantunut, havaittiin ylemmän ohjearvon ylityksiä kuparilla ja sinkillä sekä alemman ohjearvon ylityksiä kadmiumilla, lyijyllä ja vana-

diinilla. Näytepisteessä 10 oli nikkeliä ja vanadiinia yli ylemmän ohjearvon. Kaikki ylempien ohjearvojen ylitykset havaittiin näissä kolmessa pisteessä. Maaperän metallipitoisuuksissa ei havaittu seurantavuosien 2004 ja 2005 välillä merkitsevää tilastollista eroa lukuun ottamatta alumiini- ja rautapitoisuuksia, jotka molemmat olivat jälkimmäisenä seurantavuotena merkitsevästi edellisvuotista pienempiä.



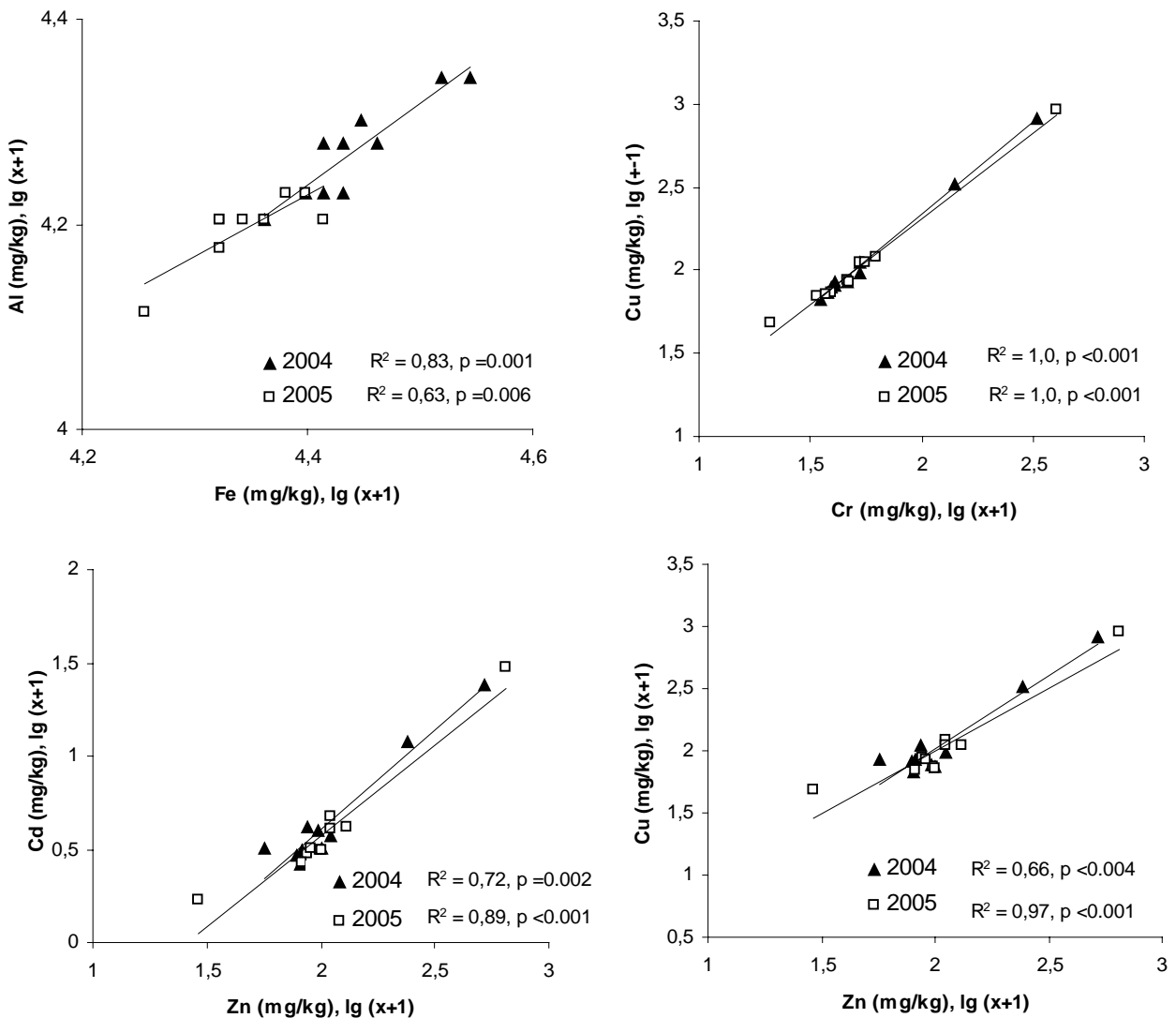
Kuva 5 g-l). Molybdeenin, sinkin, arseenin, alumiini, mangaanin ja raudan pitoisuudet (mg/kg) maaperän näytesteissä vuosina 2004 (harmaa) ja 2005 (musta). Kontrollialueen arvot (2004 n = 2, 2005 n = 4) esitetty keskiarvoina keskihajon-toineen.



Kuva 6. Eri metallien suhteelliset pitoisuudet (näytesteestä mitattu pitoisuus/kaikkien näytteiden keskiarvopitoisuus).

### Maaperän metallien väliset yhteydet

Metallien pitoisuudet maaperässä korreloivat voimakkaasti keskenään. Merkitsevä korrelaatio maaperän metallipitoisuuksissa havaittiin alumiinin ja raudan, alumiinin ja mangaanin, arseenin ja mangaanin, arseenin ja raudan, vanadiinin ja nikkelin, sinkin ja kromin, sinkin ja kuparin, sinkin ja kadmiumin sekä kuparin ja kromin välillä. Näistä erityisesti alumiini – rauta, kupari – kromi, kadmium - sinkki ja kupari – sinkki esiintyivät hyvin selvästi yhdessä (kuva 7).



Kuva 7. Maaperän metallipitoisuuksien väliset yhteydet vuosina 2004 ja 2005 otetuissa näytteissä.

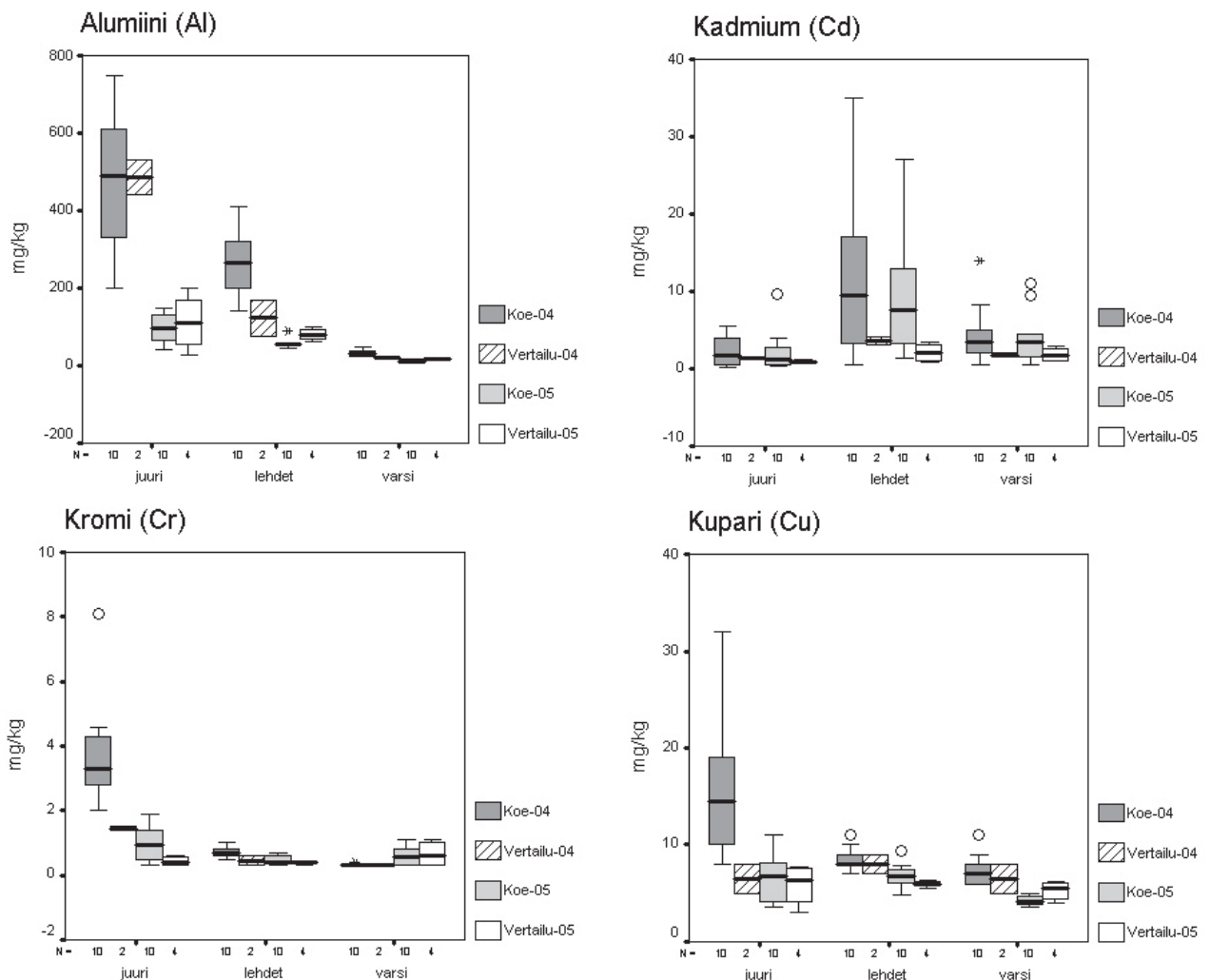


## Kasvit

### Kasvien metallipitoisuudet

Suurimmat metallipitoisuudet havaittiin haavan juuresta tai lehdistä. Puun varteen ei yhdenkään metallin kohdalla havaittu kertyvän erityisen suuria pitoisuuksia (kuvat 8 ja 9). Juureen kerääntyivät erityisesti alumiini (Al), kromi (Cr) ja vanadiini (V) sekä vähemmässä määrin kupari (Cu) ja rauta (Fe). Vastaavasti lehtiin kerääntyivät etenkin kadmium (Cd) ja sinkki (Zn), vähäisessä määrin myös nikkeli (Ni). Vuosien välinen vaihtelu eri kasvinosista määritetyissä metallipitoisuuksissa oli huomattavan suuri ja erot myös tilastollisesti merkitseviä lukuun ottamatta juuren ja varren kadmium- sekä sinkkipitoisuuksia, lehtiin rautapitoisuuksia ja varren vanadiinipitoisuuksia.

