

Kasvupaikkatyypin yhteys fosforin esiintymismuotoihin ojitetuilla turvemailla

Soiden ekologian ja suometsätieteen
pro gradu-tutkielma maatalous- ja
metsätieteiden maisterin tutkintoa varten

Helsingin Yliopisto, metsäekologian laitos
tammikuu 2008

Julia Lenkkeri

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous- metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Metsäekologian laitos	
Tekijä — Författare — Author Julia Lenkkeri			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Kasvupaikkatyypin yhteys fosforin esiintymismuotoihin ojitetuilla turvemilla			
Oppiaine — Läroämne — Subject Soiden ekologia ja suometsätiede			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterin tutkielma		Aika — Datum — Month and year Tammikuu 2008	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 60 s. + 14 liitesivua
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Turvemaiden kasvillisuuden on katsottu kuvaavan kasvupaikan ravinteisuutta ja kasvupaikkatyypin perusteella on tehty mm. lannoitus-suosituksia puuston kasvun lisäämiseksi. Turvemaiden kasvupaikkatyypin ja turpeen fosforivarojen välistä yhteyttä on tähän asti mitattu pääasiassa analysoimalla turpeen kokonais- ja helppoliukoinen fosfori. Turpeen helppoliukoisen fosforin suhde kasvupaikkojen ravinteisuusluokituksen sekä puuston tuottavuuteen on kuitenkin osoitettu olevan heikko ja täten helppoliukoinen fosfori ei erityisen hyvin kuvasta kasvupaikan ravinteisuutta. Tarkempaa tietoa fosforin sitoutumisesta on saatu tarkastelemalla fosforin eri esiintymismuotoja (fraktioita) eli raudan, alumiinin ja kalsiumin sitomaa epäorgaanista ja orgaanista fosforia. Koska fosfori on kasvua rajoittava minimitekijä turvemilla, voisi fosforiyhdisteiden tarkempi tunteminen edesauttaa mm. lannoitus-suositusten tekemistä ja huuhtoutumisriskien arviointia turvemilla.</p> <p>Tässä tutkimuksessa selvitettiin onko fosforin sitoutumisessa merkittäviä eroja erilaisten kasvupaikkojen välillä. Turvekangasluokituksessa on epävarmuutta tiettyjen suotyyppien kehittymisestä turvekankaiksi ja siksi näiden suotyyppien fosforivastetta tarkasteltiin lähemmin. Tutkimuksessa esitettiin seuraavat postulaatit:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Sekä soiden ravinteisuusluokkien että turvekangastyypin välillä on eroja fosforin fraktioiden esiintymisessä. 2) Fosfori pidättyy alumiinin ja raudan kanssa puustoltaan tuottavimmilla turvekankailla. 3) Fosfori pidättyy kalsiumin kanssa korkean pH:n omaavilla lettomaisilla kasvupaikoilla. 4) Helppoliukoinen fosfori korreloi negatiivisesti kasvupaikkojen ravinteisuuden kanssa. 5) Orgaanisen fosforin suhteelliset määrät lisääntyvät ravinteisimmille kasvupaikoille. <p>Tutkimusaineisto kerättiin vuosina 1984-1988 Pohjois-Suomen mänty- kuusi- ja koivuvaltaisilta ojitetuilta soilta. Metsäntutkimuslaitoksen nk. SINKA-metsiköistä valittiin 64 eri raintaisuustasoa edustavaa, 15-60 vuotta sitten ojitettua suota tarkasteluun. Turvenäyte fosforifraktioita varten otettiin 5-10 cm syvyyskerroksesta kolmelta koealalta ja näytteet yhdistettiin turveanalyysiä varten. Koealoilta määritettiin lisäksi kasvilajikoostumus sekä puuston tilavuus, koivun ja kuusen osuus puuston tilavuudesta, turpeen paksuus, mättään ja painanteen osuus pinta-alasta sekä kokonaistyyppipitoisuus.</p> <p>Koealat luokiteltiin sekä luonnontilaisten soiden ravinteisuusluokituksella (VMI-luokituksella) että turvekangastyypiluokituksella. Fosforifraktioiden vastetta kasvupaikkoihin, kasvillisuuteen ja ekologisiin tunnuksiin tarkasteltiin NMDS-monimuuttujamenetelmän avulla. Fosforifraktioiden määrien vertailussa käytettiin ei-parametrisiä tilastollisia menetelmiä.</p> <p>Helppoliukoinen fosfori korreloi tutkimuksen postulaatin mukaisesti negatiivisesti kasvupaikkojen ravinteisuuden kanssa. Orgaaniset alumiini- ja rautafosforifraktiot sekä epäorgaaninen rautafosfori korreloivat NMDS-ordinaatiossa puustoltaan tuottoisimpien turvekankaiden eli ruohoisten korpityypin kanssa. Epäorgaaninen alumiinifosfori puolestaan ei lisääntynyt merkittävästi tuottoisille kasvupaikoille päin. Kalsiumfosfori korreloi lettoisten ja rimpisten kasvupaikkojen sekä fosforin puutetta ilmentävän kasvillisuuden, kuten siniheinän (<i>Molinia caerulea</i>) kanssa. Orgaanisesti sidottu fosfori korreloi postulaatin mukaisesti positiivisesti kasvupaikkojen ravinteisuuden kanssa.</p> <p>Tulosten perusteella voidaan olettaa, että erityisesti epäorgaanisella alumiini- ja rautafosforilla sekä orgaanisella rautafosforilla on merkittävä rooli puustoltaan tuottavien kasvupaikkojen ravinteidenotossa.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Fosfori, turvekangas, suokasvillisuus			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Metsäekologian laitos			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Ohjaajina toimivat Mika Nieminen (Metla) ja Maija Salemaa (Metla)			

1 JOHDANTO.....	1
1.1 Soiden ravinne-ekologia.....	1
1.1.1 Luonnontilainen suo	1
1.1.2 Ojituksen vaikutus suon ravinne-ekologiaan	2
1.1.3 Suotyyppien ravinteisuus	2
1.2 Fosfori maaperässä; kemiallinen luonne ja analysointi.....	3
1.2.1 Fosfori maaperässä	3
1.2.2 Fosforin analysointi	5
1.2.3 Turvemaiden fosforimäärät.....	8
1.2.4 Turvemaiden fosforin käyttökelpoisuus	10
1.3 Kasvupaikan tuotoskyvyn yhteys fosforin määriin.....	12
1.3.1 Puuston kasvun riippuvuus kokonais- sekä helppoliukoisesta fosforista	12
1.3.2 Kasvupaikkatyyppien riippuvuus kokonais- sekä helppoliukoisesta fosforista	14
1.4 Tutkimuksen tarkoitus.....	16
2 AINEISTO JA MENETELMÄT.....	18
2.1 Tutkimusalue	18
2.2 Koejärjestelyt	18
2.3 Aineiston keruu.....	19
2.4 Aineiston käsittely.....	20
2.4.1 Turvenäytteiden kemiallinen analysointi.....	20
2.4.2 Kasvillisuus- ja ympäristömuuttuja-aineiston käsittely.....	21
2.4.3 Kasvillisuuden vaihtelu suhteessa ympäristömuuttujiin.....	22
3 TULOKSET	26
3.1 Fosforifraktioiden määrät ja ekologiset vaihtelusuunnat koko aineistossa	26
3.2 Fosforifraktioiden määrät ja ekologiset vaihtelusuunnat ravinteisuustasoluokissa.....	33
3.2.1 Lettoiset ja lehtomaiset suot.....	33
3.2.2 Ruohoiset suot.....	34
3.2.3 Pien- ja suursaraiset suot.....	38
3.3 Fosforifraktioiden ekologiset vaihtelusuunnat turvekangastyypeillä.....	41
3.3.1 Ruohoturvekankaat.....	41
3.3.2 Mustikkaturvekagas II	42
3.3.3 Puolukkaturvekangas I, II ja varputurvekangas.....	43
4 TULOSTEN TARKASTELU	44
4.1 Koejärjestelyiden ja analyysimenetelmien arviointi	44
4.2 NMDS-ordinaation tulokset.....	46
4.3 Fraktioiden yhteys kasvupaikkatyyppeihin	48
4.3.1 Orgaaninen ja epäorgaaninen fosfori.....	48
4.3.2 Helppoliukoinen fosfori.....	49
4.3.3 Rauta- ja alumiinifosfori.....	50
4.3.4 Kalsiumfosfori.....	52
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	54
LÄHDELUETTELO	55

1 JOHDANTO

1.1 Soiden ravinne-ekologia

1.1.1 Luonnontilainen suo

Pohjoisessa ilmastovyöhykkeessä suot toimivat tärkeinä hiilen ja ravinteiden varastoina. Luonnontilaisilla soilla sarat (*Carex sp.*) ja rahkasammaleet (*Sphagnum sp.*) ovat olennaisia turvetta muodostavia lajiryhmiä (Laine ja Minkkinen 1998). Turve muodostuu eri hajoamisvaiheessa olevasta kasvimateriaalista, mikrobeista, niiden hajoamistuotteista ja kasvien juurieritteistä (esim. Laiho ja Alm 2005). Turve koostuu yleensä yli 90-prosenttisesti hiilestä, hapesta ja vedystä, ja turpeen kuivamassasta noin puolet on hiiltä (Naucke ym. 1993). Kivennäisaineiden kokonaismäärä vaihtelee turpeissa 2 %:n (rahkaturve) ja 10 %:n (saraturve) välillä kuiva-aineesta.

Suon kehityksen aikana muuttuvat kasviyhdykunnat määräävät pitkälti kerääntyneen turpeen ominaisuudet. Luonnontilaisen suon kasvillisuus puolestaan määräytyy monesta tekijästä, pääasiassa vedenpinnan tason, suoveden ja turpeen happamuuden sekä kasveille käytettävissä olevien ravinteiden määrän mukaan (Wheeler ja Proctor 2000). Epäsuorasti kasvillisuuden välityksellä turpeen koostumusta määrää suon ekohydrologia, eli suolle tulevien vesien määrä ja laatu. Vesi säätelee suolla vaikuttavan mikrobiyhteisön koostumusta ja kuljettaa suolle ja siltä pois ravinteita ja hajoamistuotteita (Laiho ja Alm 2005).

Suon topografiasta riippuen suolle tulee ravinteita pääasiassa kolmea tietä: laskeuman, valunnan ja pohjavesivaikutuksen kautta (Laine ja Vasander 2005). Minerotrofisille soille tulee ravinteita ympäröivältä valuma-alueelta ja/tai pohjavesivaikutuksena turvekerroksen läpi. Minerotrofiset suot jaetaan ravinteisuudeltaan eutrofisiin, eli runsasravinteisiin, mesotrofisiin eli keskiravinteisiin ja oligotrofisiin eli niukkaravinteisiin. Aapasuot ovat kokonaan minerotrofisia. Keidas- eli kohosuot ovat boreaalisella kasvillisuusvyöhykkeellä syntyneet minerotrofisina, mutta turpeen paksuuskasvun myötä niihin on kasvanut valunta- ja pohjavesivaikutuksen ulottumattomissa oleva nk. ombrotrofinen osa. Ombrotrofisille eli sadeveden ruokkimille soille tulee ravinteita lähes ainoastaan sadeveden ja kuivalaskeuman mukana. Kohosuon laitteet ovat kuitenkin kivennäismailta tulevien vesien vaikutuspiirissä. Laskeuman mukana tulevien ravinteiden määrä on melko vähäinen,

joten kivennäismailta huuhtoutuvat ravinteet muodostavat tärkeän osan suon ravinnevarastosta (Laiho ja Alm 2005).

1.1.2 Ojituksen vaikutus suon ravinne-ekologiaan

Ojituksessa osa ympäröiviltä kivennäismailta tulevasta vedestä johdetaan ojiin ja vedenpinta laskee. Molemmat tekijät johtavat osaltaan pintaturpeen happamoitumiseen; emäskationien syöttö ympäröiviltä mailta vähenee ja turpeen hapellinen hajoaminen johtaa happamien yhdisteiden muodostumiseen (Laine ym. 2006). Happamat olosuhteet puolestaan vaikuttavat ravinteiden sitoutumismuotoon ja -voimakkuuteen. Kun vedenpintaa lasketaan ja hapellinen mikrobihajotus yltää syvemmälle, vapautuu kasvien käyttöön enemmän hiiltä ja ravinteita (mm. Silvola 1988).

Ojituksen jälkeisinä vuosikymmeninä suokasvillisuus kehittyy metsäkasvillisuutta kohti ja puuvartiset kasvit valtaavat alaa (Starr 1982). Vaikka puut kerryttävät suuria määriä ravinteita solukkoonsa, kasvien käytössä oleva ravinnevarasto ei merkittävästi pienene, sillä turve tiivistyy kuivatuksen seurauksena (Westman ja Laiho 2003). Kun hydrologian vaikutus suolla on vähentynyt, ravinnemäärät saavat vahvemman sijan kasvillisuuden kehityksen ohjaajina. Luonnontilaisen suon ravinnevarasto määrää pitkälti sen, millainen kasvupaikka suosta kehittyy kuivatuksen jälkeen. (Laine ja Vanha-Majamaa 1992).

1.1.3 Suotyyppien ravinteisuus

Käytännön tarpeita varten, kuten kasvupaikan viljavuuden arviointiin metsätaloudessa, on erotettu 25 - 35 suotyyppiä, jotka perustuvat A. K. Cajanderin (1913) metsätyyppiteoriaan (Laine ja Vasander 2005). Suot on jaettu kolmeen päätyyppiryhmään, korpiin, rämeisiin ja avosoihin ja avosuot edelleen lettoihin ja nevoihin. Suotyypit voidaan järjestää trofiasarjaan ombrotrofia-eutrofia-gradientilla. Kemiaalliset analyysit ovat osoittaneet, että suotyyppien trofiasarja korreloi positiivisesti pintaturpeen ja suoveden pääkationien (kalsium ja magnesium) sekä typen kanssa (mm. Valmari 1956, Heikurainen 1972, Starr ja Westman 1978).

Pintaturpeen kokonaisfosfori korreloi myös positiivisesti, (Westman 1981) mutta helppoliukoinen fosfori negatiivisesti trofiasarjan kanssa (Starr ja Westman 1978).

Metsäojitetut suot on perinteisesti jaettu kolmeen kuivatusasteeseen ojituksen jälkeisen kasvillisuuden muutoksen ja puuston kasvun elpymisen perusteella: ojikko-, muuttuma- ja turvekangasvaiheeseen. Metsätalouden tarpeisiin on määritelty seitsemän turvekangastyyppeä (Laine ja Vasander 2005), jotka kehittyvät suotyypeistä kuivatussukcession edetessä muuttumavaiheen yli. Pintaturpeen kokonaisravinnemääristä kalsium ja kalium sekä seuraavaksi rauta ja typpi kuvaavat parhaiten turvekangastyypin eroja (Westman ja Laiho 2003). Eräiltä suotyypeiltä kasvillisuuden kehitys ojituksen jälkeen tunnetaan niin huonosti, ettei suotyypin kehittymistä turvekangastyypiksi voida ennustaa (liite 1).

1.2 Fosfori maaperässä; kemiallinen luonne ja analysointi

1.2.1 Fosfori maaperässä

Maahan tulee orgaanisessa muodossa olevaa fosforia karikkeen ja kasvintähteiden mukana. Orgaaniseen aineeseen sidottu fosfori mineralisoituu eli muuttuu epäorgaaniseen muotoon mikrobien toiminnan tuloksena ja voi siten siirtyä kasvien käyttöön. Monien ympäristötekijöiden, mm. maan happamuuden vaikutuksesta mineralisaatio saattaa olla nopeaa tai hidasta.

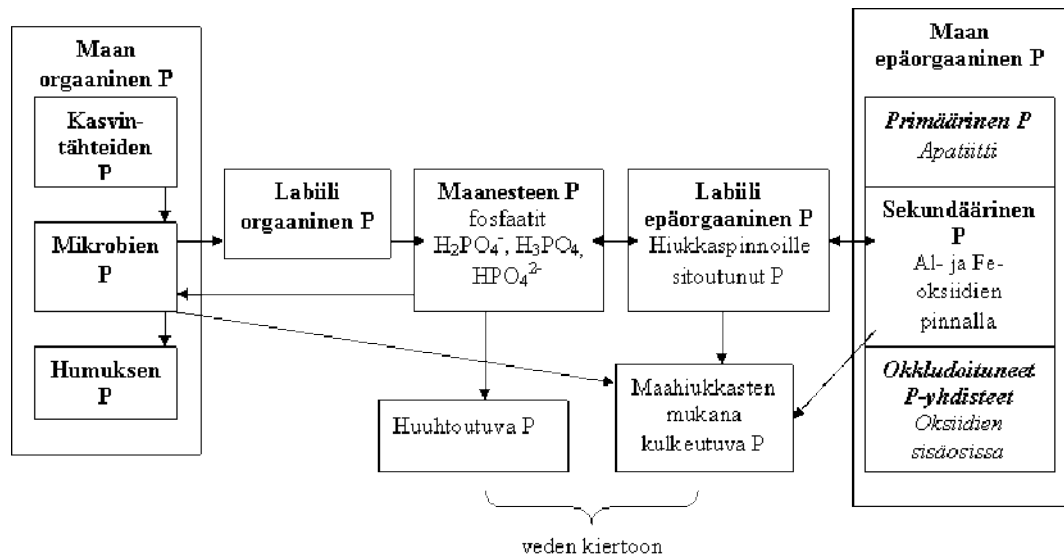
Fosfori esiintyy maassa sekä orgaanisessa että epäorgaanisessa muodossa. Tutkimus on kuitenkin painottunut epäorgaanisen fosforin ja kokonaisfosforin tarkasteluun (mm. Kaila 1955, Hartikainen 1979, Yli-Halla 1990). Epäorgaanisen fosforin on maaperässä tavallisimmin sitoutuneena kalsiumin, alumiinin tai raudan kanssa (Brady 1984). Kasveille käyttökelpoisessa muodossa epäorgaaninen fosfori on ortofosfaattina eli ortofosforihapon (H_3PO_4) anionina. Fosfaatti voi olla maassa kalsiumin kanssa saostuneena tai $CaCO_3$:n pinnalle pidäytyneenä. Kalsiumyhdisteistä apatiitti eli primäärifosfori on vaikealiukoisin. Yksinkertaisemmat yhdisteet, kuten mono- ja dikalsiumfosfaatit ovat kasvien käytettävissä. Niitä on maavedessä kuitenkin vähän, sillä ne muuttuvat nopeasti vaikealiukoisiin muotoihin. Epäorgaaninen fosfori voi esiintyä myös nk. sekundaarifosforina, rapautumisen tuottamien alumiini- ja

rautaoksidien pinnoille pidättyneenä tai sitoutuneena savimineraalien murtopintojen rauta- ja alumiini-ioneihin (kuva 1).

Orgaanista fosforia ja sen käyttökelpoisuutta kasveille on Suomessa tutkittu vähän. Hartikaisen ym. (2006b) mukaan aiheeseen ei ilmeisesti ole uskallettu tarttua analyttisten ongelmien vuoksi. Hartikaisen ym. (2006a) tutkimuksessa orgaanisen fosforin käyttökelpoisuudesta kivennäismailla fosforin kemiallisia analyysimenetelmiä tarkastellaan kriittisesti. Tätä ennen Armi Kailan väitöskirja (Kaila 1948) oli merkittävin aiheesta tehty tutkimus Suomessa. Orgaanisten fosforyyhdisteiden käyttökelpoisuutta kasveille ei ole täysin selvitetty (Richardson ym. 2001). Kuitenkin on todettu, että kasvit pystyvät hyödyntämään orgaanista fosforia kemiallisten mekanismien avulla, mm. erittämällä entsyymejä, sekä mykoritsasienten välityksellä (Jayachandran ym. 1992).

Turvemailla orgaanisen fosforin osuus on merkittävä. Kailan (1956) mukaan keskimäärin 75 % fosforin kokonaisvaroista on orgaanisessa muodossa. Maan orgaaninen fosfori on kasvi- tai mikrobiperäistä. Se esiintyy yleisimmin fytiinihappona ($C_6H_6(OHPO_3)_6$) sekä fytiinihapon synteesi- tai hajotustuotteena. Orgaanisen fosforin koostumusta ei ole vielä täysin selvitetty, vaikka 50-70 % yhdisteistä on jo tunnistettu (Makarov ym. 2004). Lisää tietoa orgaanisen fosforin käyttökelpoisuudesta ja kemiallisista sitoutumismuodoista tarvitaan täten edelleen (Hartikainen ym. 2006b). Ollakseen kasveille käyttökelpoista on fytiinihapon mineralisoiduttava ortofosfaatiksi spesifisen fytaasientsyymin avulla. Fytiinihappo muodostaa niukkaliukoisia komplekseja alkali- ja metallikationien kanssa (turvemailla yleisesti Fe, Al ja Mg) ja pidättyy voimakkaasti alumiinin ja raudan oksidipinnoille. Maan orgaaninen aines ja anionit kilpailevat samoista oksidien pidättymispinnoista, heikentäen P-yhdisteiden pidättymistä. (Brady 1984).

Fosforiin liittyvä ongelma on sen huono käyttökelpoisuus kasveille. Suurin osa fosforireserveistä (niin orgaanisista kuin epäorgaanisistakin) on tiukasti pidättäytynyt maahan ja on siten huonosti kasvien ulottuvilla. Fosforin kemiallista käyttäytymistä ja käyttökelpoisuutta kasveille turvemailla säätelevät useat tekijät, joita käsitellään kappaleessa 1.3.3.



Kuva 1. Fosforin kierto turvemilla. Potentiaalisesti käyttökelpoinen eli labiili fosfori on oksidien pinnoille spesifisesti pidättyneitä fosforia, joka muuttuu helposti kasveille käyttökelpoiseksi. Helposti hajoavaan orgaaniseen karikemateriaaliin varastoitunut fosfori on myös potentiaalisesti käyttökelpoista. Primäärinen- ja okkludoitunut fosfori sekä humusaines ovat stabiileja. Kursiivilla on esitetty turvemilla vain harvoin esiintyvät fosforin muodot (primäärinen- ja okkludoitunut fosfori). Kuvassa ei ole otettu huomioon ihmisen vaikutusta, esim. lannoitusta. Kuva on mukautettu turvemaille kivennäismaiden P-kiertoa käsittelevistä teoksista Brady (1984) ja Ylivainio ym. (2002).

1.2.2 Fosforin analysointi

Fosforianalyysin valinta riippuu siitä, missä muodossa fosfori halutaan määrittää. Mm. Kaila (1955) ja Hartikainen (2006a) ovat arvioineet uuttomenetelmien sopivuutta eri fosforiyhdisteiden määrittämiseen. Taulukkoon 1. on koottu turvemaiden fosforinfraktioiden määrittämiseen käytettyjä menetelmiä. Maan fosforipitoisuutta voidaan tarkastella kahden eri tunnuksen, gravimetrinen fosforipitoisuuden ($mg\ g^{-1}$) ja volumetrinen fosforipitoisuuden ($kg\ ha^{-1}$, esim. 10 cm paksuisessa kerroksessa) avulla. Tutkimustuloksia tarkasteltaessa käytettyyn tunnukseen on kiinnitettävä huomiota erityisesti turvemilla, sillä turpeen tilavuus vaihtelee suuresti mm. kuivatuksen seurauksena. Volumetrinen tunnus kuvaa parhaiten kasvien ravinteidenoton ulottuvilla olevan varaston suuruutta (Laiho ja Alm 2006).

Epäorgaaninen fosfori on yleensä määritetty molybdeeni-sinimenetelmällä (Molybdenum blue-method) (Kaila 1955). Siinä epäorgaanisen fosforin uuttamiseen

käytetään happoja, jotka vaihtelevat tutkimuksittain (taulukko 1). Muodostunut ortofosforihappo reagoi ammoniummolybdaatin kanssa happamassa liuoksessa ja yhdisteet muodostavat keltaisen hapon, joka muuttuu siniseksi sopivan pelkistäjän läsnä ollessa. Hapon sinisen värin katsotaan vahvistuvan fosforipitoisuuden noustessa ja värin intensiteetti mitataan fotoelektrisellä kolorimetrillä. Kokonaisfosfori saadaan polttamalla näyte, jolloin orgaaninen fosfori muuttuu epäorgaaniseen muotoon, ja näin saadaan molybdeeni-sinimenetelmällä mitattua kokonaisfosforin pitoisuus. Myöhemmissä tutkimuksissa molybdeeni-sinimenetelmän sijasta on käytetty IPC-massaspektrometriä.

Orgaanisen fosforin pitoisuus lasketaan vähentämällä kokonaisfosforista erikseen määritellyn epäorgaanisen fosforin osuus. Orgaaninen fosfori voidaan myös määrittää uutto-poltto menetelmällä. Siinä fosforia uutetaan yleensä peräkkäisillä happo- ja emäksäsittelyillä, sillä orgaaninen fosfori liukenee pääosin emäkseen. Happokäsittelyillä pyritään poistamaan metallikationeja, jotka estävät orgaanisen fosforin uuttumisen. (Hartikainen ym. 2006a). Orgaanisen fosforin kokonaismääriä turpeessa ovat kattavasti tarkastelleet ainoastaan Kaila ja Virtanen (1955) sekä Kaila (1956a, b) ja (1958).

Orgaanisten fosforyhdisteiden tunnistamiseen ja niiden biologisen käyttökelpoisuuden arviointiin on viime aikoina yhä enemmän käytetty ³¹P-NMR (Nuclear Magnetic Resonance) -tekniikkaa tai entsyymaattista hydrolyysiä (Hartikainen ym. 2006a). NMR-tekniikan avulla pystytään tutkimaan orgaanisen fosforin kemiallista rakennetta. Hartikainen ym. (2006a) korostavat kuitenkin, että NMR-tekniikalla tunnistetut yhdisteet voivat luonnossa olla tiukasti maahan sitoutuneita eikä testi siksi aina kerro yhdisteiden käyttökelpoisuudesta. NMR- tekniikkaa tai entsyymaattista hydrolyysiä ei ole käytetty turvenäytteiden orgaanisen fosforin määrittämiseen.

Fosforin fraktioita on tutkittu pääasiassa Changin ja Jacksonin (1957) sekä Hedleyn (1982) menetelmällä. Fraktiointimenetelmien periaatteena on, että fosforia uutetaan näytteestä peräkkäisillä liuoksilla, joiden fosforin uuttamiskyky kasvaa uuttovaiheiden edetessä. Changin ja Jacksonin (1957) menetelmässä maan fosfori fraktioidaan helpoliukoiseen, Al-, Fe- sekä Ca-sidottuihin fosforin muotoihin, käyttämällä uuttoliuoksina NH₄Cl, NH₄F, NaOH ja H₂SO₄. Fraktiot voi edelleen erotella orgaanisiin ja epäorgaanisiin yhdisteisiin (esim. Nieminen ja Penttilä 2003). Changin

ja Jacksonin (1957) menetelmää pienin muunnoksin ovat turveanalyseissä käyttänyt Rannikko ja Hartikainen (1980), Yli-Halla ja Lumme (1987) sekä Nieminen ja Penttilä (2003).

