

# Metsämaan fysikaaliset ja fysikaalis-kemialliset ominaisuudet CT-OMaT kasvupaikkasarjassa

Carl Johan Westman

SUMMARY: SOIL PHYSICAL AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF FINNISH UPLAND FOREST SITES

Westman, C.J. 1990. Metsämaan fysikaaliset ja fysikaalis-kemialliset ominaisuudet CT-OMaT kasvupaikkasarjassa. Summary: Soil physical and physico-chemical properties of Finnish upland forest sites. *Silva Fennica* 24(1):141-158.

Orgaanisen aineksen määrä oli ratkaiseva CT-OMaT kasvupaikkasarjan maaperän tiheydelle, ainestiheydelle ja huokoisuudelle. Orgaaninen aines vaikutti myös voimakkaasti maan efektiiviseen kationinvaihtokapasiteettiin ja happamuuteen. Kasvupaikkojen hyvyyden määräsi ensisijaisesti kivennäismaan C-kerroksen hienoaineksen määrä ( $\phi < 0.06\text{mm}$ ); siitä riippuvaiset ominaisuudet (esim. KVK) korreloivat myös kasvupaikan hyvyyteen. Humuskerroksessa sitä vastoin emäskationien määrä ja emäskyllästysaste olivat voimakkaimmin korreloituneet kasvupaikan hyvyyteen.

In soil profiles from a series of uplands of differing site types bulk density, density of solids and porosity of soil were clearly related to soil organic matter content and its distribution in the soil profile. Soil organic matter contents were also strongly correlated to effective cation exchange capacity (CEC) and soil acidity. Site fertility was primarily related to the fine fraction ( $\phi < 0.06\text{mm}$ ) content in the C horizon and related properties (i.e. CEC). In the humus layer, the content of exchangeable bases and base saturation most strongly related to site fertility.

Keywords: site factors, fertility, podzols, porosity, CEC, pH.  
ODC 114.1 + 114.2 + 113.4

Author's address: University of Helsinki, Department of Silviculture, Unioninkatu 40 B, SF-00170 Helsinki, Finland.

Accepted November 30, 1989

## 1. Johdanto

Kangasmetsiemme maat kuuluvat lähes poikkeuksetta *podsolien* pääryhmään (Aaltonen 1941a, FAO 1979), lehtomaisilla kasvupaikoilla tavataan ruskomaita tai siihen verrattavia maannoksia (Aaltonen 1947). Petersen (1976) on perusteellisesti kuvannut podsolit sekä niiden muodostumiseen johtavia prosesseja. Aaltonen (1935, 1939, 1941b) on tarkastellut podsolimaan kerrallista rakennetta varsinkin maan viljavuuteen nähden.

Podsolimaan profiilin kerrallinen rakenne asettaa tietyt vaatimukset maata tutkittaessa. Humuskerros on organogeeninen maalaji mikä ominaisuuksiltaan täysin poikkeaa alla olevasta kivennäismaasta. Näin ollen maanäytteiden keruussa näytteet on otettava erikseen humuskerroksesta ja kivennäismaasta (ks. Sondheim ja Lavkulich 1982, FitzPatrick 1983, myös Strong ja La Roi 1988).

Käytettäviä analyysimenetelmiä on sovel-

lettava erikseen molempien maalajien edellyttämällä tavalla. Analyysitulosten tulkinnaassa on myös huomioitava maannoksen rakenne. Jokseenkin ohuen humuskerroksen edafinen merkitys voidaan helposti tulkita väärin, mikäli kerroksen erityistä rakennetta ei huomioida. Humusmatriisissa huokosisuus on ylivoimaisesti suurin, ja näin ollen on tunnettava maamatriisin todellinen tiheys maaperätunnusten absoluuttista merkitystä arvioitaessa (esim. Westman ym. 1985).

Podsolimaannoksen valkoma- ja ruoste- maakerrosten rakenteen erot ovat vähäisemmät eivätkä välttämättä edellytä kerroskohtaisia näytteitä tai analyysimenetelmien soveltamista.

Maaperägeologisesti metsämaamme ovat yleensä moreeneja joiden koostumukselle on ominaista hienoaineksen suhteellinen vähäisyys. Täten kivennäismaan hienoaineksen osuus muodostuu ratkaisevaksi kasvupaikkojen hyvydelle (esim. Aaltonen 1935, 1939, 1941b, Urvas ja Erviö 1974). Kivennäismaalajin mekaanisen koostumuksen ohella maan orgaanisen aineksen määrä on selvässä suh-

teessa kasvupaikan hyvyteen; orgaanisen aineksen merkitys korostuu karkearakeisissa kivennäismaissa (esim. Aaltonen 1935).

Tämän tutkimusraportin tavoitteena on esimerkkien avulla tarkastella metsämaamme luonnollisia ominaisuuksia, erityisesti maaperän kerroksellista rakennetta, maan happamuutta sekä efektiivistä kationinvaihtokapasiteettia ja emäskyllästysastetta. Maan pH ja emäskyllästysaste ovat keskeisiä tunnuksia käytettäessä maaperätunnuksia kasvupaikkojen luokitukseen ja eteenkin kun arvioidaan ilmansaasteiden vaikutusta metsiin ja metsämaahan.

Kasvupaikkakontinuumista kerätyn maaperäaineiston avulla tarkastellaan:

1. maatunnusten välisiä suhteita ja tunnusten suhdetta maamatriisin rakenteeseen,
2. maan rakenteen kerroksellisuutta ja kerroksellisuuden ja kasvupaikkojen välistä vaihtelua, sekä
3. maaperän fysikaalisten ja fysikaalis-kemiallisten ominaisuuksien ja kasvupaikan hyvyden välistä riippuvuutta.

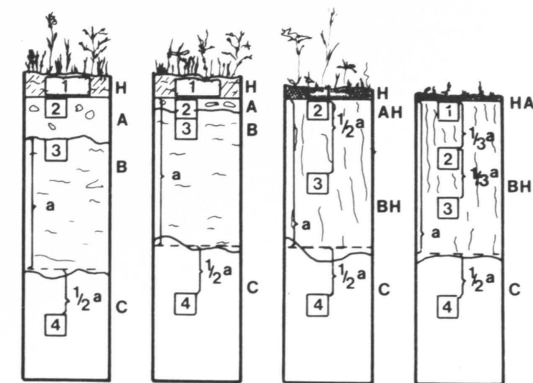
## 2. Aineisto ja menetelmät

Tässä tutkimuksessa käytetään kolmea toisistaan riippumatonta aineistoa. Ensimmäinen (aineisto a) ja toinen (aineisto b) kerättiin kesinä 1987 ja 1988 Helsingin yliopiston Hyttiälän Metsäaseman ympäristössä (61° 48' N, 24° 19' E, n. 150m m.p.y.). Vuonna 1987 tutkittiin 25 ja vuonna 1988 24 kangasmaiden metsikköä, metsiköt ovat osittain samoja. Metsäylioppilaat keräsivät ja analysoivat nämä aineistot metsämaaperäopin kurssin harjoitustyönä. Kaikki metsiköt olivat varttuneita kasvatusmetsiä tai hakkuukypsiä metsiä, eikä missään oltu suoritettu hakkuuta lähimmän kymmen vuoden aikana.

Aineistojen a ja b lisäksi otettiin tarkasteluun mukaan erillinen maanäyteaineisto (aineisto c), joka kerättiin vuonna 1970 erään NP-lannoituskokeen inventoinnin yhteydessä (Westman 1972, 1973). Tämä koekenttä oli perustettu tuoreen kankaan varttuneeseen mänty-kuusimetsään Hummelvikin tilan maille, Perniöön (60° 6' N, 23° 2' E, n. 30m m.p.y.).

Aineistojen a ja b jokaisessa metsikössä otettiin keskimääräiseen paikkaan sijoitetun maakuopan seinämästä neljä tilavuustarkkaa maanäytettä vallitsevan maannoksen mukaan morfologisesta kerroksesta (kuva 1). Maannos oli useimmissa tapauksissa podsolitai maa oli selvästi podsoloitunut. Metsiköiden (aineisto a) humuskerroksen (H), huuhtoutumis- ja rikastumiskerrosten (A ja B) keskimääräiset paksuudet sekä minimi- ja maksimihavaintojen paksuudet on esitetty taulukossa 1.

Kunkin metsikön pintakivisyys (0–30 cm) mitattiin (Viro 1952) ja maan lajitekoostumus määritettiin mekaanisella maa-analyysillä (Elonen 1971) C-kerroksen näytteestä. Lajitejakaumasta laskettiin lajittuneisuusindeksi ( $S_0 = (Q_3 / Q_1)^{1/2}$ ). Tutkittujen metsiköiden maaperä käsittää sekä tuulen lajittamia maalajeja, glasifluviaalisia harjumuodostelmia että kivisiä moreeneja. Maalajit ovat hiekkatai hietavaltaisia. Metsiköiden (aineisto a) maalajitejakaumat on koottu metsätyypeit-



Kuva 1. Tutkimuksessa käytetty maanäytteiden sijoittamiskaavio (ks. FitzPatrik 1984).

Figure 1. The method used for allocating soil samples (after FitzPatrik 1984).

Taulukko 2. Maalajin keskimääräinen lajitejakauma ja lajitteiden vaihteluväli kivennäismaan C-kerroksessa metsätyypeittäin, a-aineisto, %.

Table 2. Soil particle size distribution in C-horizon samples. Mean values and range given by site type, %

Maalajite Fraction <sup>a)</sup>	Metsätyyppi Forest site type				Kaikki All
	CT	VT	MT	OMT	
Hk	35 1–89	48 1–83	26 0–59	34 18–64	33
Ht	61 8–92	30 1–85	43 2–92	30 5–60	40
Hs	2,9 0,5–5,7	4,7 0–15	8,1 0,8–24	8,4 5,1–12	7
S	0,5 0–1,5	2,2 0–7	1,5 0–3,5	3,7 1,4–5	1,8

a) Hk 2·0·2, Ht 0·2·0·02, Hs 0·02·0·002, S < 0·002 mm.

tän taulukkoon 2, ja pintakivisyys-, lajittuneisuusindeksi- sekä karkeafraktiohavainnot taulukkoon 3. Aineistot a ja b eivät poikkea em. ominaisuuksien osalta toisistaan.

Aineisto c koostui lannoituskoeentän 18 koeruudusta. Jokaiselta koeruudulta otettiin 15 pisteessä profiilinäyte (humuskerros ja 0–50 cm:n paksuinen kivennäismaakerros 10

Taulukko 1. Maaperän morfologisten kerrosten keskimääräiset vahvuudet sekä kerrosvahvuuden vaihteluväli, a-aineisto.

Table 1. Thickness of soil morphological horizons for the site series (25 sites), ranging from Calluna to Oxalis-Maianthemum site type. Mean values and ranges given.