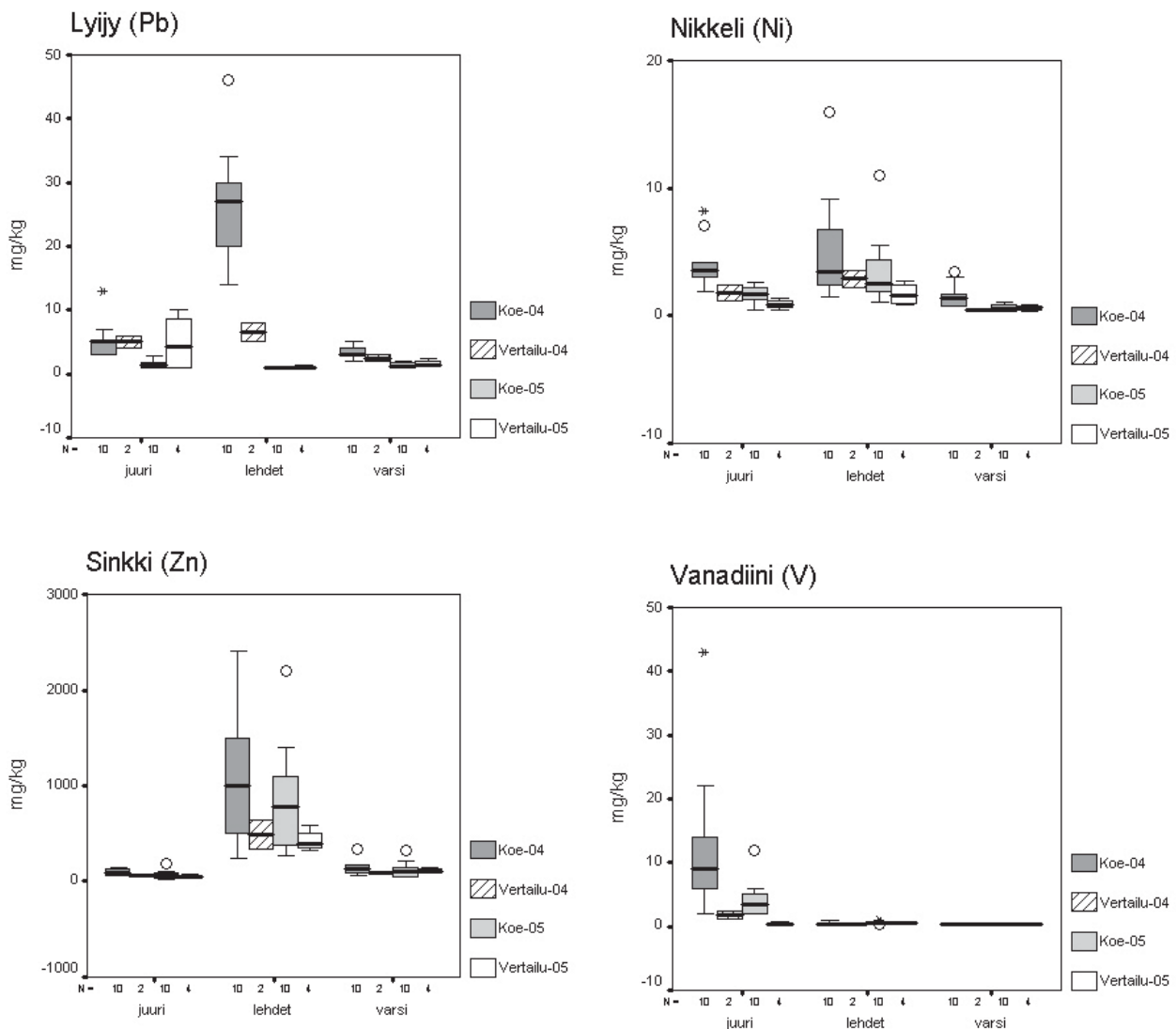
**Alumiinin** suurimmat pitoisuudet määritettiin haavan juuresta (ka. 473 mg/kg) ja lehdistä (ka. 259 mg/kg) vuonna 2004 (kuva 8). Juuren korkeat alumiinipitoisuudet eivät kuitenkaan poikenneet vertailutasosta. Lehdissä suuntaa antavaa eroa koepuiden ja vertailupuiden välillä oli, mutta erot olivat eri vuosina eri suuntaiset. Haavan varteen alumiinia ei kertynyt. **Kadmiumin** suurimmat pitoisuudet havaittiin vuoden 2004 lehtinäytteissä (ka 11,9 mg/kg), jolloin koalueen haapojen lehdistä pitoisuudet olivat selvästi vertailupuiden lehtiin kadmiumpitoisuuksia suurempia. Haapojen varteen (ka. 4,5 mg/kg) ja juureen (ka. 2,6 mg/kg) kadmiumia kertyi selvästi vähemmän kuin lehtiin. **Kromin** maksimipitoisuudet määritettiin juurinäytteistä vuonna 2004 (ka. 3,8 mg/kg), jolloin pilaantuneen kasvupaikan haapojen juurien kromipitoisuus oli merkittävästi vertailutasoa korkeampi. Myös **kuparin** kohdalla juuret keräsivät suurimmat pitoisuudet (ka. 15,4 mg/kg) vuonna 2004 ja olivat vertailunäytteissä havaittuja pitoisuuksia suurempia.



Kuva 8. Pilaantuneen koalueen ja vertailualueen haapojen juurien, lehtiin ja varsien alumiini-, kadmium-, kromi- ja kupari-pitoisuudet vuosina 2004 ja 2005. "Laatikot" kuvaavat ylä- ja alakvartiilien (75% ja 25%) välistä etäisyyttä, paksut vaakaviivat mediaaneja ja pystyjanat pitoisuuksien minimi-maksimi vaihteluväliä (o = ulkopuolinen havainto, \* = äärihavainto).

Koe- ja vertailupuiden tai eri kasvinosien välillä ei ollut merkittäviä eroja **lyijyn** määrässä lukuun ottamatta koepuiden lehtiä vuonna 2004 (kuva 9). Tällöin lehdissä oli lyijyä keskimäärin 26,6 mg/kg. Vuonna 2005 samojen koepuiden lehtien lyijypitoisuus jäi alle määritysrajan (<1 mg/kg). Vuonna 2004 myös vertailualueen puiden lehtien lyijypitoisuudet olivat lievästi kohonneet (ka. 6,5 mg/kg). **Nikkelin** pitoisuuksissa eri kasvinosien välillä ei ollut suuria eroja, joskin pitoisuudet olivat lievästi kohonneet lehdissä (ka 5,2 mg/kg) ja juuressa (3,6 mg/kg) vuonna 2004. Havaitut pitoisuudet eivät kuitenkaan poikenneet vertailutasosta (aino-

astaan varren nikkelpitoisuudet olivat koepuissa vertailutasoa merkittävästi korkeammat vuonna 2004). Korkeimmat **sinkin** pitoisuudet havaittiin lehdissä vuonna 2004 (ka. 1070 mg/kg). Havaitut pitoisuudet eivät kuitenkaan poikenneet tilastollisesti vertailupuiden lehtien sinkkipitoisuuksista, joissa niin ikään lehtien pitoisuudet olivat muita kasvinosia suuremmat. **Vanadiinin** pitoisuus oli suurin haavan juuressa ja pilaantuneen alueen haapojen juurissa vanadiinipitoisuus oli vuonna 2005 merkitsevästi ja vuonna lähes merkitsevästi suurempi kuin vertailualueella.



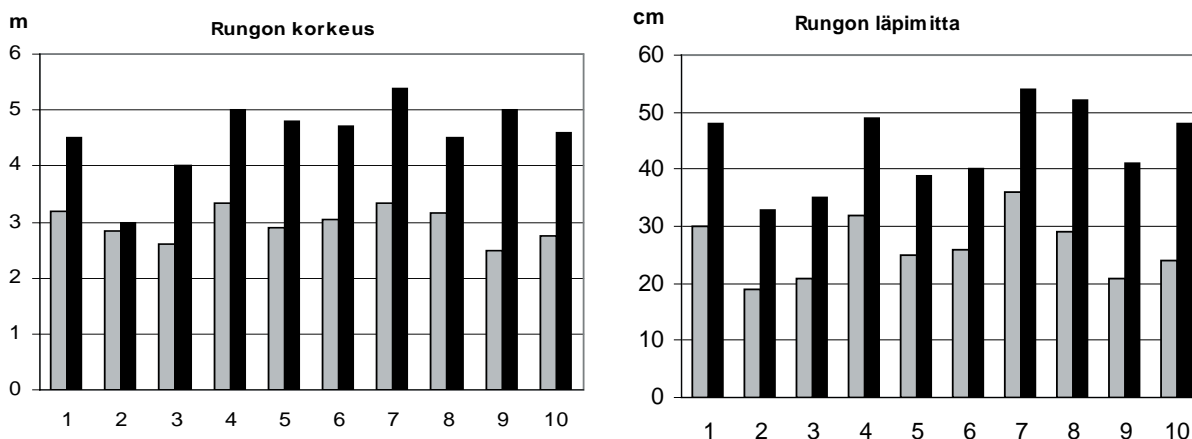
Kuva 9. Pilaantuneen koalueen ja vertailualueen haapojen juurien, lehtien ja varsien lyijy-, nikkeli-, sinkki- ja vanadiinipitoisuudet vuosina 2004 ja 2005. "Laatikot" kuvaavat ylä- ja alakvartiilien (75% ja 25%) välistä etäisyyttä, paksut vaakaviivat mediaaneja ja pystyjanat pitoisuuksien minimi-maksimi vaihteluväliä (o = ulkopuolinen havainto, \* = äärihavainto).

### 3.3.2

#### Metallien vaikutus haapojen kasvuun

Maaperän metallipilaantuneisuuden ei havaittu vaikuttavan hybridihaapojen kasvuun. Yhdenkään yksittäisen metallin tai kasvupaikan kokonaispilaantuneisuuden ja mitattujen kasvuparametrien (kokonaispituus, pituuskasvu, paksuuskasvu) välillä ei ollut merkittävää yhteyttä. Keskimääräinen pituuskasvu vuosien 2004-2005 aikana oli noin 160 cm (vaihteluväli 20-250 cm) ja rungon paksuuskasvu

50 cm korkeudelta mitattuna keskimäärin 18 mm (vaihteluväli 14-24 mm) (kuva 10). Pilaantuneen koalueen hybridihaavoista mitattuja kasvuparametreja ei ollut mahdollista verrata puhtaan vertailualueen kasvuparametreihin, sillä vertailualueen puut olivat metsähaapoja, joiden kasvu on tunnetusti hybridihaapoja hitaampaa. Koalueen puiden keskipituus neljän kasvukauden jälkeen oli noin 300 cm, mikä vastaa hybridihaavan kasvunopeutta hyvissä kasvuolosuhteissa lehtomaisella kankaalla (Hynynen ym. 2004).



Kuva 10. Hybridihaapojen rungon korkeus ja läpimitta vuosina 2004 (harmaa) ja 2005 (musta)

### 3.3.3

#### Metallien kulkeutuminen kasvissa

Metallien kulkeutumista ja jakautumista kasveissa voidaan analysoida laskemalla haitta-aineiden suhteellinen osuus kasvin eri osissa. Metallien lehti/juurisuhteen avulla voidaan arvioida kulkeutuvatko metallit kasvien lehtiin. Tässä kokeessa kadmium ja sinkki rikastuivat selvästi lehtiin (taulukko 2). Sinkin pitoisuus oli yli kymmenkertainen

ja kadmiumin noin viisinkertainen kasvien lehdisä verrattuna juuriin. Kontrollialueella, jossa näitä metalleja on vähemmän, myös lehtiin kerääntyminen oli suhteessa vähäisempää. Alumiini, kromi, natrium ja vanadiini jäivät pääasiassa kasvien juuristoon. Vuonna 2004 lyijyn laskennallinen kerääntyminen lehtiin johtuu todennäköisesti lehtien pinnalle tulleesta kuivalaskeumasta koalueella ja on siten harhaanjohtava tulos.

Taulukko 2. Metallien lehti/juurisuhteen keskiarvo koe- ja kontrollipuissa vuosina 2004 ja 2005. N/A; ei määritetty.

		Al	Cd	Cr	P	Cu	Pb	Na	Ni	Fe	Zn	V
<b>Koepuut</b>	<b>2004</b>	0,7	4,8	0,2	1,9	0,6	5,9	0,4	1,3	0,3	10,7	0,1
	<b>2005</b>	0,7	5,8	0,6	1,6	1,1	N/A	N/A	2,1	1,3	12,1	0,2
<b>Kontrollit</b>	<b>2004</b>	0,3	2,8	0,3	1,7	1,2	1,3	0,4	1,6	0,2	7,4	0,2
	<b>2005</b>	0,7	2,3	0,8	1,4	1	0,1	0,1	1,8	0,6	8,5	0,9

Metallien pitoisuudet puiden varressa kuvastavat metallien kulkeutumista kasvissa. Haavan varressa on sinkkiä ja kadmiumia noin kaksinkertainen määrä juuriin verrattuna (taulukko 3), joten näitä metalleja kuljetetaan aktiivisesti kasvin leh-

tiin. Muiden metallien pitoisuus on juuressa suurempi kuin varressa. Myöskin lyijyä on vähemmän varressa kuin lehdessä vuonna 2004, joten luultavasti lehtien suuret pitoisuudet vuonna 2004 johtuvat nimenomaan kuivalaskeumasta.