Hedleyn ym. (1982) menetelmässä käytettävät uuttoliuokset ovat HCO_3^- , HCO_3^- kloroformikäsittelyn jälkeen, NaOH, NaOH ultraäänihajotuksen jälkeen ja NCl. Uuttojen katsotaan liuottavan järjestyksessä helppoliukoisen fosforin, mikrobibiomassan sitoman fosforin, Fe- ja Al-sidotun fosforin, okkludoituneen eli hiukkasrakenteisiin sidotun fosforin ja Ca-sidotun fosforin. Nämä jakeet ovat hypoteettisesti kasvien käytettävissä edellä mainitussa järjestyksessä. Myös tässä menetelmässä mitataan erikseen orgaaniset ja epäorgaaniset fraktiot. Hedleyn ym. (1982) menetelmää ovat turvemailla käyttäneet pienin muunnoksin Qualls ja Richardson (1995).

Usein kiinnostuksen kohteena on ollut ns. helppoliukoinen fosfori, jonka katsotaan edustavan kasveille käyttökelpoista fosforia. Helppoliukoinen fosfori määritetään tavallisesti näytteestä happouutolla, jolloin uutettua saadaan osa epäorgaanista fosforia. On huomattava, että helppoliukoista fosforia mitataan erilaisilla uutoilla, jotka vain jäljittelevät kasvien erittämien heikkojen orgaanisten happojen liuottavaa vaikutusta. Siksi menetelmä antaa vain viitteellisen kuvan kasveille käyttökelpoisen fosforin määrästä (Kaila 1958). Uuttoliuosten vahvuus ja uuton kesto vaihtelevat tutkimuksittain. Turvetutkimuksissa helppoliukoinen fosfori on tavallisesti mitattu heikolla rikkihapolla (mm. Starr ja Westman 1978) tai ammoniumasetaatilla (mm. Kaunisto ja Paavilainen 1988). Taulukossa 1 on esitetty helppoliukoisien fosforin mittaamiseen käytetyt uuttomenetelmät.

Taulukko 1. Tässä tutkimuksessa viitteinä käytetyt fosforitutkimukset turvemaidella ja niissä käytetyt menetelmät. OP = orgaaninen fosfori, EP = epäorgaaninen fosfori. Viivalla merkityt kohdat indikoivat tiedon puuttumista julkaisusta.

P-fraktio	polttot °C	M	pH	uuttoliuos	kirjallisuusviite
Kokonais P	212	-		HNO ₃ -H ₂ SO ₄ -HClO ₄	Westman ja Laiho (2003), Laiho ja Laine (1994)
	550	0,5		HCl	Westman (1981), Schneider ja Westman (1987)
	550	-		HNO ₃ -H ₂ SO ₄ -NaHSO ₃	Vahtera (1955)
	550	0,1		HCl	Kaila (1959), Silfverberg ym. (2005), Kaunisto ja Paavilainen (1988), Nieminen ja Penttilä (2004), Hotanen (2003), Aro ja Kaunisto (2002), Nieminen ja Pätilä (1990)
	600	0,05		H ₂ SO ₄	Kaila ja Virtanen (1955), Kaila (1956a), (1956b), (1958)
				märkäpoltto + HClO ₄ + H ₂ SO ₄	Kaila ja Virtanen (1955), Kaila (1956a), Kaila (1956b), Kaila (1958)
		-	-	NaSO ₃	Mannerkoski (1973)
	-	-	Autoanalyser	Kellogg ja Bridgham (2003)	
Orgaaninen P				Erotus [kok. P ja keskiarvo (happo-emäsuutto-menetelmä ja poltto-uuttomenetelmä)]	Kaila ja Virtanen (1955), Kaila (1956a), Kaila (1956b), (1958)
Epäorgaaninen P	0,5	-		NaAc	Kaila (1956a), Kaila (1956b), Kaila (1958)
	0,1	-		H ₂ SO ₄	Kaila (1956a), Kaila (1956b)
	0,05	-		H ₂ SO ₄	Kaila (1958)
Helppoliukoinen P	0,2	-		H ₂ SO ₄	Starr ja Westman (1978)
			4,65	NH ₄ OAc	Paarlahti ym. (1971), Valmari (1956), (1970), Mannerkoski (1973), Aro ja Kaunisto (2002), Kaunisto ja Paavilainen (1988)
	0,1	3,75		CH ₃ COONH ₄ + NH ₄ OAc	Holmen (1965)
	0,5	-		NaHCO ₃	Kellogg ja Bridgham (2003)
P-fraktiot (Chang ja Jackson 1956) OP ja EP					
Helppoliukoinen P		1	-	NH ₄ Cl	Nieminen ja Penttilä (2003), Rannikko ja Hartikainen (1980)
Al-P		0,5	8,5	NH ₄ F	"
Fe-P		0,1	-	NaOH	"
Ca-P		0,25	-	H ₂ SO ₄	"
Alenevan käyttökelpoisuuden mukaan (Hedley ym. 1982) OP ja EP					
Vaihtuva epäorg. P		0,5	4,5	HCO ₃	Qualls ja Richardson (1995)
Mikrobi P		0,6	4,5	kloriformikäsittely + HCO ₃	Qualls ja Richardson (1995), Kellogg ja Bridgham (2003)
Fe- ja Al-P		0,1	9 + 3	NaOH	Qualls ja Richardson (1995)
Okkludoitunut Fe- ja Al-P		0,1	-	NaOH äänihajotuksen jälkeen	Qualls ja Richardson (1995)
Ca-P		1	-	HCl	Qualls ja Richardson (1995)

1.2.3 Turvemaiden fosforimäärät

Suomalaisilla turvemaidella fosforipitoisuus on luontaisesti alhainen (Kaila 1956b). Eri tutkimuksissa mitatut fosforivarat ovat luonnontilaisilla ombrotrofisilla soilla olleet 0-20 cm:n kerroksessa 105 - 220 kg ha⁻¹ (Brække ja Finér 1991) ja minerotrofisilla soilla 125 - 310 kg ha⁻¹ (Paavilainen 1980, Finér 1989). Vanhoilla metsäojitusalueilla fosforin kokonaispitoisuus oli 90 - 250 kg ha⁻¹ (Kaunisto ja Paavilainen 1988). Turvemaiden alhaisista fosforimääristä saa käsityksen kun niitä vertaa suomalaisen

viljelymaan ruokamultakerroksen (20 cm) keksimääräiseen fosforipitoisuuteen n. 2 000 kg ha⁻¹ (Saarela 2002).

Starr ja Westman (1978) ovat esittäneet kasveille käyttökelpoisen fosforin osuudeksi 5 - 10 % kokonaisfosforista luonnontilaisilla sararämeillä (RhSR, VSR, LkR). Kailan (1956) tulokset 217:ta erilaiselta luonnontilaiselta suolta (vaihtelevalta syvyydeltä) näyttivät, että 2 - 15 % epäorgaanisesta fosforista oli helppoliukoisessa muodossa. Kokonaisfosforiin suhteutettuna helppoliukoisen fosforin osuus oli tutkimuksessa keskimäärin 3 %. Suurin helppoliukoisen fosforin määrä oli rahkaturpeessa (S-t). Toisaalta Vahteran (1955) tutkimusten mukaan ojitetujen soiden turpeiden kokonaisfosfori on alhaisin rahkaturpeessa. Qualls ja Richardson (1995) mittasivat viljelymailta ravinnelisää saaneen luonnontilaisen ruohoisen ja happamuudeltaan neutraalin suon fosforiyhdisteitä eri etäisyydeltä ravinteiden syöttökohdasta. Vertailualueella helppoliukoisen fosforin osuus (uutettu bikarbonaatilla) 0 - 5 cm:n syvyydeltä oli 4,1 %. Kaunisto ja Paavilainen (1988) mittasivat ruoho- ja sararämeistä (RhSR, VSR, IR) kehittyneitä turvekankaita 0 - 10 cm kerroksesta, joiden ojitusaikakohdasta oli kulunut 70 vuotta. Näillä liukoisen fosforin osuus oli 2 - 3 %. Tutkimuksessa tarkastelluilla korpisoilla (RhK, MK, PK) liukoisen fosforin osuus 0 - 10 cm:n turvekerroksessa oli puolestaan 7 - 10 %, eli korkeampi kuin rämeillä. Mannerkosken (1973) tutkimuksessa n. 40 vuotta vanhoilla ojitetuilla ruohoisilla sarakorvilla ja ruohoisilla sararämeillä liukoisen fosforin osuus oli 0 - 10 cm kerroksessa ainoastaan 1,4 %. Nieminen ja Penttilä (1993) tutkivat 78:aa yli 50 vuotta vanhaa, ravinteisuudeltaan vaihtelevista suotyypeistä kehittyntä muuttumaa ja turvekangasta. Liukoisen epäorgaanisen fosforin osuus 5 - 10 cm:n turvekerroksessa oli keskimäärin 15,8 %. Alkuperäiseltä tyyppiltään lettoisilla soilla liukoisen fosforin osuus kokonaisfosforista oli 10,2 %, ruohoisilla soilla 4,5 %, suursaraisilla soilla 18 % ja lyhytkortisilla soilla jopa 60 %. Lyhytkortisilla soilla oli täten melkein kuusi kertaa suurempi osuus kokonaisfosforista helppoliukoisessa muodossa verrattuna lettoisiin soihin ja yli 12-kertainen vastaava osuus verrattuna ruohoisiin suotyyppeihin. Liukoisen orgaanisen fosforin osuus kokonaisfosforista oli kolmella ensimmäiseksi mainitulla suotyypillä lähes sama, keskimäärin 6,1 %. Lyhytkortisilla soilla osuus oli taas korkeampi, 13,4 %.

Edellä esitetyt tulokset näyttävät huomattavaa vaihtelua liukoisen fosforin osuuksissa. Onkin muistettava, että suotyypit ovat kasvillisuusvaihtelun osalta ja

ravinnetunnuksiltaan varsin laajoja luokkia. Eri olosuhteissa sama määrä ravinteita voikin ylläpitää hyvin erilaista kasvillisuutta, ja käänteisesti saman kasvupaikkatyyppin sisällä ravinteet voivat vaihdella suuresti (Laiho ja Alm 2006). Myös kemiallisissa analyyseissä on tekijöitä, jotka tuovat vaihtelua tuloksiin. Kaila (1958) on korostanut, että erityisesti turvenäytteissä kuivaus muuttaa tuloksia siihen suuntaan, että näyte sitoo enemmän fosforia kuin luonnontilainen märkä näyte. Tästä Kaila pääättelee, että luonnontilassa fosfori voi olla kasveille käyttökelpoisempi, kuin analyysitulosten perusteella on havaittu. Toisaalta Qualls ja Richardson (1995) totesivat tutkimuksessaan, että turvenäytteiden uutto vaihtoehtoisesti hapettomissa tai hapellisissa oloissa ei tuonut vaihtelua tuloksiin. Kuivatuksen lisäksi näytteen jauhaminen vaikuttaa suuremman P-määrän uuttumiseen, koska hiukkasrakenteen sisään sitoutunut fosfori liukenee (mm. Qualls ja Richardson 1995).

1.2.4 Turvemaiden fosforin käyttökelpoisuus

Fosfori ja osin kalium ovat todennäköisimmin kasvua rajoittavia minimiravinteita turvemaillamme (mm. Kaunisto 1997, Sundström ym. 2000). Kuitenkin fosforin kiertoa turvemailla kontrolloivat geokemialliset ja biologiset tekijät ovat heikosti tunnetut (Walbridge ja Navaratnam 2006). Sen myötä myös fosforin käyttökelpoisuus kasveille turvemailla on osittain tuntematon.

Fosforin käyttökelpoisuutta kasveille säätelevät Bradyn (1984) mukaan pääasiassa a) maan pH, b) liukoisten Fe-, Al-, Mg- ja Ca-yhdisteiden ja mineraalien määrä, c) orgaanisen aineen määrä ja hajoamisnopeus ja d) mikrobien toiminta. Fe-, Al-, Mg- ja Ca-mineraaleja on ombrotrofisilla soilla vähän ja minerotrofisilla soilla niitä voi joskus olla hyvinkin paljon. Mikrobien hajotustoimintaa säätelevät, sitä heikentäen, pääasiassa soiden usein alhainen pH ja vähäinen happipitoisuus. Tärkeimmät fosforin käyttökelpoisuutta säätelevä tekijät ovat maan sorptio- ja desorptioreaktiot. Ne säätelevät liuenneen ja sitoutuneen fosforin tasapainotilaa vastustamalla muutoksia maaveden fosforipitoisuudessa. Kun kasvit ottavat fosfaatteja maavedestä tasapaino järkkyy ja labiilia fosforia vapautuu nopeasti sitoutumispaikoilta maaveteen, esim. oksidien pinnoilta.

Fosforia esiintyy kivennäismailla määrällisesti liukoisessa, labiilissa ja stabiilissa muodoissa suhteessa 1:100:5000 eli ylivoimaisesti suurin osa fosforista on

käyttökelvottomassa muodossa (Barber 1984). Turvemaidella kasveille käyttökelpoisen fosforin määrä riippuu pääasiassa orgaanisen fosforin käyttökelpoisuudesta. Hartikainen ym. (2006b) tutkivat Hedleyn ym. (1982) menetelmällä orgaanisten fosforifraktioiden käyttökelpoisuutta kasveille määrittämällä eri fosforifraktioiden molekyylikoon. Pienimolekyylisten ($< 0,2 \mu\text{m}$) aineiden tiedetään olevan helpommin kasvien käytettävissä kuin suurimolekyylisten. Tutkimus keskittyi erilaisiin viljelymaitiin (kivennäismaita). Tulokset näyttivät, että suurin osa, keskimäärin 81 % helpoliukoisesta orgaanisesta fosforista on suurimolekyylistä eli kasveille vaikeasti käyttökelpoista. Koska turvemaidella suurin osa fosforista on orgaanisessa muodossa, voi tulos osittain selittää sen, miksi fosfori on niin vaikeasti käyttökelpoista kasveille.

Turpeen pH säätelee olennaisesti fosforin käyttökelpoisuutta. Turpeen happamuus vaikuttaa niin epäorgaanisen, käyttökelpoisen fosforin kemialliseen esiintymismuotoon kuin fosforin sitoutumiseenkin. pH:ssa 4-6 ortofosfaatti esiintyy pääasiassa yksiarvoisena anionina (H_2PO_4^-), joka on kasveille käyttökelpoinen epäorgaanisen fosforin muoto. pH:n laskiessa osa fosfaatista muuttuu H_3PO_4 -muotoon ja pH:n noustessa fosfaatin kaksiarvoinen anioni HPO_4^{2-} lisääntyy. Suurin osa turvemaiden fosforista on kuitenkin sitoutuneena orgaanisissa yhdisteissä, kuten fytiinihappona. Fytiinihappo sitoutuu maan Al- ja Fe-oksidiin, ja sitoutuminen tehostuu maan pH:n laskiessa. Ca-rikkailla mailla korkea pH lisää fosforin sitoutumista Ca:n kanssa (Brady 1984).

Rannikko ja Hartikainen (1980) tutkivat lannoitefosforin sitoutumista rahkaturpeeseen ja havaitsivat kalkituksen lisäävän orgaanisen fosforin määrää. Tutkiessaan trofialtaan vaihtelevien luonnontilaisten soiden fosforipitoisuuksia myös Kaila (1956b) sai lievästi positiivisen korrelaation orgaanisen fosforin määrän ja pH:n välillä. Nämä tulokset vahvistavat osittain teorian siitä, että korkea pH edistää P:n mikrobiologista sitoutumista (Ghoshal ja Jansson 1975). Turvemaidella pH:n ja maan orgaanisen fosforin yhteys voi Kailan (1956) mukaan johtua myös siitä, että fosforin biologinen sitoutuminen on erityisesti luonnontilaisilla soilla dominoiva fosforin sitoutumisprosessi. Qualls ja Richardson (1995) puolestaan osoittivat orgaanisen fosforin osuuden kokonaisfosforista lisääntyvän ravinteisilla kasvupaikoilla. Ravinnelisäystä saanut osa ruohoista sarasuota pidätti suhteessa neljä kertaa enemmän fosforia orgaanisessa muodossa kuin luonnontilainen osa suota.

Kellog ja Bridham (2003) käyttivät kasvillisuuden sitomaa fosforia käyttökelpoisen fosforin indikaattorina luonnontilaisilla soilla ja huomasivat käyttökelpoisen fosforin määrän olevan yhtä suuri rämeillä kuin letoilla. Tämä tutkimus vahvistaa edellisessä kappaleessa esitettyjä tuloksia (Vahtera 1955 ja Kaila 1965b) siitä, että käyttökelpoisen fosforin määrät voivat rämeillä olla suhteellisen korkeat, vaikka kokonaisfosforin määrät olisivatkin pienempiä kuin muilla suotyypeillä. Myös Niemisen ja Penttilän (2004) tutkimuksista ilmeni, että helppoliukoisen fosforin osuus kokonaisfosforista voi olla huomattavasti suurempi niukkaravinteisilla (lyhytkortisilla) suotyypeillä kuin letoilla ja ruohoisilla suotyypeillä. Nämä varsin kiinnostavat tulokset johtunevat mahdollisesti minerotrofisten soiden korkeammista Al- ja Fe-pitoisuuksista, mistä johtuen fosfori on kemiallisessa analyysissä tiukasti sitoutunut oksideihin (Kaila 1959).

Kaila (1959) ja myöhemmin mm. Cuttle (1983) osoittivat, että fosforin pidättyminen turpeeseen korreloi vahvasti Al- ja Fe-oksidiin kanssa luonnontilaisilla soilla. Nieminen ja Jarva (1996) tutkivat ojitetujen soiden fosforin adsorptiokykyä (suuri osa aloista oli turvekangasvaiheen saavuttaneita). Myös tässä tutkimuksessa havaittiin vahvin korrelaatio turpeen Fe-pitoisuuden ja turpeen adsorptiokyvyn välillä. Rannikko ja Hartikainen (1980) spekuloivat, että rakkasammalturpeissa fosforin pidättyminen Al- ja Fe-oksidiin pinnalle voi vähentyä fulvo-happojen kilpaillessa samoista pidätyspaikoista. Vaikka usein toisin ajatellaan, fosforin sitoutuminen alumiini- tai rautayhdisteisiin ei turvemailla välttämättä tarkoita huonoa fosforin käyttökelpoisuutta. Valmarin (1970) tutkimuksessa ojitetuilla soilla löytyi helppoliukoisen fosforin ja Fe-oksidiin välillä positiivinen korrelaatio. Myös Nieminen ja Penttilä (2004) havaitsivat yhteyden puuston kasvun sekä Fe- ja Al-sidotun fosforin välillä. Erityisesti pohjaveden pinnan vaihtelun myötä fosforia voi liueta rautayhdisteistä paljonkin, koska pelkistävät olosuhteet johtavat rautafosforin vapautumiseen (Brady 1984).

1.3 Kasvupaikan tuotoskyvyn yhteys fosforin määriin

1.3.1 Puuston kasvun riippuvuus kokonais- sekä helppoliukoisesta fosforista

Turvemaiden tutkimuksessa ravinteiden riittävyys ja käyttökelpoisuus puustolle ovat olleet keskeisiä aiheita. Puuston kasvun ennustamista ja lannoitustarpeen arviointia varten on kehitetty indikaattoreita puun tuotoskyvyn arvioimiseksi. Turpeen kokonais-

ja helppoliukoisten ravinteiden voisi olettaa olevan hyviä tuotoksen indikaattoreita. Tutkimus on kuitenkin osoittanut, että läheskään kaikki ravinteet eivät korreloi tuotoksen kanssa (esim. Westman 1981, Kaunisto ja Paavilainen 1988). Puuston tuotosta on mitattu erilaisin suurein: puuston tilavuutena m^3/ha (Mannerkoski 1973, Westman 1981, Nieminen ja Penttilä 2004), tilavuuden kasvuna $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{v}^{-1}$ (Holmen 1965, Nieminen ja Penttilä 2004), puiden keskipituutena (Mannerkoski 1973), puiden pituus kasvuna (Paarlahti ym. 1971, Aro ja Kaunisto 2002) sekä pohjapinta-alana (Holmen 1965, Mannerkoski 1973).

Kokonaisfosforin ja puuston tuotoksen välillä turvemaidella on lukuisissa tutkimuksissa osoitettu olevan positiivinen korrelaatio (mm. Holmen 1964, Valk 1973, Westman 1987, Kaunisto ja Paavilainen 1988). Toisaalta Paarlahti ym. (1971) saivat korkeita kokonaisfosforin pitoisuuksia myös huonosti tuottavilta soilta, mutta hyvin tuottavilla aloilla oli kuitenkin aina korkeammat fosforin pitoisuudet. On huomattava, että tutkimus koski erilaisia avoimia ja oligo-mesotrofisia soita, joilla puiden kasvu tyypillisesti riippuu muista kuin ravinnetekijöistä (Kaunisto ja Paavilainen 1988). Mannerkoski (1973) ei löytänyt riippuvuutta kokonaisfosforin ja mitattujen tuotossuureiden välille (tilavuus, pohjapinta-alan ja keskipituus) ruohoisilla sarakorvilla ja ruohoisilla sararämeillä. Myöskään vanhojen turpeenkorjuualueiden metsittämistä tutkineet Aro ja Kaunisto (2002) eivät saaneet puuston kasvun ja turpeen kokonaisfosforin välille merkitsevää korrelaatiota (2-3 viimeisen vuoden kasvu 7-vuotiailla männyntaimilla, turvetta jäljellä keskimäärin yli 17 cm). Esitetyt tulokset kertovat, että kokonaisfosforin ja puuston kasvun välisestä yhteydestä ei olla yksimielisiä, vaikka enemmistö tutkimuksista osoittaa positiivisen korrelaation todeksi.

Turpeen helppoliukoisen fosforin ja puuston kasvun välinen suhde on kiinnostava, sillä niiden välillä pitäisi olla positiivinen riippuvuus olettaen, että helppoliukoinen fosfori kuvaa kasveille käyttökelpoista fosforia. Mannerkoski (1973) havaitsi kuitenkin selkeästi negatiivisen korrelaation puuston keskipituuden ja 0-10 cm kerroksen liukoisen fosforin välillä (kuutiomäärä ja pohjapinta-ala eivät korreloineet mitenkään liukoisen fosforin kanssa). Selvästi negatiivisen suhteen ovat havainneet myös Holmen (1964) sekä Kaunisto ja Paavilainen (1988). Paarlahti ym. (1973) sekä Nieminen ja Penttilä (2004) saivat tutkimuksissaan lievästi negatiivisen korrelaation. Holmen (1964) on selittänyt liukoisen fosforin ja puuston tuotoksen negatiivista riippuvuutta

mm. sillä, että pintakasvillisuus ja puusto käyttävät lähes kaiken liukoisen fosforin ravinteisilla ja puustoltaan tuottoisilla kasvupaikoilla, jolloin fosforia ei jää merkittävästi turpeeseen.

1.3.2 Kasvupaikkatyyppien riippuvuus kokonais- sekä helppoliukoisesta fosforista

Turvemaiden kasvillisuuden ja ravinnetunnusten välistä yhteyttä on tutkittu melko laajasti. Tutkimuksissa on tarkasteltu suotyyppien ja niistä kehittyvien turvekankaiden mahdollisuutta ilmentää kasvupaikan ravinnetilaa fosforin suhteen, niin puuntuotoskyvyn arviointia varten kuin ekologisten tunnusten tulkitsemista varten (mm. Valk 1973, Starr ja Westman 1978, Schneider ja Westman 1981, Westman ja Laiho 2003, Nieminen ja Jarva 1996).

A. K. Cajanderin (1913) kehittämän floristis-ekologisen luokituksen perusteella erotettaviin suotyyppisiin sisältyy suuri määrä ekologista informaatiota. Suotyypit kuvastavat kasvillisuuden välityksellä paikan ilmasto-oloja, vesi- sekä ravinnetilaa ja ajan funktiona näiden välistä vaikutusta. Sen lisäksi kasvupaikkatyyppit ovat kasvillisuusvaihtelun suhteen melko laajoja luokkia (Laiho ja Alm 2006). Kasvillisuuden muodostumiseen vaikuttavat eniten pH ja vedentaso (Jeglum ja He 1995, Wheeler ja Proctor 2000) ja sen jälkeen muut tekijät, kuten ravinteiden riittävyys sekä puiden varjostus (Wheeler ja Proctor 2000). Ojituksen seurauksena vedenpinnan vaikutus pienenee ja ravinteiden merkitys voimistuu (Laine ym. 1995).

Useimmissa kasvupaikkatyyppien ja turpeen fosforin yhteyttä selvittäneissä tutkimuksissa on mitattu kokonais- tai helppoliukoista fosforia (mm. Westman 1981, Kaunisto ja Paavilainen 1988, Laiho ja Laine 1994). Harvemmat tutkijat ovat analysoineet turvemaiden fosforia tarkemmin sen kemiallisen sitoutumistavan mukaan (mm. Nieminen ja Penttilä 2004, Qualls ja Richardson 1995).

Kokonaisfosfori ja kasvupaikkojen viljavuus ovat useimmissa tutkimuksissa korreloineet positiivisesti keskenään. Jo Vahtera (1955) totesi ojitettujen soiden fosforipitoisuuksien korreloivan melko hyvin kasvupaikan kanssa. Westman (1981) tutki sararämeitä (LhSR, VSR, RhSR,) ja havaitsi kokonaisfosforin (mg g^{-1}) ja kasvupaikkatyyppin välillä selvän riippuvuuden, jossa fosforipitoisuus nousi tasaisesti karummalta kasvillisuustyypiltä ravinteisemmalle. Schneider ja Westman (1987)

analysoivat edellä kuvailtuja soita kahden monimuuttujamenetelmän avulla. Kokonaisfosforipitoisuus korreloi ordinaatiossa merkitsevästi kasvillisuustyyppien trofian kanssa, kun kyseessä oli gravimetrinen fosforipitoisuus, mutta laski merkitsevästi käytettäessä volumetristä pitoisuutta. Kokonaisfosforin ja kasvupaikkatyyppin välillä on havainnut positiivisen korrelaation myös Hotanen (2003), joka tutki ojitettuja korpia ja rämeitä. Monimuuttujamenetelmillä tehtyjen analyysien tuloksena (HMDS) kaikista kokonaisravinteista kasvupaikkatyyppien kanssa voimakkaimmin korreloi fosfori ($r = 0,73$) 10 cm:n kerroksessa. Westman ja Laiho (2003) tarkastelivat ojitettuja soita Etelä- ja Keski-Suomessa. Pelkästään fosforin ja kasvupaikkatyyppin välistä yhteyttä ei tutkimuksessa erikseen mainita, mutta tarkasteltaessa kokonaiskalsiumia, -kaliumia ja -fosforia yhdessä, ravinteiden ja turvekangastyyppien välillä löytyi melkein 60 %:n korrelaatio (Mtkg I ja II sekä vastaavasti Ptkg I ja II oli yhdistetty). Tutkijat totesivat, että ojitettujen soiden luokituksen käytetty floristis-ekologinen luokitus ilmentää hyvin kasvupaikan tuotoskykyä, mutta ei kuitenkaan ravinteiden kokonaismääriä eri lämpösummavyöhykkeillä. Myöskään Kaila (1956) ei löytänyt selkeää positiivista korrelaatiota kokonaisfosforin ja kasvupaikkaluokituksen välillä, kun tarkasteltavina olivat luonnontilaiset suot ($r = 0,007$). Hän ihmettelee tulosta ja otaksuu sen johtuvan turvenäytteiden erittäin vaihtelevasta syvyydestä, sillä syvältä otettu näyte ei enää heijastu pinta-kasvillisuuteen. Nieminen ja Pätilä (1990) havaitsivat karuilla rämeillä (sekä luonnontilaisilla että eri kuivatusasteilla olevilla) positiivisen korrelaation kokonaisravinnepitoisuuksien (mg g^{-1}) ja kasvillisuuden välillä ainoastaan kasvillisuudeltaan rehevimmillä koelohjoilla.