Kerros Horizon	$\bar{x}$	Vahvuus, cm Thickness, cm	
		Min.	Max.
H	6,2	2	13
A	9,8	0	55
B	19,9	2	44

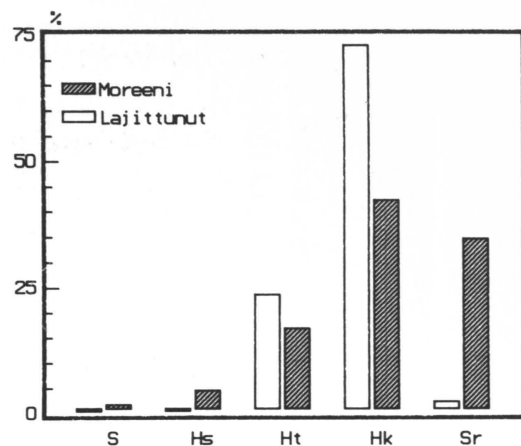
Taulukko 3. Maaperän pintakivisyys (Viro 1952) sekä maalajin lajittuneisuus (Uusinoka 1982) ja sorajaliteen osuus kivennäismaan C-kerroksessa. Metsätyypittaiset keskiarvot ja vaihteluväli, a-aineisto.

Table 3. Surface stoniness (Viro 1952), sorting index (Uusinoka 1982) and per cent of gravel (20–2 mm fraction) of mineral soil C-horizon samples. Means and range given by forest site type.

Tunnus Property	Metsätyyppi Forest site type				Kaikki All
	CT	VT	MT	OMT	
Kivisyys-% Stoniness %	0 ..	15 0–50	18 0–48	15 0–30	14
Lajittuneisuus Sorting index	1,9 1,9–2,0	2,5 1,5–3,9	3,7 1,9–9,5	5,5 2,6–8,4	3,4
Sora-% Gravel %	0 ..	19 0–47	20 0–59	23 0–39	17

cm paksuisina kerroksina), jotka yhdistettiin siten että jokaisesta koeruudusta saatiin 5 erillistä näytesarjaa (yhteensä 90 profiilia). Koekentän maalaji vaihteli lajittuneesta hiekkasta kiviseen hiekkamoreeniin. Mekaaninen maa-analyysi tehtiin siksi kahdesta kutakin maalajia edustavasta profiilista (kuva 2).

Metsiköiden (aineistot a ja b) pintakasvilli-



Kuva 2. Hummelvikin lannoituskoekentän maaperän keskimääräinen mekaaninen koostumus maalajiryhmittäin.

Figure 2. Mean particle size distribution of soil from the Hummelvik fertilization experiment, a Myrtillus site type. Filled bars represent till soil area, and open bars sorted soil area. Particle size classes: <math>< 0.002, 0.002-0.02, 0.02-0.2, 0.2-2.0</math> and <math>2.0-20</math> mm.

suus analysoitiin erikseen. Metsätyyppiin luokituksen tarkentamiseksi sekä metsiköiden keskinäisen hyvyysjärjestyksen muodostamiseksi laskettiin TWINSpan (TW) ja DECORANA (DCA) analyysit (Hill 1979a, 1979b).

TW- ja DCA-analyysit perustuvat iteratiivisiin algoritmeihin. DCA-analyysissä koealat (kasviyhdykunnat) ja yksittäiset kasvilajit järjestetään vuorotellen kunnes kasviyhdykuntien ja kasvilajien keskinäinen järjestys vakiintuu. Koelajien ja kasvilajien järjestys (ja etäisyys) DCA-akselin suuntaisesti noudattaa tällöin materiaalin ensimmäistä ekologista gradienttia. Toistamalla iterointia voidaan kiteyttää toinen ja kolmas (ortogonaalinen) gradientti. TW-analyysissä koealat (kasviyhdykunnat) ja yksittäiset kasvilajit jaetaan alustavan gradientin mukaisesti kahteen ryhmään. Iteroimalla algoritmi täsmentää alustavan jaon ja hakee aineiston parhaan mahdollisen kahtiajakoratkaisun. Muodostuneet ryhmät jaetaan samalla tavalla edelleen pienemmiksi ryhmiksi (Gauch 1982, Jongman ym. 1988).

Kunkin metsikön metsätyyppi (Lehto ja Leikola 1987) on esitetty rinnan sen

DCA1,2-ordinaation kanssa kuvassa 3. Kasvupaikan hyvytyden kannalta mielenkiintoisia kasvilajeja on merkitty kuvaan. Erillistä lannoituskoetta (aineisto c) inventoitaessa pintakasvillisuuskuvausta ei tehty.

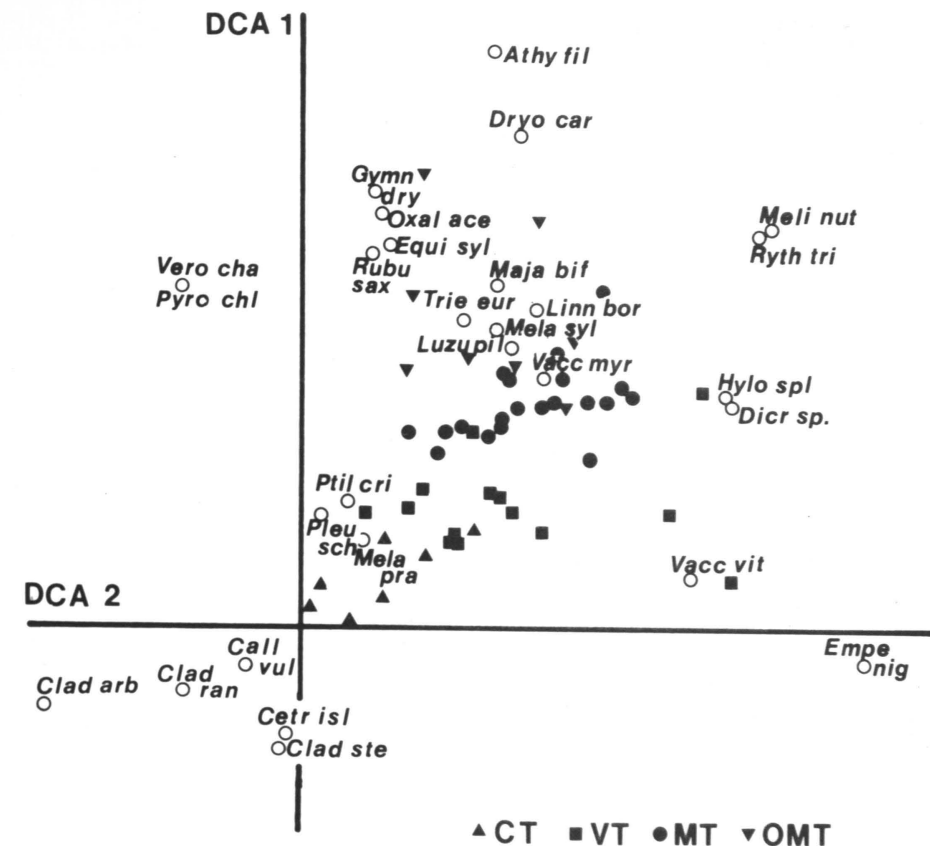
Kesinä 1987 ja 1988 kerätyt maanäytteet kuivatettiin välittömästi näytteenoton jälkeen <math>105^{\circ}</math> C:n lämpötilassa ja homogenisoitiin 2 mm:n seulalla. Seulan läpäissyt ainesfraktio (halkaisijaltaan 2 mm ja hienempi) ja seulan päälle jäänyt karkea aines (sora jne.) punnittiin erikseen; seulan läpäisemään fraktioon sisältyi myös maan orgaaninen aines. Kuivamassasta ja näytteiden luonnollisesta tilavuudesta laskettiin häiriintymättömän maan tiheys. Laboratoriossa määritettiin tiheys myös homogenisoidusta näytteestä tiivistämällä näytettä vakiomenetelmällä ja määrittämällä tiivistetyn näytteen massa. Maan aineistiheys saatiin määrittämällä massaltaan tunnetun maaperän tilavuus pyknometrissä. Luonnollisesta tiheydestä ja homogenisoidusta maa-aineksesta määritetystä aineistiheydestä laskettiin maan kokonaishuokostilavuus (Hillel 1982).

Aineistojen a ja b näytteistä (kaikista näytteistä ei ole täydellisiä analyysisarjoja) määritettiin orgaanisen aineksen määrä hehkuttamalla näyte-erä vakiopainoon <math>550^{\circ}</math> C:n lämpötilassa. Maan happamuus (pH) määritettiin kahdella tavalla, 1:2,5 maa-neste suspensiossa käytettiin nesteenä toisaalta tislattua vettä sekä toisaalta 0,01 M  $\text{CaCl}_2$  liuosta (esim. Rytty 1965). Maan efektiivinen kationinvaihtokapasiteetti määritettiin uuttamalla 4–20 g maata (riippuen näytteen orgaanisen aineksen määrästä) 200 ml:ssa 1 M KCl. Saadusta uutuksesta määritettiin  $\text{Al}^{3+}$  ja  $\text{H}^+$  erikseen kaksoistitrauksella käyttämällä natriumhydroksidia ja suolahappoa (McLean 1965) sekä  $\text{Ca}^{++}$  ja  $\text{Mg}^{++}$  yhteisesti versenaattititrausta käyttäen. Effektiivinen kationinvaihtokapasiteetti saatiin määritettyjen ionien summana ja emäskyllästysaste laskemalla kalsium- ja magnesiumionien prosentuaaliset osuudet koko vaihtokapasiteetista.

Lannoituskokeen profiilinäytteistä (aineisto c) oli määritetty vesi pH (kaikista näytteistä), kalsiumkloridi pH (yhdestä profiilista jokaisella koeruudulla) sekä efektiivinen kationinvaihtokapasiteetti 12 profiilista (6 hiekkamaasta ja 6 moreenimaasta). Käytetyt laboratoriomethodit olivat samat kuin aineistojen a ja b analysoinnissa sillä erolla että

aineiston c näytteet ilmakeivätyttiin ennen näytteiden homogenisointia. Samoista kahdestatoista profiilista, joista määritettiin kationinvaihtokapasiteetti, määritettiin lisäksi ammoniumoksalattiin liukeneva rauta ja alumiini. Analyysissa uutettiin 5 g maata 2 tunnin ajan 100 ml:ssa 0,2 M ammoniumok-

salaattia, liuoksen happamuus oli säädetty pH 3,30:een oksaalihapolla (Tamm 1922, 1934, myös McKeaque 1981). Uutteesta määritettiin rauta ja alumiini kolorimetrisesti sulfosalisyylihappo- ja aluminonimenetelmällä.



Kuva 3. Tutkittujen metsiköiden (a- ja b-aineistot) ja eräiden kasvilajien ordinaatio DCA1- ja DCA2-akselien mukaan.

Figure 3. Sites from the two site type series (Calluna to Oxalis-Myrtillus and Calluna to Oxalis-Maianthemum), and some important indicator species ordinated along DCA axes 1 and 2.

### 3. Tulokset

#### 31. Orgaaninen aines, tiheystunnuksen ja huokoisuus

Yleisesti ottaen orgaanisen aineksen määrä maaperässä on ratkaiseva tekijä maan tiheyden ja aineistiheyden kannalta (taulukko 4).

