

# Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoittamisen ekologinen riskinarviointi metsäekosysteemissä

Jukka Juutilainen, Päivi Roivainen, Tiina Boman, Toini Holopainen, Sari Makkonen, Mikko Kolehmäinen

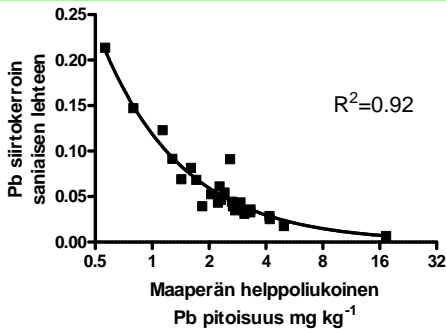


Ympäristötieteen laitos, Itä-Suomen Yliopisto, PL 1627, 70211 Kuopio  
paivi.roivainen@uef.fi, tiina.boman@uef.fi

Tutkimuksen tarkoitus: Empiirisen tiedon valossa tarkentaa suomalaisen metsäekosysteemiin soveltuva radioekologista mallintamista ja sen käyttöä loppusijoituksen mahdollisten riskien arviointiin.

## Johdanto

- Radionuklidien siirtyminen maaperästä kasvillisuuteen on tärkeä prosessi eliöiden altistumisen kannalta. Radioekologisessa mallinnuksessa tätä siirtymistä kuvataan yleisesti siirtokerroimella eli kasvin ja maaperän pitoisuuksien välisellä suhteella.
- Ydinjätteessä olevien radionuklidien siirtokerrointen tarkastelu etenkin metsäekosysteemissä ja Suomen oloissa on ollut vähäistä ja siksi tutkimuksessa kerättiin empiirinen aineisto, josta määritettiin siirtokerroimia ja niihin vaikuttavia tekijöitä.
- Siirtokerroimeen liittyy lineaarisuusoletus, jonka mukaan maaperän ja kasvien pitoisuudet riippuvat toisistaan lineaarisesti.



Kuva 1. Lyijyn siirtokerroin saniaisen (metsäalvejuuri) lehteen maaperän helppoliukoisesta lyijypitoisuudesta funktiona ja epälineaarisen sovituksen R<sup>2</sup>-arvo.

## Aineisto ja menetelmät

- Kasvi- ja maaperänäytteet (550kpl) kerättiin kahdelta uraaniesiintymältä Itä-Suomesta (Kuopio ja Nilsia) kesällä 2007. Lisäksi kerättiin liero- ja maakiitäjäisnäytteitä vuosina 2007-2008.
- Maaperänäytteet kerättiin 100 mm syvyydeltä.
- Kasvilajit: pihlaja, kuusi, metsäalvejuuri (Kuva 2), oravanmarja ja mustikka.
- Kenttäkerroksen kasvien osat juuri, varsi ja lehti; puiden kasvinosat hienojuuri, juuri ja lehti/neulainen.
- Alkuainepitoisuudet määritettiin ICP-MS - menetelmällä HNO<sub>3</sub>-hajotuksen (EPA 3051) jälkeen. Maaperän helppoliukoinen pitoisuus määritettiin NH<sub>4</sub>Ac - uutolla (pH 5).
- Maaperänäytteistä määritettiin myös pH, orgaanisen aineksen osuus ja partikkelikokojakauma.
- Tutkimuksessa tarkasteltavat alkuaineet: Co, Mo, Ni, Pb, U ja Zn
- Siirtokerroimet (CR) laskettiin kuivapainosta sekä maaperän kokonais- että helppoliukoisesta pitoisuudesta suhteen
- Lineaarisuuden tarkastelua varten aineistoon sovitettiin epälineaarinen yhtälö:

$$CR = C_{\text{kasvi}}/C_{\text{maaperä}} = a/(1+bC_{\text{maaperä}}) + c,$$

jossa a, b ja c ovat kokeellisesti määritettyjä vakioita. Epälineaarinen yhtälö muokattiin Langmuirin yhtälöstä. Alkuperäiseen Langmuirin yhtälöön lisättiin vakio c, joka kuvaa arvoa, jota siirtokerroin asymptoottisesti lähestyy suurilla maaperäpitoisuuksilla.

Taulukko 1. Kobolttin, lyijyn, molybdeenin, nikkelin ja uraanin siirtokerroimet aluskasvillisuuteen (n=69), puihin (n=70), lieroihin (n=11) ja maakiitäjäisiin (n=29). Taulukossa esitetään kerrointen geometrinen keskiarvo ja keskihajonta.