Useimmat helppoliukoisen fosforin ja kasvupaikkojen ravinteisuuden yhteyttä selvittäneissä tutkimuksissa niiden välillä on havaittu negatiivinen korrelaatio (Holmen 1964, Starr ja Westman 1978, Nieminen ja Penttilä 2004). Starr ja Westman (1978) raportoivat VSR:ltä suurempia määriä fosforia kuin RhSR:ltä (7,17 ja 5,82 mg kg^{-1}). LkR jäi fosforimäärältään edellä mainittujen tyyppien väliin. Tutkijat spekuloiivat, että niukempi fosforipitoisuus ravinteisemmalla kasvupaikalla johtuu turpeen korkeammasta humifikaatioasteesta ja suuremmista Fe- ja Al-pitoisuuksista. Holmen (1965) havaitsi myös negatiivisen korrelaation kasvillisuuden ravinteisuusgradientin ja liukoisen fosforin pitoisuuksien välillä eri suotyypeillä Koillis-Ruotsissa. Nieminen ja Penttilä (2004) havaitsivat alkuperäiseltä suotyypiltään lyhytkortisilla soilla 2 - 4

kertaa korkeamman helppoliukoisen fosforin pitoisuuden kuin suursaraisilla, ruohoisilla tai lettoisilla aloilla.

1.4 Tutkimuksen tarkoitus

Turpeen helppoliukoisen fosforin ja puuston tuottavuuden välisen suhteen on osoitettu olevan heikko (mm. Holmen 1964, Mannerkoski 1973, Kaunisto ja Paavilainen 1988). Täten helppoliukoinen fosfori ei erityisen hyvin kuvasta kasvupaikan ravinteisuutta. Nieminen ja Penttilä (2004) käyttivät fosforin fraktiointimenetelmää selvittääkseen tarkemmin fosforin sitoutumisen ja puuston kasvun välistä suhdetta. Tutkimuksessa havaittiin vahva positiivinen korrelaatio puuston kasvun sekä alumiinin sitoman orgaanisen fosforin ja raudan sitoman epäorgaanisen fosforin välillä.

Turvemaiden kasvillisuuden on yleisesti katsottu kuvaavan kasvupaikan ravinteisuutta ja kasvupaikkatyyppin perusteella on tehty mm. lannoitussuosituksia puuston kasvun lisäämiseksi. Turvemaiden kasvupaikkatyyppien ja turpeen fosforivarojen välistä yhteyttä on tähän asti mitattu pääasiassa analysoimalla turpeen kokonais- ja helppoliukoinen fosfori (mm. Starr ja Westman 1978, Schneider ja Westman 1981, Westman ja Laiho 2003). Fosforin fraktioita, eli alumiinin-, raudan- ja kalsiumin sitomaa fosforia kasvupaikkatyypeillä ovat tutkineet ainoastaan Nieminen ja Penttilä 2004.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää, onko fosforin sitoutumisessa merkittäviä eroja erilaisten kasvupaikkojen välillä. Fosforifraktioiden vastetta kasvupaikkoihin, kasvillisuuteen ja ekologisiin tunnuksiin tarkastellaan monimuuttujamenetelmän avulla. Turvekangasluokituksessa on epävarmuutta tiettyjen suotyyppien kehittymisestä turvekankaiksi (Laine ja Vasander 2005) ja siksi näiden suotyyppien fosforivastetta tarkastellaan lähemmin. Aiempaa tarkempi tieto fosforin sitoutumismuodoista on olennainen osa suometsien ravinnetutkimusta, erityisesti koska fosfori monessa tapauksessa on kasvua rajoittava minimitekijä. Fosforin sitoutumismuotojen tunteminen tuo lisää tietoa fosforin käyttökelpoisuudesta eri kasvupaikoilla. Turpeen fosforiyhdisteiden tarkempi tunteminen voisi tulevaisuudessa myös edesauttaa lannoitussuositusten tekemistä ja huuhtoutumisriskien arviointia.

Fosfori sitoutuu maassa happamissa olosuhteissa raudan ja /tai alumiinin kanssa ja emäksisissä oloissa kalsiumin kanssa. Turpeen happamuudesta ja raudan, alumiinin ja

kalsiumin määrästä riippuen voi suokasvupaikoilla olla hyvin erilaiset määrät kyseisiä fraktioita. Korkeampi pH vaikuttaa myös fosforin sitoutumiseen orgaaniseen muotoon. Koska fosfori on soilla yleinen kasvun minimitekijä, kasvupaikkojen väliset erot selittyvät todennäköisesti ainakin osittain kasvilajien eroilla hyödyntää eri tavoin sitoutunutta fosforia.

Tutkimuksen postulaatit:

- 1) Sekä soiden ravinteisuusluokkien että turvekangastyypin välillä on eroja fosforin fraktioiden esiintymisessä.
- 2) Fosfori pidättyy alumiinin ja raudan kanssa puustoltaan tuottavimmilla turvekankailla.
- 3) Fosfori pidättyy kalsiumin kanssa korkean pH:n omaavilla lettomaisilla kasvupaikoilla.
- 4) Helppoliukoinen fosfori korreloi negatiivisesti kasvupaikkojen ravinteisuuden kanssa.
- 5) Orgaanisen fosforin suhteelliset määrät lisääntyvät ravinteisimmille kasvupaikoille.

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Tutkimusalue

Tutkimusaineisto kerättiin Lapin, Koillis-Suomen, Kainuun, Pohjois-Pohjanmaan ja Keski-Pohjanmaan piirimetsälautakuntien mänty- kuusi- ja koivuvaltaisilla ojitetuilla soilla. Metsäntutkimuslaitoksen (Metla) silloisen suontutkimusosaston Rovaniemien, Muhoksen ja Kannuksen suotutkijat perustivat vuosina 1984 - 1988 ns. SINKA-metsiköt eli "Turvemaiden pysyvät kasvukoealat Pohjois-Suomessa" (Penttilä ja Honkanen 1986). SINKA-metsiköistä valittiin 64 eri ravinteisuustasoa edustavaa ojitettua suota tarkasteluun (koordinaatit yhtenäiskoordinaatistossa välillä 7106.000 N ja 7433667.000 N sekä 360.000 E ja 3621146.000 E). Suot on ojitettu 16 - 55 vuotta ennen mittausta. Aineistossa esiintyy 55 muuttumaa, 6 turvekangasta ja kolme soistunutta turvekangasta (taulukko 2). Turpeen paksuus koealoilla vaihteli 17 -100 cm. Kasvupaikat on kuvattu alkuperäisen suotyypiluokituksen mukaan (Heikurainen ja Pakarinen 1983) ja niihin sisältyy 11 lettoista, 28 ruohoista, 13 suursaraista ja 12 piensaraista suota. Koealue kuuluu Pohjanmaan ja Perä-Pohjolan aapasuovyöhykkeeseen sekä Perämeren alueen eksentristen kermikeitaiden vyöhykkeeseen. Alueen keskimääräinen vuotuinen lämpösumma ($\geq 5^{\circ}$ C) vaihteli välillä 916 - 1060 d.d. vuosina 1941 - 1970 ja vuotuinen kokonaissademäärä välillä 340 - 980 mm.

2.2 Koejärjestelyt

SINKA-metsiköt valittiin valtakunnan metsien 7. inventoinnin (VMI 7) koealaverkosta systemaattisella otannalla. Otosyksikkönä on metsikkökuvio, joka täyttää tietyt metsikön kokoa, kasvupaikkaa, puuston kehitysvaihetta ja -kelpoisuutta sekä terveydentilaa koskevat ehdot. Otos on ositettu ojitustilanteen, pääpuulajin ja kasvupaikkatyyppin suhteen (kts. tarkemmin Penttilä ja Honkanen 1986). Tähän tutkimukseen valittiin metsikkökuvioita, joiden ravinnetilan katsottiin olevan tyydyttävä metsänkasvatusta varten; vajaatuottoiset metsät hylättiin VMI 7:n kenttät yöhjeiden määritelmän perusteella (Valtakunnan metsien...1977). Lisäksi tutkimusaineistosta hylättiin lannoitetut alat sekä viimeisen kymmenen vuoden aikana hakatut metsikkökuviot. SINKA-metsiköt koostuvat kolmesta ympyräkoealasta, jotka

on sijoitettu 40 m:n etäisyydelle toisistaan. Ympyräkoelan säde on 5 m ja koko 78,5 m². Puustoa mitattaessa koelan koko kuitenkin vaihteli puiden lukumäärän mukaan, siten että jokaiselta koelalta saatiin mitattua noin 33 puuta, eli SINKA-metsiköstä noin 100 puuta. Yhden metsikön koelaloilla on sama ravinteisuustaso (Huikarin 1952 mukaan) sekä sama historia hakkuiden ja ojitusajankohdan suhteen.

2.3 Aineiston keruu

SINKA-metsiköiden kenttätöohjeet on mahdollisimman pitkälle laadittu VMI 7 ohjeiden mukaisiksi. Turvenäyte fosforifraktioita varten otettiin 5-10 cm syvyyskerroksesta jokaisen kolmen koelan keskipisteestä sekä puolen säteenmitan kohdalta kaikista pääilmansuunnista. Koelalta kerättiin viisi näytettä eli SINKA-metsiköltä yhteensä 15 näytettä ja näytteet yhdistettiin yhdeksi metsikkökuviokohtaiseksi kokoomanäytteeksi.

Kasvillisuusaineisto kerättiin vuosina 1984 - 1988. Aluksi kuvion kenttä- ja pohjakerroksen kasvillisuudesta tehtiin silmävarainen osakasvustokartoitus. Kasvustomosaiikista pyrittiin erottamaan 2 - 4 osakasvustoa pinnanmuotojen ja lajikoostumuksen perusteella. Tavallisimmin erottuivat mätäs-, tasa- ja painannepinnat. Ympyräkoelalta piirrettiin osakasvustokartta ja sen avulla arvioitiin silmämääräisesti eri osakasvustojen osuus prosentteina pinta-alasta. Lajiluettelo tehtiin kulkemalla koeala huolellisesti läpi ja merkitsemällä kasvilajeille prosenttipeittävyydet jokaista osakasvustoa kohden. Lajien peittävyydet arvioitiin Norrlinin menetelmästä johdetulla 9 -asteikolla seuraavasti: 1 = <0,24, 2 = 0,25 - 0,99, 3 = 1 - 2, 4 = 3 - 4, 5 = 5 - 8, 6 = 9 - 16, 7 = 17 - 32, 8 = 33 - 64, 9 = 65 - 100 %. Alle 1,3 m:n pituiset puut ja pensaat merkittiin muistiin vain koko koelalta. Kasvilajien nimistö on putkilokasvien osalta Hämet-Ahti ym. (1998) mukainen, sammalten osalta Ulvinen ym. (2002) ja jäkälien osalta Moberg ja Holmåsén (1982) mukainen (liite 6).

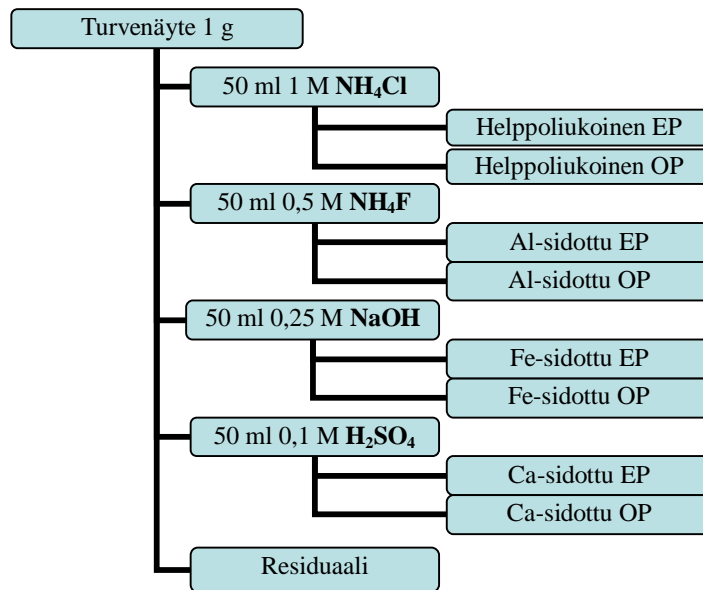
Koelaloilta kerätyistä puustotiedoista olen tutkimuksessani hyödyntänyt kasvillisuuden vaihtelua selittävinä tekijöinä puuston tilavuutta sekä koivun ja kuusen osuutta puuston tilavuudesta. Puustotietojen keruussa on noudatettu VMI 7:n maastotyöohjeita (Valtakunnan metsien...1977). Muita tutkimuksessa käytettyjä ympäristömuuttujia ovat turpeen paksuus (cm), mättään ja painanteen osuus pinta-alasta (%) sekä kokonaistyyppipitoisuus (mg kg⁻¹). Jos turpeen paksuus ylitti 100 cm:ä, merkittiin se

≥100 cm. Näytteet kokonaistyyppianalyysia varten kerättiin samalla tavalla kuin näytteet fosforin fraktiointiin.

2.4 Aineiston käsittely

2.4.1 Turvenäytteiden kemiallinen analysointi

Turveanalyysit tehtiin Metlan Rovaniemen toimintayksikön laboratoriossa. Turvenäytteet kuivattiin 60 °C:ssa ja homogenisoitiin ruostumattomasta teräksestä valmistetun siivilän läpi (silmäkoko 2 mm). Turpeen fosfori (P) fraktioitiin helposti liukenevaan alumiini-, rauta- ja kalsiumsidottuun muotoon Chang ja Jackson (1957) menetelmän mukaan. Fraktiointimenetelmän periaatteena on, että fosforia uutetaan näytteestä peräkkäisillä liuoksilla, jotka kukin uuttavat tietyn fosforifraktion. Liuosten uuttamiskyky kasvaa uuttovaiheiden edetessä. 1 g turvetta uutettiin yllä kuvattujen fraktioiden liuottamiseksi 50 ml:ssa seuraavia uuttoliuoksia: 1 M ammoniumkloridi (NH₄Cl), 0,1 M ammoniumfluoridi (NH₄F), 0,1 M suolahappo (NaOH) ja 0,1 M rikkihappo (H₂SO₄). Ammoniumkloridiliuoksen pH säädettiin 8,5:ksi (Fife 1959). Uuttoprosessia häiritsevä humus poistettiin Hartikaisen (1979) menetelmällä. Jokaisesta liuoksesta määritettiin sekä epäorgaaninen (EP) että kokonaisfosfori (TP). Liuoksen epäorgaanisen fosforin osuus määritettiin molybdeenisini-menetelmällä (Kaila, 1955). Kokonaisfosfori (TP) määritettiin askorbiinihappo-menetelmällä kaliumperoksidisulfaattiuuton jälkeen (Vesihallinnon analyysimenetelmät 1981). Fraktion kokonaisfosforin (TP) ja epäorgaanisen fosforin (EP) erotuksena saatiin orgaaninen fosfori (OP). Changin ja Jacksonin (1957) fraktiointimenetelmällä ei kuitenkaan saada uutettua kaikkea fosforia näytteestä, joten turpeen kokonaisfosforivarasto määritettiin ICP-menetelmällä. Fraktioiden summan ja kokonaisfosforivaraston erotusta, eli fraktiointiprosessissa liukenematonta fosforia kutsutaan residuaaliksi. Kaaviossa 1 on esitetty uuttokäsittelyillä saadut fosforin fraktiot. Kokonaistyyppi määritettiin Kjeldahlin menetelmällä. Kyseistä fosforifraktioaineistoa ovat aiemmin käyttäneet Nieminen ja Penttilä (2004).



Kaavio 1. Fosforin fraktiointi Chang ja Jacksonin (1957) menetelmällä. Turvenäytteestä uutetaan fosforia peräkkäisillä liuoksilla, jotka kukin uuttavat tietyn fraktion. Liuosten uuttamiskyky kasvaa uuttovaiheiden edetessä. Fraktioista määritetään lisäksi orgaaninen (OP) ja epäorgaaninen (EP) fosfori. Residuaali saatiin fraktioiden summan ja kokonaisfosforivaraston erotuksena.

2.4.2 Kasvillisuus- ja ympäristömuuttuja-aineiston käsittely

SINKA-kasvillisuusaineistosta poistettiin ne koealojen osakasvustot, jotka olivat sattuneet ojamaalle tai kivikolle. Aineistoon hyväksyttiin täten vain tasamaa-, mätäs- ja painanneosakasvustot. Lajien peittävydet muutettiin prosenttipeittävyksiksi käyttämällä Norrlinin luokkavälin keskipistettä peittävyysarvona. Kasvillisuusaineiston osakasvustokohtaiset peittävydet muutettiin koealakohtaisiksi keskipeittävyksiksi. SINKA-metsikköiden kolmen koealan kasvillisuuspeittävyksistä laskettiin metsikkökohtainen keskiarvo. Koska yksittäisten havaintojen esiintyminen aineistossa saattaa vääristää monimuuttuja-analyysin tulosta, tarkastelusta jätettiin pois lajit jotka esiintyvät vain yhdellä SINKA-metsikkökoealalla

Fosforifraktioista ja muista ympäristömuuttujista laskettiin kolmen koealan metsikkökohtaiset keskiarvot. Koealat luokiteltiin sekä luonnontilaisten soiden ravinteisuustasoluokituksella eli VMI-luokituksella (Valtakunnan metsien...) että turvekangastyypiluokituksella (Laine ja Vasander 2005). Näissä luokissa tarkasteltiin fosforifraktioiden jakaumia kuvaavia tilastollisia tunnuslukuja (riippumattomuus,

normaalijakautuneisuus ja jakauman symmetrisyys) tilastollisen laskentaohjelman SPSS 14.0 avulla. Analyyseissä käytettiin ei-parametrisiä menetelmiä: ryhmien välisiä eroja tarkasteltiin Kruskal-Wallisin yksisuuntaisella varianssianalyysillä ja ryhmien sisäisiä eroja Friedmanin kaksisuuntaisella varianssianalyysillä.

2.4.3 Kasvillisuuden vaihtelu suhteessa ympäristömuuttujiin

Tilastollisilla monimuuttujamenetelmillä käsitellään usean muuttujan aineistoja. Kasvillisuuden ordinaatiomenetelmillä pyritään tiivistämään moniulotteista tietoa kasvilajien esiintymisestä. Ordinaatiomenetelmät voivat olla epäsuoria tai suoria. Epäsuorissa menetelmissä pyritään löytämään kasvillisuuden rakenteen ekologiset vaihtelusuunnat riippumatta ympäristömuuttujista (Kent ja Coker 1992). Epäsuoria menetelmiä voidaan käyttää hypoteesien luomiseen kasvillisuuden ja ympäristötekijöiden suhteesta. Ympäristömuuttujien, kuten ravinteisuuden tai kosteuden suhdetta kasvillisuuden vaihteluun voidaan kuvata sovittamalla ordinaatorakenteeseen vektoreita tai vastepintoja. Suorassa menetelmässä kasvillisuuden ordinaatio tehdään mitattujen ympäristömuuttujien avulla regressiomalleihin perustuen.

Tässä tutkimuksessa on käytetty ei-metristä moniulotteista skaalausta (Non-metric multidimensional scaling, NMDS) joka on epäsuora ordinaatiomenetelmä. Moniulotteisella skaalauksella konstruoidaan koealojen väliset suhteet niiden lajistollisen samankaltaisuuden avulla. Koealojen lajiston väliset todelliset etäisyydet mitataan etäisyysmatriisiin avulla, esim. Bray-Curtis indeksillä. Ordinaatiomenetelmien yleisenä periaatteena on sijoittaa koealat moniulotteisessa avaruudessa muutaman ulottuvuuden (yleensä kolmen) suhteen niin, että alojen alkuperäiseen etäisyysmatriisiin perustuva järjestys säilyy mahdollisimman hyvin (Oksanen 2006). Moniulotteinen skaalaus sijoittaa koealat koordinaatistoon iteroimalla eli toistamalla ordinaatiota kunnes yhteensopivuus alkuperäiseen etäisyysmatriisiin on mahdollisimman suuri. Yhteensopivuuden mitta on stressi, joka on 0 yhteensopivuuden ollessa täydellinen. NMDS menetelmä pystyy käsittelemään minkä tahansa muotoisia, myös epälineaarisia lajivasteita. Tässä tutkimuksessa etsittiin kasvillisuuden taustalla olevia ravinteisuusgradientteja ja verrattiin kuinka hyvin maastossa tehty kasvupaikkaluokitus vastaa ordinaatorakenteesta löydettyjä vaihtelusuuntia. Fosforifraktioiden vaihtelusuuntia tutkittiin sovittamalla

kasvillisuusordinaatioon lineaarisia vektoreita ja laskemalla fraktioiden ja kasvillisuuden väliset maksimikorrelaatiot Monte Carlo-menetelmällä. Kasvillisuuden ja ympäristömuuttujien välinen suhde voi olla myös epälineaarinen. Sovittamalla kasvillisuusordinaatioon ympäristömuuttujien vasteet regressiopintoina, voidaan tutkia onko vaste lineaarinen vai epälineaarinen.

Ordinaatio tehtiin R-ohjelman avulla (Oksanen 2007) käyttäen Vegan-paketin funktiota metaMDS. MetaMDS-funktiossa oletusindeksinä on Bray-Curtis'in indeksi. Indeksillä on suhteellinen, eli jos koealoilla ei ole yhtäkään yhteistä lajia niiden etäisyys on maksimaalinen eli 1. Lajiordinaatio tehtiin laskemalla lajien peittävyydellä painotetut keskiarvot koealojen koordinaattipisteistä. Lajien i ja j välinen Bray-Curtis-etäisyysindeksi on

$$BC_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{|n_{ik} - n_{jk}|}{n_{ik} + n_{jk}} \quad (1)$$

jossa N on koealojen lukumäärä.

Koska tutkimusaineistossa oli suuria eroja pienimmän ja suurimman lajin peittävyysarvon välillä, tehtiin kasvillisuusaineistolle neliöjuurimuunnos ja Wisconsinin kaksoisstandardointi (lajikohtaiset arvot jaetaan lajin maksimiarvolla ja koealakohtaiset koealojen summalla). Kaksi- ja kolmiulotteisia NMDS-ajoja tehtiin iteroimalla aineisto 1000 kertaa jokaista ajoa kohden. Koska stressi oli pienempi kolmiulotteisessa kuin kaksiulotteisessa ratkaisussa (stressiarvot 12,8 ja 17,6) ja koska korrelaatiot kuvastivat kolmiulotteisessa ratkaisussa parhaiten kasvillisuuden ja ympäristömuuttujien suhdetta, valittiin esittää koko aineiston korrelaatioarvot kolmeulotteisesta ratkaisusta. NMDS-ajot tehtiin kuitenkin kaksiulotteisesti (1. ja 2. dimensio), koska kolmas dimensio ei yleensä tuonut merkittävästi uutta tietoa ordinaatiokuvan tulkintaan.

NMDS-ordinaatioajoja ja vektorisovituksia tehtiin ensin koko aineistolle ja sitten erilaisille ositteille, jotka edustivat joko tiettyä/tiettyjä ravinteisuustasoluokkia (VMI-luokitus) tai turvekangastyyppejä (Laine ja Vasander 2005). Ruohoisia soita tarkasteltiin erikseen räme- ja korpipyhmissä. Turvekangastyyppejen ajoilla haluttiin erityisesti tarkastella niiden suotyyppien fosforivastetta, jotka Laine ja Vasander ovat

luokitelleet epävarmoiksi tapauksiksi turvekangasluokituksessa (liite 1). Niiden kehitystä suosta turvekankaaksi ei täysin osata ennustaa. Kun jatkossa tutkimuksessa puhutaan suotyypeistä, tarkoitetaan aineistossa esiintyviä, ravinteisuustasoluokituksen mukaan luokiteltuja muuttumia, turvekankaita ja soistuneita turvekankaita.

Taulukko 2 (1/2). Ojitettujen suokoealojen tunnuksia. Ravinteisuustasoluokat 1 = Lettoiset suot, 2 = ruohoiset korvet, 2b = ruohoiset rämeet, 3 = suursaraiset, 4 = piensaraiset suot. Ojitus-tila mu = muuttuma, tk = turvekangas, st = soistunut turvekangas. Mo = Mättään osuus, Po = painanteen osuus. Suotyypin lyhenteet ovat liitteessä 1.

SINKA nro	Ravinteisuusluokka	Suotyyppi	Ojitus-tila	Tilavuus m ² ha ⁻¹	Puulajijakauma % (V)			Turpeen paksuus, cm	Mo %	Po %
423	1	VLR	mu	23	83	6	12	62	40	16
477	1	LhK	mu	164	3	56	41	41	24	1
501	1	VLR	mu	7	93	1	6	83	26	0
502	1	KoLK	mu	101	0	0	100	100	20	2
509	1	VLR	mu	62	60	31	10	67	37	0
523	1	VLK	mu	26	30	70	0	84	7	0
530	1	VLK	mu	31	19	75	6	100	12	5
531	1	VLK	mu	34	0	77	23	87	9	0
540	1	LhK	tk	27	32	64	5	45	29	0
491	1	VLR	mu	37	100	0	0	100	31	0
492	1	VLR	mu	48	100	0	0	100	24	0
11	2	RhK	mu	12	2	0	98	57	2	0
12	2	RhK	mu	30	0	0	100	57	1	1
24	2	RhK	mu	151	5	28	67	17	53	0
26	2	RhSK	mu	147	81	4	15	17	22	0
27	2	RhSK	tk	79	4	1	95	30	18	0
38	2	RhSK	mu	87	15	0	85	100	27	0
55	2	RhSK	mu	17	31	0	69	100	17	0
56	2	RhSK	mu	34	45	0	55	100	0	0
111	2	RhSK	mu	188	11	3	86	100	33	0
125	2	RhSK	tk	62	6	0	94	100	18	0
503	2	RhSK	mu	77	0	0	100	100	38	0
505	2	RhK	tk	38	0	93	7	55	45	8
16	2b	RhSR	st	55	99	0	1	37	42	0
110	2b	RhSR	mu	118	85	6	8	100	22	0
114	2b	RhSR	mu	130	73	0	27	100	8	0
115	2b	RhSR	mu	93	63	3	34	100	10	0
124	2b	RhSR	st	136	75	0	25	100	18	0
402	2b	RhSR	mu	33	99	1	0	100	26	0
404	2b	RhSR	mu	16	96	0	4	100	34	34
463	2b	RhSR	mu	72	62	3	35	100	37	18
513	2b	RhSR	tk	109	83	5	12	100	30	0
518	2b	RhSR	mu	38	46	7	47	98	34	0
546	2b	RhSR	mu	226	63	1	36	32	12	0
612	2b	RhSR	mu	19	99	0	0	85	28	0
643	2b	RhSR	mu	26	100	0	0	100	18	0
646	2b	RhSR	mu	87	54	5	41	100	9	0
461	2b	RhSR	mu	12	100	0	0	47	24	0
462	2b	RhSR	mu	24	100	0	0	65	31	0

Taulukko 2 (2/2).