Koska kivennäisaineksen ja orgaanisen aineksen aineistiheyksien suhde on alhainen (1–3), muodostuu maaperän aineistiheyden ja maan orgaanisen aineksen määrän välinen suhde jokseenkin suoraviivaiseksi. Maan tiheyden ja orgaanisen aineksen määrän väli-

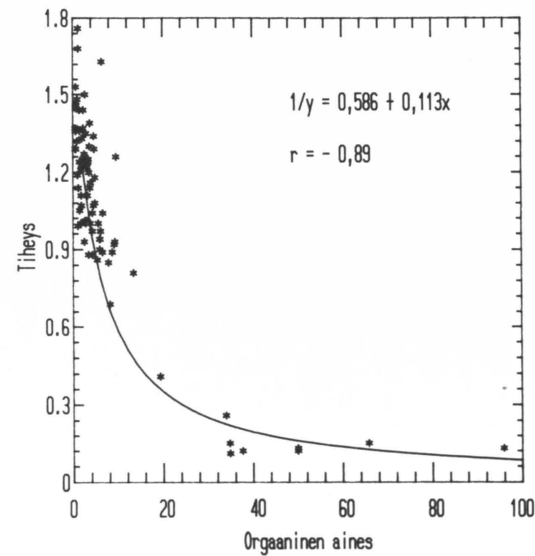
Taulukko 4. Maaperän orgaanisen aineksen määrä (paino-%), ainestihyys ( $g \cdot cm^{-3}$ ), tiheys ( $g \cdot cm^{-3}$ ) sekä kokonais huokostilavuus (vol-%) maanoskerroksittain (keskiarvot ja keskivirheet), b-aineisto.

Table 4. Amount of organic matter (% by weight), density of solids ( $g \cdot cm^{-3}$ ), bulk density ( $g \cdot cm^{-3}$ ) and total porosity (% by volume) of soil given by soil morphological horizon. Mean values and standard errors for the site type series (24 sites) ranging from Calluna to Oxalis-Myrtillus site type are given.

Kerros	Orgaaninen aines	Ainestihyys	Tiheys	Huokostila
Horizon	Organic matter	Density of solids	Bulk density	Porosity
H	68,5 ± 1,82	1,45 ± 0,028	0,15 ± 0,030	90 ± 1,41
A	4,0 ± 1,82	2,47 ± 0,029	1,05 ± 0,031	57 ± 1,45
B	4,7 ± 1,82	2,49 ± 0,028	1,11 ± 0,030	56 ± 1,38
C	1,6 ± 1,82	2,57 ± 0,028	1,34 ± 0,029	48 ± 1,38

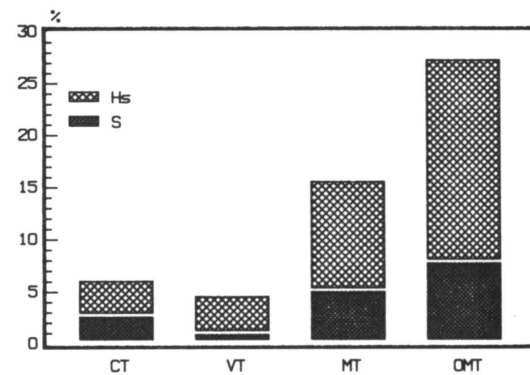
nen riippuvuus on sen sijaan monitahoisempi, kivennäismaan tiheys on moninkertainen verrattuna kangashumuksen (tai äärimmillään maatumattoman turpeen) tiheyteen (taulukko 4). Täten orgaanisen aineksen määrän vaihdella välillä 0–20 % maan tiheys pienenee jyrkästi kun orgaanisen aineksen määrä kasvaa; määrän yhä kasvaessa muutoksen voimakkuus vähenee ja tiheys lähestyy asympotoottisesti turpeen tiheysarvoja. Podsolimaannoksessa humuskerroksen tiheyden vaikuttaa siihen sekoittuneen kivennäisaineksen määrä (kuva 4).

Orgaanisen aineksen määrän vaikutus maan tiheyteen ja ainestihyteen yhdistyy kokonaishuokostilan vaihteluna maaprofiilissa (taulukko 4). Humuskerroksessa, jossa orgaanisen aineksen määrä on suuri, myös kokonaishuokostila on suuri. Syvemmillä maaprofiilissa kokonaishuokostila pienenee orgaanisen aineksen määrän vähenemisen ja maan pakkautumisen myötä. Pohjamaakerroksessa (C-kerros) hienoaineksen osuus kivennäismaan lajitejakaumassa muodostuu yhtä ratkaisevaksi kokonaishuokostilavuudelle (f) kuin orgaanisen aineksen määrä ( $r_{\text{hieno},f} = 0,35$ ,  $r_{\text{org},f} = 0,37$ ). Huuhtoutumiskerroksessa (A-kerros) vain orgaaninen aines korreloi kokonaishuokostilaan ( $r_{\text{org},f} = 0,54$  ja  $r_{\text{hieno},f} = 0,16$ ). Korrelaatioanalyysissä on hienoaineksenä käytetty  $\phi < 0,06$  mm frakti- on yhteismäärää.



Kuva 4. Maan orgaanisen aineksen määrän (paino-%) ja maan luonnollisen tiheyden ( $g \cdot cm^{-3}$ ) välinen regressio. A-aineisto.

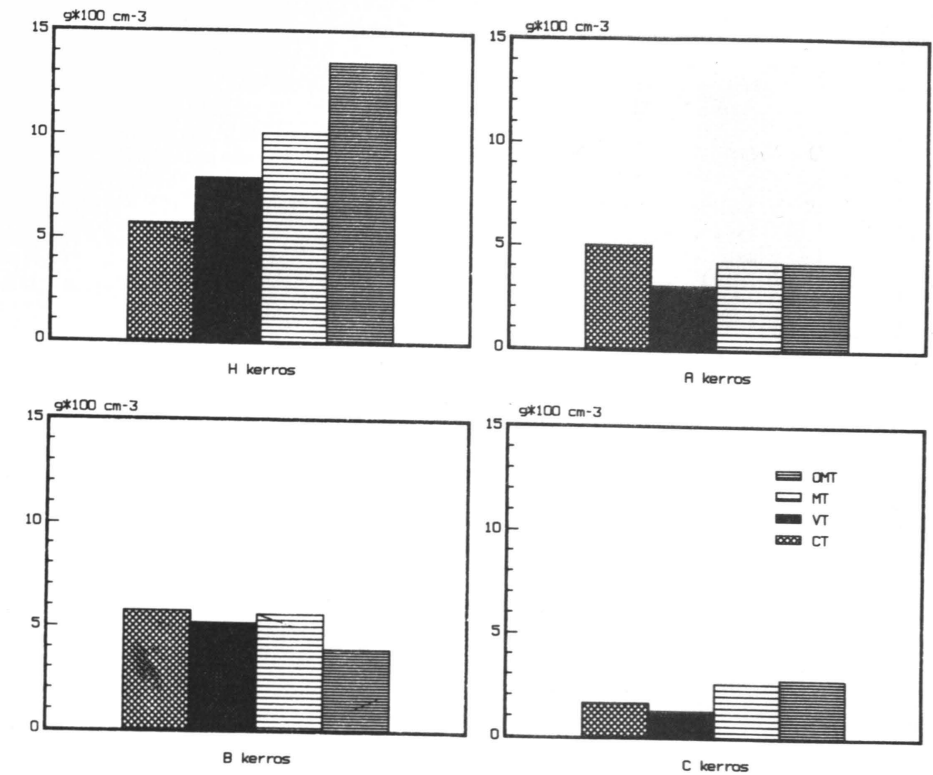
Figure 4. The regression between the content of soil organic matter (% by weight) and bulk density of soil ( $g \cdot cm^{-3}$ ). Data from a site series (25 sites) ranging from Calluna to Oxalis-Maianthemum site types.



Kuva 5. Hienoaineksen (S ja Hs) määrä metsätyypeittäin kivennäismaan C-kerroksessa. B-aineisto.

Figure 5. The amount of fine particles (<0.02 mm) in C-horizon given by forest site type. Mean values for the site type series (24 sites) ranging from Calluna to Oxalis-Myrtillus site types.

Korrelaatioita tutkittaessa on pidettävä mielessä että vähäinen orgaanisen aineksen määrä kivennäismaassa ei primäärisesti määrää maan kokonaishuokostilaa (taulukko 4,



Kuva 6. Maan orgaanisen aineksen määrä ( $g \cdot 100cm^{-3}$ ) metsätyypeittäin ja maanoskerroksittain. A-aineisto.

Figure 6. The content of soil organic matter ( $g \cdot 100cm^{-3}$ ) given by forest site type and soil horizon. Mean values for the site series (25 sites), ranging from Calluna to Oxalis-Maianthemum site types.

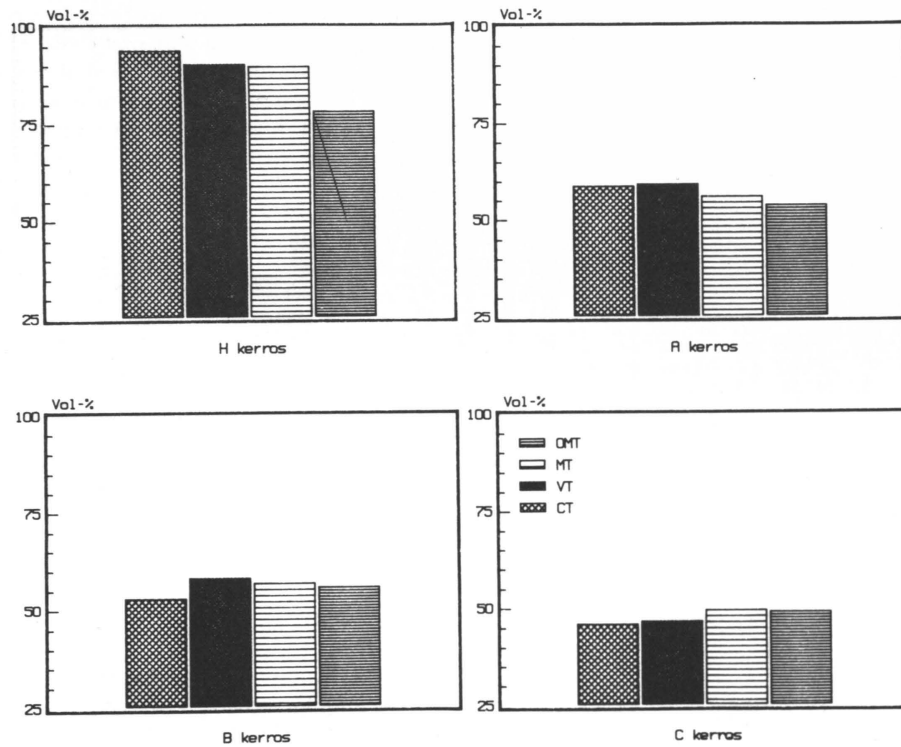
myös kuva 6). Profiilissa kivennäismaan pakkautuminen kasvaa samalla kun orgaanisen aineksen määrä vähenee. Toisaalta maan pakkautumisessa esiintyvät kasvupaikkojen väliset erot ovat vaikuttaneet orgaanisen aineksen kulkeutumiseen maaprofiilissa. Ts. mitä löyhempi maa aluperin on ollut, sitä helpommin erilaiset ainekset ovat voineet liikkua profiilissa.