Taulukko 3. Metallien varsi/juurisuhteen keskiarvo koe- ja kontrollipuissa vuosina 2004 ja 2005. N/A; ei määritetty

		Al	Cd	Cr	P	Cu	Pb	Na	Ni	Fe	Zn	V
Koepuut	2004	0,08	1,84	0,1	0,86	0,55	0,74	0,75	0,43	0,06	1,43	N/A
	2005	0,15	2,6	0,76	0,61	0,72	0,87	0,25	0,41	0,23	1,82	N/A
Kontrollit	2004	0,04	1,38	0	0,78	1	0,5	0,48	0,28	0,04	1,28	0
	2005	0,16	2,08	2,14	0,64	0,9	0,18	0,21	0,68	0,15	2,14	0

Kasvien lehtien metallipitoisuudet suhteessa varressa oleviin pitoisuuksiin antavat viitteitä kuinka nopeasti kasvi pumppaa metallit lehtiin tai varastoiko kasvi metalleja varteen (taulukko 4). Kadmiumilla ja sinkillä lehtien pitoisuudet ovat taas selvästi suuremmat kuin varsien pitoisuudet, joten nämä metallit kerääntyvät selvästi aktiivisesti

kasvien lehtiin. Toisaalta muillakin metalleilla lehtien pitoisuudet ovat pääasiassa suuremmat kuin varsien pitoisuudet. Tulosten perusteella näyttää siltä, että hybridihaapa varastoi metalleja joko juuristossa tai lehdissä, ja varressa olevat pitoisuudet kuvastavat pääasiassa lehtiin kuljetettavana olevia pitoisuuksia.

Taulukko 4. Metallien lehti/varsisuhteen keskiarvo koe- ja kontrollipuissa vuosina 2004 ja 2005. N/A; ei määritetty

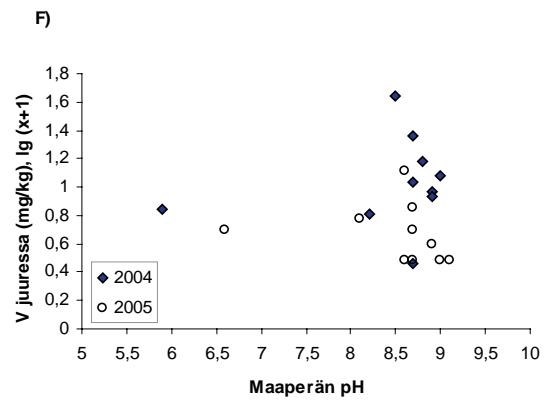
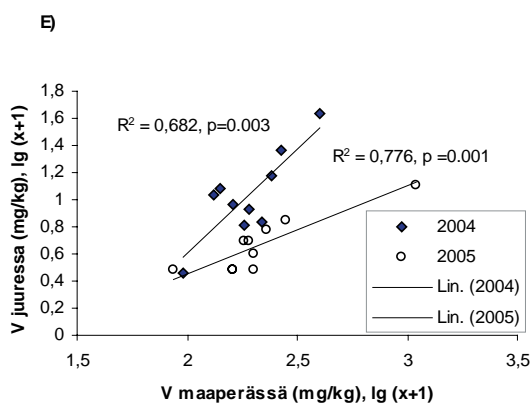
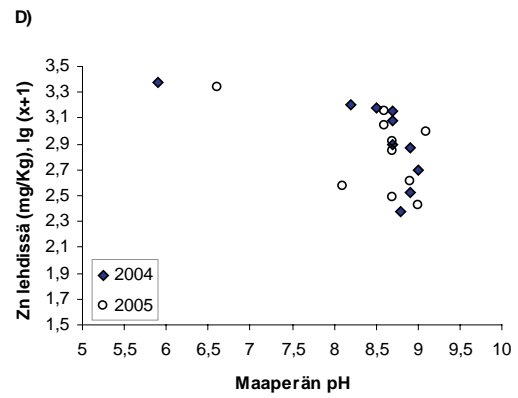
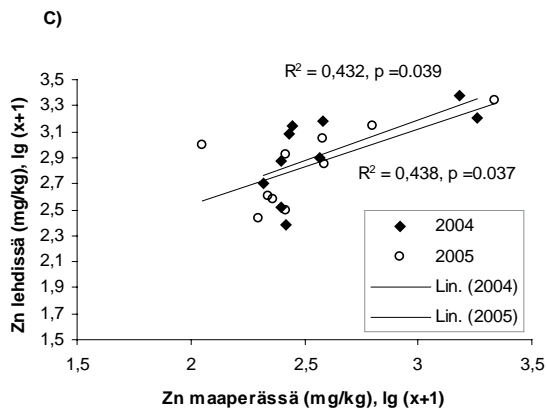
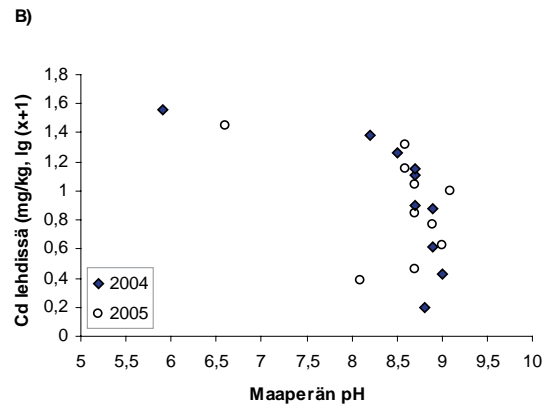
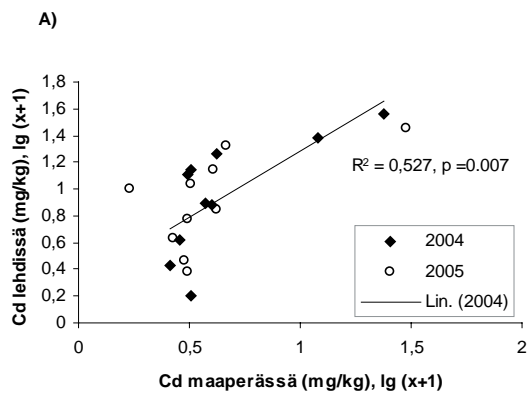
		Al	Cd	Cr	P	Cu	Pb	Na	Ni	Fe	Zn
Koepuut	2004	8,1	2,4	2,2	2,2	1,2	8	0,5	3,6	4,6	7,4
	2005	5	2,3	0,8	2,8	1,6	N/A	N/A	5,4	5,7	6,9
Kontrollit	2004	6,5	2	N/A	2,2	1,2	2,6	0,9	5,8	5,1	5,8
	2005	4,4	1,1	0,4	2,2	1,1	0,8	0,7	2,7	4	4

## Maaperä ja kasvit

### Maaperän metallipitoisuuksien ja happamuuden vaikutus bioakkumulaatioon

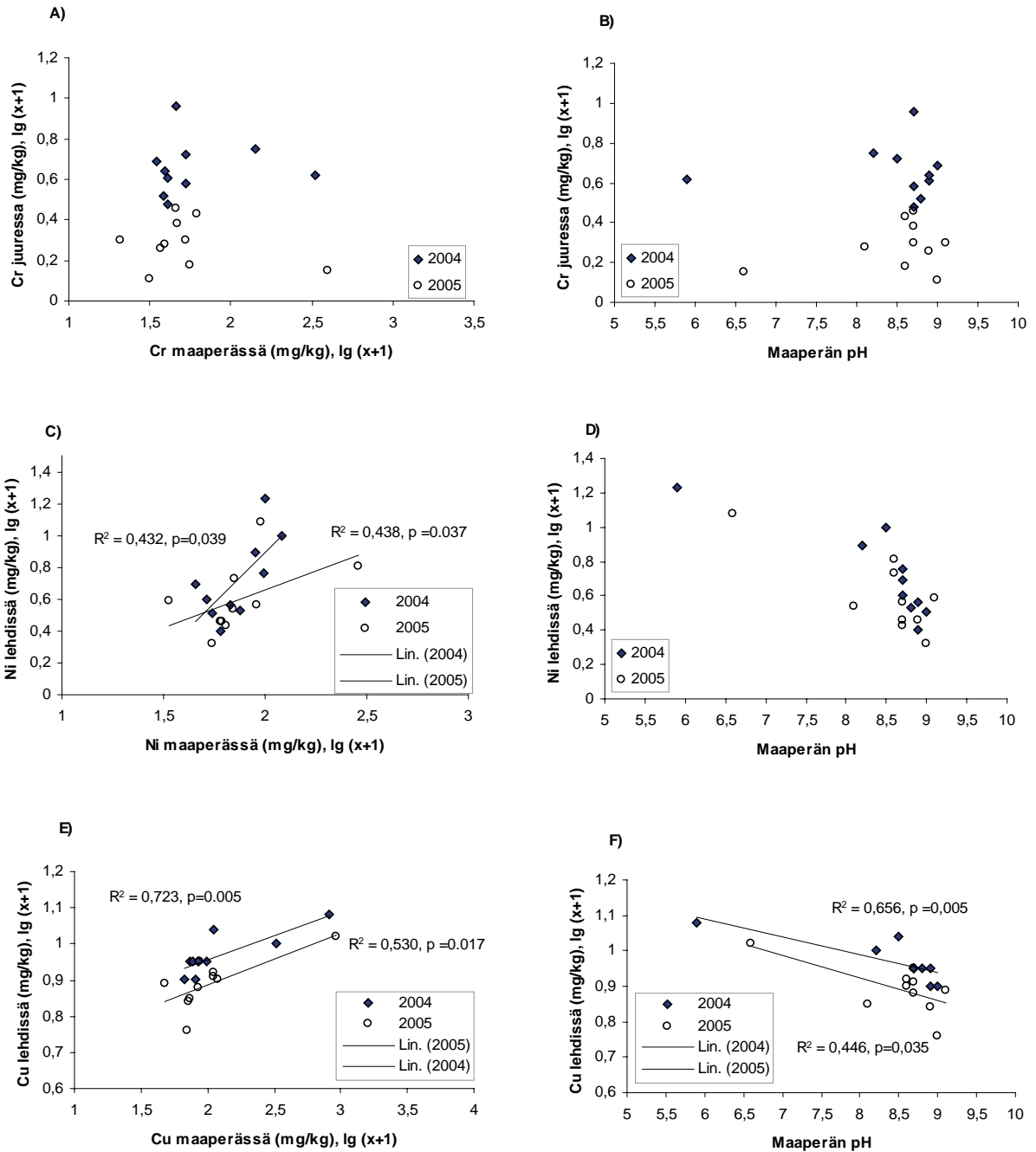
Maaperän metallipitoisuuksien vaikutus eri kasvinosista mitattuihin metallipitoisuuksiin oli useimilla metalleilla olemassa, mutta suhteellisen heikkona. Esimerkiksi kadmiumin ja sinkin lehdistä sekä vanadiinin juuresta (kasvinosat, joihin em. metallit selvimmin akkumuloituivat) mitatut pitoisuudet lisääntyivät maaperän metallipitoisuuksien kasvun myötä (kuvat 11 a-c). Lineaarisen regressiomallin perusteella maaperän kadmiumpitoisuus selitti noin 53% haavan lehdissä vuonna 2004 havaitusta kadmiumpitoisuuden vaihtelusta (kuva 13). Varresta mitatuille pitoisuuksille vastaavanlaisen mallin ( $y = 0,144 + 0,763x$ ) selitysaste oli aavistuksen parempi, 64%. Myös lehtien ja maaperän sinkkipitoisuuden välille pystyttiin tekemään lineaarisen regressiomalli, jonka selitysaste oli 48% (kuva 13). Kadmiumin ja sinkin rikastumiseen kasvin lehtiin voi vaikuttaa myös maaperän happamuus, joka lisää metallien saatavuutta. Tämä yhteys on havaittavissa etenkin kadmiumin kohdalla vuoden 2004 tuloksissa. Sekä maaperän metallipitoisuuden että happamuuden yhdistävällä regressiomallilla ei pystytty kuitenkaan selittämään eri kasvinosista mitattujen metallipitoisuuksien vaihtelua muilla metalleilla kuin nikkelillä.