SINKA nro	Ravinteisuus- luokka	Suotyyppi	Ojitus- tila	Tilavuus m ² ha ⁻¹	Puulajijakauma % (V)			Turpeen paksuus, cm	Mo %	Po %
5	3	VSR	mu	26	84	0	16	33	35	0
6	3	VSR	mu	28	92	1	8	73	43	0
9	3	VSR	mu	63	92	0	8	100	57	0
64	3	VSK	tk	52	78	12	11	70	47	0
69	3	VSR	mu	12	17	0	83	69	26	0
71	3	VSN	mu	52	100	0	0	98	20	0
51	3	VSR	mu	20	98	0	2	100	32	0
415	3	VSR	mu	19	99	1	0	60	36	0
417	3	VSR	mu	21	71	19	10	100	31	0
443	3	VSR	mu	36	89	1	10	79	31	21
467	3	VSR	mu	23	97	3	1	100	30	0
485	3	VSN	mu	21	12	0	88	75	26	0
606	3	VSR	mu	97	61	0	39	63	36	0
10	4	LkR	mu	7	80	0	20	100	23	2
49	4	TSR	st	47	95	0	5	100	23	0
83	4	TSR	mu	45	100	0	0	51	42	0
401	4	PsR	mu	15	98	2	0	27	38	17
403	4	KgR	mu	31	99	1	0	27	26	0
408	4	TSR	mu	11	100	0	0	100	33	0
416	4	PsR	mu	8	75	11	14	70	33	11
418	4	PsR	mu	22	87	4	9	36	26	13
421	4	PsR	mu	50	91	0	9	46	41	0
479	4	PsR	mu	4	92	0	8	55	23	2
522	4	TSR	mu	34	75	13	11	89	32	17
607	4	TSR	mu	54	86	4	10	28	48	0

3 TULOKSET

3.1 Fosforifraktioiden määrät ja ekologiset vaihtelusuunnat koko aineistossa

Fraktiomäärien jakaumaa kuvaavat sijainnin ja hajonnan tunnusluvut vaihtelivat suo- ja turvekangasryhmien välillä suuresti. Ne olivat suotyyppien ravinteisuusluokissa yleensä normaalisti jakautuneita. Havaitut jakaumat poikkesivat normaalista erityisesti kalsiumfosforin ja helppoliukoisen fosforin osalta. Turvekankailla jakaumat poikkesivat normaalista kaikkien fosforifraktioiden osalta mustikkakangastyypillä II. (Liite 3). Molemmilla luokituksilla esiintyi jakaumien epäsymmetrisyyttä. Erisuuret varianssit ja otoskoot sekä jakauman normalisuudesta poikkeaminen vähentävät varianssianalyysin vakautta, mistä syystä tilastollisissa analyyseissä on käytetty ei-parametrisiä menetelmiä.

Yleisesti ottaen fraktiomäärien vaihteluvälit olivat kaikissa ryhmissä suuret (liite 3). Orgaaninen rautafosfori erottautui keskimäärin hieman pienemmällä suhteellisella varianssilla (taulukko 3). Ravinteisuustasoluokissa fraktioiden määrät erosivat merkitsevästi ryhmien välillä. Turvekankailla sen sijaan monen fraktion kohdalla ryhmät eivät eronneet suuresti toisistaan (liite 4). Orgaanista kalsiumfosforia oli merkittävästi eniten letoilla ja epäorgaanista kalsiumfosforia melkein yhtä paljon letoilla ja ruohoisilla korvilla. Eniten helppoliukoista epäorgaanista fosforia oli pien- ja suursaraisilla soilla. Orgaanista helppoliukoisen fosforin määrissä ei ilmennyt suuria vaihteluita ravinteisuustasoluokkien välillä, mutta vähiten sitä oli letoilla. Orgaanista rauta- ja alumiinifosforia oli selvästi eniten ruohoisilla korvilla. Määrät pienenevät molempiin suuntiin ravinteisuusasteikolla. Sama päti epäorgaaniseen rautafosforiin. Eniten epäorgaanista alumiinifosforia oli suursaraisilla soilla (liite 4). Orgaanisen fosforin suhteellinen osuus nousi ravinteisuustason mukaan: piensaraisilla soilla orgaanisen fosforin osuus kokonaisfosforista oli 44 %, suursaraisilla soilla 48 %, ruohoisilla rämeillä 52 %, letoilla 59 % ja ruohoisilla korvilla 60 %.

Turvekangastyypeillä fosforin määrien vaihtelu ryhmien välillä oli pienempää kuin ravinteisuustasoluokilla, kun ei oteta huomioon Vtkg metsikön arvoja (n=1). Orgaanista rautafosforia esiintyi poikkeuksellisen vähän Ptkg I:llä muihin ryhmiin verrattuna (liite 4). Epäorgaanista kalsiumfosforia puolestaan oli merkittävän paljon Ptkg I:llä. Kaikissa ryhmissä, molemmilla luokituksilla, orgaanista rautafosforia oli

ryhmien sisällä suhteessa eniten (taulukko 3, liite 2). Myös suhteelliset hajonnat olivat pienimmät orgaanisella rautafosforilla (taulukko 3). Soiden ravinteisuustasoluokissa epäorgaanista rautafosforia oli seuraavaksi eniten (muilla paitsi letoilla ja piensaraisilla soilla). Keskimäärin vähiten kaikissa ryhmissä oli orgaanista helppoliukoista fosforia (taulukko 3).

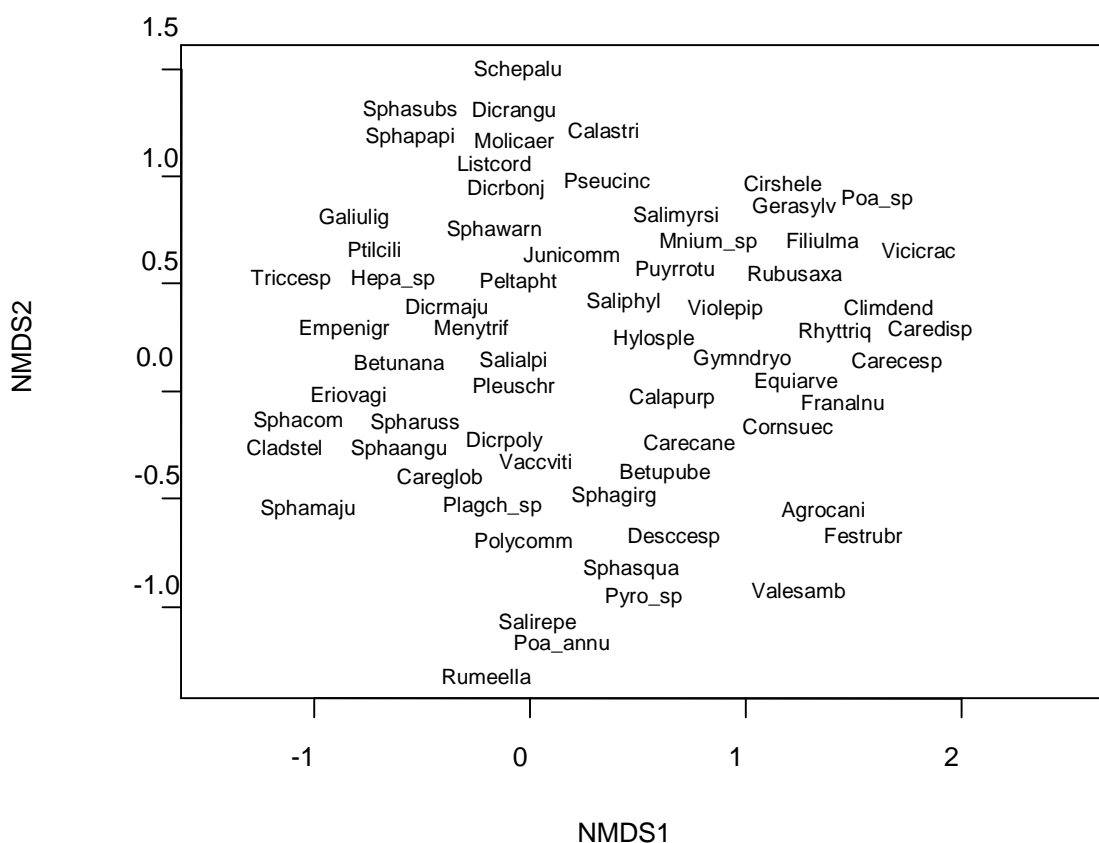
Taulukko 3. Fosforifraktioiden (mg kg^{-1}) keskimääräiset pitoisuudet (\bar{x}) ja keskijajonta (SD) eri kasvupaikkaryhmissä. Ep = epäorgaaninen fosfori, op = orgaaninen fosfori.

	Lettoiset suot n = 11		Ruohoiset korvet n = 12		Ruohoiset rämeet n = 16		Suursaraiset suot n = 13		Piensaraiset suot n = 12	
	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
NH ₄ Cl-ep	24	29	12	10	20	20	39	41	62	53
NH ₄ Cl-op	12	7	15	8	16	10	15	7	15	8
NH ₄ F-ep	20	14	65	41	50	40	77	53	66	52
NH ₄ F-op	45	34	102	55	85	48	79	50	70	43
NaOH-ep	36	42	126	49	114	81	82	96	49	36
NaOH-op	153	52	238	40	193	60	208	67	140	80
H ₂ SO ₄ -ep	46	34	16	14	31	22	21	32	26	23
H ₂ SO ₄ -op	52	34	22	30	18	18	15	21	11	10

	Rhtkg n = 19		Mtkg II n = 21		Ptkg I n = 6		Ptkg II n = 17		Vtkg n = 1
	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}
NH ₄ Cl-ep	27	37	17	18	39	36	51	49	15
NH ₄ Cl-op	16	7	14	10	13	5	15	7	1
NH ₄ F-ep	50	38	43	38	56	18	82	51	7
NH ₄ F-op	84	55	75	47	88	50	71	48	41
NaOH-ep	91	66	96	79	48	32	77	38	48
NaOH-op	202	67	189	54	117	64	192	81	216
H ₂ SO ₄ -ep	26	23	33	30	39	24	20	17	10
H ₂ SO ₄ -op	29	28	27	32	11	6	15	20	6

Aineiston ekologisten päävaihtelusuuntien selvittämiseksi suoritettiin NMDS-ordinaatio kasvilajille ja koealoille. On huomattava, että ekologiset gradientit eivät välttämättä kulje akseleiden suunnassa. Kasvilajordinaatiossa näkyi

ravinteisuusgradientin kulkevan vasemmasta alakulmasta oikeaan yläkulmaan (kuva 2). Ombro-oligotrofisuutta ilmentävät lajit sijoittuvat ordinaatiokentässä vasemmalle ja meso-eutrofisuutta ilmentävät lajit oikealle. Tyypillisiä niukkaravinteisten soiden sammalia ovat varvikkorahkasammal, paakkurahkasammal ja vajorahkasammal (*Sphagnum russovii*, *S. compactum*, *S. majus*) sekä tupasvilla ja tupasluikka (*Eriophorum vaginatum*, *Trichophorum cespitosum*). Ordinaation oikealla laidalla runsaampaa ravinteisuutta indikoivat mm. mesiangervo, hiirenvirna, metsäliekosammal ja hentosara (*Filipendula ulmaria*, *Vicia cracca*, *Rytidiadelphus triquetrus*, *Carex dispansa*).



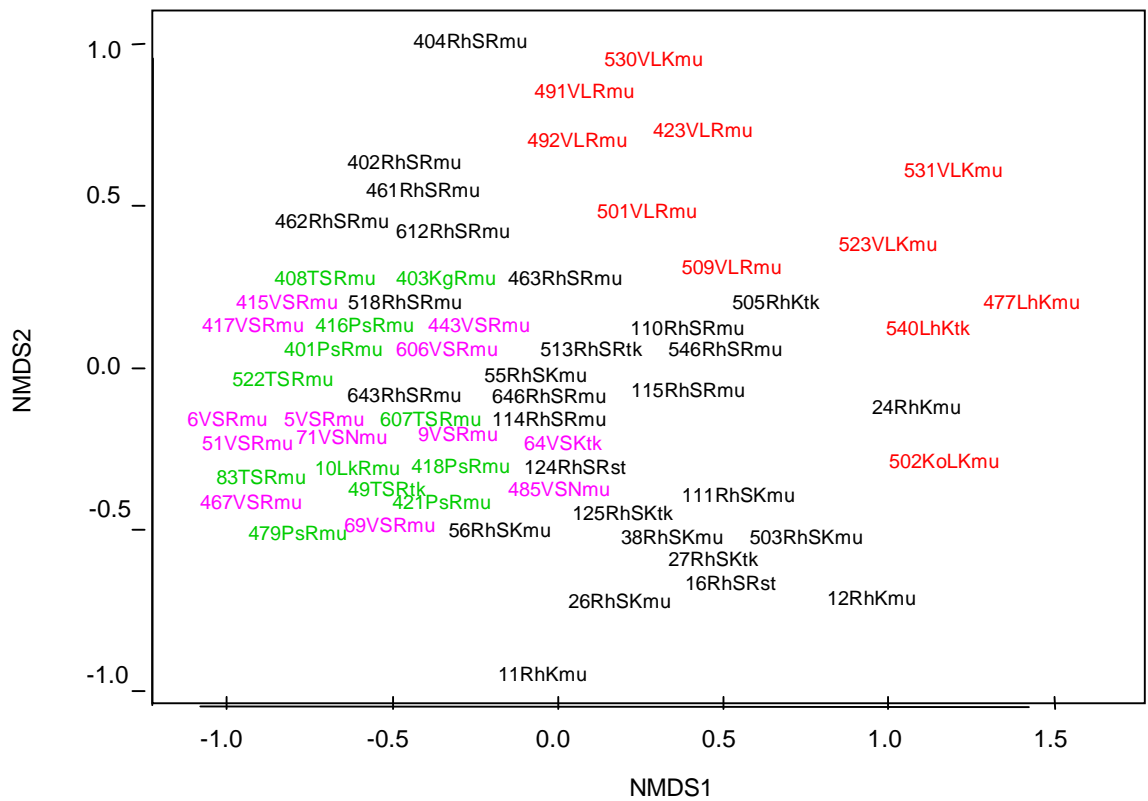
Kuva 2. NMDS-kasvilajordinaatio. Kasvilajien tieteelliset ja suomenkieliset nimet sekä lyhenteet on esitetty liitteessä 6.

Lajordinaatiossa näkyi myös metsäisyys vs. avosuogradientti (nevaisuus- ja lettoisuus), joka myös voidaan tulkita kosteusgradientiksi. Gradientti seurasi lähes ordinaatioakselia 2, mutta hieman viistosti oikeasta alakulmasta vasempaan yläkulmaan. Reunavaikutteisuutta ilmentävät lajit sijoittuivat ordinaatioakselin alaosaan, esim. luhtaisuutta ilmentävät okarahkasammal, nurmilauha ja jousivihvilä (*S.*

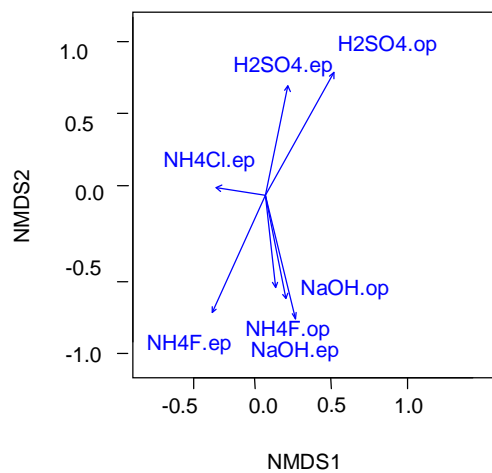
squarrosus, *Deschampsia cespitosa*, *Juncus filiformis*) sekä korpisuutta ilmentävät isotalvikki ja karhunsammal (*Pyrola rotundifolia*, *Polytrichum commune*). Nevaisuutta ja lettoisuutta ilmentää akselin 2 yläpäässä mm. keräpäärakasammal (*S. subsecundum*). Nevaisuutta ilmentää leväkkö (*Scheuchzeria palustris*), lettoisuutta äimäkynsisammal ja siniheinä (*Dicranum angustum*, *Molinia caerulea*). Aapasoilla rimpisyyttä indikoi luhtasirppisammal (*Drepanocladus aduncus*) (Ulvinen ym. 2002).

Suotyyppiordinaatiossa koealat seurasivat ravinteisuusgradienttia (kuva 3). Karut pien- ja suursaraiset suotyypit sijoittuivat gradientin alkupäähän ilman havaittavaa ryhmittymistä suotyyppien välillä. Gradientin keskiosaan sijoittuivat ruohoiset kasvupaikat ja niiden jälkeen letot. Äärimmäisenä oikealle ordinaatioakselille tulivat rehevimmät kasvupaikat eli VLK, LhK ja KoLK. Vastakkaiseen suuntaan (alhaalta oikealta ylävasemmalle) kulkevalle metsäisyys vs. avosuogradientille sijoittuvat korpi- ja rämetyyppit niin että RhK ja RhSK sijoittuivat metsäisyyden leimamaan päähän ja RhSR puolestaan avosuokasvillisuuden vallitsemaan yläosaan.

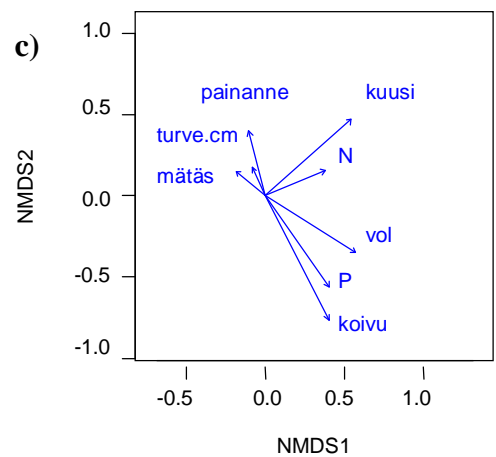
a)



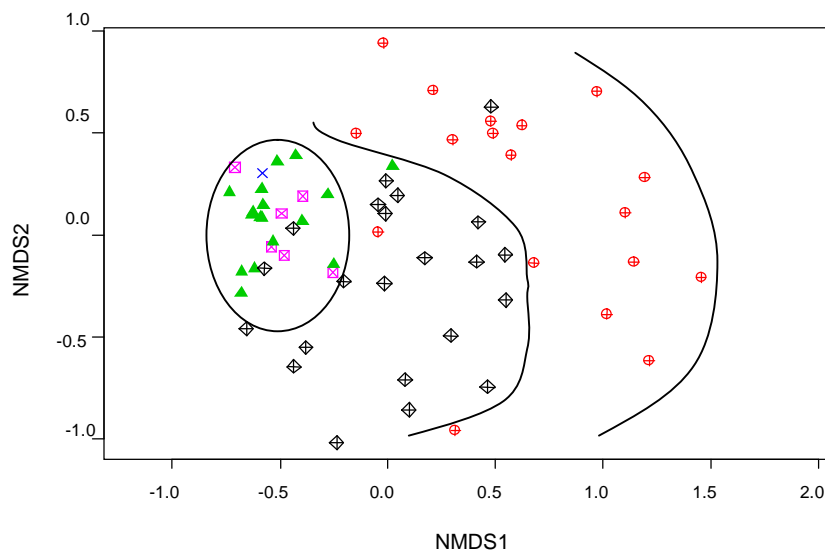
b)



c)



Kuva 3. Yllä (a) koelaordinaatio SINKA-koelatunnuksilla. Väri selittävänä kasvupaikkatekijänä (punainen = lettoiset ja lehtomaiset, musta = ruhoiset, vaaleanpunainen = suursaraiset, vihreä = piensaraiset suot). Alla (b, c) ympäristömuuttujien vektorisovitus. Nuolen pituus kertoo korrelaation voimakkuudesta. Ympäristömuuttujien lyhenteet on esitetty taulukossa 4.



Kuva 4. Koelaordinaatio turvekangasluokituksella. o = Rhtk, \diamond = Mtkg II, \blacksquare = Ptkg I, \blacktriangle = Ptkg II, x = Vtkg. Linjat havainnollistavat turvekangasluokkien ryhmittymistä.

Myös turvekangasluokitus seurasi myös ravinteisuusgradienttia (kuva 4). Aineiston ainoa Vtkg sekä puolukkaturvekankaat I ja II sijoittuivat ravinteisuusgradientin vasemmalle laidalle. Ruohoturvekankaat sijoittuivat nauhamaisesti ravinteisuusgradientin päähän Mtkg I jäädessä karumpien ja rehevämpien tyyppien väliin.

Ympäristömuuttujille tehtiin vektorisovitus kasvillisuuden ordinaatorakenteen kanssa ja näiden korrelaatiot on esitetty taulukossa 4. Kaikki muuttujat, paitsi helppoliukoinen epäorgaaninen fosfori, saivat vektorisovituksessa merkitseviä korrelaatioarvoja ($p < 0,05$). Fosforifraktioista voimakkaimmin korreloivat orgaaninen kalsiumfosfori ($r = 0,54$), epäorgaaninen alumiinifosfori ($r = 0,49$) ja orgaaninen rautafosfori ($r = 0,48$). Muista ympäristömuuttujista parhaiten kasvillisuusaineiston kanssa korreloivat koivun ja kuusen osuus puustosta ($r = 0,74$ ja $r = 0,72$), kokonaisfosfori ($r = 0,54$), puuston tilavuus ($r = 0,52$) sekä kokonaistypen pitoisuus ($r = 0,50$).

Vektoreita tarkasteltaessa fosforifraktiot lisääntyvät selvästi kolmeen eri suuntaan (kuva 3b). Kalsiumfosforin vektorit osoittava korrelaation voimistuvan lettoisille kasvupaikoille ja niistä kehittyville ruohoturvekankaille (vrt. kuvia 3 ja 4) Orgaaninen

alumiini- ja rautafosfori sekä epäorgaaninen alumiinifosfori puolestaan lisääntyvät vastakkaiseen suuntaan eli ruohoisille korpityypeille. Turvekangasordinaatiossa edellä mainittujen fosforifraktioiden vektorit osoittavat alempaan osaan laajaa mustikkaturvekangas II ryhmää. Epäorgaanisen alumiinifosforin vektori osoittaa alumiini- ja rautaryhmästä poiketen hieman vasemmalle eli ravinteisuusgradientin vähäravinteisempaan päähän. Helppoliukoinen epäorgaaninen fosfori lisääntyi pien- ja suursaraisille tyypeille päin sekä niistä kehittyville turvekankaille.

Muista ympäristömuuttujista painanne- ja mätäsosuudet korreloivat voimakkaimmin pien- ja suursaraisten rämeiden sekä nevaisuuden leimaamien ruohoisten sararämeiden kanssa (kuva 3b). Samaan suuntaan lisääntyy myös paksuturpeisuus. Kuusen osuus puustosta ja kokonaistyyppipitoisuudet kasvavat lettoisiin ja lehtomaisiin tyypeihin päin ja koivun osuus sekä kokonaisfosforipitoisuudet taas ruohoisiin korpiin mentäessä. Puuston tilavuus kasvaa ruohoisille korville ja lehtokorville päin.

Taulukko 4. Kasvillisuusaineiston ja ympäristömuuttujien välinen riippuvuussuhde kolmiulotteisessa NMDS-ratkaisussa ($p < 0,001$ merkitty 0,000).

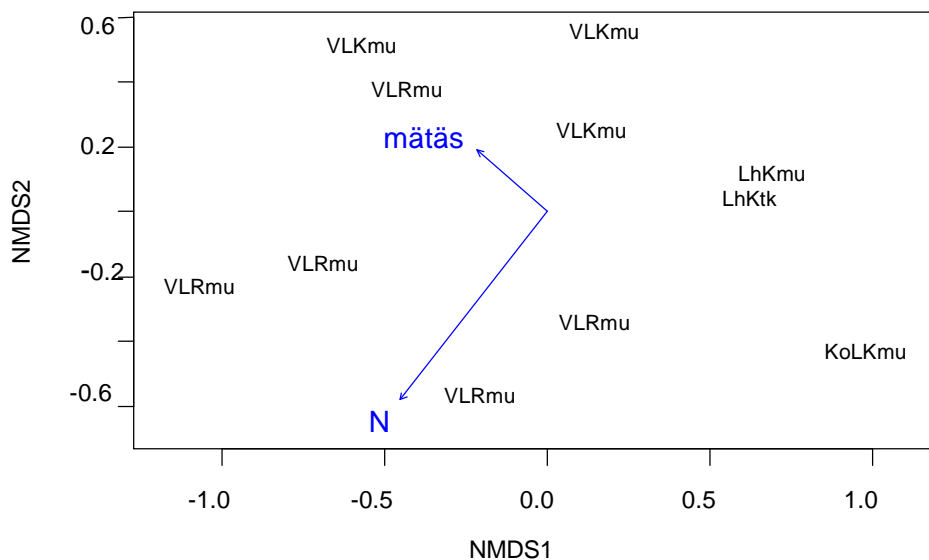
Lyhenne	Ympäristömuuttuja	r	p	
NH ₄ Cl-ep	Helppoliukoinen epäorgaaninen fosfori	0.44	0.006	***
NH ₄ Cl-op	Helppoliukoinen orgaaninen fosfori	0.29	0.142	
NH ₄ F-ep	Al-assosioitunut epäorgaaninen fosfori	0.49	0.000	***
NH ₄ F-op	Al-assosioitunut orgaaninen fosfori	0.43	0.004	**
NaOH-ep	Fe-assosioitunut epäorgaaninen fosfori	0.45	0.005	**
NaOH-op	Fe-assosioitunut orgaaninen fosfori	0.48	0.000	***
H ₂ SO ₄ -ep	Ca-assosioitunut epäorgaaninen fosfori	0.43	0.005	**
H ₂ SO ₄ -op	Ca-assosioitunut orgaaninen fosfori	0.54	0.000	***
vol	Puuston tilavuus	0.52	0.000	***
turve.cm	Turpeen paksuus	0.53	0.000	***
koivu	Koivun osuus kokonaispuuston tilavuudesta	0.74	0.000	***
kuusi	Kuusen osuus kokonaispuuston tilavuudesta	0.72	0.000	***
painanne	Painanneosakasvuston osuus pinta-alasta	0.39	0.016	*
mätäs	Mätäsosakasvuston osuus pinta-alasta	0.44	0.007	***
N	Kokonaistyyppi	0.50	0.002	**
P	Kokonaisfosfori	0.54	0.000	***

3.2 Fosforifraktioiden määrät ja ekologiset vaihtelusuunnat ravinteisuustasoluokissa.

3.2.1 Lettoiset ja lehtomaiset suot

Lettoisten soiden fosforifraktioiden yhteenlasketusta määrästä 49 % on rautafosforia ja siitä 80 % on orgaanisessa muodossa. Määrältään toiseksi suurin fraktioryhmä, kalsiumfosfori (25 % fraktioista) jakautuu melko tasaisesti orgaaniseen ja epäorgaaniseen fosforiin. Alumiinifosforia on 17 % fraktioista ja siitä orgaanista fosforia on kaksi kertaa enemmän kuin epäorgaanista. Helppoliukoisen fosforin osuus on 9 %, josta epäorgaanista fosforia on kaksi kertaa enemmän kuin orgaanista. Fraktioiden vaihteluvälit (mg kg^{-1}) on esitetty liitteessä 3. Fosforifraktioiden osuus kokonaisfosforista lettoisilla ja lehtomaisilla soilla on 38 %.