Pintakasvillisuuden lajikoostumuksen perusteella lasketun DCA-ordinaation ensimmäinen ortogonaalinen akseli on korreloitu humuskerroksen (H-kerros) huokostilavuuteen,  $r_{\text{DCA1,H}} = 0,53$  ja 0,24 a- ja b-aineistoissa. Tämän mukaan H-kerroksen kokonaishuokostila on suurin karuilla ja pienin viljavilla kasvupaikoilla. Kokonaishuokostila on kuitenkin kääntäen korreloitu orgaanisen aineksen maatumisuuteen; samassa tilavuudessa viljavien kasvupaikkojen H-ker-

roksessa on enemmän orgaanista ainesta kuin karujen kasvupaikkojen H-kerroksessa (kuva 6).

Kivennäismaan pohjamaakerroksen (C-kerros) osalta ei ole selvää korrelaatiota boniteetin ja huokostilavuuden välillä; kaiken kaikkiaan on huokostilan vaihtelu kivennäismaassa varsin vähäinen. Aineistossa a korrelaatio boniteetin kanssa on C-kerroksen osalta samansuuntainen kuin H-kerroksessa ( $r_{\text{DCA1,C}} = 0,41$ ) mutta ristiriitainen maan lajitekoostumuksessa samanaikaisesti tapahtuvan muutoksen kanssa (kuva 5). Kivennäismaalajissa kokonaishuokostilan pitää kasvaa hienojen maalajitteiden osuuden kasvaessa. Aineistossa b korrelaatio on olematon.

Samat muutokset kokonaishuokostilassa ja viljavuudessa kuin DCA-analyysi ilmentää, ilmenee myös kokonaishuokostilan metsätyypittäisessä vaihtelussa (kuva 7); huuhtou-



Kuva 7. Maaperän kokonaishuokostilavuus (vol-%) metsätyypeittäin ja maanoskerroksittain. B-aineisto.

Figure 7. The total porosity of soil (% by volume) given by forest site type and soil horizon. Mean values for the site type series (24 sites), ranging from Calluna to Oxalis-Myrtillus site types.

tumiskerroksessa (A-kerros) kokonaishuokostilan vaihtelu on samansuuntainen humuskerroksessa (H-kerros) tapahtuvan vaihtelun kanssa.

### 32. Happamuus, kationinvaihtokapasiteetti ja seskvioksidit

Maan kationinvaihtokapasiteettin ja maan orgaanisen aineksen sekä happamuustunustien ja maan orgaanisen aineksen määrään välillä on kiinteä korrelaatio (taulukko 7). Siitä seuraa että humuskerroksen ja kivennäismaan pintakerroksen kationinvaihtokapasiteetti ja happamuus  $[H^+]$  ovat moninkertaiset verrattuna syvemmän kivennäismaakerroksen happamuuteen (taulukot 5 ja 6). Erot kerrosten välillä korostuvat jos ionikonsentraatiot ilmaistaan suhteessa maan massa.

Syvemmillä maaprofiilissa, missä orgaan-

naisen aineksen määrä on pieni, hienojen maa-lajitteiden merkitys kationinvaihdolle (ja happamuudelle) kasvaa. Yksinkertaiset korrelaatiot (aineisto b) pohjamaan aineksen kationinvaihtokapasiteetin ja hienoaineen ( $\phi < 0.06$  mm) sekä orgaanisen aineksen määrien välillä ovat  $r_{KVK, hieno} = 0,56$  ja  $r_{KVK, org} = 0,78$ . Huuhtoutumiskerroksessa, missä orgaanista ainetta on suhteellisen runsaasti, on hienoaineen merkitys kationinvaihdolle olematon ( $r_{KVK, hieno} = -0,09$  ja  $r_{KVK, org} = 0,45$ ).

Vaihtuvien vetyionien runsaudenvaihtelu ilmenee tietenkin myös pH-luvun vaihtelussa (taulukko 7). Aineistossa c (taulukko 6), jossa tutkittava kivennäismaaprofiili ulottui 60 cm:n syvyyteen, humuskerroksen pH-arvot (vesilietos) vaihtelivat välillä pH 3,4 ja 4,4, kun vastaava vaihteluväli 50–60 cm:n syvyydessä olevassa kivennäismaakerroksessa oli pH 4,7 ja 6,1.

Taulukko 5. Maaperän mediaanihappamuus (vesi-pH) sekä 1M kaliumkloridiin vaihtuvat kationit ja efektiivinen kationinvaihtokapasiteetti ( $meq \cdot 100cm^{-3}$ ) ja emäskyllästysaste (%), keskiarvot ja keskivirheet maanoskerroksittain, a-aineisto.

Table 5. Median pH (water), mean (and standard error of mean) of exchangeable cations and effective CEC from a 1M KCl extraction ( $meq \cdot 100cm^{-3}$ ), and base saturation (%) of soil given by soil morphological horizon from the site type series (25 sites) ranging from Calluna to Oxalis-Maianthemum site types.

Kerros Horizon	pH	H <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup>	KVK CEC	FKA Base sat.
H	3,7	2,37 ± 0,44	0,48 ± 0,62	3,30 ± 0,51	4,93 ± 0,89	39 ± 6,1
A	4,0	1,42 ± 0,36	1,93 ± 0,39	1,18 ± 0,36	4,56 ± 0,53	25 ± 3,6
B	4,7	1,47 ± 0,37	1,71 ± 0,39	1,33 ± 0,36	2,93 ± 0,54	28 ± 3,7
C	5,1	1,17 ± 0,35	0,57 ± 0,40	0,90 ± 0,37	2,01 ± 0,55	43 ± 3,8

Taulukko 6. Maaperän mediaanihappamuus (vesi-pH), 1M kaliumkloridiin vaihtuvat kationit ja efektiivinen kationinvaihtokapasiteetti ( $meq \cdot 100cm^{-3}$ ) sekä emäskyllästysaste (%), keskiarvot ja keskivirheet humuskerroksessa ja 60 cm:n kivennäismaakerroksessa, c-aineisto.

Table 6. Median pH (water), mean (and standard error of mean) of exchangeable cations and effective CEC from a 1M KCl extraction ( $meq \cdot 100cm^{-3}$ ), and base saturation (%) of the humus layer (n=12) and the 60 cm mineral soil layer (n=72) for the Myrtillus site type experiment.

Kerros Horizon	pH	H <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup>	KVK CEC	FKA Base sat.
H	4,2	1,51 ± 0,07	0,79 ± 0,14	6,78 ± 0,32	9,08 ± 0,32	74 ± 5,8
0–10	4,4	0,69 ± 0,07	1,57 ± 0,14	2,16 ± 0,32	4,42 ± 0,32	45 ± 5,8
10–20	4,8	0,46 ± 0,07	1,72 ± 0,14	1,02 ± 0,32	3,21 ± 0,32	30 ± 5,8
20–30	5,2	0,32 ± 0,07	0,95 ± 0,14	0,82 ± 0,32	2,09 ± 0,32	34 ± 5,8
30–40	5,4	0,24 ± 0,07	0,67 ± 0,14	0,59 ± 0,32	1,49 ± 0,32	33 ± 5,8
40–50	5,6	0,21 ± 0,07	0,44 ± 0,14	0,65 ± 0,32	1,30 ± 0,32	39 ± 5,8
50–60	5,6	0,24 ± 0,07	0,34 ± 0,14	0,91 ± 0,32	1,48 ± 0,32	40 ± 5,8

Samanlainen pH:n syvyydenmukainen muutos on havaittavissa myös aineistoissa a ja b, joiden maat kuitenkin keskimäärin ovat happamammat kuin c-aineiston maa (taulukot 5 ja 6). Happamuustasojen erot kuvastuvat myös maan emäskyllästysasteeseen. Kun c-aineiston humuskerroksen emäskyllästysaste on jopa yli 70 % ja kivennäismaassakin 30–45 %, ovat vastaavat arvot aineistoissa a ja b 39 % ja 13–43 %.

Kivennäismaassa pH:n ja kationinvaihtokapasiteetin välillä vallitseva negatiivinen korrelaatio (taulukko 7) on seuraus maan happamuuden (pH), kationinvaihtokapasiteetin ja maan orgaanisen aineksen määrän välillä vallitsevasta multikollinearisuudesta.

Sekä vetyionikonsentraatio että kationinvaihtokapasiteetti vaihtelevat samansuuntaisesti maan orgaanisen aineksen määrän kanssa. Humuskerroksessa pH:n ja kationinvaihtokapasiteetin välinen korrelaatio on positiivinen (taulukko 7).

Aktiivisuuden ja -alumiinin fraktioiden määrät (ammoniumoksalattiutuuksia) vaihtelevat maaprofiilissa podsolimaannokselle tunnusomaisella tavalla (kuva 8). Kiteytymättömiä rautaoksideja on rikastunut profiilin 20–30 cm:n kerrokseen ja alumiinin oksidit jonkin verran syvemmälle 30–40 cm:n kerrokseen.

Kivennäismaassa aktiivialumiinin määrän ja vaihtuvan happamuuden välillä vallitsee

Taulukko 7. Maaperän fysikaaliskemiallisten tunnusten väliset korrelaatiot Spearman järjestyskorrelaatiokertoimina. Tiheys  $g \cdot cm^{-3}$ , pH vesilietoksessa, vaihtuvat kationit ja KVK  $mek \cdot 100g^{-1}$ , aktiivirauta ja -alumiini  $\mu g \cdot g^{-1}$ , c-aineisto.

Table 7. Correlations between soil physico-chemical properties given as Spearman coefficients. Bulk density ( $g \cdot cm^{-3}$ ), pH in water, exchangeable cations and CEC ( $meq \cdot 100g^{-1}$ , ammonium oxalate soluble iron and aluminium ( $\mu g \cdot g^{-1}$ ), the humus layer ( $n=12$ ) and the 60 cm mineral soil layer ( $n=72$ ) samples from the Myrtillus site type experiment.

Tunnus Property	Tiheys Bulk density	pH	H <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup>	KVK CEC	Fe <sub>ox</sub>
H-kerros $r_s$ ( $p < 5\%$ ) $> 0,59$ H-horizon							
pH	0,33						
H <sup>+</sup>	-0,33	-0,38					
Al <sup>3+</sup>	-0,79	-0,20	0,26				
Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup>	-0,89	0,39	0,08	0,55			
KVK CEC	-0,92	0,31	..	..			
Fe <sub>ox</sub>	-0,91	0,32	-0,02	0,68	0,80	0,87	
Al <sub>ox</sub>	0,69	0,19	-0,10	0,38	-0,63	0,68	0,85
C-kerros $r_s$ ( $p < 5\%$ ) $> 0,28$ C-horizon							
pH	0,38						
H <sup>+</sup>	-0,46	-0,71					
Al <sup>3+</sup>	-0,65	-0,76	0,59				
Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup>	-0,53	-0,17	0,31	0,47			
KVK CEC	-0,69	-0,47	..	..			
Fe <sub>ox</sub>	-0,40	-0,15	-0,05	0,21	0,20	0,18	
Al <sub>ox</sub>	-0,31	0,10	-0,34	-0,05	0,01	0,06	0,80

negatiivinen korrelaatio, mikä johtuu alumiinin kulkeutumisen pH-riippuvaisesta mekanismista. Humuskerroksesta huuhtoutuvat orgaaniset molekyylit muodostavat vesiliukoisia yhdisteitä alumiinin kanssa kivennäismaan pintakerroksessa (A-kerros). Syvemmällä maaprofiilissa sidokset murtuvat pH:n noustessa ja alumiini saostuu oksidina (B-kerros). Prosessiin liittyy myös orgaanisen aineksen kulkeutuminen; kivennäismaassa aktiivialumiinin ja -raudan määrät ovat korreloituneet orgaanisen aineksen määrään (tiheyden käänteisarvo taulukossa 7). Samankaltaista aktiiviraudan riippuvuutta happamuudesta tai pH:sta (taulukko 7) ei kuitenkaan ilmennyt vaikka raudan kulkeutuminen maaprofiilissa tapahtuu samalla tavalla kuin alumiinin kulkeutuminen. Syynä tähän on se

että alumiinia on uuttunut kivennäismaan happamasta pintakerroksesta suhteellisesti enemmän kuin rautaa, ja uuttunut myös syvemmälle kuin rautaa (kuva 8).