Maaperän kromipitoisuuden lisääntyminen ei vaikuttanut haavan juurien eikä lehtien kromipitoisuuteen. Maaperän kuparipitoisuus oli sen sijaan yhteydessä lehtien kuparipitoisuuteen (kuva 12 e). Suurimmat kuparipitoisuudet kertyivät tosin haavan juuriin ja tähän maaperän kuparipitoisuuden vaihtelu ei merkittävästi vaikuttanut. Myös lehtien nikkelpitoisuus lisääntyi maaperän nikkelpitoisuuden kasvun myötä (kuva 12). Lisäksi maaperän happamuuden ja lehtien nikkelpitoisuuden välillä oli olemassa heikosti havaittava, lähes merkitsevä yhteys. Tällä aineistolla maaperän nikkelpitoisuuden ja happamuuden vaikutus lehtien nikkelpitoisuuteen voitiinkin kuvata lineaarisella regressioyhtälöllä, joka oli muotoa  $y = 0,767 + 0,773x_1 - 0,177x_2$ . Yhtälössä  $x_1 = \lg(\text{nikkelpitoisuus} + 1)$  ja  $x_2 = \text{pH}$ . Maaperän happamuuden ja nikkelpitoisuuden yhdistävän mallin selitysaste oli 77%. Maaperän pH erikseen selitti noin 68% haavan lehdissä havaitun nikkelpitoisuuden vaihtelusta.

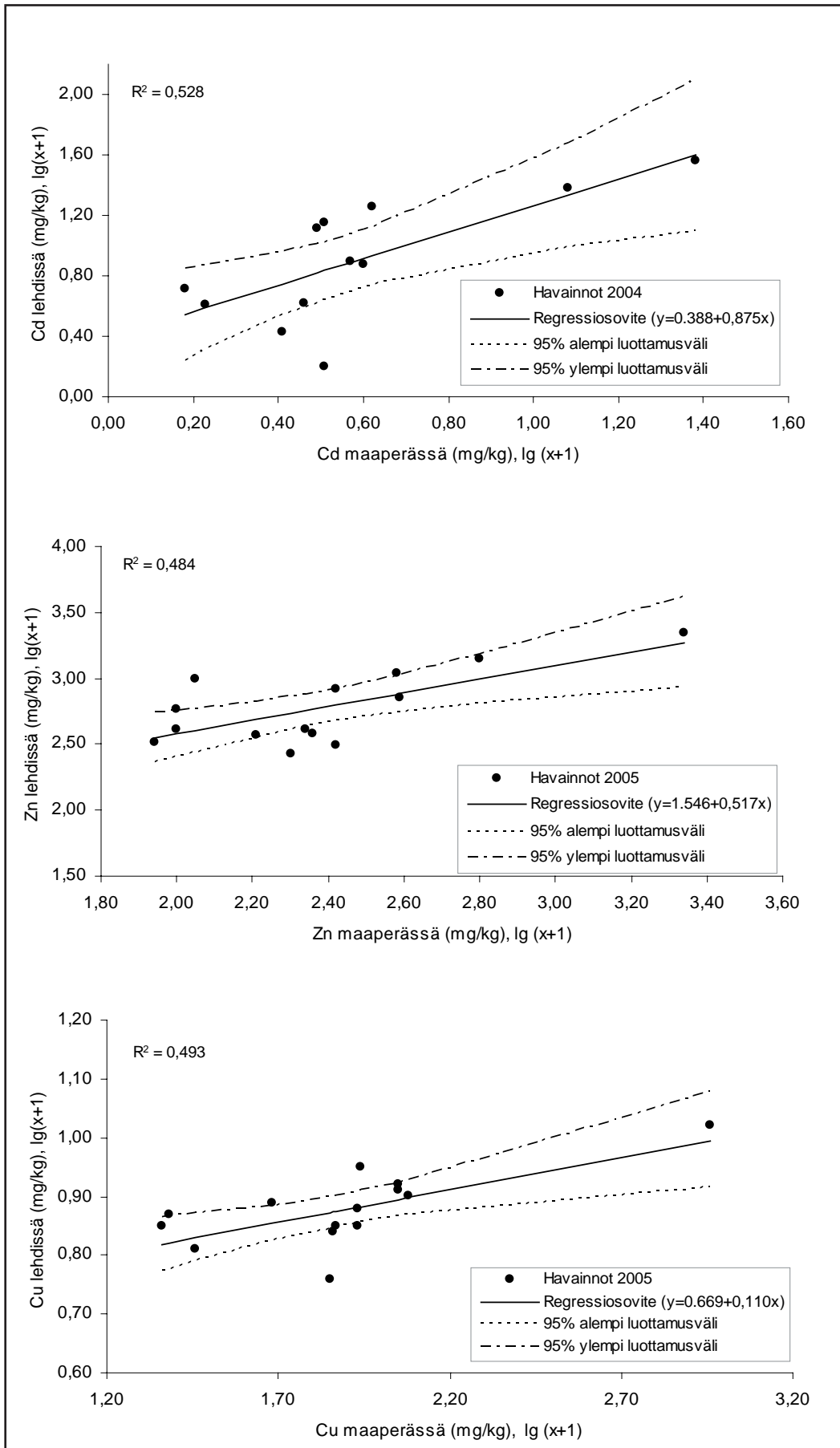


Kuva II. Maaperän metallipitoisuuden ja happamuuden yhteys lehtien kadmium- ja sinkkipitoisuuksiin ja juuren vanadiinipitoisuuteen (10 puuta pilaantuneelta alueelta).





Kuva 12. Maaperän metallipitoisuuden ja happamuuden yhteys haavan lehtien kromi- ja kuparipitoisuuksiin sekä juuren nikkelipitoisuuteen (10 puuta pilaantuneelta alueelta).



Kuva 13. Maaperän ja hybridihaavan lehtien kadmium-, sinkki- ja kuparipitoisuuksien lineaariset regressiosovitteet ja -yhtälöt.

## 3.4.2

**Bioakkumulaatio**

Hybridahaavat keräsivät lehtiinsä noin kolminkertaiset kadmium- ja sinkkipitoisuudet verrattuna maaperän pitoisuuksiin (taulukko 5). Lehtien pitoisuuden suhdetta maaperän pitoisuuksiin voidaan kutsua bioakkumulaatiofaktoriksi tai biokonsent-

raatiofaktoriksi. Muiden metallien pitoisuudet lehdissä olivat hyvin pienet verrattuna maaperän pitoisuuksiin, eli haapa ei rikasta muita tutkittavana olleita metalleja itseensä.

Taulukko 5. Kasvien lehtien metallipitoisuuksien suhde maaperän metallipitoisuuteen (= metallien bioakkumulaatiofaktorit)

	Al	Cd	Cu	Pb	Ni	Fe	Zn
2004	0,013	3,4	0,11	0,24	0,08	0,01	2,8
2005	0,006	3,58	0,11	N/A	0,07	0,01	3,02

Jos kasveja haluttaisiin käyttää metallien poistamiseen maaperästä (fytoekstraktio), haitta-aineiden tulisi rikastua mahdollisimman tehokkaasti kasvin maanpäällisiin osiin. Varren biomassassa on kuitenkin paljon suurempi kuin lehtien biomassassa, joten on tarpeellista tutkia lehtien rikastumiskertoimen lisäksi kasvin maanpäällisten osien rikastu-

miskerointia (taulukko 6). Kadmiumilla ja sinkillä maanpäällisten osien metallipitoisuuksien suhde maaperän metallipitoisuuksiin oli vielä suurempi kuin lehtien rikastumiskerroin. Muilla metalleilla rikastumista ei havaittu, myös juurien metallipitoisuudet olivat pienempiä kuin maaperän metallipitoisuudet.

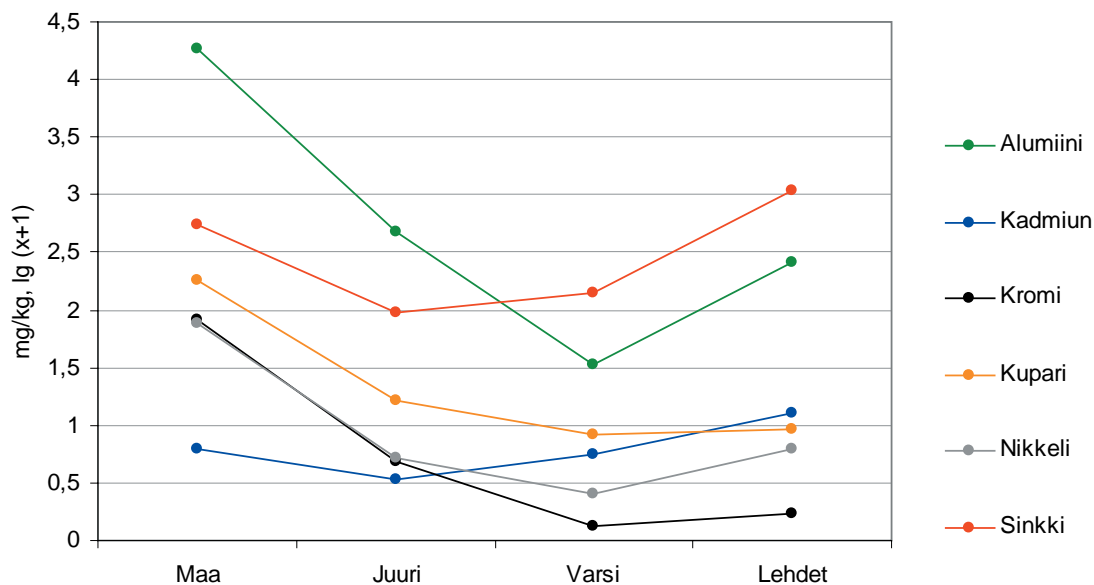
Taulukko 6. Kasvien maanpäällisten osien (lehdet ja varret) metallipitoisuus suhteessa maaperän metallipitoisuuteen.

	Al	Cd	Cu	Pb	Ni	Fe	Zn
2004	0,015	4,84	0,2	0,27	0,1	0,007	3,2
2005	0,008	5,2	0,2	N/A	0,09	0,009	3,6

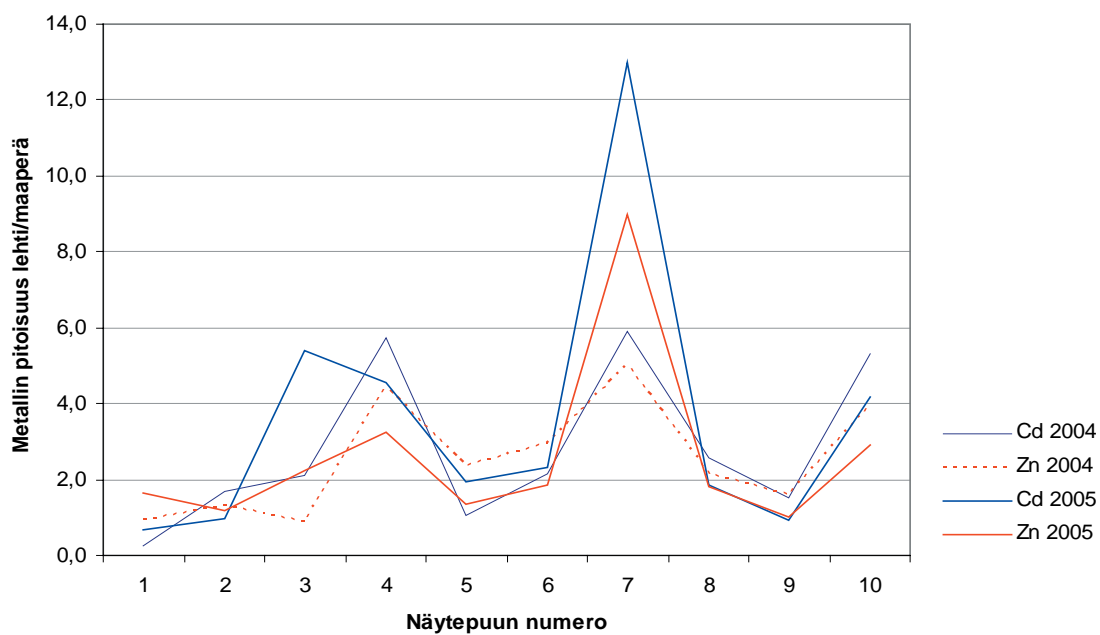
Metallien pitoisuus kasvissa verrattuna maaperän metallipitoisuuksiin antaa viitteitä mihin kategoriaan (ts. kerääjät, välttäjät vai indikaattorit) haapa kuuluu. Kadmiumin ja sinkin suhteen haapa käyttäytyy kuten hyperakkumulaattorikasvit (kuva 13). Kaikille muilla tutkituilla metalleille kasveihin kerääntyvät pitoisuudet jäävät selvästi pienemmiksi kuin kyseisten metallien pitoisuudet maaperässä.