NMDS-ordinaatio osoittaa, ettei lettoisilla yksikään fosforin fraktio korreloi merkitsevästi ($p < 0,05$) kasvillisuuden kanssa (kuva 5). Ainoastaan typen pitoisuus ja mätäsosuuksuus jakavat aineiston. Koealat ovat ryhmittyneet rämeisiin, korpisiin ja lehtomaisiin suotyyppeihin.



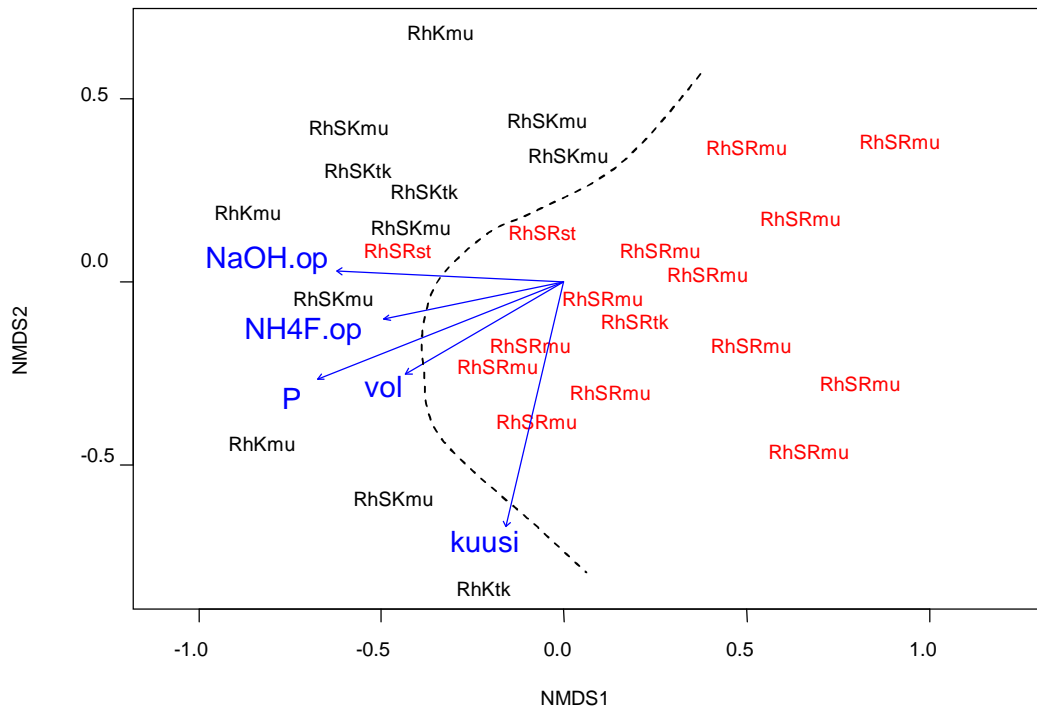
Kuva 5. Lettoisten ja lehtomaisten soiden koealaordinaatio ja ymäristömuuttujien vektorisovitus ($p < 0,05$).

3.2.2 Ruohoiset suot

Ruohoisten soiden fosforifraktioiden yhteenlasketusta määrästä 60 % on rautafosforia ja 27 % on alumiinifosforia. Orgaanista rautafosforia on 35 % koko fraktiosta ja epäorgaanista rautafosforia 22 %. Orgaanista alumiinifosforia on hieman enemmän kuin epäorgaanista alumiinifosforia. Helppoliukoinen fosfori ja kalsiumfosfori edustavat kumpikin noin 3 % kokonaisfosforista ja epäorgaaniset ja orgaaniset osuudet jakautuvat niiden sisällä lähes tasan. Fraktioiden vaihteluvälit on esitetty liitteessä 3.

Ruohoisilla korvilla ja rämeillä oli erittäin samankaltaiset suhteet fosforifraktioiden määrissä. Ainoastaan epäorgaanista kalsiumfosforia oli suhteessa enemmän rämeillä (liite 2). Korvilla oli enemmän rauta- ja alumiinifraktioita kuin rämeillä (liite 4). Ruohoisilla rämeillä fosforifraktioiden suhteellinen hajonta oli suurempi kuin korvilla, lukuun ottamatta orgaanista kalsiumfosforia (taulukko 3). Fosforifraktioiden osuus kokonaisfosforista ruohoisilla korvilla oli 41 % ja ruohoisilla rämeillä 45 %.

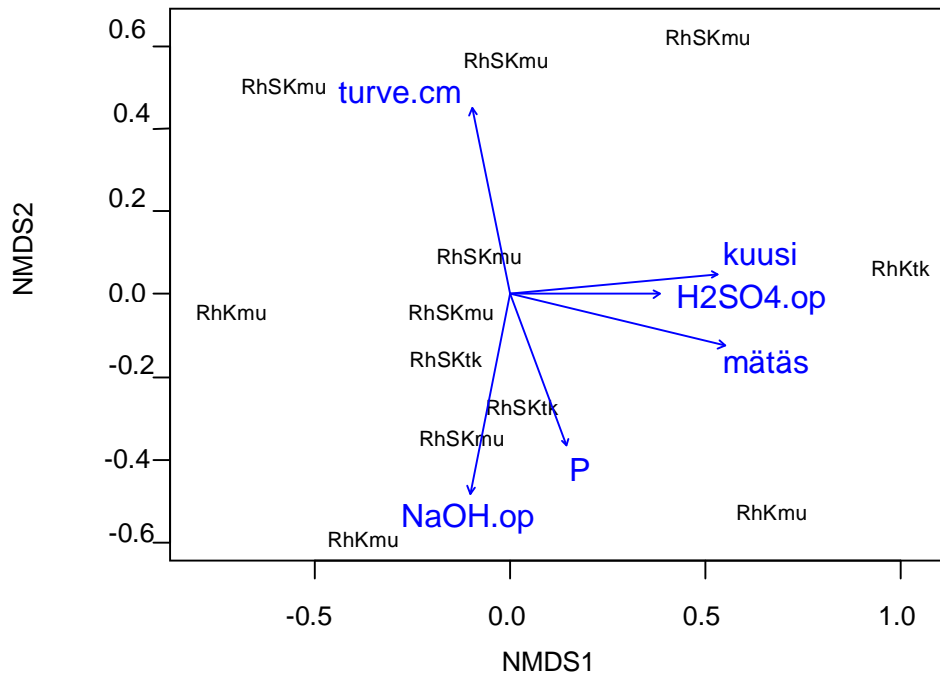
Koelaordinaatiosta tuli ilmi korpien ja rämeiden selvä kahtiajako kasvillisuuden perusteella (kuva 6). Vasemmalla ordinaatioon sijoituivat korvet sekä yksi soistuneeksi turvekankaaksi luokiteltu ruohoinen sararäme. Oikealle ordinaatioon sijoituivat rämeet. Vahvasti kasvillisuusaineiston kanssa korreloivat orgaaninen alumiinifosfori ($r = 0,45$) ja orgaaninen rautafosfori ($r = 0,62$), joiden määrät lisääntyivät suoraan korpisuus-rämeisyysgradienttia pitkin korpien suuntaan. Myös kokonaisfosforin määrä ja puuston tilavuus kasvoivat samaan suuntaan mainittujen fraktioiden kanssa. Lisäksi kuusen osuus korreloi kasvillisuusaineiston kanssa.



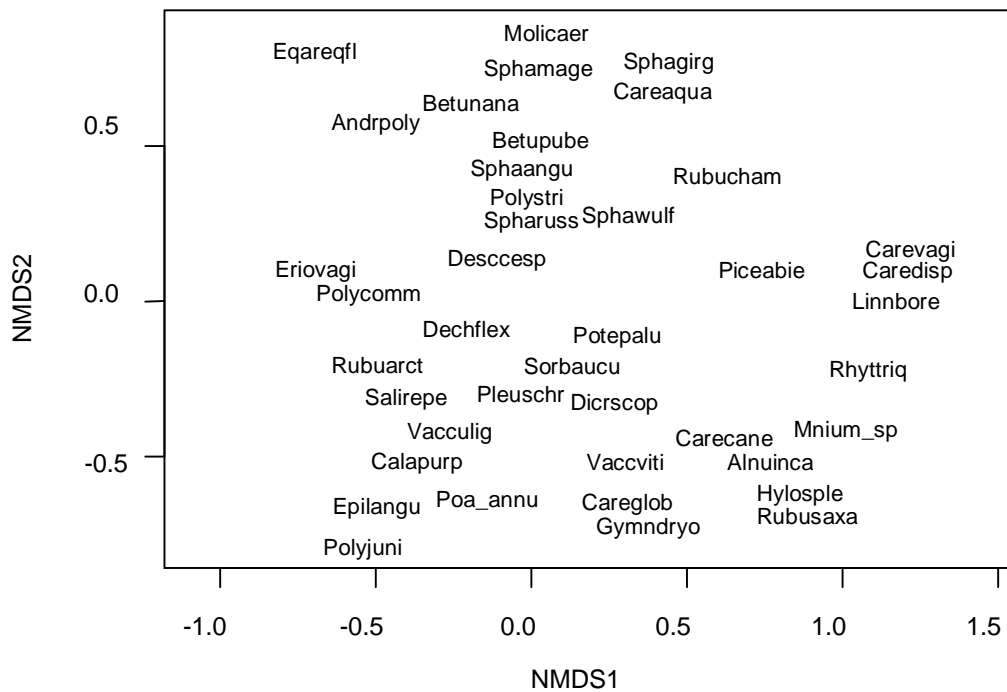
Kuva 6. Ruohoisten soiden koelaordinaatio vektorisovituksella ($p < 0,05$).

Korpien koelaordinaatiossa ruohokorvet sijoittuivat akselin 1 keski- ja alaosaan (kuva 7). Koelajojen ekologinen vaihtelusuunta näkyi kasvillisuusordinaatiosta, jossa kosteusgradientti myötäilee ordinaatioakselia 2 (kuva 8). Aitokorpisista ja lehtomaisista lajeista ovat esimerkkeinä metsäimarre, metsäkerrossammal ja maitohorsma (*Gymnocarpium dryopteris*, *Hylocomium splendens*, *Epilobium angustifolium*). Kosteusakselin yläpäässä löytyvät märkyyttä (luhtaisuutta, lettoisuutta ja nevaisuutta) ilmentäviä lajeja kuten suokukka, siniheinä, kuirisammalryhmä ja monet rahkasammalet (*Andromeda polifolia*, *Molinia caerulea*, *Calliergon sp.*, *Sphagnum sp.*). Muuta gradienttia ordinaatiosta ei löytynyt.

Vektorisovitus vahvasti kasvillisuusordinaatiossa esille tulleen ekologisen gradientin. Turpeen paksuus lisääntyi märille kasvupaikoille kun taas kokonaisfosfori ja orgaaninen rautafosfori ($r = 0,88$) korreloivat korpisuuden kanssa. Kuusen ja mättään osuus, kuten myös kalsiumfosforin määrä ($r = 0,67$) lisääntyi poikittain tätä gradienttia vastaan.

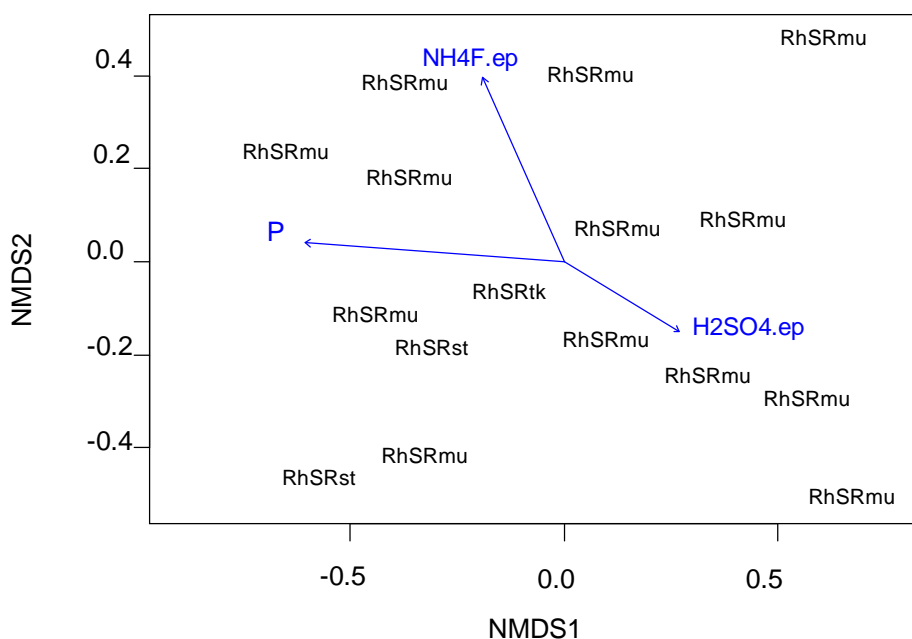


Kuva 7. Ruohokorpien ja ruohoisten sarakorpien koelaordinaatio ja ympäristömuuttujat vektorisovituksella ($p < 0,05$).

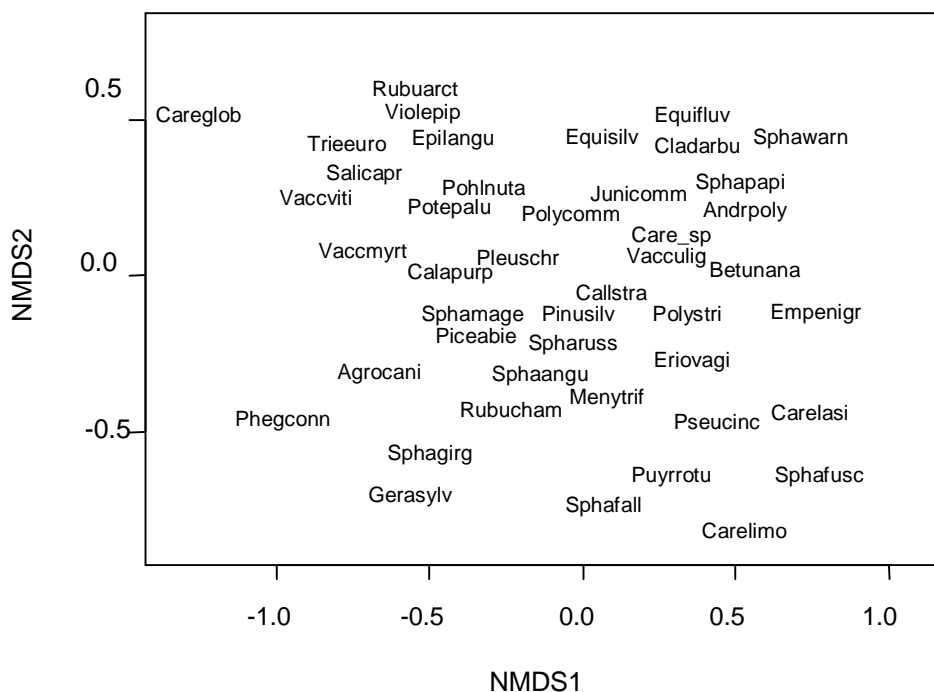


Kuva 8. Ruohokorpien ja ruohoisten sarakorpien kasvillisuusordinaatio.

Ruohoisten rämeiden koelaordinaatiossa (kuva 9) kokonaisfosfori ja epäorgaaninen alumiinifosfori ($r = 0,73$) lisääntyvät vinosti ordinaatioakselia 1 pitkin pienemmille akselin arvoille, kun puolestaan epäorgaaninen kalsiumfosfori ($r = 0,71$) lisääntyy akselin suuremmille arvoille. Ympäristömuuttujat jakavat näin koelatunnuksilta varsin homogeenisen aineiston. Kasvillisuusordinaatiossa (kuva 9) näkyy metsäisyys- vs. avosuogradientti (nevaisuus- ja lettoisuus). Gradientti seuraa pitkälti kalsiumfosforin vektorin suuntaa. Gradientin ylävasemmalla on korpien lajeja kuten metsätähtimö, korpiorvokki ja pallosara (*Trientalis europea*, *Viola epipsila*, *Carex globularis*). Vastakkaisessa suunnassa näkyy nevaisuuden ja lettoisuuden vaikutus. Jouhisara, harsusara, sararahkasammal ja variksenmarja (*Carex lasiocarpa*, *Carex limosa*, *S. fallax*, *Empetrum nigrum*) ovat nevojen tyypillisiä lajeja. Isotalvikki ja kiiltolehväsammal (*Pyrola rotundifolia*, *Pseudobryum cinclodides*) esiintyvät letoilla. Kokonaisfosfori ja epäorgaaninen alumiinifosfori korreloivat reunavaikutteisten, metsäisten kasvupaikkojen kanssa. Sen sijaan epäorgaaninen kalsiumfosfori korreloi nevaisuuden ja lettoisuuden leimaamien kasvupaikkojen kanssa.



Kuva 9. Ruohoisten sararämeiden koelaordinaatio ja ympäristömuuttujien vektorisovitus ($p < 0,05$).



Kuva 10. Ruohoisten sararämeiden kasvillisuusordinaatio.

3.2.3 Pien- ja suursaraiset suot

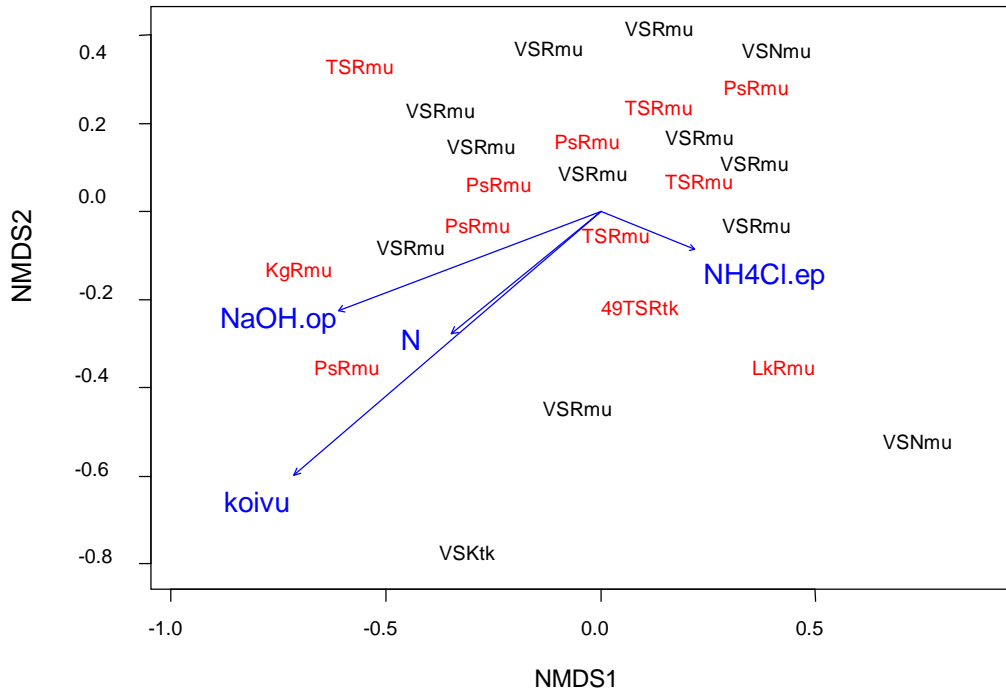
Suursaraisten soiden fosforifraktioista 54 % on rautafosforia, 29 % on alumiinifosforia, 10 % on helppoliukoista fosforia ja 7 % on kalsiumfosforia. Rautafosforista yli kaksinkertainen määrä on orgaanisessa muodossa verrattuna epäorgaaniseen. Alumiinifosforin määrät jakautuvat tasaisesti orgaaniseen ja epäorgaaniseen fraktioon. Helppoliukoisen ja kalsiumfosforin orgaanisissa ja epäorgaanisissa osuuksissa ei ole merkittävää eroa.

Piensaraisilla soilla 43 % fraktioista on rautafosforia, 31 % alumiinifosforia ja jopa 19 % helppoliukoista fosforia. Kalsiumfosforia on vain 4 %. Orgaanista rautafosforia on yli kaksinkertainen määrä epäorgaaniseen verrattuna kun taas alumiinifosforin orgaaniset ja epäorgaaniset määrät eivät eroa merkittävästi toisistaan. Helppoliukoista epäorgaanista fosforia on nelinkertainen määrä orgaaniseen verrattuna. Kalsiumfosforia on kaksi kertaa enemmän epäorgaanisessa kuin orgaanisessa muodossa. Liitteessä 3 on esitetty fraktioiden vaihteluvälit (mg kg^{-1}). Fosforifraktioiden osuus kokonaisfosforista suursaraisilla soilla on 49 % ja piensaraisilla soilla 42 %.

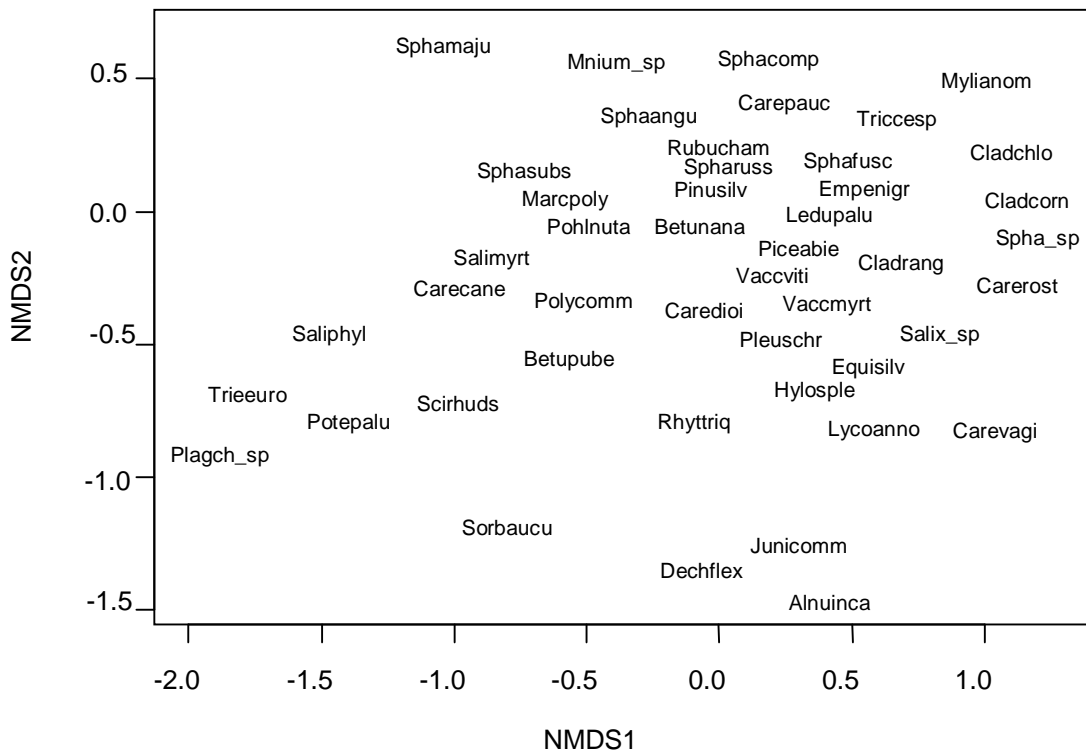
Järjestyslukusummien perusteella pien- ja suursaraisten soiden fosforifraktiomäärät ovat suhteessa melko samankaltaiset, lukuun ottamatta epäorgaanista helppoliukoista ja rautafosforia. Suursaraisilla soilla on enemmän rautafosforia ja vähemmän helppoliukoista fosforia kuin piensaraisilla soilla (liite 2).

Tehtäessä koealaordinaatio pien- ja suursaraisille ryhmille erikseen mikään ympäristömuuttuja ei korreloinut kasvillisuusaineiston kanssa ($p < 0,05$). Ryhmien yhteisessä ordinaatiossa koealat järjestäytyivät heterogeenisesti ja suotyypit eivät näytä muodostavan omia ryhmiään (kuva 11). Kasvillisuusordinaatiosta sen sijaan erottui selvä ravinteisuusgradientti ordinaation alavasemmalta yläoikealle (kuva 12). Lounaaseen sijoittui meso-eutrofisia lajeja kuten kiiltopaju, keräpäärahkasammal ja metsätähti (*Salix phylicifolia*, *S. subsecundum*, *Trientalis europea*). Koilliseen ryhmittyi karujen rämeiden ja nevojen lajeja kuten tupasluikka, rahkanäivesammal ja torvijäkälä (*Trichoforum cespitosum*, *Mylia anomala*, *Cladonia sp.*).

Ympäristömuuttujista korreloi kasvillisuusaineiston kanssa merkitsevästi koivun osuus puuston tilavuudesta, typen kokonaismäärä, orgaaninen rautafosfori ($r = 0,70$) sekä epäorgaaninen helppoliukoinen fosfori ($r = 0,72$). Orgaaninen rautafosfori lisääntyy ravinteisemmille kasvupaikoille kun puolestaan epäorgaaninen helppoliukoinen fosfori korreloi positiivisesti karumpien kasvupaikkojen (LkR, VSN) ja karun kasvillisuuden kanssa, kuten suopursu ja poronjäkälä (*Ledum palustre*, *Cladonia sp.*).