Kivennäismaassa aktiivialumiinin ja vaihtuvan alumiinin välillä ei ole korrelaatiota (taulukko 7). Vaihtuvan alumiinin määrä seuraa happamuuden vaihtelua (taulukko 7), määrän ollen vähäisin 50–60 cm:n kerroksessa jossa pH luku samalla on profiilin korkein (taulukko 5). Aktiivialumiinin määrä on sen sijaan suurin rikastumiskerroksessa (kuva 8). Humuskerroksessa, jossa kiteytymättömiä oksideja on vähän (kuva 8) ja vaihtuvan alumiinin määrä on pieni (taulukot 5 ja 6), korrelaatio aktiivialumiinin ja vaihtuvan alumiinin määrien välillä on kuitenkin positiivinen (taulukko 7). Humuskerroksessa aktiivirauta

Taulukko 8. Maaperän fysikaaliskemiallisten tunnusten, orgaanisen aineksen sekä hienoaineen määrän suhde kasvupaikan hyvyyteen (DCA 1 -akselin pisteluku), Spearman järjestyskorrelaatio. Orgaaninen aines  $g \cdot cm^{-3}$ , hieno aines ( $\phi < 0,06mm$ ) paino-%, pH vedessä, vaihtuvat kationit ja KVK  $mek \cdot 100g^{-1}$  ja EKA %, b-aineisto.

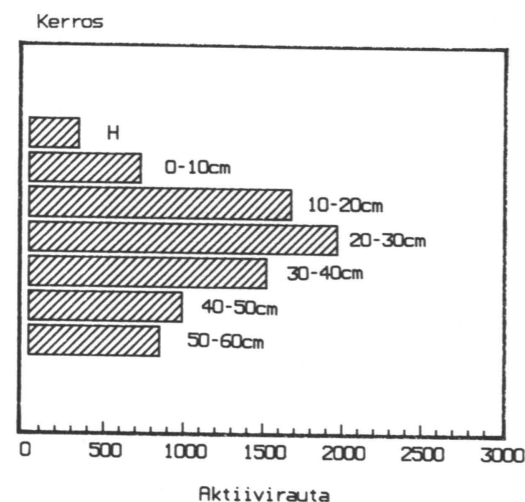
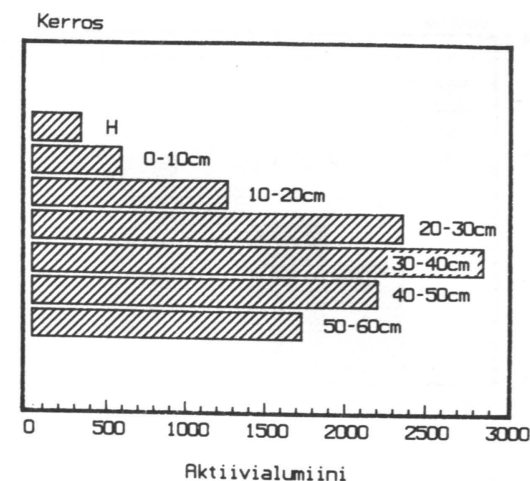
Table 8. Spearman correlation coefficients between soil physico-chemical properties, amount of organic matter and fine fraction and site fertility (DCA axis 1 scores). Organic matter ( $g \cdot cm^{-3}$ ), fine fraction ( $\phi < 0.06mm$  % by weight), pH in water, exchangeable cations and effective CEC ( $meq \cdot 100g^{-1}$ ), base saturation (%). Data from the site series (24 sites) ranging from Calluna to Oxalis-Myrtillus site types.

Tunnus Property	DCA1-akseli DCA1-axis	
	H-kerros H-horizon	C-kerros C-horizon
Orgaaninen aines Organic matter	0,38	0,44
Hienoaines Fine fraction	..	0,67
pH	0,44	0,22
H <sup>+</sup>	0,09	0,62
Al <sup>3+</sup>	-0,05	0,40
Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup>	0,45	0,33
KVK CEC	0,40	0,44
EKA Base saturation	0,38	-0,08
$r_s$ ( $p < 5\%$ ) $> 0,49$		

ja -alumiini ovat kiinteästi korreloituneet aineksen efektiiviseen kationinvaihtokapasiteettiin (taulukko 7).

Maan fysikaalis-kemiallisten tunnusten ja kasvupaikan hyvyyden (DCA akseli, metsätyyppi) välillä on selvä korrelaatio. Humuskerroksessa, emäksisyyttä kuvaava pH, vaihtuvien emästen määrä sekä emäskyllästysaste kasvavat siirryttäessä karusta viljavaan kasvupaikkaan (taulukko 8, kuva 9). Orgaanisen aineksen volumetrinen määrä on myös korreloitunut kasvupaikan hyvyyteen.

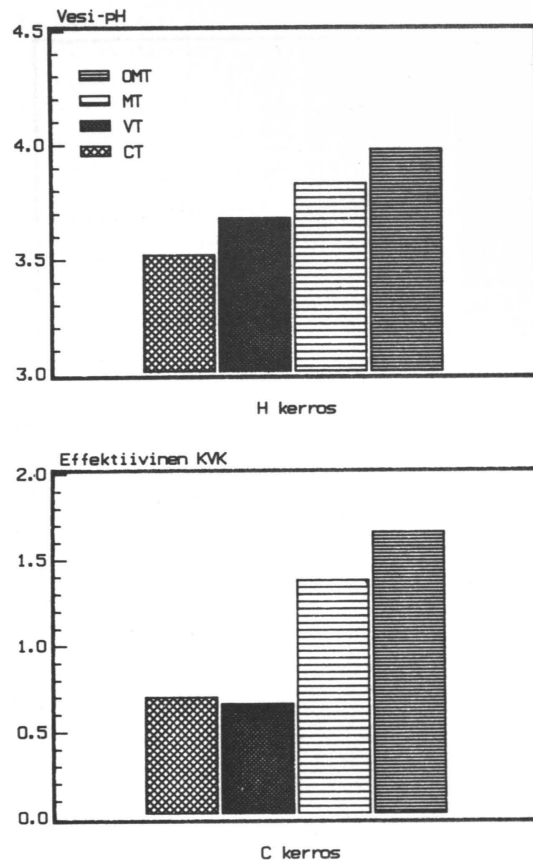
Kivennäismaan C-kerroksessa on em. tunnuksista vain vaihtuvien emäskationien määrän ja pintakasvillisuuden lajikoostumuksen (kasvupaikan hyväystunus, boniteetti) välil-



Kuva 8. Aktiivialumiinin ja -raudan jakautuminen humuskerroksessa ja 60 cm syvässä kivennäismaaprofiilissa. Alumiini ja rauta  $\mu g \cdot cm^{-3}$ , C-aineisto.

Figure 8. The distribution of oxalate soluble aluminium and iron ( $\mu g \cdot cm^{-3}$ ) in the humus layer and the 60 cm deep mineral soil layer. Mean values from 12 soil profiles from the Myrtillus site type experiment.

lä korrelaatio. Sen sijaan hienoaineen määrä ja siitä riippuvat ominaisuudet kuten maan kationinvaihtokapasiteetti ja vaihtuvien happojen määrä, ovat selvästi ja positiivisesti korreloituneet (taulukko 8, kuva 5 ja 9) kasvupaikan hyvyyteen. Vaihtuvien vetyionien määrän ja kasvupaikan hyvyyden samankainen kasvu johtuu multikollinearisuudesta maan hienoaineen kanssa.

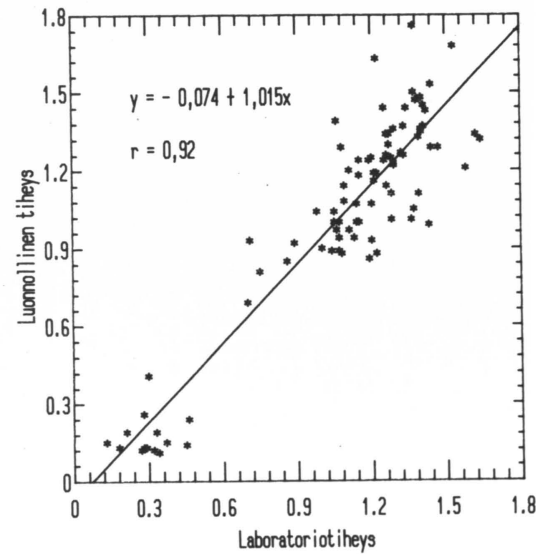


Kuva 9. Humuskerroksen keskimääräinen pH (vesilietos) ja kivennäismaan C-kerroksen efektiivinen kationinvaihto kapasiteetti ( $\text{mek} \cdot 100\text{g}^{-1}$ ) metsätyypeittäin. B-aineisto.

Figure 9. The pH (water) of the humus layer and the effective cation exchange capacity of the mineral soil C-horizon ( $\text{meq} \cdot 100\text{g}^{-1}$ ). Mean values for the site type series (24 sites), ranging from Calluna to Oxalis-Myrtillus site types.

### 33. Maan tiheyden ja happamuuden mittaaminen

Maan todellinen tiheys (aineisto a) selitettiin homogenisoiduista näytteistä määrittelyllä tiheydellä. Johtuen maan orgaanisen aineksen määrän epätasaisesta jakaumasta podsolimaannoksessa, tiheyshavainnot jakautuvat kahteen ryhmään. Kivennäismaanäytteet muodostavat oman ryhmänsä ja humuskerrosnäytteet erillisen, paljon pienemmän havaintoryhmän. Kivennäismaanäyteryhmässä

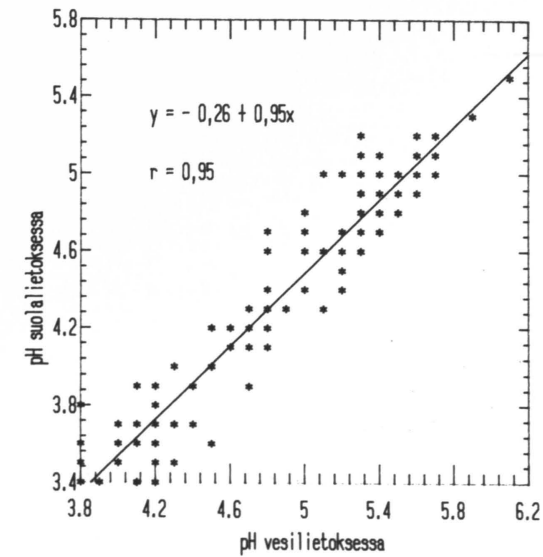


Kuva 10. Maan laboratoriotiheyden ja luonnollisen tiheyden ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) välinen regressio. A-aineisto.  
Figure 10. The regression between the laboratory bulk density ( $<2 \text{ mm}$ , dry) and undisturbed soil sample density ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Data from a site series (25 sites), ranging from Calluna to Oxalis-Maianthemum site types.