Eliö	Co	Mo	Ni	Pb	U <sup>1</sup>
lehti, aluskasvillisuus	0.04 (2.48)	0.17 (3.66)	0.30 (1.68)	0.01 (2.43)	0.005 (3.18)
juuri, aluskasvillisuus	0.19 (3.04)	0.33 (3.23)	0.63 (1.82)	0.14 (2.18)	0.06 (3.49)
lehti/neulainen, puut	0.05 (2.11)	0.07 (4.49)	0.28 (2.44)	0.01 (2.09)	0.004 (3.77)
hienojuuri, puut	0.64 (2.94)	0.43 (2.88)	0.77 (1.87)	0.54 (2.35)	0.27 (4.27)
liero	0.85 (1.83)	0.49 (2.59)	0.26 (2.11)	0.24 (3.74)	0.52 (4.59)
maakiitäjäinen	0.03 (1.65)	0.69 (3.55)	0.05 (1.49)	0.008 (1.66) <sup>2</sup>	0.005 (1.93)

## Tulokset ja tulosten tarkastelu

- Siirtokerroimet maaperästä juuriin olivat suurempia kuin muihin kasvinosiin (Taulukko 1).
- Siirtokerroimien vaihtelu oli suurta. Lajien välillä ei ollut suurempaa vaihtelua kuin lajien sisällä – eri kasvilajeilla voidaan siis käyttää samaa siirtokerrointa.
- Maaperän fosforipitoisuus oli tärkein siirtokerroimiin vaikuttava ravinne.
- Lierojen ja juurten siirtokerroimet olivat samaa suuruusluokkaa; samoin maakiitäjäisten ja lehtien (Taulukko 1).
- Siirtokerroimet kasvoivat maaperäpitoisuuden pienentyessä systemaattisesti koko aineistossa. Trendi havaittiin sekä kasveille välttämättömillä että ei-välttämättömillä alkuaineilla. Esimerkkinä havaitusta trendistä on esitetty Kuva 1.
- Kun aineistoon sovitettiin epälineaarinen yhtälö, sen sovitustasojen (R<sup>2</sup>) vaihteluväli oli 7.4E-8 – 0.98.
- Kaikissa tapauksissa epälineaarinen sovitus sai lineaarisesta (vakio siirtokerroin) suuremmat R<sup>2</sup>-arvot. Lineaarisen sovituksen R<sup>2</sup>-arvot olivat alle 5.5E-16.
- Vakiosuhteiden käyttö voi olla perusteltua suurilla maaperäpitoisuuksilla, mutta pienillä pitoisuuksilla se voi johtaa kasvipitoisuuden aliarviointiin.
- Osa empiirisesti määritettyjen siirtokerroimien suuresta vaihtelusta voi olla systemaattista vaihtelua maaperän pitoisuuden suhteen.



Kuva 2. Metsäalvejuuri keräyspaikalla

Artikkelit kansainvälisissä sarjoissa:

Roivainen P. ym. 2011. Soil-to-plant transfer of uranium and its distribution between plant parts in four boreal forest species. Boreal Environment Research 16, painossa.

Roivainen P. ym. 2011. Transfer of elements relevant to radioactive waste from soil to five boreal plant species. Chemosphere 83:385-390.

Lähetetyt käsikirjoitukset:

Boman T. ym. Soil-to-plant transfer is not linear: results for five elements and five boreal forest species.

Käsikirjoitukset:

Roivainen P. ym. Element interactions and soil properties affecting the soil-to-plant transfer of cobalt, lead, molybdenum, nickel and uranium in boreal forest

Kokousabstraktit:

Boman T. ym. Testing of linearity assumption of soil-to-plant transfer factors in boreal forest. Third European IRPA Congress 2010, Helsinki, Finland.

Boman T. ym. Testing of linearity assumption of soil-to-plant transfer factors in boreal forest. SEG 2010 International Conference, Galway, Irlanti.

Roivainen P. ym. Soil-to-plant transfer of uranium and its distribution between plant parts in boreal forest. International Conference on Radioecology & Environmental Radioactivity. 2008. Bergen, Norway.

Roivainen P. ym. Concentration ratios for uranium, thorium, nickel, strontium, molybdenum and lead in a Finnish forest ecosystem. SETAC Europe 17th Annual Meeting. 2007. Porto, Portugal.