Kuva 11. Pien- ja suursaraisten suotyypin koelaordinaatio ja ympäristömuuttujien vektorisovitus ($p < 0,05$). Piensaraiset suot on merkitty punaisella ja suursaraiset suot mustalla



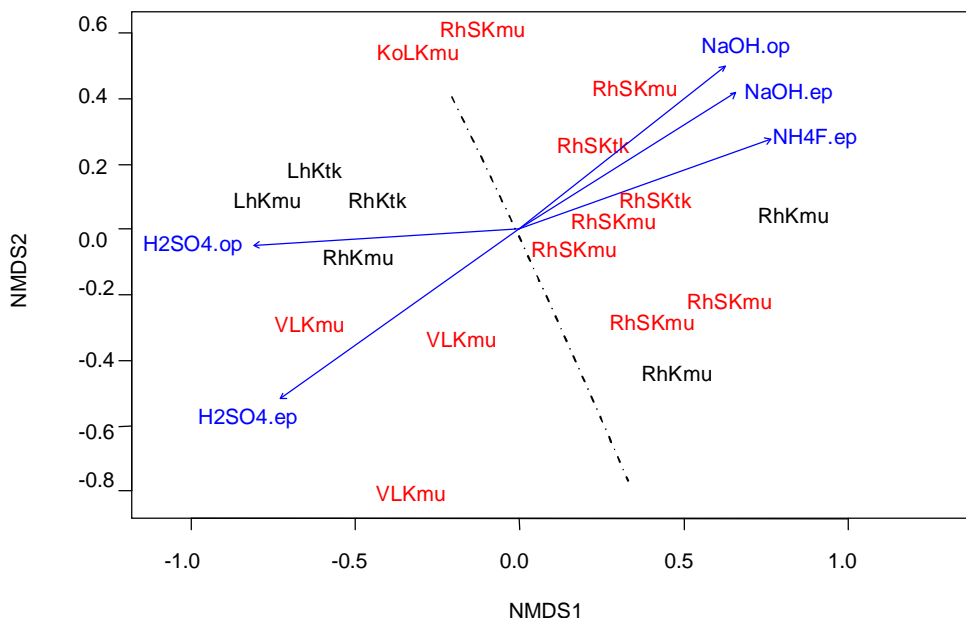
Kuva 12. Pien- ja suursaraisten soiden kasvillisuusordinaatio.

3.3 Fosforifraktioiden ekologiset vaihtelusuunnat turvekangastyypeillä

3.3.1 Ruohoturvekankaat

Ruohoturvekankaiden fosforifraktioiden jakauma on lähellä ruohoisten korpjen vastaavaa. Varsinaisten lettojen vaikutus turvekangasryhmässä näkyy helppoliukoisen fosforin ja kalsiumfosforin kasvaneina osuuksina (liite 2).

Koealaordinaatiossa (kuva 13) turvekankaat järjestäytyivät selvästi fraktioiden korrelaatio-suuntien perusteella kahteen ryhmään. RhSK ja kaksi RhK metsikköä korreloivat epäorgaanisen rautafosforin ($r = 0,57$), orgaanisen rautafosforin ($r = 0,69$) ja epäorgaanisen alumiinifosforin ($r = 0,54$) kanssa ja sijoittuvat oikealle puolelle ordinaatiossa. Varsinaiset lettokorvet, loput ruohokorvista ja lehtokorvet puolestaan sijoittuivat epäorgaanisen kalsiumfosforin ($r = 0,71$) ja orgaanisen kalsiumfosforin ($r = 0,61$) vektoreiden osoittamaan suuntaan. Epävarmoiksi tapauksiksi turvekangaskehitykseltään luokitellut suotyypit ryhmittäytyivät rauta- ja alumiinifosforin osoittamalle puolelle, lukuun ottamatta varsinaisia lettokorpia.

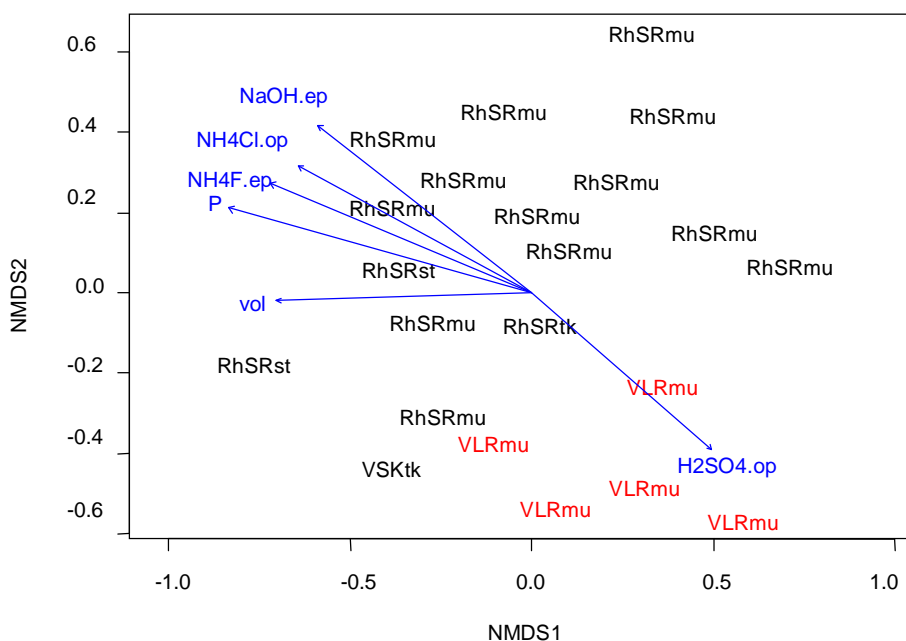


Kuva 13. Ruohoturvekankaiden koealaordinaatio ja ympäristömuuttujien vektorisovitus. Väri erottaa turvekankaiksi kehittyvät suotyypit (musta) ja epävarmoiksi turvekangaskehitykseltään luokitellut suotyypit (punainen).

3.3.2 Mustikkaturvekagas II

Mustikkaturvekankaalla fosforifraktioiden jakaumat ovat pitkälti ruohoisten sararämeiden kaltaisia. Varsinaiset lettorämeet turvekangasryhmässä vaikuttavat fraktioiden suhteisiin niin, että orgaanista kalsiumfosforia on mustikkaturvekankailla ruohoisiin sararämeisiin verrattuna suhteellisesti enemmän (liite 2).

Mustikkaturvekankaat jakoutuivat ordinaatiossa kahteen selvästi erottuvaan ryhmään (kuva 14). Suurin osa ruohoisista sararämeistä korreloi vahvasti kokonaisfosforin pitoisuuden ja puuston tilavuuden sekä epäorgaanisen rautafosforin ($r = 0,59$), epäorgaanisen alumiinifosforin ($r = 0,60$) ja orgaanisen helppoliukoisen fosforin ($r = 0,62$) kanssa. Epävarmat suotyypit turvekehityksen suhteen (VLR) sijoittuvat ordinaatiossa orgaanisen kalsiumfosforin ($r = 0,52$) osoittamaan kulmaan.

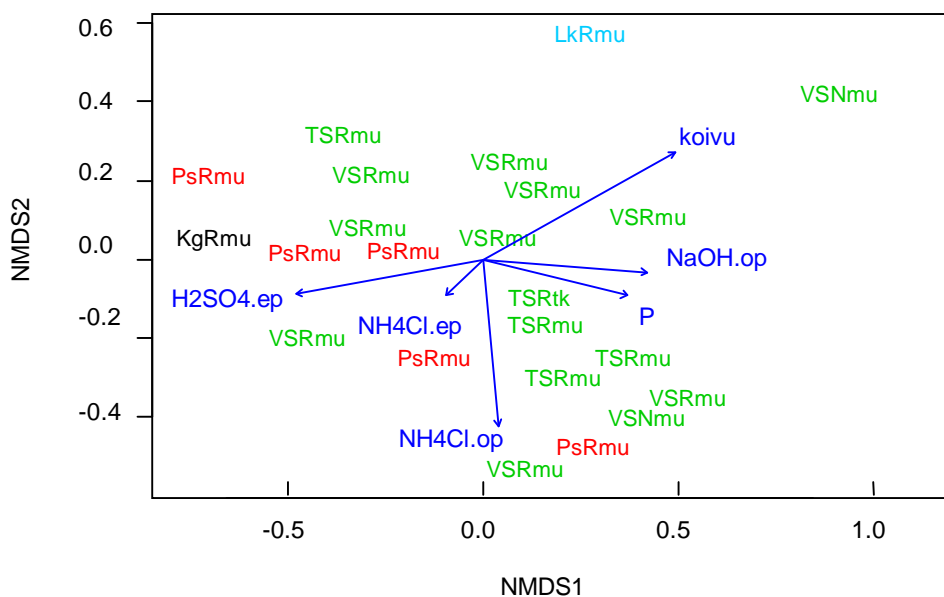


Kuva 14. Mustikkaturvekankaiden koelaordinaatio ja ympäristömuuttujien vektorisovitus. Väri erottaa turvekankaiksi kehittyvät suotyypit (musta) ja epävarmoiksi turvekangaskehitykseltään luokitellut suotyypit (punainen).

3.3.3 Puolukkaturvekangas I, II ja varputurvekangas.

Puolukkaturvekangas I ja II sekä varputurvekangasta ei voi verrata suotyyppien ravinteisuusluokkiin, sillä suotyyppien jako on näillä aivan erilainen. Fraktioiden keskimääräiset osuudet, vaihteluvälit sekä niiden järjestysluvut turvekangasryhmissä on esitetty taulukossa 3 sekä liitteissä 2 ja 3.

Koealaordinaatiossa Ptkg II ryhmän suot järjestäytyivät vinosti ordinaation vasempaan laitaan (kuva 15). Tämän ryhmän kaikki suot, lukuun ottamatta kangasrämettä, ovat huonosti tunnettuja turvekangaskehityksen suhteen. Ptkg II ryhmän kanssa korreloi lievästi epäorgaaninen kalsiumfosfori ($r = 0,54$) ja orgaaninen- sekä epäorgaaninen helppoliukoinen fosfori ($r = 0,67$ ja $r = 0,49$). Ptkg I sijoittuivat hieman lomittain Ptkg II kanssa ja levittäytyivät viistosti ordinaation oikealle puolelle. Kokonaisfosfori, koivun osuus sekä orgaanisen rautafosforin ($r = 0,65$) määrä kasvoivat samaan suuntaan, jossa Ptkg I dominoi.



Kuva 15. Puolukkaturvekangas I ja II sekä varputurvekankaan koealaordinaatio ja ympäristömuuttujien vektorisovitus. Väri erottaa Ptkg II:ksi kehittyvät suotyypit (musta) ja epävarmoiksi turvekangaskehitykseltään luokitellut suotyypit (punainen). Ptkg I (vihreä) ja Vtkg (sininen) kehitys tunnetaan (kts. myös liite 1).

4 TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Koejärjestelyiden ja analyysimenetelmien arviointi

Tämän tutkimuksen koealojen alkuperäisiä suotyyppejä ei varmuudella tiedetä sillä kasvupaikat on määritetty muuttuma- tai turvekangasvaiheessa. Sarasto (1962) on kuitenkin todennut, että alkuperäisen suotyypin erottaminen kasvipeitteen avulla on mahdollista kaikissa kuivumisvaiheissa. Ainoastaan pitkälle kuivuneilla soilla suotyypin määrittäminen on vaikeaa. Tutkimusaineistossa valtaosa koealoista oli tarkasteluhetkellä muuttumavaiheessa, ainoastaan 9 % koealoista oli turvekankaita ja 5 % soistuneita turvekankaita. Aineiston koealat olivat mittaushetkellä pääosin 20-30 vuotta vanhoja (ojitettu 1960-70 luvulla) ja vanhimmat ojitukset olivat 1930-luvulta. Ojituksen jälkeinen sukkessio turvekankaaksi kestää Pohjois-Suomessa huomattavasti pidempään kuin etelässä. Humidisuus kasvaa ja lämpösumma alenee pohjoista kohti, jolloin olosuhteet eivät ole turvekangaskehitykselle otolliset (Heikurainen ja Pakarinen 1983). Täten voidaan olettaa, että suurin osa turvekankaiden alkuperäisen suotyypin määrittämisistä on ollut varsin helppo tehdä ja pitänee paikkansa.

Turvenäyte otettiin tässä tutkimuksessa 5-10 cm:n syvyydeltä, joka edustaa erityisesti aluskasvillisuudelle tärkeää kerrosta ravinteiden oton kannalta. Kuitenkaan tämä kerros ei todennäköisesti ole puiden ravinteidenotolle oleellisin kerros. Laine (1989) on todennut, että ojitetuilla soilla voi esiintyä kerroksellisuutta, jolloin karumman pintaturpeen alla alle puolen metrin syvyydessä voi olla ravinteisempaa turvetta. Täten fosforimäärien ja kasvillisuuden korrelaatioita tässä tutkimuksessa on tarkasteltava kriittisesti. Turvenäytteet yhdistettiin kolmelta samaan suotyyppiin kuuluvalla koealalla metsikkökuviokohtaiseksi, jolloin saatiin erittäin suurta pinta-alaa edustava näyte. Samoin kasvillisuusaineiston kohdalla on analyseissä käytetty metsikkökuviokohtaisia peittävyksiä. Näin koelakokohtainen vaihtelu on häivytetty ja keskiarvot edustavat varsin suurta alaa. Siksi fosforin fraktioiden tutkimuksessa olisi tulevaisuudessa tarkasteltava paikallista kasvillisuuden ja turpeen fosforin suhdetta. Tässä tutkimuksessa ei valitettavasti voitu tehdä tilastollista analyysiä yksittäisistä mittauksista vaan oli tyydyttävä kokoomanäytteiden arvoihin, koska turvenäytteet oli ennen kemiallista analyysiä jo yhdistetty metsikkökohtaisiksi. Kasvillisuusaineiston keruun yhteydessä virhelähteeksi voidaan mainita ihmisen epätarkkuus peittävyksien mittaajana. Kasvilajien projektiopeittävyksien arviointi lienee mahdoton tehdä

samalla kalibroinnilla jokaisen osakasvuston ja koealan kohdalla. Toisaalta sama henkilö on suorittanut kaikki kasvillisuuskartoitukset, joten arviot ovat keskenään vertailukelpoisia. Kasvilajien peittävyuden arviointiin käytetty Norrlinin asteikko tuo jonkin verran epätarkkuutta tuloksiin johtuen luokkavälien asteittaisesta kasvamisesta suurista arvoista kohti.

Changin ja Jacksonin (1957) menetelmässä fosforia fraktioidaan uuttoliosten avulla hypoteettisesti neljään fraktioon. Liuokset eivät kuitenkaan ole täysin fraktiospesifejä, vaan uuttavat usein jonkun verran myös muita fosforin muotoja. Esim. NH_4F -uutto, jonka pitäisi liuottaa Al-sidotun fosforin, liuottaa myös pieniä määriä Fe-fosforia (2,2 - 7,5 % kokonaisrautafosforista) ja Ca-fosforia (alle 1 % kokonaiskalsiumfosforista). Menetelmässä virhe korjataan poistamalla Al-fraktiosta se määrä fosforia, joka vastaa 10 % NaOH-uutolla saatua Fe-sidottua fosforia ja lisäämällä se Fe-fosfori fraktioon. Näin päästään tulokseen, jonka pitäisi poiketa korkeintaan kahdella ppm:llä todellisesta määrästä. Fe- ja Ca-sidotun fosforin fraktiointiin käytetyt uuttoliuokset antavat todenmukaisia määriä olettaen, että määrityksessä edetään menetelmän uuttojärjestyksen mukaan (Chang ja Jackson 1957). Helppoliukoinen fosfori on erityisen vaikea uuttaa niin, että määrät vastaisivat luonnollisissa olosuhteissa helposti kasvien ulottuvilla olevaa fosforia. Yleisesti käytetyt uuttoliuokset (NH_4OAc ja NH_4Cl) liuottavat jauhamisen seurauksena merkittäviä määriä fosforia paitsi turpeesta, myös elävästä biomassasta (kuten juurista ja mikro-organismeista). Rehevän kasvupaikan uuttoliuoksissa fosfori (sekä alun perin helppoliukoinen fosfori että ns. biomassasta vapautuva fosfori) pidättyy turvenäytteeseen tiukasti alumiinin ja raudan oksidien kanssa, kun näytteen jauhamisen seurauksena oksidien pidättymispinta-ala kasvaa. Näin rehevillä kasvupaikoilla on kemiallisten analyyseiden tulosten perusteella vähemmän helppoliukoista fosforiä kuin karuilla. Karuilla soilla ns. biomassasta vapautuva fosfori jää analysoitavaan uuttoliuokseen, jolloin se ei kuvasta todellista kasveille käyttökelpoista fosforia. (Nieminen ja Penttilä 2004). Tässäkin tutkimuksessa esiintyvä kasvupaikkojen ravinteisuusgradientin ja helppoliukoisen fosforin välinen negatiivinen korrelaatio oletetaan johtuvan juuri analyysimenetelmien puutteista.

NMDS-analyysi vastaa Minchin (1987) vertailujen perusteella muita ordinaatiomenetelmiä paremmin todellisuutta. Thorpen (1983) esittämästä kriittisestä huolimatta menetelmän etuina pidetään sen mahdollisuuksia havainnollistaa hyvinkin monimutkaisia otosyksiköiden välisiä suhteita ja sen soveltuvuutta kuvata habitaattien

välisiä eroja (Ranta ym. 2005). NMDS-analyysin tuloksia olisi kuitenkin tarkasteltava kaikissa dimensioissa, jotta korrelaation suunnasta saisi täysin oikean kuvan. Useimmiten valitaan tarkastelun kohteeksi ne dimensiot, joissa stressiarvo pienenee merkittävästi dimensiosta seuraavaan siirryttäessä. Yleensä kolmen tai neljän dimension jälkeen stressiarvo ei enää pienene. Neljättä dimensiota taas ei käytännössä ole tapana esittää, koska se on vaikea hahmottaa. Tämän tutkimuksen tulokset olisi esitetty todenmukaisempina, jos jokaisesta NMDS-ordinaatiokuvasta olisi esitetty kaikki kolme dimensiota. Kahden dimension ordinaatioskuvassa kahden vektorin suunta voi näyttää samalta, vaikka todellisuudessa korrelaatio suunnat eroaisivatkin toisistaan 90 astetta kolmatta dimensiota tarkasteltaessa. Tässä tutkimuksessa kuitenkin valittiin esittää systemaattisesti vain kaksi dimensiota, sillä useimmissa ordinaatioissa kolmas dimensio ei tuonut tulkintaan merkittävästi uutta informaatiota.

4.2 NMDS-ordinaation tulokset

Koealojen NMDS-ordinaatiossa pien- ja suursaraiset suotyypit ryhmittyvän tiivisti yhteen, kun taas letot ovat levittäytyneet laajalle alueelle. Erot ovat osaksi selitettävissä sillä, että nevojen ja karujen rämeiden kasvillisuus on yleisesti lajikäyhempiä kuin lettoryhmän. Pohjois Suomessa esiintyy lisäksi kasvillisuudeltaan erittäin vaihtelevia lettoja alueen geologisesta monimuotoisuudesta johtuen, mm. Kainuun viherliuske-esiintymät lisäävät paikoin turpeen emäksisyyttä. Lettojen ja lehtomaisten soiden NMDS-ordinaatiossa yksikään fosforifraktio ei korreloinut merkittävästi kasvillisuusaineiston kanssa (kuva 5). Tahvanainen (2005) on saanut vastaavia tuloksia Kainuusta, jossa pääkationien määrät ja suhteet lettokasvupaikoilla vaihtelivat suuresti, kun ne puolestaan karummilla suotyypeillä olivat yhdenmukaisemmat.

Koko aineiston NMDS-ordinaatiossa koealat järjestäytyivät ravinteisuusgradientin sekä metsäisyys vs. avosuo gradientin mukaan, joka samalla on kosteusgradientti. Vastaavia tuloksia on saanut Pakarinen (1985), joka havaitsi pohjoissuomalaisten luonnontilaisten suotyyppien järjestäytyvän ordinaatiossa trofian ja kosteusgradientin mukaan. Myös turvekankailla on havaittu samat ekologiset vaihtelusuunnat (Starr 1982, Reinikainen 1988). Pakarinen ja Ruuhijärvi (1978) ovat lisäksi maininneet Pohjois-Suomen soiden erikoispiirteeksi suotyyppien järjestäytymisen ohutturpeisen reuna- ja paksutturpeisen keskustavaikutusgradientin mukaisesti. Tässä tutkimuksessa ruohoiset rämeet järjestäytyivät kyseisen gradientin mukaan.

Kaikki fosforifraktiot saivat merkitseviä korrelaatioita kasvillisuusaineiston kanssa koko aineiston NMDS-ordinaatiossa, lukuun ottamatta helppoliukoista orgaanista fosforia. Fosforifraktioiden korrelaatiot olivat lisäksi varsin lineaarisia, kun muiden ympäristömuuttujien korrelaatioissa (turvesyvyys, puuston tilavuus ja typen määrä) ilmeni epälineaarisuutta (liite 5). Koska soiden ravinteisuustasoluokat ja turvekangastyypit ryhmittivät selkeästi NMDS-ordinaatioissa ja fosforifraktiot saivat merkitseviä korrelaatioita, pystyttiin vahvistamaan tutkimuksen 1. postulaatti. Fosforifraktioiden esiintymisessä eri kasvupaikkatyypeillä on merkitseviä eroja. Ordinaatiossa käytetyt muut ympäristömuuttujat vahvistivat havaittuja ekologisia vaihtelusuuntia. Painanne- ja mätäsosakasvustojen osuus lisääntyivät ja turpeen paksuus kasvoi pien- ja suursaraisten soiden sekä varsinaisten lettorämeiden suuntaan. Tämä on tyypillistä avosoiden ja sekatyypin soille (Laine ja Vasander 2005). Ordinaatiossa ilmeni myös Mtkg II:lle tyypillinen piirre, koivuvaltaisuus ja kuusen valtapuuasema letto- ja lehtokorvilla (Laine 1989). Puuston tilavuus ja kokonaisfosfori lisääntyivät ruohoisille sarakorville. Tulos on linjassa useiden tutkimusten kanssa, jossa puustoltaan tuottoisimpien turvekankaiden sekä kokonaisfosforin määrien on osoitettu korreloivan keskenään (Holmen 1964, Westman 1987, Kaunisto ja Paavilainen 1988). Kokonaistyyppi puolestaan lisääntyi varsinaisille lehtokorville ja lehtokorville, minkä ovat todenneet myös mm. Laine ym. (2000).

Fosforifraktioiden yhteenlaskettu osuus kokonaisfosforista nousi karummille kasvupaikoille päin. Letoilla ja lehtomaisilla soilla fraktioiden osuus oli 38 %, ruohoisilla korvilla 41 % ruohoisilla rämeillä 45 % ja suursaraisilla soilla 49 %. Piensaraisilla soilla fraktioiden osuus tosin oli vain 42 %.

Tutkimuksen tuloksia on vaikea verrata muihin tutkimuksiin, sillä fosforin fraktioita turvemaidella ei juuri ole tutkittu. Niemisen ja Penttilän (2004) tulokset neljältä ravinteisuustasolta antavat yleisen kuvan fraktioiden määristä turvemaidella. Yksittäisten suotyyppien, turvekagastyypien sekä kasvillisuusaineiston korrelaatioista fraktioiden kanssa ei ole saatavilla tutkimuksia. Kivennäismailta sen sijaan fosforin fraktiotutkimuksia on runsaasti. Siksi tämän tutkimuksen tuloksia vertaillaan myös kivennäismaiden tuloksiin, pääasiassa tarkastelemalla maan ravinteisuuden vaikutusta eri fraktioiden esiintymiseen.

4.3 Fraktioiden yhteys kasvupaikkatyyppeihin

4.3.1 Orgaaninen ja epäorgaaninen fosfori

Rauta- ja alumiinifosforia oli kaikilla suotyypeillä enemmän orgaanisessa kuin epäorgaanisessa muodossa. Helppoliukoista fosforia oli puolestaan kaikilla suotyypeillä enemmän epäorgaanisessa kuin orgaanisessa muodossa. Kalsiumfosforia oli kasvupaikkatyypeillä myös enemmän epäorgaanisessa muodossa, paitsi letoilla, joilla sitoutuminen orgaaniseen muotoon vallitsi. Jos tekee oletuksen, että tämän tutkimuksen letoilla on kasvupaikoista korkeimmat pH arvot, kuten tavallisesti letoilla on (mm. Laine ym. 2000), kalsiumfosforin osalta tuloksia vahvistaa Rannikko ja Hartikaisen (1980) sekä Kailan (1956b) tutkimukset joissa pH:n ja orgaanisen fosforin välillä on havaittu positiivinen korrelaatio.

Orgaanisen fosforin suhteellinen osuus nousi ravinteisuustason mukaan. Piensaraisilla soilla orgaanisen fosforin osuus kokonaisfosforista oli 44 %, suursaraisilla soilla 48 %, ruohoisilla rämeillä 52 %, letoilla 59 % ja ruohoisilla korvilla 60 %. Tulokset ovat sopusoinnissa Hartikaisen ym. (2006b) kivennäismailla tekemän tutkimuksen kanssa, jossa todistettiin orgaanisen fosforin osuuden lisääntyvän viljavilla mailla. Tutkimuksessa vertailtiin fosforifraktioiden esiintymistä metsämaalla, tavanomaisella pellolla, luomupellolla ja luonnonniityllä. Eniten tyypeä ja hiiltä sisältävä luonnonniitty satoi myös suurimman osan fosforista orgaaniseen muotoon. Kivennäismaiden ja turvemaiden tutkimuksia ei kuitenkaan suoraan voi verrata, sillä turvemaidella orgaanista ainesta on aina runsaasti, kun taas kivennäismailla hiilen pitoisuuksissa on suuria eroja ja orgaanisen aineen runsauden voi kivennäismailla olettaa johtavan fosforin sitoutumiseen orgaanisiin yhdisteisiin. Qualls ja Richardson (1995) ovat kuitenkin todistaneet saman ilmiön turvemaidella.

Orgaanisten fraktioiden ja ravinteisuuden välistä yhteyttä vahvistaa osaltaan myös se, että rehevillä kasvupaikoilla ainoastaan orgaaninen fosfori korreloi merkittävästi kasvillisuusaineiston kanssa. Korpien erillisessä ordinaatiossa merkittäviksi tulivat orgaaninen kalsium- ja rautafosfori niin, että rautafosfori lisääntyi kostuesgradienttia pitkin metsäisille kasvupaikoille. Hieman karumpien ruohoisten rämeiden ordinaatiossa merkittäviksi eivät enää tulleet orgaaniset fraktiot, vaan epäorgaanisesti sidottu alumiini- ja kalsiumfosfori. Tulosten perusteella voidaan todistaa postulaatin 5

mukainen olettaus orgaanisen fosforin ja ravinteisuuden positiivisesta suhteesta turvemailla todeksi. Orgaanisen fosforin kertyminen ravinteisimmille suotyypeille johtuu Qualls ja Richardsonin (1995) mukaan kasvien suuremmasta fosforinotosta rehevillä kasvupaikoilla ja kuolleisiin kasvinosiin varastoituvan fosforimäärän lisääntymisestä, fosforin immobilisaatiosta mikrobibiomassaksi hajotustoiminnan tuloksena sekä fosforin liittymisestä humusyhdisteisiin.

4.3.2 Helppoliukoinen fosfori

Epäorgaaninen helppoliukoinen fosfori korreloi koko aineiston NMDS-ordinaatiossa vähäravinteisempien kasvupaikkojen eli pien- ja suursaraisten rämeiden kanssa. Suhteellisesti eniten (19 %) helppoliukoista fosforia esiintyi piensaraisilla kasvupaikoilla. Useimmat helppoliukoisen fosforin ja kasvupaikkojen ravinteisuuden yhteyttä selvittäneet tutkimukset tukevat tulosta, että helppoliukoinen fosfori korreloi negatiivisesti ravinteisuuden kanssa (Holmen 1964, Starr ja Westman 1978, Nieminen ja Penttilä 2004). Epäorgaaninen helppoliukoinen fosfori tulee merkitseväksi myös pien- ja suursaraisten suotyyppien tarkastelussa, jossa fraktio korreloi ravinteisuusgradientin karumman kasvillisuuden kanssa. Epäorgaanisen helppoliukoisen fosforin osoittamaan suuntaan sijoittui myös kaikkein karuin suotyyppi eli lyhytkortinen räme.