(orgaanista ainesta  $<20\%$ ) muuttujien välinen regressio on looginen ( $r = 0,67$ ), ja koska humusnäytehavainnot sattuvat tämän regressiosuoran jatkeelle, muodostuu korrelaatio koko aineistossa hyvinkin kiinteäksi (kuva 10). Toisaalta humusnäyteryhmässä (orgaanista ainetta yli  $20\%$ ) maan todellinen tiheys ei ole laskettavissa homogenisoidusta näytteestä määritetystä tiheydestä, siksi muuttujat eivät ole lainkaan korreloituneet keskenään.

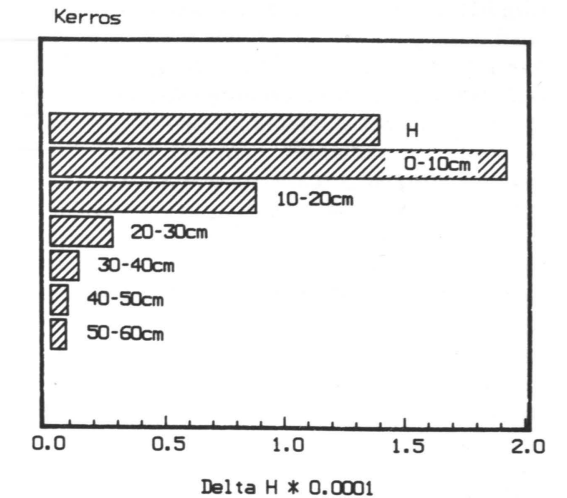
Maan pH mitattiin rinnakkain sekä vesietä kalsiumkloridilietoksista (pH<sub>v</sub>, pH<sub>s</sub>). Vesilietoksesta mitatun pH:n arvo on kaikissa kolmessa aineistossa keskimäärin  $0,5-1,0$  pH-yksikköä korkeampi kuin vastaava kalsiumkloridilietoksesta mitattu arvo. Molempien pH-tunnusten välinen regressio on lineaarinen ja varsin kiinteä (kuva 11). Regressio testattiin b-aineistolla. Vesilietoksesta mitattujen pH arvojen avulla estimoidut pH arvot eivät eronneet vastaavista mitatuista arvoista.

Eri tavoin mitattuja pH-arvoja vertailtaessa on kuitenkin muistettava että pH on log-



Kuva 11. Vesilietoksesta ja kalsiumkloridilietoksesta mitattujen pH arvojen välinen regressio. C-aineisto.  
Figure 11. The regression between pH determined in water and in calcium chloride. 119 samples from 18 soil profiles from the Myrtillus site type experiment.

muunnettu arvo. Absoluuttinen, vetyionikonsentraationa laskettu ero pH-tunnusten välillä riippuu näin ollen happamuuden tasosta. Koska happamuus riippuu maan orgaanisen aineksen määrästä ja maan pintakerrokset



Kuva 12. Vesilietoksesta ja suolalietoksesta mitattujen pH arvojen erotus vetyionikonsentraationa humuskerroksessa ja 60 cm:n kivennäismaakerroksessa. C-aineisto.

Figure 12. The difference between pH determined in water and calcium chloride expressed as hydrogen ion concentrations. Mean values from 18 soil profiles from the Myrtillus site type experiment given separately for the humus layer and 60 cm mineral soil layer.

ovat happamampia kuin syvemmällä olevat kerrokset, on happamuustunnusten välinen absoluuttinen ero suurin humuskerroksessa ja kivennäismaan pintakerroksissa (kuva 12).

## 4. Tarkastelu

### 4.1. Maaperän rakenne

Podsolimaannos muodostuu periaatteessa kahdesta erilaisesta maalajista, eloperäisestä humuskerroksesta ja kivennäismaasta. Tutkittujen metsiköiden (aineistot a ja b) maanoksen podsoliluonne on ilmeinen. Humuskerros eroaa sen matriisin rakennetta kuvaavien tunnusten (orgaanisen aineksen määrä, tiheys, ainestiheys ja huokostilavuus) suhteen alla olevasta kivennäismaasta (taulukko 4). Suuri orgaanisen aineksen määrä johtaa maan alhaiseen tiheyteen ja ainestiheyteen

(esim. Segeberg 1956, Heinonen 1957, 1960), mistä seuraa että humuskerroksen kokonaishuokostila (Hillel 1982) on suuri suhteessa kivennäismaan huokostilaan.

Viljavilla kasvupaikoilla ei aina muodostu selvää kangashumuskerrosta, kehittyvä maannos edustaa podsolin ja varsinaisen ruskomaan välimuotoa (esim. Tamm 1921, Aaltonen 1947, kuva 1). Viljavuuden lisääntyessä karike sekoittuu lisääntyvän biologisen aktiiviteetin seurauksena tehokkaammin kivennäismaahan (esim. Müller 1887). Lehtomaisissa metsiköissä kangashumuskerros saattaa

olla heikosti kehittynyt ja painoprosentuaalisesti ilmaistuna sen sisältämän orgaanisen aineksen määrä saattaa olla pienempi kuin muiden metsätyypiryhmien humuskerrosten orgaanisen aineksen määrä. Viljavilla kasvupaikoilla on kuitenkin samassa maavolyymissa enemmän orgaanista ainesta kuin karuilla kasvupaikoilla (kuva 6, myös taulukko 8). Toisaalta kivennäismaakerroksissa viljavimpien kasvupaikkojen orgaanisen aineksen määrä on suuremman biomassatuotannon ja tehokkaamman sekoittumisen seurauksena myös suurempi kuin karumpien kasvupaikkojen maassa (Valmari 1922, Viro 1969). Aineisto a sisältää lehtomaisia kasvupaikkoja (kuva 3), joissa selvää kangashumuskerrosta ei ole. Näillä kasvupaikoilla H-kerros lähestyy rakenneominaisuuksiltaan alla olevaa kivennäismaata.

Podsoliannoksissa, kivennäismaassa orgaanista ainetta rikastuu B-kerrokseen (Petersen 1976). CT- ja MT-metsätyypiryhmissä tämä rikastuminen näkyy melko selvästi (taulukko 4, kuva 6).

Erillisen lannoituskokeen (aineisto c) metsikön maannos edustaa myös hyvin kehittyntä podsolia; em. mainittujen ominaisuuksien syvyysuuntainen vaihtelu profiilissa on samanlainen kuin aineistoissa a ja b (taulukko 5). Myös kiteytymättömien rauta- ja alumiinioksidien jakaumat profiilissa ovat tyypilliset podsolille (Aaltonen 1935, 1939, 1941b, Jauhiainen 1969, Petersen 1976), oksideja on selvästi uuttunut kivennäismaan pintakerroksesta ja vastaavasti rikastunut kivennäismaan 20–40 cm:n kerrokseen (kuva 9). Alumiini on rikastunut jonkin verran syvemmälle kuin rauta.

Seskvioksidien ja orgaanisen aineksen kulkeutumisen ja saostumisen (esim. Petersen 1976, Ritari ja Ojanpää 1984) ja syvempien maakerrosten suuremman pakkautumisen seurauksena (taulukot 5 ja 6) maan tiheys voi muodostus juurten kasvua rajoittavaksi tekijäksi (esim. Vepraskas 1988).

Podsoliannoksen kerrallisesta rakenteesta seuraa, että humuskerroksen kivennäismaasta poikkeavan rakenteen johdosta on mahdotonta verrata näitä kerroksia keskenään tuntematta niiden todellista tiheyttä. Massan suhteen ilmaistu tunnus liioittelee humus- ja kivennäismaakerrosten välisiä eroja yliarvioimalla ko. tunnusta humuskerroksen osalta (myös Westman ym. 1985). Kan-

gashumuskerroksen orgaanisen aineksen suhde kasvupaikan hyvyyteen ilmenee myös selvemmin kun ilmoitetaan orgaanisen aineksen määrää suhteessa maan volyyymiin (esim. kuva 6, taulukko 8).

Humuskerroksen tiheyden likiarvo ei ole luotettavasti estimoitavissa homogenisoidusta näytteestä (luku 33.). Näin ollen on metsämaan ominaisuuksien kuvaamiseksi, toisin kuin viljelysmailla (Kurki ym. 1965), käytettävä tilavuustarkkoja näytteitä. Metsämaan kivennäismaan todellinen tiheys voidaan kuitenkin jokseenkin luotettavasti estimoida homogenisoidusta näytteestä (luku 33.), mutta estimaatin jäännösvarianssi riippuu maalajin lajitekoostumuksesta (Niska 1987).

#### 42. Kationinvaihtokapasiteetti ja happamuus

Orgaanisen aineksen määrä on tärkein metsämaan pH:n ja kationinvaihtokapasiteetin vaihtelua selittävä maan tunnus (taulukko 7). Orgaanisista yhdisteistä dissosioituvat vetyionit vaikuttavat suoraan maan happamuuteen (pH), ja kolloidien pinnoilla vapautuneet negatiiviset varauspaikat lisäävät maan kationinvaihtokapasiteettia. Protonien ( $H^+$ ) dissosioituminen on pH:sta riippuvainen tapahtuma, pH:n noustessa ( $OH^-$  ionien määrä kasvaa) dissosioitumisaste kasvaa (esim. Tan 1982, Schachtschabel ym. 1976).

Vaihtosysteemin rakenteesta (runsaasti orgaanisen aineksen pH-riippuvaisia vaihtopaikkoja) seuraa että kationinvaihtokapasiteetti kasvaisi jos maan pH nostettaisiin; kationinvaihtokapasiteetin ja pH:n välinen riippuvuus on positiivinen (Helling ym. 1964). Tämä edellyttää kuitenkin että verrataan maita joille on ominaista jokseenkin muuttumaton määrä samanlaista orgaanista ainetta. Lannoituskokeen (aineisto c) metsikön humuskerroksessa tämä positiivinen korrelaatio ilmenee selvästi (taulukko 7). Kerrallisrakenteisen podsoliannoksen kivennäismaassa on kationinvaihtokapasiteetin ja pH:n välinen korrelaatio kuitenkin negatiivinen (taulukko 7) johtuen kationinvaihtokapasiteetin, pH:n ja orgaanisen aineksen määrän välisestä multikollineaarisuudesta.