Verrattaessa sinkin ja kadmiumin kertymistä kasveihin biokonsentraatiofaktorien (lehtien metallipitoisuus/maaperän metallipitoisuus) avulla kymmenessä tutkimusalueella kasvavassa puussa,

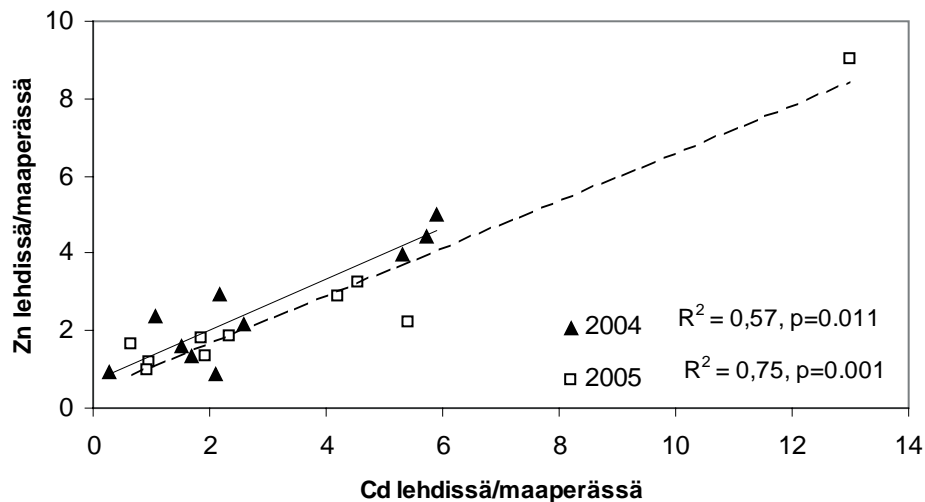
havaittiin sinkin ja kadmiumin kertymistehokkuuden olevan varsin yhdenmukainen eri koepuissa (kuva 14). Sinkin ja kadmiumin biokonsentraatiofaktorien välisen lineaarisen regressiosuoran selitysaste oli vuonna 2004 57 % ja vuonna 2005 vastaavasti 75 % (kuva 15). Myös varsien metallipitoisuuksien avulla laskettujen konsentraatiofaktorien selitysaste oli samaa suuruusluokkaa, mikä viittaa siihen, että nämä metallit kuljetetaan myös varressa yhdessä. Onkin todennäköistä, että sinkillä ja kadmiumilla on samanlainen kuljetusmekanismi.



Kuva 14. Eräiden metallien pitoisuudet maaperässä ja hybridihaavan juuressa, varressa sekä lehdissä v. 2004



Kuva 15. Sinkin ja kadmiumin biokonsentraatiofaktorit (lehtien metallipitoisuus/maaperän metallipitoisuus) koepuittain vuosina 2004 ja 2005.



Kuva 16. Sinkin ja kadmiumin lehtien biokonsentraatiofaktoreiden välinen yhteys.

### 3.5

## Metallien poistuma

Haitta-aineiden poistuminen maaperästä riippuu fytoimediaatiossa käytettävien kasvien keräämien pitoisuuksien lisäksi kasvien biomassasta. Hybridihaapojen fytoakkumulaatiokykyä arviointiin määrittämällä yhden keskimääräisen puun maanpäällisten osien massa kokeen lopussa vuonna 2005. Kooltaan 4,80 m korkean ja runkopaksuudeltaan 47 mm (50 cm korkeudelta mitattuna) hybridihaavan rungon tuorepaino oli 5,178 kg ja kuivapaino 2,50 kg. Tästä varren paino oli vastavasti 3,578 kg / 1,560 kg ja oksien paino 1,60 kg / 0,940 kg. Haavan lehtien tuorepaino oli yhteensä 1,456 kg ja kuivapaino 0,560 kg. Biomassa- ja metallipitoisuustietojen perusteella kasvin maanpäällisten osien mukana maaperästä poistuvien metallipitoisuuksien suhteellinen määrä voidaan laskea seuraavasti (Zhao ym. 2003):

$$x = (a * b) / (c * d) * 100 \quad \text{tai} \quad x = ((e * b) / d) * 100$$

- x = metallien poistuma maaperästä (%)
- a = kasvista mitattu metallipitoisuus (mg/kg)
- b = kasvin biomassa (kg)
- c = maaperästä mitattu metallipitoisuus (mg/kg)
- d = juuriston alueella oleva maaperän massa (kg)
- e = bioakkumulaatiofaktori

Tässä kokeessa pahiten pilaantuneen näytepisteen (9) metallipitoisuuksien mukaan laskettuna vuosittainen poistuma lehtien mukana oli kadmiumilla noin 20 mg (0,560 kg x 35 mg/kg) ja sinkillä 1344 mg (0,560 kg x 2400 mg/kg). Mikäli lehtien sijaan poistettaisiin kaikki maanpäälliset kasvinosat (myös varsi ja oksat) saataisiin kadmiumin poistumaksi 55 mg (35 mg + 20 mg) ja sinkin poistumaksi 2194 mg (1344 mg + 850 mg). Maaperän pitoisuudet näytepisteessä 9 olivat vuonna 2004 kadmiumilla 23 mg/kg ja sinkillä 1500 mg/kg.

## 4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

### 4.1

#### Pilaantunut alue ja koeasetelma

Tässä hankkeessa yhdistyivät luonnon olosuhteissa tehdyn tutkimuksen vahvuudet ja heikkoudet. Tutkimuksessa saatiin tietoa useiden eri metallien samanaikaisesta kerääntymisestä hybridihaavan eri kasvinosiin ja metallien keskinäisistä vuorovaikutuksista. Useimmissa tutkimuksissa metallien kulkeutumista kasveissa on tutkittu vesiviljelyssä, jossa yhtä raskasmetallia lisätään kasvien ravintoliuokseen kasvihuone-olosuhteissa. Näissä kokeissa on saatu arvokasta perustietoa metallien kulkeutumisesta kasviin optimi-olosuhteissa. Pilaantuneilla alueilla kasvu-olosuhteet ovat kuitenkin hyvin erilaiset. Pilaantuneilla alueilla esiintyy yleensä useita haitta-aineita ja niiden saatavuus on yleensä huonompi. Myöskään kasvien ravinteiden tai kosteuden saanti ei ole turvattua, ja kasvit joutuvat kilpailemaan elintilasta sekä niitä syöviä hyönteisiä vastaan. Näytteenoton toistaminen kahtena seuranta-vuonna mahdollisti tässä tutkimuksessa myös vuosien välisen vaihtelun arvioimisen. Kasveista määritetyt metallipitoisuudet poikkesivatkin vuosien välillä yllättävän paljon; vuonna 2004 lähes kaikkien metallien pitoisuudet olivat suuremmat kuin vuonna 2005. Maaperän metallipitoisuudet tai happamuus eivät sen sijaan poikenneet merkittävästi seurantavuosien välillä. Näytepisteiden 9 maaperä oli huomattavasti muita happamampi ja tässä pisteessä havaittiin useimpien metallien maksimipitoisuudet. Muissa näytepisteissä pH oli paljon korkeampi (pH 8-9) ja metallit pääsääntöisesti heikommin liukenevassa muodossa ja näin ollen kasveille huonommin saatavilla. Maaperän metallipilaantuneisuus vaihteli alueellisesti hyvin selvästi, mikä on pilaantuneille maa-alueilla tyypillistä (esim. Dickinson 2004, French 2005).

Tutkimusasetelman heikkoutena voidaan pitää lukuisien taustatekijöiden kontrolloimattomuutta.

Kokeessa käytetty pilaantunut alue oli heterogeeninen maaperän laadun, pilaantuneisuuden ja osin myös kosteusolosuhteiden vuoksi. Maaperän laatu vaihteli karkeasta hiedasta lähes puhtaaseen saveen ja tämän lisäksi alueelle oli tuotu täyttömaita. Kahdessa näytepisteessä esiintyikin kerroksittain kovaa tuhkapitoista täytemaata. Pienipiirteisesti vaihtelevan metallipilaantuneisuuden lisäksi Kumpulanpuron alajuoksu oli todettu kauttaaltaan pilaantuneen öljyillä. Lisäksi alue oli todettu paikoitellen pilaantuneen PCB:llä ja PAH-yhdisteillä, joten kokonaisuutenaan alue oli moniongelmainen. Osa näytepisteistä oli lisäksi melko lähellä puron uomaa, mikä saattoi aiheuttaa vaihtelua näytepuiden kosteusolosuhteisiin ja kasvupaikan laatuun.

Myös vertailupuiden määrä ja laatu (metsähaapoja) vaikeuttivat tulosten tulkintaa. Vertailupuiden suurempi määrä olisi mahdollistanut kattavamman analysoinnin esimerkiksi varianssianalyysin keinoin. Mikäli vertailupuut olisivat olleet samaan aikaan ja vastaavalle kasvupaikalle istutettuja hybridihaapoja, olisi ollut mahdollista arvioida kattavammin esimerkiksi metallipilaantuneisuuden ja puiden kasvun välisiä yhteyksiä. Tähän käyttämämme koekenttä ei kuitenkaan antanut mahdollisuuksia.

Keväällä 2005 merivesi kohosi poikkeuksellisen korkealle ja koekenttä puineen jäi hetkellisesti veden alle. Tämän lyhytkestoisen häiriön vaikutusta tutkimuksen tuloksiin on vaikea arvioida, mutta todennäköisesti vaikutukset esim. maaperän metallipitoisuuksiin tai happamuuteen olivat lievät. Toinen kokeeseen vaikuttanut kontrolloimaton häiriötekijä on saattanut olla koealueen välittömässä läheisyydessä sijainnut Kyläsaaren käsitteilyalue, jossa muun muassa välivarastoidaan raskasmetalleilla pilaantuneita maita. Useilla metalleilla maksimipitoisuudet havaittiin juuri lehdissä, mutta koska pitoisuudet näissä tapauksissa olivat korkeat myös varressa, on todennäköistä että metallit kulkeutuivat lehtiin maaperästä, eivät ilmaskeumana viereiseltä käsitteilyalueelta.



## Kasvien metallipitoisuudet

Suurimmat metallipitoisuudet havaittiin kasvien lehdissä ja juuressa. Erityisesti kadmium ja sinkki kerääntyivät haavan lehtiin ja molempien metallien pitoisuudet ylittivät lehdissä maaperästä mitatut pitoisuudet. Sama ilmiö oli havaittavissa myös vertailualueella, missä maaperän pitoisuudet olivat huomattavasti pilaantunutta koealuetta pienemmät. Hybridihaavan lehtien kadmium- ja sinkkipitoisuudet korreloivat selvästi maaperän metallipitoisuuksien kanssa. Samankaltainen yhteys on havaittu aikaisemmin mm. haapojen sukuun kuuluvalla valkopoppelilla (Madejon ym. 2004) ja onkin esitetty, että poppelin lehtiä voitaisiin käyttää sinkin ja kadmiumin biomonitoreina.

Muista puuvartisista kasveista ainakin pajun (*Salix sp.*) lehtien kadmium- ja sinkkipitoisuuksien tiedetään korreloivan maaperän pitoisuuden kanssa (French ym. 2006, Vandecasteele ym. 2005). Pajulla kadmiumin lisäksi sinkki kerääntyi lehtiin, kun taas Cu, Cr, Pb, Fe, Mn ja Ni kerääntyivät pääasiassa juuristoon (Vandecasteele ym. 2005). Tässä tutkimuksessa saadut tulokset antavat viitteitä siitä, että maaperästä ja kasvin lehdistä määritettyjen kadmium- ja sinkkipitoisuuksien välinen yhteys saattaisi olla hyperakkumulaattorin kaltaisesti epälineaarinen, jolloin kasvista mitatut pitoisuudet kasvavat nopeasti maaperäpitoisuuden lisääntymisen myötä. Tutkimuksen suhteellisen pieni havaintomäärä ei kuitenkaan anna varmuutta asiasta.