Orgaaninen helppoliukoinen fosfori ei saanut merkitsevää korrelaatiota koko aineistoa tarkasteltaessa. Puolukkaturvekankaiden ja varputurvekankaan yhteisessä NMDS-ajossa sen sijaan orgaaninen helppoliukoinen fosfori korreloi merkitsevästi aineiston kanssa. Korrelaation suunta on lähes sama kuin epäorgaanisen helppoliukoisen fosforin, mutta koska karuimpien turvekankaiden ordinaatiossa ei ilmennyt selvää turvekangastyyppien ryhmittymistä, kuvan tulkinta ei ole yksiselitteinen. Kuitenkin voidaan havaita epävarmoiksi turvekangaskehitykseltään luokiteltujen piensaraisten rämeiden sijoittuvan helppoliukoisen fosforin osoittamaan suuntaan.

Tulosten perusteella postulaatti numero 3 todistettiin pitävän paikkansa. Helppoliukoinen fosfori ei korreloinut positiivisesti kasvupaikkojen ravinteisuuden kanssa. Vaikuttaa siltä, että karuilla kasvupaikoilla olisi helppoliukoista fosforia enemmän kuin rehevämmillä kasvupaikoilla. Kuten aiemmin on todettu (kts. kappale 4.1.) näin ei todennäköisesti ole, vaan oletettavasti rehevillä kasvupaikoilla on

enemmän helppoliukoista fosforia, joka kemiallisessa analyysissä ei tule näkyviin koska rauta- ja alumiinioksidit sitovat sen. Runsas helppoliukoinen fosfori kertoo tässä tutkimuksessa lähinnä fosforia sitovien alumiini- ja rautaoksidien vähäisyydestä turpeessa.

4.3.3 Rauta- ja alumiinifosfori

Rautafosforin orgaanista ja epäorgaanista fraktiota löytyi absoluuttisesti eniten ruohoisilta korvilta (liite 4). Ruohoisten soiden NMDS-ajossa orgaaninen rautafosfori korreloi aitokorpisten lajien kuten metsäimarteen ja maitohorsman (*Gymnocarpium dryopteris*, *Epilobium angustifolium*) kanssa. Epäorgaanista rautafosforia oli seuraavaksi eniten ruohoisilla rämeillä ja orgaanista rautafosforia seuraavaksi eniten suursaraisilla soilla ja ruohoisilla rämeillä. Vaikka rautafosforia esiintyi vähiten pien- ja suursaraisilla soilla, näiden soiden NMDS-ordinaatiossa orgaaninen rautafosfori kuitenkin jakoi aineiston ($p < 0,70$). Rautafosfori korreloi jälleen ravinteisemmän, meso-eutrofisen kasvillisuuden, kuten kiiltopajun (*Salix phylicifolia*) ja ojituksen seurauksena yleistyneen metsätähtimön (*Trientalis europea*) kanssa.

Turvekangastyyppejä tarkasteltaessa eniten orgaanista rautafosforia oli yllättäen varputurvekankaalla liitteessä 4 esitettyjen järjestyslukuarvojen perusteella, mutta on otettava huomioon, että ryhmään kuului vain yksi koeala. Seuraavaksi eniten orgaanista rautafosforia oli ruohoturvekankaalla sekä puolukkaturvekangas II:lla. Epäorgaanista rautafosforia oli turvekangastyypin vertailussa eniten myös rehevimmillä kasvupaikoilla eli ruohoturvekankaalla ja mustikkaturvekangas II:lla.

Epäorgaaninen alumiinifosfori korreloi koko aineiston NMDS-ajossa enemmän karujen suotyyppien kanssa kuin muut alumiini- ja rautafosforifraktiot. Alumiinifosforia oli epäorgaanisessa muodossa absoluuttisesti eniten suursaraisilla soilla ja seuraavaksi eniten piensaraisilla soilla sekä ruohoisilla rämeillä. Kuitenkin epäorgaaninen alumiinifosfori jakoi ruohoisten rämeiden aineiston NMDS-ordinaatiossa, korreloiden voimakkaasti reunavaikutteisten, metsäisten lajien kuten korpiorvokin (*Viola epipsila*) ja mesimarjan (*Rubus arcticus*) kanssa. Näin postulaatin 2 oletus rauta- ja alumiinifosforin fraktioiden positiivisesta suhteesta puustoltaan tuottavien kasvupaikkojen kanssa ei täysin pidä paikkansa epäorgaanisen alumiinifosforin kohdalla.

Orgaanista alumiinisidottua fosforia puolestaan oli absoluuttisesti eniten ruohoisissa korvissa ja määrät vähenivät molempiin suuntiin ravinteisuusakselilla. Orgaaninen alumiinifosfori korreloi ruohoisten soiden NMDS-ordinaatiossa voimakkaasti korpityyppien kanssa (kuva 6). Ruohoisilta soilta saadut tulokset todistavat tutkimuksen 2. postulaatin osittain oikeaksi. Korpi- ja rämekasvupaikat eroavat rauta- ja alumiinifosforin suhteen niin, että orgaaninen rauta- ja alumiinifosfori lisääntyvät voimakkaasti ($r = 0,62$ ja $r = 0,45$) korpikasvupaikoille. Epäorgaaniset fraktiot kuitenkin eivät saneet merkitseviä korrelaatioita.

Rauta- ja alumiiniyhdisteiden määrät soilla ja sen kautta fosforin assosioituminen kyseisten mineraalien kanssa on sidoksissa suon ravinnetilaan. Reunavaikutteisille, luhtaisille ja lähteisille soille tulee enemmän mineraaliyhdisteitä kuin keskustavaikutteisille soille (Laine ym. 2000). Turvemaiden kasvien ulottuvilla oleva fosforivaranto riippuu positiivisesti pidättävien oksidien määrästä, käytännössä rauta- ja alumiinioksideista (mm. Cuttle 1983, Kaila 1959, Nieminen ja Jarva 1996). Turpeen adsorptioreaktioita säätelevä tasapainotila puolestaan kontrolloi oksidipinnoilta ja orgaanisen aineksen pinnoilla pidättyneen fosforin vapautumista suoveteen. Mineraaliyhdisteet siis sekä pidättävät että vapauttavat fosforia. Cuttle (1983) sai suurimman korrelaation fosforin pidättymisindeksin ja liukoisen raudan (HCl-uutto) välillä 0-15 cm:n turvekerroksessa. 15-30 cm:n turvekerroksessa puolestaan tärkein fosforin sitoutumiseen vaikuttava tekijä oli liukoisen alumiinin esiintyminen. Hartikainen ym. (2006b) ovat erilaisilla kivennäismailla todenneet 89-92 % sitoutuneesta fosforista olevan assosioitunut raudan kanssa. Karuilla soilla fosforin saatavuus kasveille on ongelmallinen pienempien mineraalivarantojen ja usein alhaisemman pH:n johdosta, minkä takia fosfori sitoutuu oksidipinnoille tiukemmin. Karuilla soilla oletetaankin kasvien juurieritteiden ja juurikarvojen yhteydessä toimivien mykorritsasienten merkityksen ravinteidenotossa olevan suuri, mutta näiden tekijöiden vaikutus fosforin saatavuuteen orgaanisilla mailla tunnetaan huonosti.

Valmari (1970) osoitti kasvien fosforinoton olevan suurempi rautarikkailla turvemaidella kuin rautaköhyillä. Nieminen ja Penttilä (2004) ovat puolestaan todenneet puuston kasvun korreloivan positiivisesti orgaanisen alumiini- ja rautafosforin sekä epäorgaanisen rautafosforin kanssa. Epäorgaaninen alumiinifosfori ei korreloinut merkitsevästi puuston kasvun kanssa. Edellä mainitut tulokset indikoivat erityisesti

orgaanisesti sidotun raudan ja alumiinin oksidien olevan tärkeässä roolissa fosforin varastoinnissa ja ravinteen käyttökelpoisuuden säätelyssä kasveille. Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat samaan suuntaan. Koko aineiston NMDS-ajossa orgaaniset alumiini- ja rautafosforifraktiot sekä epäorgaaninen rautafosfori korreloivat vahvasti puustoltaan tuottoisimpien turvekankaiden eli ruohoisten korpityyppien kanssa.

Turvekangastyypin NMDS-ordinaatioissa näkyy epävarmoiksi turvekangaskehitykseltään luokiteltujen suotyyppien erot. Mustikkaturvekangas II:n suotyypeistä ruohoisilla sararämeillä oli NMDS-ordinaation perusteella selvästi enemmän fosforia sidottuna raudan ja alumiinin kanssa kuin samaan turvekangastyypin kuuluvilla varsinaisilla lettorämeillä, joiden kehitystä turvekankaiksi ei tunneta. Sama pätee ruohoturvekankaiden NMDS-ordinaatioissa varsinaisille lettokorville, jotka ryhmittäytyivät täysin vastakkaiseen suuntaan rauta- ja alumiinifosforin kanssa. Näiden tulosten perusteella varsinaiset lettorämet ja lettokorvet todennäköisesti eivät kehity puustoltaan tuottaviksi turvekankaiksi.

Ruohoturvekankaiden NMDS-ordinaatioissa kaikki Laineen ja Vasanderin (2005) epävarmoiksi turvekangaskehitykseltään luokitellut ruohoiset sarakorvet sijoittuivat rauta- ja alumiinifosforin osoittamaan suuntaan. Tulos viittaa siihen, että ruohoiset sarakorvet voisivat kehittyä puustoltaan tuottaviksi turvekankaiksi kuivatuksen edetessä tarpeeksi pitkälle. Sen sijaan neljä tunnetusti turvekankaiksi kehittyvää kasvupaikkaa (LhK ja RhK) korreloivat ehkä yllättäen voimakkaimmin kalsiumin sitoman fosforin kanssa.

4.3.4 Kalsiumfosfori

Fosforin sitoutuminen kalsiumyhdisteiden kanssa kasvaa pH:n noustessa, mikä tarkoittaa kasveille heikkoa fosforin käyttökelpoisuutta. Kyseinen sitoutumismekanismi voi olla osasyynä runsasravinteisten lettojen huonoon puuston kasvuun. Tässä tutkimuksessa koko aineiston NMDS-analyysi osoittaa kalsiumfosforin selkeän korrelaation lettojen, erityisesti lettorämeiden kanssa. Näillä suotyypeillä kalsiumfosforia oli myös absoluuttisesti eniten. Kalsiumfosforia oli seuraavaksi eniten ruohoisilla rämeillä.

Epäorgaanista kalsiumfosforia oli kasvupaikkojen vertailussa runsaasti myös piensaraisilla kasvupaikoilla, kun taas orgaanista kalsiumfosforia oli ravinteisilla kasvupaikoilla enemmän kuin karuilla. Tämä kahtiajako kalsiumfosforifraktioiden kohdalla näkyy koko aineiston NMDS-ordinaatiossa. Epäorgaaninen kalsiumfosforin vektori osoittaa lievästi karuille kasvupaikoille päin, orgaanisen kalsiumfosforin osoittaessa suoraan lettokasvupaikoille. Epäorgaaninen kalsiumfosfori korreloi rimpisyyttä ilmentävien kasvien, kuten siniheinän (*Molinia caerulea*) ja leväkön (*Scheuchzeria palustris*) kanssa. Runsaana esiintyessään siniheinä indikoi voimakasta kalin ja fosforin puutetta (Vasander ja Laine 2005). Fosforin puute voidaan tämän tutkimuksen perusteella selittää fosforin taipumuksella sitoutua epäorgaanisen kalsiumin kanssa rimpisillä eli metsänkasvatuksellisesti heikoilla lettokasvupaikoilla. Heikosti liikkuva vesi rimpisuolla luo epäsuotuisat olosuhteet kasvillisuuden kehittymiselle sekä hapellisten mikro-organismien toiminnalle. Näin fosforin sitoutuminen orgaanisiin yhdisteisiin vähenee fosforin epäorgaanisen sitoutumisen kustannuksella. Korkea pH lettomaisilla kasvupaikoilla puolestaan vaikuttaa fosforin tiukkaan sitoutumiseen kalsiumin kanssa ja fosforin käyttökelpoisuus kasveille heikkenee. Myös ruohoisten sararämeiden ordinaatiossa epäorgaaninen kalsiumfosfori osoitti avosuokasvillisuuden kuten mutasaran ja jouhisaran (*Carex limosa*, *Carex lasiocarpa*) leimaamaan osaan gradienttia. Tulosten perusteella tutkimuksen 3. postulaatti voidaan todistaa pitävänsä paikkansa, eli fosfori sitoutuminen kalsiumin kanssa lisääntyy lettomaisilla kasvupaikoilla.

Ruohoturvekankaiden sekä mustikkaturvekangas II:n ordinaatioissa kalsiumfosfori korreloi samaan suuntaan epävarmoiksi turvekangaskehitykseltään määriteltyjen suotyyppeiden kanssa (VLK ruohoturvekankailla ja VLR mustikkaturvekangas II:lla). Näillä kasvupaikoilla fosforin käyttökelpoisuus on todennäköisesti huono, eikä niistä ehkä kehity ruohoturvekankaita.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Turvemaiden fosforin sitoutuminen orgaaniseen muotoon korreloi positiivisesti kasvupaikkojen ravinteisuuden kanssa. Rauta- sekä alumiinifosforia oli kaikilla kasvupaikoilla enemmän orgaanisessa muodossa. Kalsiumfosfori puolestaan oli kaikilla kasvupaikoilla, paitsi letoilla, enemmän sidottu epäorgaaniseen muotoon.

Helppoliukoinen fosfori korreloi tutkimuksen postulaatin mukaisesti negatiivisesti kasvupaikkojen ravinteisuuden kanssa. Karuilla kasvupaikoilla (pien- ja suursaraisilla soilla) oli kokonaisfosforiin suhteutettuna suurempi osuus helppoliukoista fosforia kuin rehevämmillä kasvupaikoilla. Tämä ilmiö johtuu todennäköisesti helppoliukoisen fosforin liittyvistä määritysongelmista kemiallisen analyysin yhteydessä. Näillä määritysmenetelmillä helppoliukoinen fosfori kuvaa todellisuudessa rauta- ja alumiinioksidien vähäisyyttä.

Orgaaniset alumiini- ja rautafosforifraktiot sekä epäorgaaninen rautafosfori korreloivat NMDS-ordinaatiossa merkitsevästi puustoltaan tuottoisimpien turvekankaiden eli ruohoisten korpityyppien kanssa. Epäorgaanista alumiinifosforia sen sijaan oli eniten suursaraisilla soilla. Näin voidaan olettaa, että erityisesti epäorgaanisella alumiini- ja rautafosforilla sekä orgaanisella rautafosforilla on merkittävä rooli puustoltaan tuottavien kasvupaikkojen ravinteidenotossa. Tutkimus valotti Laineen ja Vasanderin (2005) turvekangasluokitusta siltä osin, että epävarmoiksi turvekangaskehitykseltään luokitellut varsinaiset lettorämeet ja varsinaiset lettokorvet sijoittuivat NMDS-analyysissä vastakkaiseen suuntaan lisääntyvään rauta- ja alumiinifosforiin nähden ja korreloivat positiivisesti kalsiumfosforin kanssa. Näin voidaan epäillä, kehittykö niistä puustoltaan erityisen tuottavia turvekankaita. Toisaalta epävarmoiksi luokitellut ruohoiset sarakorvet korreloivat positiivisesti raudan ja alumiinifosforin kanssa. Nämä turvekankaat voisivat ravinnetalouden puolesta ehkä ajan myötä kehittyä puustoltaan tuottaviksi kasvupaikoiksi.

Tässä tutkimuksessa NMDS-ordinaatio osoitti kalsiumfosforin korreloivan lettoisten ja rimpisten kasvupaikkojen sekä fosforin puutetta ilmentävän kasvillisuuden, kuten siniheinän (*Molinia caerulea*) kanssa. Fosforin puute voidaan tämän tutkimuksen perusteella selittää fosforin taipumuksella sitoutua vahvasti kalsiumin kanssa korkean pH:n kasvupaikoilla, kuten metsänkasvatuksellisesti heikoilla lettokasvupaikoilla.

LÄHDELUETTELO

Aro, L. & Kaunisto, S. 2002. Relationship between some soil properties and nutrition and height growth of Scots pine on cutaway peatlands. Julkaisussa: Gardiner, E.S. & Breland, L.J. (toim.). Proceedings of the IUFRO conference on restoration of boreal and temperate forests, Vejle. Danish Centre for Forest and Landscape Planning. Reports 11: 145-146.

Barber, S. 1984. Soil nutrient bioavailability. John Wiley & Sons, Inc. USA. 384 s.

Brady, N.C. 1984. The nature and properties of soils. Macmillan Publishing Company, USA. 960 s.

Brække F.H. & Finér L. 1991. Fertilizations effects on surface peat on pine bogs. Scandinavian Journal of Forest Research 6: 433-449.

Cajander, A.K. 1913. Studien über die Moore Finnlands. Acta Forestalia Fennica 2(3): 1-108.

Chang, S.C. & Jackson, M.L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. Soil science 84: 133-144.

Cuttle, S.P. 1983. Chemical properties of upland peats influencing the retention of phosphate and potassium ions. Journal of Soil Science 34: 75-82.

Dormaar J.F. & Webster G.R. 1963. Determination of total organic phosphorus in soils by extraction method. Canadian Journal of Soil Science 43: 35-43.

Fife, C.V. 1959. An evaluation of ammonium fluoride as selective extractant for aluminium bound soil phosphate. II. Preliminary studies on soils. Soil Science 87: 83-88.

Finér, L. 1989. Biomass and nutrient cycle in fertilized and unfertilized pine, mixed birch and pine and spruce stands on a drained mire. Acta Forestalia Fennica 208: 1-63.

Ghoshal, S. & Jansson, S.L. 1975. Transformation of phosphorus in organic matter decomposition studies with special reference to the immobilization aspect. Swedish Journal of Agricultural Research 5: 199-208.

Hartikainen, H., Karppinen, M., Rätty, M., Soinne, H., Turtola, E. & Uusitalo, R. 2006a. Orgaaninen fosfori kasvien fosforinlähteenä ja vesistökuormittajana. Loppuraportti. Helsingin Yliopisto, Soveltavan kemian ja mikrobiologian laitos. Helsinki. 42 s.

Hartikainen, H., Karppinen, M. & Uusitalo, R. 2006b. Maan fosforivarat ja niiden käyttökelpoisuus. Teoksessa: Alakukku, L. (toim.). Maaperän prosessit - pellon kunnan ja ympäristönhoidon perusta, s. 12-22. MMM:n maaperätutkimusohjelman loppuraportti. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. 127 s.

Hedley, M.J., Stewart, W.B. & Chauchan, B.S. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. Soil Science Society of America Journal 46: 970-976.

- Heikurainen, L. 1972. Peatland classification for forestry in Finland. Julkaisussa: Proceedings of the 4th International Peat Congress, Otaniemi, Finland, June 25-30. s. 435-450.
- Heikurainen, L. & Pakarinen, P. 1983. Suokasvillisuus ja suotyypit. Teoksessa: Laine, J. (toim.). Suomen suot ja niiden käyttö. Suoseura ry. Helsinki. s. 14-23.
- Holmen, H. 1964. Forest ecological studies on drained peatland in the province of Uppland, Sweden. Parts I-III. *Studia Forestalia Suecica* 16. 236 s.
- Hotanen, J. P. 2003. Multidimensioneal site description of peatlands drained for forestry. *Silva Fennica* 37: 55-93.
- Huikari, O. 1952. Suotyypin määrittäminen maa- ja metsätaloudellista käyttöarvoa silmällä pitäen. *Silva Fennica* 75. 22 s.
- Hämet-Ahti, L., Suominen, J., Ulvinen, T. & Uotila, P. (toim.) 1998: Retkeilykasvio 4. uudistettu painos. Luonnontieteellisen keskusmuseon kasvimuseo, Helsinki. 656 s.
- Jayacjandran, K., Schwab, A.P. & Hetrick, B.A.D. 1992. Mineralization of organic phosphorus by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology & Biochemistry* 24: 867-903.
- Jeglum, J.K. & He, F. 1995. Pattern and vegetation-environment relationship in a boreal forested wetland in northeastern Ontario. *Canadian Journal of Botany* 73: 629-637.
- Kaila, A. 1948. Viljelysmaan orgaanisesta fosforista. Valtion maatalouskoetöiminnan julkaisuja 129. Helsinki. 118 s.
- Kaila, A. 1955. Studies on the colorimetric determination of phosphorus in soil extracts. *Acta Agralia Fennica* 83: 25-47.
- Kaila, A. 1956a. Phosphorus in various depths of some virgin peat lands. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 28: 90-103.
- Kaila, A. 1956b. Phosphorus in virgin peat soils *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 28: 142-167.
- Kaila, A. 1958. Availability for plants of phosphorus in some virgin peatlands *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 30: 133-142.
- Kaila, A. 1959. Retention of phosphorus by peat samples. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 31(3): 215-225.
- Kaila, A. & Virtanen, O. 1955. Determination of organic phosphorus in samples of peat soils. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 27: 104-115.
- Kaunisto, S. 1997. Peatland forestry in Finland: problems and possibilities from the nutritional point of view. Teoksessa: Trettin, C.C., Jurgensen, M.F., Grigal, D.F., Gale,

- M.R. & Jeglum, J.K. (toim.). Northern forested wetlands: Ecology and Management. CRC Press, Boca Raton. s. 287-401.
- Kaunisto, S. & Paavilainen, E. 1988. Nutrient stores in old drainage areas and growth of stands. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 145: 1-39.
- Kellogg, L. & Bridgham, S.D. 2003. Phosphorus retention and movement across an ombrotrophic-minerotrophic peatland gradient. *Biogeochemistry* 63: 299-315.
- Kent, M & Coker, P. 1992. Vegetation description and analysis; a practical approach. John Wiley & Sons, England. 363 s.
- Laiho, R. & Alm, J. 2006. Turvemaiden ravinnevarat. Julkaisussa: Ahti, E., Kaunisto, S., Moilanen, M. & Murtovaara, I. (toim.). Suosta metsäksi. Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. Tutkimusohjelman loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 947. s. 40-45.
- Laiho, R. & Laine, J. 1994. Nitrogen and phosphorus stores in peatlands drained for forestry in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 9:251-260
- Laine, J. 1989. Metsäojitettujen soiden luokittelu. *Suo* 40:37-51.
- Laine, J., Laiho, R., Minkkinen, K. & Vasander, H. 2006. Forestry and peatland ecosystems. Teoksessa: Wieder, R.K. & Vitt, D.H. (toim.). Boreal peatland ecosystems. *Ecological studies* 188. Springer-Verlag, Heidelberg. s. 331–357.
- Laine, J. & Minkkinen, K. 1998. Metsäojitus ja kasvihuoneilmiö. Teoksessa: Vasander, H. (toim.). Suomen suot. Suoseura ry. Helsinki. 168 s.
- Laine, J., Laiho, R., Minkkinen, K. & Vasander, H. 2006. Forestry and peatland ecosystems. Teoksessa: Wieder, R.K. & Vitt, D.H. (toim.). Boreal peatland ecosystems. *Ecological studies* 188. Springer-Verlag, Heidelberg. s. 331–357.
- Laine, J., Minkkinen, K., Laiho, R., Tuittila E-S. & Vasander H. 2000. Suokasvit - turpeen tekijät. Helsingin yliopiston Metsäekologian laitoksen julkaisuja 24. 55 s.
- Laine, J & Vanha-Majamaa, I. 1992. Vegetation ecology along a trophic gradient on drained pine mires in southern Finland. *Annales Botanici Fennici* 29: 213-233.
- Laine, J. & Vasander, H. 2005. Suotyytit ja niiden tunnistaminen. Metsäkustannus Oy, Hämeenlinna. 110 s.
- Laine, J., Vasander, H., Laiho, R. 1995. Long-term effect of water level drawdown on the vegetation on drained pine mires in southern Finland. *Journal of Applied Ecology* 32: 785-802.
- Makarov, M. I., Haumaier, L., Zech, W. & Malysheva, T.I. 2004. Organic phosphorus compounds in particle-size fractions of mountain soil in the northwest Caucasus. *Geoderma* 26: 267-286.
- Mannerkoski, H. 1973. Ekologisia havaintoja eräältä ojitetulta suolta. *Silva Fennica* 7: 129–151.

- Minchin, P. R. 1987. An evaluation of the relative robustness of techniques of ordination. *Vegetatio* 69: 89-107.
- Moberg, R. & Holmåsén, I. 1982. *Lavar. En fälthandbok*. Interpublishing, Stockholm. 240 s.
- Naucke, W., Heathwaite, A.L., Eggesmann, R. & Schuch, M. 1993. Mire chemistry. Teoksessa: Heathwaite, A.L. & Göttlich, K. (toim.). *Mires, Processes, Exploitation and Conservation*. John Wiley & Sons, Chichester. s. 261-309.
- Nieminen, M. & Jarva, M. 1996. Phosphorus adsorption by peat from drained mires in southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11(4): 321-326.
- Nieminen, M. & Penttilä, T. 2004. Inorganic and organic phosphorus fractions in peat from drained mires in northern Finland. *Silva Fennica* 38: 243-251.
- Nieminen, M. & Pätilä, A. 1990. Karujen rämeiden luokittelu pintakasvillisuuden ja ravinnetunnusten avulla. *Folia Forestalia* 749. 29 s.
- Oksanen, J. 2007. R-programme version 2.4.1, Vegan package. (Ohjelma julkisella ftp-palvelimella).
<<http://cc.oulu.fi/~jarioksa/softhelp/vegan.html>>. (Haettu 12.1.2007).
- Paarlahti, K., Reinikainen, A. & Veijalainen, H. 1971. Nutritional diagnosis of Scots pine stand by needle and peat analysis. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 74(5). 58 s.
- Paavilainen, E. 1980. Effect of fertilization on plant biomass and nutrient cycle on a drained dwarf shrub pine swamp. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*. 98(5): 1-71.
- Pakarinen, P. 1985. Numerical approaches to the classification of north Finnish mire vegetation. *Aquilo Series Botanica* 21:111-116.
- Pakarinen, P. & Ruuhijärvi, R. 1978. Ordination of northern Finnish peatland vegetation with factor analysis and reciprocal averaging. *Annales Botanici Fennici* 15:147-157.
- Penttilä, T. & Hokkanen, M. 1986. Suometsien pysyvien koealojen (SINKA) maastotyöohjeet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 226. 98 s.
- Qualls, R.G. & Richardson, C.J. 1995. Forms of soil phosphorus along a nutrient enrichment gradient in the northern Everglades. *Soil Science* 3: 183-188.
- Rannikko, M. & Hartikainen, H. 1980. Retention of applied phosphorus in Sphagnum peat. *Proceedings of the 6th International Peat Congress, Duluth, Minnesota, August 17-23*. s. 666-669.
- Ranta, E., Rita, H. & Kouki, J. 2005. *Biometria. Tilastotiedettä ekologeille*. Yliopistopaino, Helsinki. 569 s.
- Reinikainen, A. 1988. Metsäojitettujen soiden kasvupaikkaluokituksen suunnanhakua. *Suo* 39(3): 61-71.