Podsoliannoksen vaihtosysteemin rakenteesta ja luontaisesti alhaisesta pH:sta seuraa että kationinvaihtokapasiteetin mittaa-

minen potentiaalisena arvona (esim. Halonen ym. 1983) johtaa erheellisiin tuloksiin. Kationinvaihtokapasiteettia yliarvioidaan koska korkeassa pH:ssa dissosioituvat vetyionit vapauttavat runsaasti vaihtopaikkoja. Vaihtuvien emästen määrä ionijakaumassa ei muutu ja näin ollen aliarvioidaan maan emäskyllästysastetta (Nömmik 1974, Guadalix ym. 1988). Mittaamalla potentiaalista kationinvaihtokapasiteettia Derome ym. (1985) ovat todenneet, että podsoliannoksen humuskerroksen emäskyllästysaste on n. 20% ja kivennäismaassa huomattavasti sitä pienempi. Tässä tutkimuksessa efektiivisestä vaihtokapasiteetista lasketut emäskyllästysasteet (taulukot 5 ja 6) ovat Deromen ym. (1985) tuloksiin verrattuna ainakin kaksinkertaiset.

Emäskyllästysasteessa on maantieteellistä vaihtelua. Hummelvikin koekentän maaperässä (aineisto c) emäksisyys on melkoisesti korkeampi kuin Hyytiälän ympäristön maaperässä (aineisto a ja b) keskimäärin. Vertailtaessa aineistoja a ja b aineistoon c on otettava huomioon, että aineisto c edustaa vain yhden MT-metsikön maaperää, kun aineistot a ja b kattavat laajemman kasvupaikkajakauman. Hummelvikin koekentän maat ovat kuitenkin nuoremmat kuin Hyytiälän seudun maat (korkeusero); nuorille maille on ominaista korkeampi pH kuin vanhoilla maille (Aaltonen 1937). Lisäksi Hummelvik sijaitsee Lounais-Suomen saaristoalueen reunaan. Tämän alueen moreenit saattavat sisältää kalkkipitoista hienoainesta; moreeni saattaa olla alkuperältään Selkämeren pohjalta olevia sedimenttejä. Hummelvikista n. 10 km luoteeseen sijaitsee Förbyn kalkkikaivos.

Aineistojen happamuuseroihin on myös saattanut vaikuttaa näytteiden esikäsittely. Ilmakuivatetusta näytteestä määritetty pH on selvästi korkeampi kuin pH määritetty 105° C:ssä kuivatetusta näytteestä (van Liep ja McKenzie 1977, Saarinen 1989). Lannoituskokeen (aineisto c) maanäytteet ilma-kuivatettiin ja aineistojen a ja b näytteet kuivatettiin 105° C:ssä.

#### 43. Maaperä ja boniteetti

Maaperätunnusten ja boniteetin (metsätyypin, DCA-ordinointi) välillä vallitsee selvä korrelaatio (kuvat 5, 6, 7 ja 9, taulukko 8).

Humuskerroksen pH, vaihtuvien emästen

määrä ja emäskyllästysaste ovat selvimmin korreloituneet boniteetin mittana käytettyyn DCA1-akselin pistelukuun (taulukko 8, kuva 9). DCA-ordinaatiossa karujen kasvupaikkojen metsiköt saivat alhaisia pistelukuja ja viljavat korkeita.

Emäskationien (erityisesti kalsium) merkitys kasvupaikan viljavuudelle on kiistaton ja tunnettu vanhastaan sekä kangasmailla että soilla (Valmari 1921, Ilvessalo 1923, Aaltonen 1925, Viro 1951, Heikurainen 1953, Vahtera 1955, Urvas ja Erviö 1974, Lipas 1985).

Vaikka humuskerroksen ominaisuudet ilmentävät kasvupaikan viljavuutta, maaperän kivennäismateriaalin mineraloginen koostumus ja maalajitejakauma määräävät kuitenkin ensisijaisesti kasvupaikan primäärin laadun (Tamm 1921, Aarnio 1934, Granlund & Wennerholm 1935, Vuokko 1978). Kivennäismaan maaperätunnuksista C-kerroksen hienojen maalajitteiden yhteismäärä korreloi voimakkaimmin DCA1-akselin pisteluvun kanssa (taulukko 8).

Kivennäismaan hienoaines kuvataan  $\phi < 0,06$  mm fraktion määrällä laskentateknisistä syistä, tunnus on mitattu kaikista b-aineiston kivennäismaakerroksista. Granlund ja Wennerholmin (1935) mukaan vielä kiinteämpää korrelaatiota saataisiin käyttämällä maan savelajitteen määrä (vrt. Lipas 1983).

Maaperän matriisin hienoin lajite koostuu laajasti ottaen savesmineraaleista, eriaiteisesti kiteytyneistä oksideista (esim. ammoniumoksalattiilikoinen rauta ja alumiini, kuva 8) ja orgaanisista molekyyleistä (Tan 1982). Tämä ainesfraktio liittyy rajatta maan kolloidisysteemiin ( $\phi < 0,2 \mu m$ ), mikä säätelee maaperän fysikaalis-kemiallisia prosesseja. Koska valtaosa metsämaistamme koostuu verraten karkearakeisista moreeneista (Aaltonen 1935, 1939, 1941b, Aarnio 1938, Kivinen 1941), pienikin hienoaineksen lisäys lisää kasvupaikan viljavuutta. Pohjamaakerroksen (C-kerros) S- ja Hs-fraktioiden metsätyypittäiset keskimääräiset määrät on esitetty kuvassa 5; keskiarvojen osoittama suuntaus noudattaa selvästi metsätyypin viljavuusvaihtelua (ks. myös taulukko 8).

Hienojen kivennäismaalajitteiden määrän ohella myös C-kerroksen orgaanisen aineksen määrän ja boniteetin välillä on positiivinen korrelaatio (taulukko 8). Hienoaineksen vaihtelun vaikutus kuvastuu C-kerroksen



kationinvaihtokapasiteetin vaihteluun, joka täten myös korreloi positiivisesti boniteettiin (taulukko 8, kuva 9). Vaihtosysteemin ionikoostumus on kuitenkin kivennäismaassa erilainen kuin H-kerroksessa. Humuskerroksessa, vaihtosysteemin kalsium-magnesium ionien määrä on ratkaiseva efektiivisen kationinvaihtokapasiteettiin nähden; C-kerroksessa alumiini- ja vetyionien pitoisuus on vuorostaan ratkaiseva, molemmat ionit vaihtelevat samansuuntaisesti hienojen maalajitteiden ja orgaanisen aineksen määrien kanssa.

Maan hienoaineksen määrän vaihtelu kuvastuu myös huokostilan vaihtelussa. Viljavimpien kasvupaikkojen kivennäismaaperä saattaa olla hieman huokoisempaa kuin karujen (kuva 7), kivennäismaan kokonaishuokostila vaihtelee kuitenkin varsin vähän. Humuskerroksessa huokostilavuuden vaihteluväli on sen sijaan laajempi; aineistossa a on kokonaishuokostilan negatiivinen korrelaatio boniteettiin jokseenkin selvä (kuva 7).

Kokonaishuokostila ei ole sellaisenaan ratkaiseva kasvupaikan viljavuuden kannalta; maan vedenpidätysominaisuudet riippuvat enemmän huokoskokojakaumasta kuin kokonaishuokostilasta (Andersson ja Wiklert 1972, Hillel 1982, Heiskanen 1988). Kivennäismaahan kulkeutunut orgaaninen aines vaikuttaa huokoskokojakaumaan samansuuntaisesti kuin hiesu- ja saveslajitteet. Pienikokoisten kivennäislajitteiden ja orgaanisten kolloidien määrän lisääntyessä kasvaa keskikokoisten ja pienten huokosten osuus kokonaishuokostilasta. Humuskerroksessa (eloperäinen maalaji) orgaanisen aineksen

laatu, erityisesti maatuneisuus, vaikuttaa huokoskokojakaumaan (esim. Päivänen 1973).

Tarkasteltaessa boniteetin ja maaperätunusten välistä suhdetta on otettava huomioon se, että tässä määritetyt tunnuksat kuvaavat maan läpimitaltaan 2 mm:n pienempää ainesosaa. Soraaineksen runsaudenvaihtelu on otettu huomioon ainoastaan maan tiheystunnuksen ja lajitejakauman mittauksessa. Maaperän kivisyyttä ei ole otettu huomioon ollenkaan, sen vaikutus kasvupaikan viljavuuteen on kuitenkin monitahoinen (Viro 1947).

Tutkittujen metsiköiden maaperän geologinen syntyhistoria on vaihteleva. Karujen kasvupaikkojen, CT- ja VT-metsiköiden maaperä on tuulen tai veden lajittama. Esim. CT-ryhmän joidenkin koealojen maan suuri hiedan osuus (> 90%) johtuu siitä että koealat sijaitsivat vanhalla lentohiekka-dyynialueella. Viljavimpien kasvupaikkojen, erityisesti MT-metsiköiden (aineisto a) maaperä on pääosaltaan lajittumatonta moreenia (taulukko 3). Moreenimaille ominainen kivisyys on myös näillä kasvupaikoilla usein runsasta. Kuivahkojen kankaiden runsas pintakivisyys (myös Viro 1947) johtuu vuorostaan siitä että tässä tutkimuksessa VT-metsiköt sijaitsivat kivisillä veden huuhtomilla sorailla (ks. VT-metsiköiden maa-aineksen suuri lajittuneisuus, taulukko 3). Tämän kaltaisilla mailloilla, josta hienoaines on huuhtoutunut, runsas kivisyys alentaa voimakkaasti viljavuutta. Moreenimailloilla, missä maa-aines jo sisältää jonkin verran hienoja lajitteita, kivisyyden vaikutus boniteettiin on selvästi vähäisempi.

## Kirjallisuus

- Aaltonen, V. T. 1925. Über den Aziditätsgrad (pH) des Waldbodens. *Commun. Inst. Quaest. Forest. Finl.* 9. 54 s.
- 1935. Zur Stratigraphie des Podzolprofils besonders vom Standpunkt der Bodenfruchtbarkeit. I. *Commun. Inst. For. Fenn.* 20(6). 150 s.
- 1937. Einige pH Bestimmungen in Waldböden. *Commun. Inst. For. Fenn.* 25(2). 52 s.
- 1939. Zur Stratigraphie des Podzolprofils besonders vom Standpunkt der Bodenfruchtbarkeit. II. *Commun. Inst. For. Fenn.* 27(4). 133 s.
- 1941a. Metsämaamme valtakunnan metsien toisen arvioinnin tulosten valossa. Referat: Die Fin-

nischen Waldböden nach den Erhebungen der zweiten Reichswaldschätzung. *Commun. Inst. For. Fenn.* 29(5). 71 s.

— 1941b. Zur Stratigraphie des Podzolprofils besonders vom Standpunkt der Bodenfruchtbarkeit. III. *Commun. Inst. For. Fenn.* 29(7). 47 s.

— 1947. Studien über die Bodenbildung in Hainwäldern Finnlands mit einigen Beobachtungen über ausländische Braunerden. *Commun. Inst. For. Fenn.* 35(1): 8–92 s.

Aarnio, B. 1934. Über die Einwirkung der Gesteinsarten auf die Pflanzennährstoffe des Naturbodens. *Agrogeol. Julk.* 35. 21 s.

— 1938. Moreenin mekaaninen koostumus Suomessa. Referat: Die mechanische Zusammensetzung der Moräne in Finnland. *Agrogeol. Julk.* 45. 14 s.