Tässä tutkimuksessa haapojen lehdistä mitattuja kadmium- ja sinkkipitoisuuksia pystyttiin kuvaamaan lineaarisella regressiomallilla. Mallien selityksasteet vastasivat vastaavissa analyyseissä aikaisemmin saatuja tuloksia (Efroymson ym. 2001). Maaperän happamuuden ja metallipitoisuuden huomioiva kahden selittäjän regressiomalli onnistuttiin tekemään kuitenkin ainoastaan lehtien nikkelipitoisuudelle. Vaikka maaperän happamuuden tiedetään vaikuttavan metallien saatavuuteen, ei tässä kenttäkokeessa pystytty arviomaan maaperän happamuuden vaikutusta eri kasvinosiin kertyviin metallipitoisuuksiin riittävän luotettavasti. Tämä johtui pääosin vähäisestä happamuusgradientista, sillä valtaosassa näytepisteistä pH vaihteli välillä 8-9 ja ainoastaan yhdessä näytepisteessä pH oli selvästi hapan (5,9-6,6). Havaintojen perusteella maaperän happamuus saattaa lisätä tiettyjen metallien rikastumista kasveihin, mutta tämäkään suhde ei liene lineaarinen.

Pilaantuneessa sedimentissä kasvaneiden haapojen on havaittu keräävän melko korkeita pitoisuuksia sinkkiä ja kadmiumia lehtiinsä. Esimerkiksi Vandecasteele ym. (2003) havaitsivat haavan lehdissä yli 7,5 mg/kg Cd-pitoisuuksia ja noin 320 mg/kg Zn-pitoisuuksia. Toisessa tutkimuksessa haapojen (*Populus spp.*) lehdissä oli kadmiumia korkeimmillaan n. 10-12 mg/kg, ja sinkkiä n. 800 mg/kg. Tässä tutkimuksessa hybridihaavan lehdistä määritetyt maksimipitoisuudet kadmiumilla olivat 35 mg/kg ja sinkillä vastaavasti 2400 mg/kg kuivapainosta. Havaitut maksimipitoisuudet ovat verrattain korkeita. Hyperakkumulaation rajana on kadmiumilla 100 mg/kg ja sinkillä 10 000 mg/kg.

Tutkimuksessa kadmiumin ja sinkin biokonsentraatiofaktorit korreloivat kaikissa puissa voimakkaasti toisiinsa, mikä antaa viitteitä siitä, että kyseiset metallit kuljetetaan kasvissa yhdessä. Tällaista ilmiötä ei ole havaittu esimerkiksi kevättaskuruoholla, joka on näiden metallien hyperakkumulaattorikasvi (Zhao ym. 2003). Pajulla kadmiumin ja sinkin biokonsentraatiofaktorin on todettu olevan korkein alhaisimmilla maaperän metallipitoisuuksilla (Vandecasteele ym. 2005). Tässä tutkimuksessa maaperän metallipitoisuuksien ja biokonsentraatiofaktorien suhde ei ollut yhtä ilmeinen.

Muista metalleista hybridihaavan juureen kerääntyivät selvimmin alumiini, kromi, vanadiini ja vähemmässä määrin myös kupari. Näillä metalleilla kasvista mitatut pitoisuudet olivat kuitenkin selvästi kasvupaikan maaperässä olevia pitoisuuksia pienemmät. Esimerkiksi kasvista määritetyt kuparipitoisuudet olivat keskimäärin 10 % maaperän pitoisuuksista ja suurimmillaankin vain 38 % maaperän pitoisuuksista. Tässä tutkimuksessa hybridihaavat eivät siis rikastaneet itseensä muita metalleja kuin kadmiumia ja sinkkiä.

## Haapojen soveltuvuus fytoremediaatioon

Pilaantuneella maa-alueella istutetut hybridihaavat kasvoivat hyvin huolimatta alueen monitahoisesta pilaantuneisuudesta. Useissa kansanvälisissä tutkimuksissa onkin todettu *Populus*-heimon kasvien olevan hyviä kandidaatteja fytoremediaatioon suuren biomassan tuotannon ja suhteellisen suurien metallipitoisuuksien vuoksi. Lisäksi *Populus*-heimon puiden etuna on voimakas vesonta, jonka seurauksena pilaantuneella alueella olevista kasveista voidaan kerätä maanpäälliset osat pois tietyin väliajoin. Fytoremediaatiossa kasvien kasvedellytyksiä ja metallien sisäänottoa on myös mahdollista edistää esimerkiksi kastelulla, lannoituksella tai maaperän happamuuden säätelyllä. Haapojen kohdalla olisi mahdollista tehdä valintaa eri kloonien välillä, jolloin parhaiten soveltuvat puut voitaisiin istuttaa pilaantuneelle alueelle.

Haavan ja pajujen fytoekstraktiokykyä kadmiumin ja sinkin poistossa on aikaisemmin arvioinut ainakin French ym. (2006), joka totesi kadmiumin ja sinkin poistamisen maaperästä tehokkaimmilla *Salix* taksonilla olevan mahdollista 25-30 vuodessa. Myös Layreysens ym. (2004, 2005) totesi useiden *Populus* lajien soveltuvan kadmiumin, sinkin ja alumiinin fytoekstraktioon lievästi pilaantuneille alueille. Layrensensenin (2004) kokeessa eri haapakloonien kadmiumin pitoisuudet kasvissa olivat 5-40 kertaa maaperän pitoisuuksia korkeampia ja sinkin pitoisuudet 3,6- 7,8 kertaa maaperän pitoisuuksia suurempia. Tässä tutkimuksessa hybridihaavan lehtiin kertyi esimerkiksi kadmiumia suurimmillaan 35 mg/kg kuivapainoa kohden. Puun varteen rikastuneet määrät olivat tätä pienempiä, suurimmillaan 20 mg/kg. Nämä pitoisuudet olivat keskimäärin 3-4 kertaa maaperän kokonaispitoisuuksia korkeampia.

Vaikka hybridihaavat rikastavat maanpäällisiin kasvinosiin melko tehokkaasti kadmiumia ja sinkkiä, olivat vuosittain poistuvat metallipitoisuudet tässä tutkimuksessa vähäiset huomioitaessa kasvien biomassassa ja juuriston vaikutusalueella olevan maaperän kokonaismetallipitoisuudet. Fytoremediaation tehostamiseksi tulisikin maksimoida kasvien biomassan tuotanto. Suuntaa antavana arviona riittävän tehokkaasta vuosittaisesta biomassan tuotantokyvystä on esitetty 8-10 t/ha vuodessa (Mitchell ym. 1999, Tubby ja Armstrong 2002). Esimerkiksi pajuilla saaduissa lupaavissa tuloksissa on biomassan tuotantotehokkuutta lisätty lyhyellä kasvatuskierrolla. Viimeisen sadonkorjuun yhteydessä suositellaan poistettavaksi myös pääosa juuristosta (Dickinson ja Pulford 2004). Teoreettisten laskelmien ja käytännön fytoremediaatiokokeissa saatujen tulosten välillä on kuitenkin edelleen useita epävarmuustekijöitä. Näistä yksi merkittävimmistä on todennäköisesti maaperän pilaantuneisuuden spatiaalinen vaihtelu (Dickinson 2004, French 2005). Lievästi pilaantuneilla alueilla fytoremediaatio voi kuitenkin tietyissä olosuhteissa olla toimiva, kustannustehokas ja samalla ympäristöystävällinen kunnostusmenetelmä.

## 5 Yhteenveto

Hankkeessa tutkittiin pilaantuneelle alueelle istutettujen hybridihaapojen metallipitoisuuksia eri kasvinosissa ja arvioitiin haapojen soveltuvuutta metallien fytoimediaatioon. Tutkimuksen koalueen tiedettiin pilaantuneen pitkän aikavälin kuluessa etenkin öljyillä ja raskasmetalleilla. Tarkemmissa maaperäanalyyseissa alueen maaperän laadun ja metallipilaantuneisuuden havaittiin vaihtelevan runsaasti ja korkeita pitoisuuksia esiintyi etenkin sinkillä, kuparilla, kadmiumilla, nikkeliällä, vanadiinilla ja kromilla. Monien eri metallien pitoisuudet maaperässä korreloivat voimakkaasti keskenään. Maaperän pilaantuneisuuden ei kuitenkaan havaittu vaikuttavan koepuiden kasvuun ja puiden pituuskasvu vastasi hybridihaavan kasvunopeutta hyvissä kasvuolosuhteissa.

Metallista riippuen korkeimmat pitoisuudet havaittiin hybridihaavan juuressa tai lehdissä. Puun varteen metallien kertyminen oli selvästi vähäisempää. Juureen kerääntyivät erityisesti alumiini, kromi ja vanadiini ja lehtiin vastaavasti kadmium sekä sinkki, vähemmässä määrin myös nikkeli. Kahden seurantavuoden välinen vaihtelu eri kasvinosista määritetyissä metallipitoisuuksissa oli huomattavan suurta. Osalla metalleista kasvusta määritetyt pitoisuudet korreloivat maaperän metallipitoisuuksien kanssa. Selvimmin tämä yhteys oli havaittavissa sinkillä, vanadiinilla, kuparilla ja nikkeliällä.

Koalueen maaperässä esiintyvistä raskasmetalleista ainoastaan kadmium ja sinkki rikastuivat hybridihaapoihin; lehtien kadmiumpitoisuudet olivat yli kolminkertaiset ja sinkkipitoisuudet lähes kolminkertaiset verrattaessa maaperän pitoisuuksiin. Kadmiumin ja sinkin varsin yhden mukaiset pitoisuusvaihtelut eri kasvin osissa antavat viitteitä siitä, että kyseisillä metalleilla on samanlainen kuljetusmekanismi kasvin sisällä. Vaikka hybridihaavat rikastivat maanpäällisiin kasvinosiin kadmiumia ja sinkkiä melko tehokkaasti, oli vuosittainen metallipoistuma fytoekstraktion myötä melko vähäistä verrattuna maaperän kokonaispitoisuuksiin. Tehostamalla kasvien biomassan tuotantoa hybridihaavat voisivat kuitenkin soveltua lievemmin pilaantuneiden maiden kunnostukseen pidemmän aikavälin kuluessa.