- Richardson, A.E., Hadobas, P.A., Hayes, J.E. 2001. Extracellular secretion of *Aspergillus* phytase from *Arabidopsis* roots enables plants to obtain phosphorus from phytate. *The Plant Journal* 25: 641-649.
- Saarela, I. 2002. Phosphorous in Finnish soils in the 1900s with particular reference to acid ammonium acetate soil test. *Agricultural and food science in Finland*. 11: 257-271.
- Schneider, H. & Westman, C. J. 1987. Relation of peat nutrients to ground vegetation in communities on sedge pine fens. *Suo* 38(2): 29-36.
- Silvola, J. 1988. Effect of drainage and fertilization on carbon output and nutrient mineralization of peat. *Suo* 39: 27-37.
- Starr, M. 1982. The development of drained peatland forest sites in Finland. Ph. D. Thesis. Department of Geography, Faculty of Pure Science, University of Sheffield. 311 s.
- Starr, M. & Westman, C.J. 1978. Easily extractable nutrients in the surface layer of virgin sedge-pine swamps. *Silva Fennica* 12: 65-78.
- Sundström, E., Magnusson, T. & Hånell, B. 2000. Nutrient dynamics in drained peatlands along a north-south climatic gradient in Sweden. *Forest Ecology and Management*. 126: 149-161.
- Tahvanainen, T. 2005. Diversity of water chemistry and vegetation of mires in the Kainuu region, middle boreal Finland. University of Joensuu, PhD Dissertation in Biology, Joensuu. 27 s.
- Thorpe, R. S. 1983. A review of the numerical methods for recognizing and analyzing racial differentiation. *Teoksessa: Felsenstein, J. (toim.). Numerical taxonomy*, s. 404-423. Berlin.
- Tolonen, K. & Seppänen, P. 1976. Comparison of ombrotrophic and minerotrophic mire waters in Finland. *Proc. 5th Int. Peat Congress, Pozhnan, Poland. Section II: 73-89. Int. Peat Society, Jyväskylä.*
- Ulvinen, T., Syrjänen, K., Anttila, S. 2002. Suomen sammalet - levinneisyys, ekologia, uhanalaisuus. *Suomen ympäristö 560. Vammala*. 354 s.
- Vahtera, E. 1955. Metsänkasvatusta varten ojitettujen soitten ravinnepitoisuuksista. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*. 108 s.
- Valk, U. 1973. Possibilities of evaluating nutrient content in oligotrophic bog peat according to tree growth and vegetation type. *Metsäanduslikud Uurimused* 10: 245–259. (Venäjäksi englanninkielisellä yhteenvedolla).
- Valmari, A. 1956. Über den Edaphischen bonität von Mooren Nordfinnlands. *Acta Agralia Fennica*. 88: 1-126.

- Valmari, A. 1970. On the relationship between iron and available phosphorus in peat soil. *Aquilo Series Botanica* 10: 1-7.
- Valtakunnan metsien inventoinnin maastotyöohjeet. 1977. Yleinen osa. Metsäntutkimuslaitos, metsänarvioimisen tutkimusosasto. 59 s. + liitteet.
- Vesihallinnon analyysimenetelmät. 1981. Vesihallitus. Tiedotus 213. 136 s.
- Walbridge, M.R. & Navaratnam, J.A. 2006. Phosphorus in boreal peatlands. Teoksessa: *Boreal peatland ecosystems*. Wieder, R.K. & Vitt, D.H. (toim.). Springer-Verlag, Heidelberg. s. 231-258.
- Westman, C. J. 1981. Fertility of surface peat in relation to the site type and potential stand growth. *Acta Forestalia Fennica* 172. 77 s.
- Westman, C.J. & Laiho, R. 2003. Nutrient dynamics of peatland forests after water-level draw-down. *Biochemistry* 63: 296-298.
- Wheeler, B.D. & Proctor, M.C.F. 2000. Ecological gradients, subdivision and terminology of northwest European mires. *Journal of Ecology* 88: 187-203.
- Ylivainio, K., Esala, M. & Turtola E. 2002. Luonnonmukaisen ja tavanomaisen viljelyn typpi- ja fosforihuuhtoutumat. *Maa- ja elintarviketaous* 12. 74 s.
- Yli-Halla, M. & Lumme, I. 1987. Behaviour of certain phosphorus and potassium compounds in a sedge peat soil. *Silva Fennica* 3: 251-257.

LIITE 1

Tekstissä esiintyvä nimistö sekä käytetyt lyhenteet. Turvekangastyyppien kehitys suotyypeistä. (Laine ja Vasander 2005).

Ravinteisuus- luokka	Lyhenne	Suotyyppi
1	VLK	Varsinainen lettokorpi
1	KoLK	Koivulettokorpi
1	LhK	Lehtokorpi
1	VLR	Varsinainen lettoräme
2	RhSK	Ruohoinen sarakorpi
2	RhK	Ruohokorpi
2	MK	Mustikkakorpi
2	PK	Puolukkakorpi
2b	RhSR	Ruohoinen sararäme
3	VSK	Varsinainen sarakorpi
3	VSR	Varsinainen sararäme
3	VSN	Varsinainen saraneva
4	PsR	Pallosararäme
4	KgR	Kangasaräme
4	IR	Isovarpuräme
4	TSR	Tupasvillasararäme
4	LkR	Lyhytkortinen räme

Lyhenne	Turvekangastyyppi	Kehittyy suotyypistä	Kehitys epävarma
Rhtkg	Ruohoturvekangas	LhK, RhK	VLK, RhSK
Mtkg II	Mustikkaturvekangas II	RhSR, RhSN, VSK	VLR
Ptkg I	Puolukaturvekangas I	KgR	PsK, PsR
Ptkg II	Puolukaturvekangas II	VSR, VSN, TSR	
Vtkg	Varputurvekangas	LkR	

LIITE 2

Fosforifraktioiden järjestyspisteiden keskiarvot (Friedman) ravinteisuustasoluokilla ja turvekangastyypeillä.

		Mean Rank
Letot	NH4Cl-ep	3.27
	NH4F-ep	3.27
	NaOH-ep	3.55
	H2SO4-ep	4.91
	NH4Cl-op	2.73
	NH4F-op	4.82
	NaOH-op	7.91
	H2SO4-op	5.55
Ruoh. korvet	NH4Cl-ep	1.92
	NH4F-ep	5.08
	NaOH-ep	6.42
	H2SO4-ep	3.00
	NH4Cl-op	3.00
	NH4F-op	6.08
	NaOH-op	7.92
	H2SO4-op	2.58
Ruoh. rämeet	NH4Cl-ep	2.25
	NH4F-ep	4.50
	NaOH-ep	6.38
	H2SO4-ep	4.31
	NH4Cl-op	2.50
	NH4F-op	5.94
	NaOH-op	7.92
	H2SO4-op	2.58
Suur- saraiset	NH4Cl-ep	4.08
	NH4F-ep	5.85
	NaOH-ep	5.62
	H2SO4-ep	2.69
	NH4Cl-op	2.77
	NH4F-op	5.23
	NaOH-op	7.69
	H2SO4-op	2.08
Pien- saraiset	NH4Cl-ep	5.00
	NH4F-ep	5.58
	NaOH-ep	4.50
	H2SO4-ep	3.75
	NH4Cl-op	2.25
	NH4F-op	5.83
	NaOH-op	7.17
	H2SO4-op	1.92

		Mean Rank
Rhtkg	NH4Cl-ep	2.78
	NH4F-ep	4.39
	NaOH-ep	5.22
	H2SO4-ep	3.72
	NH4Cl-op	2.94
	NH4F-op	5.50
	NaOH-op	7.89
	H2SO4-op	3.56
Mtkg II	NH4Cl-ep	2.36
	NH4F-ep	4.32
	NaOH-ep	5.77
	H2SO4-ep	4.23
	NH4Cl-op	2.59
	NH4F-op	5.82
	NaOH-op	7.73
	H2SO4-op	3.18
Ptkg I	NH4Cl-ep	4.00
	NH4F-ep	5.67
	NaOH-ep	4.50
	H2SO4-ep	4.67
	NH4Cl-op	1.83
	NH4F-op	6.33
	NaOH-op	7.33
	H2SO4-op	1.67
Ptkg II	NH4Cl-ep	4.53
	NH4F-ep	5.94
	NaOH-ep	5.29
	H2SO4-ep	2.76
	NH4Cl-op	2.76
	NH4F-op	5.18
	NaOH-op	7.41
	H2SO4-op	2.12

LIITE 3 (1/2)

Fosforifraktioiden (mg kg^{-1}) tunnuslukuja eri kasvupaikkaryhmissä. Keskimääräiset osuudet (\bar{x}), keskihajonta (SD), normaalijakautuneisuus Shapiro-Wilk indexillä (S-W) sekä jakauman symmetrisyys (g). 1 = normaalijakautunut, 0 = ei normaalijakautunut kun $p < 0,05$.

Ravinteisuustasoluokat. 1 = lettoiset ja lehtomaiset suot, 2 = ruohoiset korvet, 2b = ruohoiset rämeet, 3 = suursaraiset suot, 4 = piensaraiset suot.

rav	NH4Cl- ep	NH4Cl- op	NH4F- ep	NH4F- op	NaOH- ep	NaOH- op	H2SO4- ep	H2SO4- op
1	N	11	11	11	11	11	11	11
	Min	1.40	3.42	1.26	15.22	1.94	68.30	3.81
	Max	83.37	23.01	45.36	121.09	97.59	219.21	97.81
	g	1.24	0.41	0.47	1.243	0.77	-0.47	.183
	S-W	0	1	1	1	1	1	0
2	N	12	12	12	12	12	12	12
	Min	2.09	7.11	3.88	30.23	9.91	171.11	3.44
	Max	32.06	30.62	146.81	218.22	211.89	291.52	43.05
	g	1.39	0.92	0.46	0.89	-0.75	-0.453	1.407
	S-W	0	1	1	1	1	0	0
2b	N	16	16	16	16	16	16	16
	Min	4.20	3.79	5.86	38.87	11.69	59.10	8.27
	Max	63.20	39.80	124.17	176.14	294.74	280.31	86.55
	g	1.62	0.84	0.48	0.85	1.11	-0.71	1.474
	S-W	1	1	1	1	1	0	0
3	N	13	13	13	13	13	13	13
	Min	4.68	4.09	12.35	3.42	9.22	92.77	1.27
	Max	148.75	28.11	197.75	168.92	379.76	303.35	110.43
	g	1.76	0.46	1.02	0.37	2.80	-0.47	2.357
	S-W	0	1	1	1	1	0	0
4	N	12	12	12	12	12	12	12
	Min	5.40	0.88	6.56	13.87	1.96	12.90	1.47
	Max	144.58	28.44	201.78	163.89	125.08	240.66	82.08
	g	0.32	0.28	1.75	0.80	0.74	-0.44	1.43
	S-W	1	1	1	1	1	1	0

LIITE 3 (2/2)

Turvekangastyypit. 1 = Rhtkg, 2 = Mtkg II, 3 = Ptkg I, 4 = Ptkg II, 5 = Vtkg.

tk g	NH ₄ Cl- ep	NH ₄ Cl- op	NH ₄ F- ep	NH ₄ F- op	NaOH- ep	NaOH- op	H ₂ SO ₄ - ep	H ₂ SO ₄ - op
1	N	19	19	19	19	19	19	19
	Min	2.09	7.11	3.88	17.16	1.94	68.31	1.27
	Max	148.75	30.62	146.80	218.22	211.89	291.53	78.74
	g	2.33	0.47	1.03	.87	-0.14	-0.70	.89
	S-W	0	1	1	1	1	1	0
2	N	21	21	21	21	21	21	21
	Min	1.40	3.42	1.26	15.21	6.96	59.10	3.80
	Max	63.20	39.80	124.17	176.13	294.74	280.32	97.81
	g	1.80	1.09	.75	.99	1.25	-0.569	1.19
	S-W	0	0	0	0	0	1	0
3	N	6	6	6	6	6	6	6
	Min	12.59	7.87	34.61	20.94	3.93	15.91	13.50
	Max	99.40	20.47	79.07	163.89	93.45	181.26	82.07
	g	1.25	0.68	0.34	0.27	0.13	-0.683	1.20
	S-W	0	1	1	1	1	1	1
4	N	17	17	17	17	17	17	17
	Min	4.68	4.09	12.35	3.42	1.963	12.90	1.46
	Max	144.58	28.44	201.78	168.92	379.76	303.36	110.43
	g	0.80	0.40	0.88	0.65	2.92	-0.798	2.58
	S-W	0	1	1	1	0	1	1
5	N	1	1	1	1	1	1	1

LIITE 4

Fosforifraktioiden järjestyslukusummien keskiarvot (Kruskall-Wallis) ravinteisuusluokissa ja turvekangastyypeillä. Ravinteisuustasoluokat: 1 = lettoiset ja lehtomaiset suot, 2 = ruohoiset rämeet, 2b = ruohoiset korvet, 4 = suursaraiset suot, 5 = piensaraiset suot. Turvekangastyyppit: 1 = Rhtkg, 2 = Mtkg II, 3 = Ptkg I, 4 = Ptkg II, 5 = Vtkg.

Ravinteisuustasoluokat

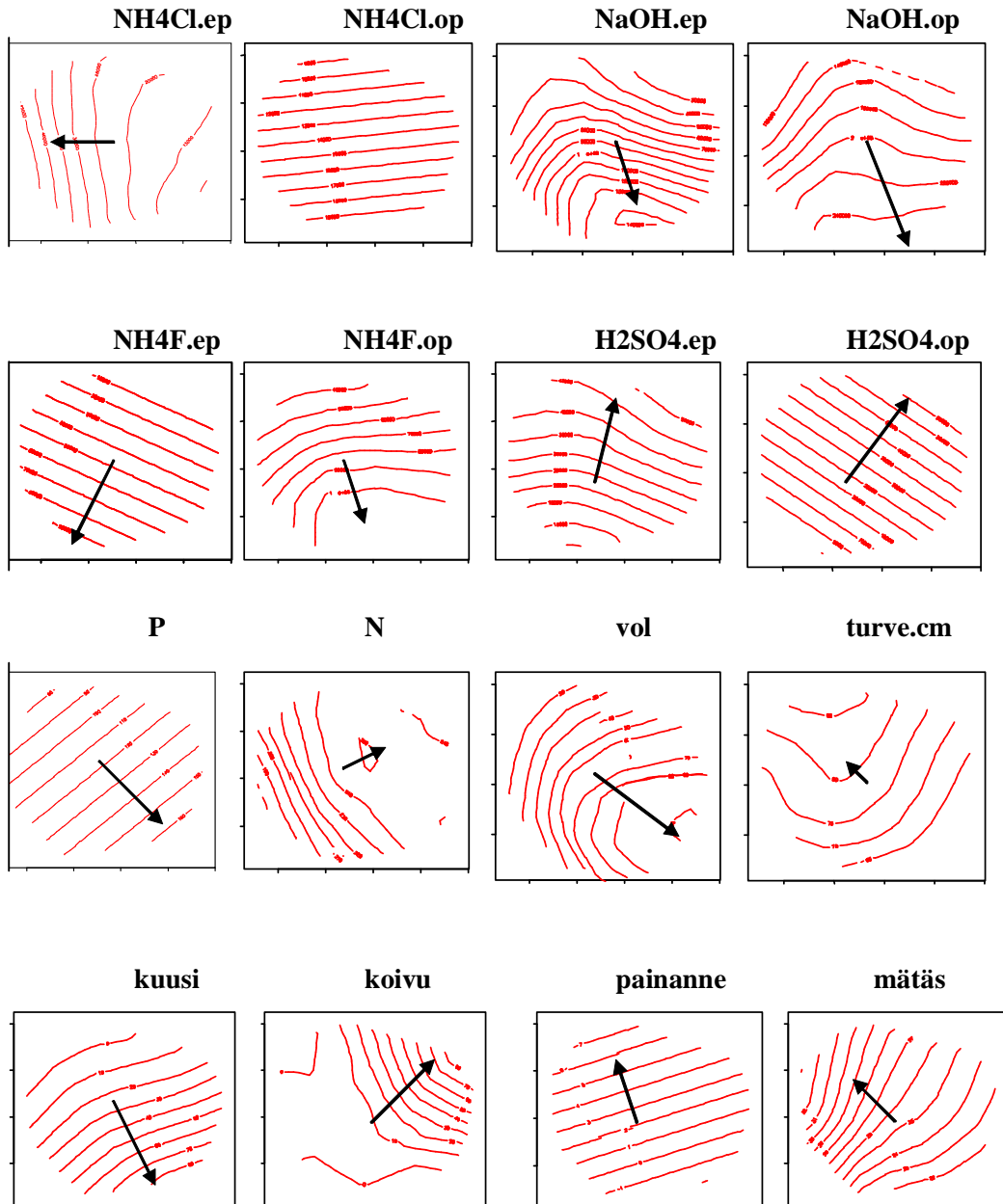
	rav	N	Mean Rank
NH ₄ Cl-ep	1	11	26.00
	2	16	22.50
	2b	12	29,13
	4	13	39.00
	5	12	45.92
	Total	64	
NH ₄ F-ep	1	11	15.45
	2	16	37.33
	2b	12	30,63
	4	13	40.77
	5	12	36.83
	Total	64	
NaOH-ep	1	11	17.27
	2	16	48.25
	2b	12	40,50
	4	13	29.77
	5	12	23.00
	Total	64	
H ₂ SO ₄ -ep	1	11	42.00
	2	16	24.92
	2b	12	39,25
	4	13	22.15
	5	12	33.58
	Total	64	
NH ₄ Cl-op	1	11	26.82
	2	16	33.25
	2b	12	34,81
	4	13	33.23
	5	12	33.08
	Total	64	
NH ₄ F-op	1	11	19.09
	2	16	41.33
	2b	12	33,63
	4	13	33.69
	5	12	30.50
	Total	64	
NaOH-op	1	11	21.36
	2	16	46.58
	2b	12	33,19
	4	13	38.31
	5	12	21.42
	Total	64	
H ₂ SO ₄ -op	1	11	54.18
	2	16	28.58
	2b	12	34,00
	4	13	23.46
	5	12	24.33
	Total	64	

Turvekangastyyppit

	tkg	N	Mean Rank
NH ₄ Cl-ep	1	19	28.32
	2	21	26.10
	3	6	43.17
	4	17	41.24
	5	1	34.00
	Total	64	
NH ₄ F-ep	1	19	30.74
	2	21	26.67
	3	6	37.33
	4	17	41.53
	5	1	6.00
	Total	64	
NaOH-ep	1	19	35.95
	2	21	35.48
	3	6	22.67
	4	17	28.94
	5	1	24.00
	Total	64	
H ₂ SO ₄ -ep	1	19	32.00
	2	21	37.24
	3	6	45.33
	4	17	23.41
	5	1	20.00
	Total	64	
NH ₄ Cl-op	1	19	36.37
	2	21	29.52
	3	6	29.00
	4	17	34.94
	5	1	1.00
	Total	64	
NH ₄ F-op	1	19	34.63
	2	21	31.62
	3	6	37.67
	4	17	30.24
	5	1	18.00
	Total	64	
NaOH-op	1	19	36.74
	2	21	31.33
	3	6	13.50
	4	17	35.53
	5	1	39.00
	Total	64	
H ₂ SO ₄ -op	1	19	36.84
	2	21	38.67
	3	6	27.00
	4	17	23.00
	5	1	15.00
	Total	64	

LIITE 5

Fosforifraktioiden ja ympäristömuuttujien korrelaatiot ($p < 0,05$) kasvillisuusaineiston kanssa koko aineiston NMDS-ordinaatiossa. Regressiopinnoista ilmenee korrelaation mahdollinen epälineaarisuus. Nuolet osoittavat positiivisen korrelaation pääsuunnan (lineaarinen korrelaatio). Lyhenteiden selitteet on annettu taulukossa 4.



LIITE 6 (1/2)

Tutkimuksessa esiintyvä kasvilajinimistö.

Lyhenne	Latinankielinen nimi	Suomenkielinen nimi
Agrocani	Agrostis canina	luhtarölli
Alnuinca	Alnus incana	harmaaleppä
Andrpoly	Andromeda polyfolia	suokukka
Betunana	Betula nana	vaivasikoivu
Betupube	Betula pubescens	hieskoivu
Calapurp	Calamagrostis purpurea	corpikastikka
Calastri	Calamagrostis stricta	luhtakastikka
Callstra	Calliergon stramineum	kalvaskuirisammal
Careaqua	Carex aquatilis	vesisara
Carecane	Carex caescens	harmaasara
Carecesp	Carex cespitosum	mätässara
Caredioi	Carex dioica	äimäsara
Caredisp	Carex disperma	hentosara
Careglob	Carex globularis	pallosara
Carelasi	Carex lasiocarpa	jouhisara
Carelimo	Carex limosa	mutasara
Carepauc	Carex pauciflora	rahkasara
Carerost	Carex rostrata	pullosara
Care_sp	Carex sp.	sarat
Carevagi	Carex vaginata	tuppisara
Cirshele	Cirsium helenioides	huopahdake
Cladarbu	Cladina arbuscula	valkoporonjäkälä
Cladhlo	Cladonia chlorophaea	jauhetorvijäkälä
Cladcorn	Cladonia cornuta	puikkotorvijäkälä
Cladrang	Cladina rangiferina	harmaaporonjäkälä
Cladstel	Cladina stellaris	palleroporonjäkälä
Climdend	Climacium dendroides	palmusammal
Cornsuec	Cornus suecica	ruohokannukka
Desccesp	Descampia cespitosa	nurmilauha
Descflex	Deschampsia flexuosa	metsälauha
Dicr angu	Dicranum angustum	jänkäkynsisammal
Dicr bonj	Dicranum bonjeanii	lettokynsisammal
Dicrmaju	Dicranum majus	isokynsisammal
Dicrpoly	Dicranum polysetum	kangaskynsisammal
Dicrscop	Dicranum scoparium	kivikynsisammal
Empenigr	Empetrum nigrum	variksenmarja
Epilangu	Epilobium angustifolium	maitohorsma
Equiarve	Equisetum arvense	peltokorte
Equisilv	Equisetum sylvaticum	metsäkorte
Eriovagi	Eriophorum vaginatum	tupasvilla
Festrubr	Festuca rubra	punanata
Filiulma	Filipendula ulmaria	mesiangervo
Franalnu	Frangula alnus	paatsama
Gali ulig	Galium uliginosum	luhtamatara
Gerasyly	Geranium sylvaticum	metsäkurjenpolvi
Gymndryo	Gymnocarpium dryopteris	metsäimarre
Hepa_sp	Hepatophyta	maksasammalet
Hylosple	Hylocomium splendens	metsäkerrossammal
Junicomm	Juniperus communis	kataja
Ledupalu	Ledum palustre	suopursu

LIITE 6 (2/2)

Lyhenne	Latinankielinen nimi	Suomenkielinen nimi
Linnbore	<i>Linna borealis</i>	vanamo
Listcord	<i>Listera cordata</i>	herttakaksikko
Lycoanno	<i>Lycopodium annotinum</i>	riidenlieko
Menytrif	<i>Menyanthes trifoliata</i>	raate
Pseucinc	<i>Pseudobryum cinclioides</i>	kiiltolehväsammal
Mnium_sp.	<i>Mnium</i> sp.	lehväsammalet
Molicaer	<i>Molinia caerulea</i>	siniheinä
Peltapht	<i>Peltigera aptosa</i>	pilkuunahkajakälä
Phegconn	<i>Phegopteris connectilis</i>	korpi-imarre
Piceabie	<i>Picea abies</i>	mänty
Pinusilv	<i>Pinus sylvestris</i>	kuusi
Plagch_sp	<i>Plagiochila</i> sp.	kastesammalet
Pleuschr	<i>Pleurozium schreberi</i>	seinäsammal
Poa_annu	<i>Poa annua</i>	kylänurmikka
Pohlnta	<i>Pohlia nutans</i>	nuokkuvarstasammal
Polycomm	<i>Polytrichum commune</i>	korpikarhunsammal
Polyjuni	<i>Polytrichum juniperinum</i>	kangaskarhunsammal
Potepalu	<i>Potentilla palustris</i>	kurjenjalka
Puyrrotu	<i>Pyrola rotundifolia</i>	isotalvikki
Pyro_sp	<i>Pyrola</i> sp.	talvikit
Rhyttriq	<i>Rhytidiadelphus triquetrus</i>	metsäliekosammal
Rubuarct	<i>Rubus arcticus</i>	mesimarja
Rubucham	<i>Rubus chamaemorus</i>	muurain
Rubusaxa	<i>Rubus saxatilis</i>	lillukka
Rumeella	<i>Rumex acetosella</i>	ahosuolaheinä
Salicapr	<i>Salix caprea</i>	raita
Salimyrsi	<i>Salix myrsinites</i>	lettopaju
Salimyrt	<i>Salix myrtilloides</i>	juolukkapaju
Saliphyl	<i>Salix phylicifolia</i>	kiiltopaju
Salirepe	<i>Salix repens</i>	hanhenpaju
Schepalu	<i>Scheuchzeria palustris</i>	leväkkö
Sorbaucu	<i>Sorbus aucuparia</i>	pihlaja
Sphaangu	<i>Sphagnum angustifolium</i>	rämerahkasammal
Sphacom	<i>Sphagnum compactum</i>	paakkurahkasammal
Sphafusc	<i>Sphagnum fuscum</i>	ruskorahkasammal
Sphagirg	<i>Sphagnum girgensohnii</i>	korpirahkasammal
Sphamage	<i>Sphagnum magellanicum</i>	punarahkasammal
Sphamaju	<i>Sphagnum majus</i>	vajorahkasammal
Sphapapi	<i>Sphagnum papillosum</i>	kalvakkarahkasammal
Spharuss	<i>Sphagnum russowii</i>	varvikkorahkasammal
Spha_sp	<i>Sphagnum</i> sp.	rahkasammaleet
Sphasqua	<i>Sphagnum squarrosum</i>	okarahkasammal
Sphasubs	<i>Sphagnum subsecundum</i>	keräpäärahkasammal
Sphawarn	<i>Sphagnum warnstorffii</i>	heterahkasammal
Sphawulf	<i>Sphagnum wulfianum</i>	pallopäärahkasammal
Triccesp	<i>Trichophorum cespitosum</i>	tupasluikka
Trieeuro	<i>Trientalis europea</i>	metsätähti
Vaccmyrt	<i>Vaccinium myrtillus</i>	mustikka
Vacculig	<i>Vaccinium uliginosum</i>	juolukka
Vaccviti	<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	puolukka
Valesamb	<i>Valeriana sambucifolia</i>	lehto virmajuuuri
Vicicrac	<i>Vicia cracca</i>	hirrenvirna
Violepip	<i>Viola epipsila</i>	korpiorvokki