Andersson, S. & Wiklert, P. 1972. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XXIII. Om de vattenhållande egenskaperna hos svenska jordarter. *Grundförbättring* 25(2–3):53–143.

Derome, J., Kukkola, M. & Mälkönen, E. 1986. Forest liming on mineral soils. National Swedish Environment Protection Board. Report 3084. 107 s.

Elonen, P. 1971. Particle-size analysis of soil. *Acta Agr. Fenn.* 122. 122 s.

FAO/UNESCO, 1979. Soil map of the world. UNESCO, Paris.

FitzPatrik, E. A. 1983. Soils, their formation, classification and distribution. Longman, London and New York. 353 s.

Gauch, H. 1982. Multivariate analysis in community ecology. Cambridge University Press, New York. 298 s.

Granlund, E. & Wennerholm, S. 1935. Sambandet mellan moräntyper samt bestånds- och skogstyper i Västerbottens Lappmarker. *Sveriges Geol. Unders. Ser. C No.* 384. 65 s.

Guadalix, M. E., Pardo, M. T. & Hernando, V. 1988. Evaluation of cation exchange measurements for variable change soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19(3):271–279.

Halonen, O., Tulkki, H. & Derome, J. 1983. Nutrient analysis methods. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 121. 28 s.

Heikurainen, L. 1953. Die kiefern bewachsenen eutrophen More Nordfinlands. Eine Moortypenstudie aus dem Gebiet des Kivalo-Höhenzuges. *Ann. Bot. Soc. "Vanamo"* 26(2). 189 s.

Heinonen, R. 1957. Suomen maalajien ominaispainosta. Summary: On the specific gravity of Finnish soils. *J. Sci. Agr. Soc. Finl.* 29(1):38–40.

— 1960. Das Volumgewicht als kennzeichen der "normalen" Bodenstruktur. *J. Sci. Agr. Soc. Finl.* 32:81–87.

Heiskanen, J. 1988. Metsämaan vedenpidätyskyvystä ja sen suhteista eräisiin kasvupaikasta mitattuihin tunnuksiin. *Metsänhoitotieteen lisensiaatintyö.* 92 s.

Helling, C. S., Chester, G. & Corey, R. B. 1964. Contribution of organic matter and clay to soil cation-exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:517–520.

Hill, M. O. 1979a. DECORANA. A fortran program for detrended correspondence analysis and reciprocal averaging. Ecology and systematics, Cornell University, Ithaca, New York. 30 s.

— 1979b. TWINSpan. A fortran program for arranging multivariate data in an ordered two way table by classification of individual and attributes. Ecology and systematics, Cornell University, Ithaca, New York. 30 s.

Hillel, D. 1982. Introduction to soil physics. Academic Press, Paris, San Diego, San Francisco, S o Paolo, Sydney, Tokio and Toronto. 364 s.

Ilvessalo, Y. 1923. Ein Beitrag zur Frage der Korrelation zwischen den Eigenschaften des Bodens und dem Zuwachs des Waldbestandes. *Acta For. Fenn.* 25. 31 s.

Jauhiainen, E. 1969. On soil in the boreal coniferous region, Central Finland-Lapland-Northern Poland. *Fennia* 98:1–123.

Jongman, R. H. G., ter Braak, C. J. F. & van Tongeren, O. F. R. 1987. Data analysis in community and landscape ecology. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (PUDOC). Wageningen. 299 s.

Kivinen, E. 1941. Untersuchungen über die Eigenschaften der Moränenböden in den sogenannten Vaaragebietten. *J. Sci. Agr. Soc. Finl.* 13. 22 s.

Kurki, M., Lakanen, E., Mäkitie, O., Sillanpää, M. & Vuorinen, J. 1965. Viljavuusanalyysien tulosten ilmoitustapa ja tulkinta. Summary: Interpretation of soil testing results. *Ann. Agr. Fenn.* 4:145–153.

Lehto, J. & Leikola, M. 1987. Käytännön metsätyypit. Kirjayhtymä, Helsinki. 96 s.

van Lierop, W. M. & MacKenzie, F. A. 1977. Soil pH measurement and its application to organic soils. *Can. J. Soil Sci.* 57:55–64.

Lipas, E. 1983. Effect of fine material on the results for soil textural parameters. *Silva Fenn.* 17(1):71–76.

— 1985. Kasvupaikan puuntuotoskyvyn ja lannoitustarpeen arviointi maan ominaisuuksien avulla. Summary: Assessment of site productivity and fertilizer requirement by means of soil properties. *Folia Forest.* 618. 16 s.

McKeague, J. A. 1978. Manual of soil sampling and methods of analysis. 2. painos. *Can. Soc. Soil Sci.* 212 s.

Müller, P. E. 1887. Studien über die natürlichen Humusformen und deren Einwirkung auf Vegetation und Boden. Verlag von Julius Springer, Berlin. 324 s.

Niska, K. 1986. Kivennäismaan ravinnemäärien ilmoitus-tapa. Summary: Expressing the nutrient concentrations of mineral soils. *Silva Fennica* 20(2):129–138.

Nömmik, H. 1974. Ammonium chloride-imidazole extraction procedure for determining titratable acidity, exchangeable base cations, and exchange capacity in soils. *Soil Sci.* 118:254–262.

Päivänen, J. 1973. Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. *Acta For. Fenn.* 129. 70 s.

Ritari, A. & Ojanpää, V. 1984. Properties and formation of cemented ortstein horizons in Rovaniemi, Northern Finland. *Commun. Inst. For. Fenn.* 124. 32 s.

Ryti, R. 1965. On the determination of soil pH. *J. Sci. Agr. Soc. Finl.* 37:51–60.

Saarinen, J. 1989. Effect of drying temperature on the extractable macro- and micronutrients and pH of different peat types. *Suo* 40(4):149–153.

Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.-P. & Hartge, K. H. 1976. Lehrbuch der Bodenkunde. 9. painos. Ferd. Enke Verl. Stuttgart. 394s.

Segeberg, H. 1955. Zur Kenntnis der spezifischen Gewichte von Niedermoorerden. *Z. Pflanzenern. Düng. u. Bodenk.* 71:133–141.

Sondheim, M. W. & Lavkulich, L. M. 1982. Comparison of podzolic horizons using chemical properties and multivariate density equation. *Can. J. Soil Sci.* 62:91–96.

Strong, W. L. & La Roi, G. H. 1988. Use of soil horizon as ecological sampling units. *Can. J. Soil Sci.* 68:151–155.

- Tamm, O. 1921. Om berggrundens inverkan på skogsmarken. Medd. Statens Skogsförsöksanst. 18(3):105–164.
- 1922. Om bestämning av de oorganiska komponenterna i markens gelkomplex. En metod för studiet av brunjorden och dess degeneration. Medd. Statens Skogsförsöksanst. 19:387–404.
- 1934. Über die Oxalatmethode in der Chemischen Bodenanalyse. Medd. Statens Skogsförsöksanst. 27. 20 s.
- Tan, K. H. 1982. Principles of soil chemistry. Marcel Dekker Inc. New York and Basel. 267 s.
- Urvas, L. & Erviö, R. 1974. Metsätyypin määrittäminen maalajin ja maaperän kemiallisten ominaisuuksien perusteella. Summary: Influence of the soil type and the chemical properties of soil on the determining of the forest type. J. Sci. Agr. Soc. Finl. 46(3):307–319.
- Uusinoka, R. 1982. Yleinen maaperägeologia, 2 osa. Sedimentit ja sedimentaatioprosessit. 2 painos. Helsingin yliopisto, geologian laitos, geologian ja paleontologian osasto. Moniste 6. 272 s.
- Vahtera, E. 1955. Metsänkasvatusta varten ojitettujen soitten ravinnepitoisuuksista. Referat: Über Nährstoffgehalten der für Walderziehung entwässerten Moore. Commun. Inst. For. Fenn. 45(4). 108 s.
- Valmari, J. 1921. Beiträge zur chemischen Bodenanalyse. Acta For. Fenn. 20(4). 67 s.
- Vepraskas, M. J. 1988. Bulk density values diagnostic of restricted root growth in coarse-textured soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:1117–1121.
- Viro, P. J. 1947. Metsämaan raekoostumus ja viljavuus: varsinkin maan kivisyttä silmällä pitäen. Summary: The mechanical composition and fertility of forest soils taking into consideration especially the stoniness of the soil. Commun. Inst. For. Fenn. 35(2). 115 s.
- 1951. Nutrient status and fertility of forest soil. I. Pine stands. Commun. Inst. For. Fenn. 39(4). 54 s.
- 1952. Kivisyden määrittämisestä. Summary: On the determination of stoniness. Commun. Inst. For. Fenn. 40(3). 23 s.
- 1969. Prescribed burning in forestry. Commun. Inst. For. Fenn. 67(7). 49 s.
- Vuokko, S. 1978. Lapin ultraemäksisten alueiden kasvillisuus. Luonnon tutkija 82:131–134.
- Westman, C. J. 1972. Kväve- och fosforgödsling i ett fastmarksbestånd. Helsingfors universitet, inst. lantbrukskemi och -fysik, Progradur arbete. 110 s.
- 1973. Urealannoituksen vaikutus metsämaan kasveille käyttökelpoiseen typpimäärään. Summary: Effect of urea application on plant available nitrogen in forest soils. Silva Fenn. 8(2):128–134.
- , Starr, M. R. & Laine, J. 1985. A comparison of gravimetric and volumetric soil properties in peatland and upland sites. Silva Fennica 19(1):73–80.

Total of 64 references

## Summary

### *Soil physical and physico-chemical properties of Finnish upland forest sites*

Volumetric samples from soil profiles from 49 upland sites were collected. The sites represented a site fertility continuum ranging from Calluna to Oxalis-Maianthemum site type. For a more exact description of site fertility, surface vegetation corresponding to the sampling points was described and analysed using TWINSPAN and DECORANA. Data from an additional 90 profiles from a separate experiment (Myrtillus site type) were also used.

To describe the soil matrix, particle size distribution, bulk density, density of solids and loss on ignition were determined. The following physico-chemical properties were also measured: pH (water and salt suspensions), effective cation exchange capacity ( $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$  in 1M KCl extract) and acid ammonium oxalate soluble aluminium and iron.

Bulk density, density of solids and porosity of soil were clearly related to soil organic matter content and its distribution in the soil profile. Soil organic matter content was also strongly correlated to effective cation exchange

capacity (CEC) and soil acidity. In the humus layer, where the soil pH was the lowest, the CEC and also the content of exchangeable bases were the highest in the profile. The distinct organic matter distribution in the podsolic profiles gave rise to a negative correlation between pH and CEC in the mineral soil layer. In the more homogenous humus layer there was a positive correlation between pH and CEC.

The relation between soil properties and site fertility was evaluated. For podsolic profiles, the content of the fine particle fraction ( $\phi < 0.06\text{mm}$ ) in the C horizon and related properties (e.g. CEC) were positively correlated to site fertility. The organic matter content in the mineral soil also tended to increase with increasing site fertility. However, the relationship with bulk density, density of solids and porosity were irregular.

For the humus layer, the volumetric content of organic matter, the content of exchangeable bases and base saturation were clearly related to site fertility.