## LÄHTEET

- Assmuth T. 1997. Selvitys ja ehdotuksia ympäristövaarallisten aineiden pitoisuuksien ohjearvoista maaperässä - tiedolliset perusteet, määrittelyperiaatteet, soveltaminen, kehittäminen. Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristökeskuksen moniste nro 92, Helsinki.
- Baker AJM, Reeves RD, Hajar ASM. 1994. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (Brassicaceae). *New Phytol* 127:61-68.
- Baker AJM, Brooks RR. 1989. *Terrestrial Higher Plants Which Hyperaccumulate Metallic Elements—A Review of Their Distribution, Ecology and Phytochemistry*. Biorecovery, Academic Publishers. Volume 1 pp. 81–126.
- Dickinson, N.M., Pulford, I.D. 2004. Cadmium phytoextraction using short-rotation coppice *Salix*: the evidence trail. *Environ international* 31: 609-613
- Efroymson, R.A., Sample, E.B., Suter II, G.W. 2001. Uptake of inorganic chemicals from soil by plant leaves: Regression of the field data. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 20 11. p. 2561-2571.
- French CJ, Dickinson NM, Putwain PD. 2006. Woody biomass phytoremediation of contaminated brownfield land. *Environ Pollution* 141: 387-395.
- Ghosh M, Singh SP. 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. - 1 -. *Applied Ecology and Environmental Research* 3: 1-18.
- Hassinen V. 2002. Raskasmetallien fyto-remediaation hyödyntämismahdollisuudet. *Suomen ympäristö* 547. 72 s
- Hassinen VH, Tervahauta AI, Kärenlampi SO. Searching genes for metal tolerance and uptake. In *Phytoremediation: Methods and reviews* (Willey N, ed), Humana Press, Totowa, NJ, USA. In press
- Hermle S, Günthardt-Goerg MS, Schulin R. 2006. Effects of metal-contaminated soil on the performance of young trees growing in model ecosystems under field conditions. *Environ Pollut* 144(2): 703-714
- Hynynen, J. 1999: Haavan ja hybridihaavan kasvu ja tuotos. Julkaisussa: Hynynen, J. & Viherä-Aarnio, A. (toim.). Haapa – monimuotoisuutta metsään ja metsätalouteen. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 725. s. 25-27.
- Hynynen, J., Ahtikoski, A., Eskelinen, T. Viljelyhaavikon tuotos ja kasvatuksen kannattavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2004: 113-116
- Jiang RF, Ma DY, Zhao FJ, McGrath SP. 2005. Cadmium hyperaccumulation protects *Thlaspi caerulescens* from leaf feeding damage by thrips (*Frankliniella occidentalis*). *New Phytol*. 167:805-814.
- Kärenlampi S, Schat H, Vangronsveld J, Verkleij JAC, van der Lelie D, Mergeay M, Tervahauta AI. 2000. Genetic engineering in the improvement of plants for phytoremediation of metal polluted soils. *Environ Pollut* 107:225-231.
- Laureysens I, Blust R, De Temmerman L, Lemmens C, Ceulemans R. 2004. Clonal variation in heavy metal accumulation and biomass production in a poplar coppice culture: I. Seasonal variation in leaf, wood and bark concentrations. *Environ Pollut*. 131:485-494.
- Laureysens I, De Temmerman L, Hastir T, Van Gysel M, Ceulemans R. 2005. Clonal variation in heavy metal accumulation and biomass production in a poplar coppice culture. II. Vertical distribution and phytoextraction potential. *Environmental Pollut*. 133:541-551.
- Madejon P, Maranon T, Murillo JM, Robinson B. 2004. White poplar (*Populus alba*) as a biomonitor of trace elements in contaminated riparian forests. *Environ Pollut*. 132:145-155.
- Puolanne J, Pyy O, Jeltsch U (toim.). 1994. Saastuneet maa-alueet ja niiden käsittely Suomessa - Saastuneiden maa-alueiden selvitys- ja kunnostusprojektin loppuraportti. Helsinki, ympäristöministeriö. Ympäristönsuojeluosaston muistio nro 5/19-94.
- Saarela, J. 1990. Kaivosjätteiden geoteknisistä ominaisuuksista ja ympäristövaikutuksista. Helsinki, Vesi- ja ympäristöhallitus. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisu nro 64.
- Sillanpää, P. 2007. Öljyhiilivedyillä saastuneen maan puhdistaminen puiden avulla. *Suomen ympäristö* 2. 91 s. Pirkanmaan ympäristökeskus.
- Stenvall, N., Haapala, T., Pulkkinen, P. 2004. Effect of genotype, age and treatment of stock plants on propagation of hybrid aspen (*Populus tremula* × *Populus tremuloides*) by root cuttings. *Scan. J. For. Res.* 19(4): 303-311.
- Sorvari, J, & Antikainen, R. (toim.) 2004. Katsaus pilaantuneiden maa-alueiden riskinhallinnan nykykäytäntöihin. Suomen ympäristökeskuksen moniste 316. Suomen ympäristökeskus.
- Sorvari, J. 2005. Pilaantuneen maaperän ja pohjaveden riskinhallinnan nykykäytännöt (esitys). Valtakunnalliset ympäristöntutkimuspäivät, Kuopio 1.-2.11.2005.
- Viatak 2003. Toukolan rantapuisto, Kumpulanpuro. Pilaantuneen maaperän ja sedimentin kunnostussuunnitelma. Helsingin kaupungin rakennusvirasto, viherosasto. 33 s.
- Viatak 2004. Kumpulanpuron alajuoksun kunnostussuunnitelma (luonnos). Helsingin kaupungin rakennusvirasto, viherosasto. 28 s.+ liitteet.
- Viherä-Aarnio, A. 1999: Hybridihaapa – 40 vuoden takaa viljelypuuksi. Julkaisussa: Hynynen, J. & Viherä-Aarnio, A. (toim.). Haapa – monimuotoisuutta metsään ja metsätalouteen. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 725. s. 13-23.
- Yu, Q., Mäntylä, N., Salonen, M. 2001a. Rooting of hybrid clones of *Populus tremula*, L. × *Populus tremuloides* Michx. by stem cutting derived from micropropagated plants. *Scan. J. For. Res.* 16(3):238-245.
- Yu, Q., Pulkkinen, P., Rautio, M. Haapanen, M., Alen, R., Stener, L.G. Beuker, E. & Tigerstedt, P.M.A. 2001b. Genetic control of wood physicochemical properties growth and phenology of hybrids aspen clones. *Can. J. For. Res.* 31:1-9.
- Yu, Q., Tigerstedt, P.M.A. & Haapanen, M. 2001c. Growth and phenology of hybrid aspen clones (*Populus tremula*, L. × *Populus tremuloides* Michx.). *Silva Fennica* 35(1):15-25.
- Zhao FJ, Lombi E, McGrath SP. 2003. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil* 249:37-43.

**Liite I. Maaperän happamuus (pH-arvo) sekä alumiinin (Al), arseenin (As), kadmiumin (Cd), kromin (Cr), kuparin (Cu), lyijyn (Pb), mangaanin (Mn), molybdeenin (Mo), nikkelin (Ni), raudan (Fe), sinkin (Zn) ja vanadiinin (V) pitoisuudet (mg/kg, keskiarvo) eri näytepisteissä (I-10) sekä kontrollipisteissä (KI-KI6) vuosina 2004 ja 2005. N/A ei analysoitu.**

2004													
Maanäyte	pH	Al	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Mn	Mo	Ni	Fe	Zn	V
1	8,8	20000	34	2,2	37	73	99	960	2	74	28000	260	240
2	8,9	19000	26	1,9	40	80	78	810	1	59	26000	250	160
3	8,2	22000	36	1,1	140	330	240	830	4	88	35000	1800	180
4	8,7	17000	32	2,1	45	84	81	730	2	50	26000	270	130
5	9	19000	27	1,6	34	66	80	780	2	54	27000	210	140
6	8,9	19000	34	3	38	77	96	1000	1	66	29000	250	190
7	8,7	16000	14	2,2	40	85	56	600	1	45	23000	280	95
8	8,7	22000	33	2,7	52	96	110	1000	2	97	33000	370	270
9	5,9	17000	22	23	330	810	520	340	9	100	27000	1500	220
10	8,5	17000	17	3,2	52	110	86	700	2	120	25000	380	400
KI1	N/A	8100	5	0,5	20	29	68	200	1	34	14000	120	25
KI2	N/A	16000	7	0,7	36	44	83	230	1	15	20000	130	38
2005													
Maanäyte	pH	Al	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Mn	Mo	Ni	Fe	Zn	V
1	8,1	16000	32	2,1	38	73	98	970	2	68	22000	230	230
2	8,7	15000	24	2	45	87	87	840	2	63	21000	260	180
3	8,6	16000	27	3,7	61	120	110	940	3	69	23000	630	200
4	8,7	16000	28	2,2	46	85	90	900	1	59	23000	260	160
5	9	16000	23	1,7	33	69	81	860	2	54	21000	200	160
6	8,9	16000	30	2,1	36	71	99	1000	2	60	21000	220	200
7	9,1	13000	11	0,7	20	47	28	630	1	33	18000	110	87
8	8,7	17000	29	3,2	52	110	130	1100	2	91	24000	390	280
9	6,6	16000	22	29	400	920	650	320	11	95	26000	2200	190
10	8,6	17000	27	3,1	55	110	110	950	2	290	25000	380	1100
KI3	8	6200	4,5	<0,5	35	84	98	160	1	21	11000	160	21
KI4	7,8	19000	6	<0,5	48	28	21	310	<1	23	27000	87	58
KI5	7,5	8100	4,5	<0,5	22	22	21	150	<1	9,8	12000	100	27
KI6	9,2	3700	3,3	<0,5	13	23	120	150	<1	9,2	7700	100	21

**Liite 2. Hybridihaapojen juurien alumiiniin (Al), arseenin (As), kadmiumin (Cd), kokonaiskromin (Cr), koksaisfosforin (P), kuparin (Cu), lyijyn (Pb), natriumin (Na), nikkelin (Ni), raudan (Fe), sinkin (Zn) ja vanadiinin (V) pitoisuudet (mg/kg kuivapainosta, keskiarvo) koealueen puissa (1-10) sekä kontrollialueen puissa (K11-K16) vuosina 2004 ja 2005.**

2004												
Juurinäyte	Al	As	Cd	Cr	P	Cu	Pb	Na	Ni	Fe	Zn	V
1	610	<2	0,3	2,3	1900	8	3	310	4	630	58	14
2	500	<2	<0,2	3,1	2700	15	5	1500	3,9	610	77	8,3
3	330	<2	3,9	4,6	1800	20	7	230	2,8	450	130	5,4
4	620	<2	5,1	8,1	2800	32	13	320	4,2	850	150	9,9
5	750	<2	0,6	3,9	1900	10	3	120	3	1200	58	11
6	590	<2	1,5	3,4	1600	11	5	100	3,3	760	64	7,6
7	240	<2	2,7	2	2600	9	3	110	1,9	270	98	1,9
8	410	<2	1,9	2,8	2200	14	5	490	7,1	490	98	22
9	200	<2	5,6	3,2	1700	19	5	92	3,2	270	140	5,9
10	480	<2	1,5	4,3	1800	16	5	95	8,2	640	79	43
K11	530	<2	1,2	1,5	1800	8	6	240	2,4	780	79	2,4
K12	440	<2	1,4	1,4	790	5	4	150	1,2	590	53	1,2
2005												
Juurinäyte	Al	As	Cd	Cr	P	Cu	Pb	Na	Ni	Fe	Zn	V
1	85	<2	0,4	0,9	1600	3,6	<1	110	1,5	87	37	5
2	150	<2	0,5	1,9	1300	5,9	1,5	100	2,3	170	39	4
3	130	<2	4	1,7	2100	11	2,9	360	1,8	170	100	2
4	140	<2	1,1	1,4	2000	8,1	2,9	200	1,3	200	59	2
5	53	<2	0,3	<0,3	970	4,2	<1	50	0,4	49	24	2
6	120	<2	0,6	0,8	2100	4,2	1,3	150	1,1	130	31	3
7	73	<2	1,7	1	2600	8,2	1,4	140	1,4	94	81	2
8	110	<2	1,3	1	1400	7,6	1,8	280	1,9	130	53	6
9	42	<2	9,6	0,4	2200	9,5	<1	48	2,6	55	180	4
10	64	<2	2,8	0,5	2300	5,2	<1	35	2,2	82	88	12
K13	200	<2	1,2	0,6	1500	7,4	10	260	0,8	600	74	0,7
K14	83	<2	0,8	0,5	1600	3	<1	360	0,5	190	53	0,4
K15	140	<2	0,7	0,3	1500	5,3	<1	110	1	160	38	<0,3
K16	29	<2	0,9	<0,3	1300	7,7	7,4	150	1,4	60	34	<0,3



**Liite 3. Hybridihaapojen varsien alumiiniin (Al), arseeniin (As), kadmiumin (Cd), kokonaiskromin (Cr), kokonaisfosforin (P), kuparin (Cu), lyijyn (Pb), natriumin (Na), nikkelin (Ni), raudan (Fe), sinkin (Zn) ja vanadiinin (V) pitoisuudet (mg/kg kuivapainosta, keskiarvo) koelueen puissa (I-10) sekä kontrollialueen puissa (KI I-KI6) vuosina 2004 ja 2005.**

2004												
Varsinäyte	Al	As	Cd	Cr	P	Cu	Pb	Na	Ni	Fe	Zn	V
1	28	<2	0,5	<0,3	1500	6	3	110	1,4	37	62	<0,3
2	36	<2	2,1	0,3	1600	6	5	140	1,7	36	100	<0,3
3	38	<2	8,3	0,4	1800	6	4	130	1,4	32	170	<0,3
4	26	<2	4,9	<0,3	1600	8	3	130	0,8	30	140	<0,3
5	25	<2	0,9	<0,3	1300	8	2	130	1	29	84	<0,3
6	23	<2	2,6	0,3	1700	9	2	130	0,8	26	80	<0,3
7	45	<2	5	0,3	1900	7	4	110	1,4	39	170	<0,3
8	47	<2	3,4	<0,3	1700	6	5	110	3,4	46	120	<0,3
9	24	<2	14	<0,3	2600	11	3	110	3	22	340	<0,3
10	31	<2	3,6	0,3	1600	7	3	120	0,8	30	130	<0,3
KI1	18	<2	1,5	<0,3	1200	8	2	91	0,5	28	88	<0,3
KI2	20	<2	2,1	<0,3	810	5	3	98	0,5	25	81	<0,3
2005												
Varsinäyte	Al	As	Cd	Cr	P	Cu	Pb	Na	Ni	Fe	Zn	V
1	11	<2	0,6	0,9	1100	3,9	<1	<30	0,7	22	55	0,5
2	7	<2	1,1	0,4	1400	4,9	<1	<30	0,5	20	49	<0,3
3	16	<2	9,4	0,7	1300	4,7	1,9	50	0,9	25	220	0,5
4	13	<2	4,1	0,3	1100	4,1	1,3	38	0,4	20	110	<0,3
5	11	<2	1,6	0,7	520	4,2	<1	28	0,4	20	65	0,4
6	11	<2	1,9	0,4	930	4,9	<1	36	0,4	15	42	0,6
7	16	<2	4,4	0,8	1100	4	1,9	35	0,6	27	150	0,3
8	16	<2	2,9	<0,3	970	3,6	1,8	32	0,4	33	110	<0,3
9	10	<2	11	<0,3	1500	4,6	<1	<30	1	20	330	<0,3
10	13	<2	4,4	1,1	970	3,6	1,6	<30	1,1	24	140	<0,3
KI3	22	<2	2,3	<0,3	870	4,9	2,4	57	0,5	42	89	0,31
KI4	18	<2	1	<0,3	1100	6	1,3	57	0,4	41	87	<0,3
KI5	16	<2	1,2	1,1	840	6,2	1,1	41	0,8	36	140	<0,3
KI6	17	<2	3	0,9	950	4	1,5	34	0,8	34	110	<0,3



**Liite 4. Hybridihaapojen lehtien alumiiniin (Al), arseenin (As), kadmiumin (Cd), kokonaiskromin (Cr), kokonaisfosforin (P), kuparin (Cu), lyijyn (Pb), natriumin (Na), nikkelin (Ni), raudan (Fe), sinkin (Zn) ja vanadiinin (V) pitoisuudet (mg/kg kuivapainosta, keskiarvo) koealueen puissa (I-10) sekä kontrollialueen puissa (KI1-KI6) vuosina 2004 ja 2005.**

2004													
Lehtinäyte	Al	As	Cd	Cr	P	Cu	Pb	Na	Ni	Fe	Zn	V	
1	330	<2	0,6	0,7	2900	8	29	55	2,4	190	240	0,6	
2	270	<2	3,2	0,7	2700	7	30	49	1,5	30	330	0,4	
3	410	<2	23	1	4400	9	46	63	6,8	220	1600	0,5	
4	200	<2	12	0,9	4200	8	21	55	3	140	1200	<0,3	
5	190	<2	1,7	0,8	4000	7	20	56	2,2	130	500	<0,3	
6	140	<2	6,5	0,5	4300	8	14	65	2,6	110	740	0,4	
7	260	<2	13	0,6	4000	8	29	65	3,9	160	1400	<0,3	
8	320	<2	7	0,7	4000	8	34	64	4,7	180	800	1	
9	200	<2	35	0,7	3600	11	19	56	16	130	2400	<0,3	
10	270	<2	17	0,5	3500	10	25	72	9,1	170	1500	0,8	
KI1	77	<2	4,1	0,3	2400	9	5	74	2,2	100	640	<0,3	
KI2	170	<2	3,1	0,6	2000	7	8	90	3,6	170	340	0,4	
2005													
Lehtinäyte	Al	As	Cd	Cr	P	Cu	Pb	Na	Ni	Fe	Zn	V	
1	60	<2	1,4	0,4	2700	6,1	<1	<30	2,5	130	380	0,6	
2	50	<2	1,9	<0,3	3200	7,9	<1	<30	1,7	120	310	0,6	
3	58	<2	20	0,7	3000	6,9	<1	<30	4,4	130	1400	0,6	
4	58	<2	10	0,4	3400	6,5	<1	<30	1,9	120	840	0,4	
5	44	<2	3,3	0,4	2200	4,8	<1	<30	1,1	95	270	0,7	
6	52	<2	4,9	0,4	3000	5,9	<1	<30	1,9	110	410	0,7	
7	52	<2	9,1	0,4	3000	6,7	<1	<30	2,9	130	990	0,5	
8	60	<2	6	0,6	2900	7,1	<1	<30	2,6	130	710	1	
9	91	<2	27	0,4	2600	9,4	<1	<30	11	170	2200	0,8	
10	54	<2	13	0,7	2500	7,4	<1	<30	5,5	120	1100	0,7	
KI3	63	<2	2,8	0,3	2000	6	<1	32	2,1	130	370	0,5	
KI4	86	<2	0,8	0,4	1800	5,5	<1	<30	1	180	330	0,7	
KI5	73	<2	1,2	0,4	2400	6	<1	<30	0,9	130	410	0,5	
KI6	100	<2	3,5	0,4	2100	6,4	1,3	<30	2,7	170	590	0,5	

## KUVAILULEHTI

<i>Julkaisija</i>	Pohjois-Savon ympäristökeskus			<i>Julkaisu-aika</i> maaliskuu 2007
<i>Tekijä(t)</i>	Veli-Matti Vallinkoski, Viivi Hassinen ja Kristina Servomaa			
<i>Julkaisun nimi</i>	<b>Hybridahaapa metalleilla pilaantuneen alueen kasvikunnostuksessa</b>			
<i>Julkaisusarjan nimi ja numero</i>	Pohjois-Savon ympäristökeskuksen raportteja 2 / 2007			
<i>Julkaisun teema</i>				
<i>Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut</i>				
<i>Tiivistelmä</i>	<p>Hankkeessa tutkittiin pilaantuneelle alueelle istutettujen hybridahaapojen metallien sietoa ja eri kasvinosien keräämiä metallipitoisuuksia. Tavoitteena oli arvioida hybridahaapojen soveltuvuutta raskasmetalleilla pilaantuneiden alueiden kasvikunnostukseen eli fytoimediaatioon.</p> <p>Tutkimuksessa käytetyn koalueen tiedettiin pilaantuneen pitkän aikavälin kuluessa etenkin öljyllä ja raskasmetalleilla. Tarkemmissa maaperäanalyyseissa maaperän laadun ja metallipilaantuneisuuden havaittiin vaihtelevan runsaasti ja paikoitellen esiintyi korkeina pitoisuuksina etenkin sinkkiä, kuparia, kadmiumia, nikkeliä, vanadiinia ja kromia. Maaperän pilaantuneisuuden ei kuitenkaan havaittu vaikuttavan hybridahaapojen kasvuun, sillä puiden kasvu oli pilaantuneisuudesta huolimatta varsin nopeaa.</p> <p>Metallista riippuen korkeimmat pitoisuudet kerääntyivät hybridahaavan juureen tai lehtiin. Puun varteen metallien kertyminen oli selvästi vähäisempää. Juureen kerääntyivät erityisesti alumiini, kromi ja vanadiini sekä lehtiin vastaavasti kadmium ja sinkki, vähemmässä määrin myös nikkeli. Kahden seurantavuoden välinen vaihtelu eri kasvinosista määritetyissä metallipitoisuuksissa oli huomattavan suurta. Osalla metalleista kasvista määritetyt pitoisuudet korreloivat maaperän metallipitoisuuksien kanssa. Selvimmin tämä yhteys oli havaittavissa sinkillä, vanadiinilla, kuparilla ja nikkelillä.</p> <p>Koalueen maaperän raskasmetalleista ainoastaan kadmium ja sinkki rikastuivat hybridahaapoihin; lehtien kadmiumpitoisuudet olivat yli kolminkertaiset ja sinkkipitoisuudet lähes kolminkertaiset verrattaessa maaperän pitoisuuksiin. Kadmiumin ja sinkin yhdenmukaiset pitoisuusvaihtelut eri kasvinosissa antavat viitteitä siitä, että kyseisillä metalleilla on kenties samanlainen kuljetusmekanismi kasvin sisällä. Vaikka hybridahaavat rikastivat maanpäällisiin kasvinosiin kadmiumia ja sinkkiä tehokkaasti, oli vuosittainen metallipoistuma fytoekstraktion myötä melko vähäistä verrattuna maaperän kokonaispitoisuuksiin. Tehostamalla kasvien biomassan tuotantoa hybridahaavat voisivat soveltua lievemmin pilaantuneiden maiden kunnostuksiin pidemmän aikavälin kuluessa.</p>			
<i>Asiasanat</i>	fytoimediaatio, raskasmetalli, hybridahaapa, maaperä, pilaantuminen			
<i>Rahoittaja/ toimeksiantaja</i>	Ympäristöministeriö / Pohjois-Savon ympäristökeskus			
	ISBN 978-952-11-2659-8 (nid.)	ISBN 978-952-11-2660-4 (PDF)	ISSN 1796-1858 (pain.)	ISSN 1796-1866 (verkkok.)
	<i>Sivuja</i> 39	<i>Kieli</i> Suomi	<i>Luottamuksellisuus</i> Julkinen	<i>Hinta (sis.alv 8 %)</i> 10 €
<i>Julkaisun myynti/ jakaja</i>	Pohjois-Savon ympäristökeskus, PL 1049, Sepänkatu 2 B, 70101 Kuopio puh. 020 690 167, telefax 020 490 4777, sähköposti: kirjaamo.psa@ymparisto.fi www.ymparisto.fi/julkaisut			
<i>Julkaisun kustantaja</i>	Pohjois-Savon ympäristökeskus			
<i>Painopaikka ja -aika</i>	Kainuun Sanomat Oy, Kajaani 2007			

Suomessa arvioidaan olevan noin 20 000 mahdollisesti pilaantunutta maa-  
aluetta. Viimeisen vuosikymmenen aikana pilaantuneiden maiden kun-  
nostustarve on lisääntynyt ja tällä hetkellä kunnostetaan vuosittain noin  
400 kohdetta. Ylivoimaisesti käytetyin kunnostusmenetelmä on edelleen  
massanvaihto, jonka seurauksena jatkokäsittelyyn ohjattujen maa-ainesten  
määrät ovat olleet jatkuvassa kasvussa.

Lievemmin pilaantuneissa laaja-alaisissa kohteissa fytoimediaatio, eli kas-  
vien avulla tapahtuva kunnostus, saattaisi olla vaihtoehtoinen tai perinteisiä  
kunnostusmenetelmiä täydentävä kunnostustapa. Kasvit keräävät itseensä  
monenlaisia yhdisteitä auringon energian avulla ja sopivissa olosuhteissa  
kasveja voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi pilaantuneen maaperän stabi-  
loinnissa tai haitta-aineiden keräämisessä.

Tässä hankkeessa tutkittiin pilaantuneelle alueelle istutettujen nopeakas-  
vuisten hybridihaapojen metallien sietoa ja eri kasvinosiin kerääntyviä  
metallipitoisuuksia. Tulosten avulla pohditaan hybridihaapojen soveltuvuutta  
metalleilla pilaantuneen alueen fytoimediaatioon.



POHJOIS-SAVON  
YMPÄRISTÖKESKUS

**Pohjois-Savon ympäristökeskus**  
**Sepänkatu 2 B**  
**70100 Kuopio**  
**020 690 167**

**ISBN 978-952-11-2659-8 (nid.)**  
**ISBN 978-952-11-2660-4 (PDF)**  
**ISSN 1796-1858 (pain.)**  
**ISSN 1796-1866 (verkkok.)**