

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
RAKENNUS- JA MAANMITTAUSTEKNIIKAN OSASTO

Katri Rankinen

KOSTEUDEN VAIKUTUS TYPEN
MINERALISAATIOON MAAPERÄSSÄ

Diplomityö, joka on tehty opinnäytteeksi
Teknillisen korkeakoulun rakennus- ja maan-
mittaustekniikan osastolla professori Pertti
Vakkilaisen valvonnassa vuonna 1992.

Tekijä:	Katri Rankinen	
Diplomityö:	Kosteuden vaikutus typen mineralisaatioon maaperässä	
Päivämäärä:	20.11.1992	Sivumäärä: 75
Professuuri:	Vesitalous	Koodi: yhd-25
Valvoja:	professori Pertti Vakkilainen	
Ohjaaja:	diplomi-insinööri Maija Paasonen-Kivekäs	
<p>Suomessa keskeisimpiä vesistöjen kuormittajia ravinteiden osalta ovat peltoviljely, karjankasvatus ja kalankasvatus. Pääosa kuormituksesta tulee keväällä lumen sulamisen aikaan ja syksyllä syyssateiden aikaan. Erityisesti nitraatti huuhtoutuu helposti, koska se on maaperässä vesiliukoisena anionina. Tämän työn tarkoitus oli selvittää maan kosteuden vaikutus typen mineralisaatioon ja arvioida, kuinka säätöjitus vaikuttaa mineraalitypen kertymiseen maahan. Kosteuden vaikutusta typen mineralisaatioon tutkittiin laboratoriossa tehdyillä inkubaatiokokeilla. Maanäytteet haettiin vesitalouden laboratorion lysimetrikentältä (Espoo, Otaniemi). Kokeessa oli neljä maalajia, neljä kosteutta ja neljä eri pituista inkubaatiojaksoa. Kokeen aikana lämpötila oli vakio. Tuloksia analysoitiin yksisuuntaisella varianssi-analyysillä ja monimuuttujavarianssianalyysillä. Kosteuden ja ajan vaikutusta typen mineralisaatioon tutkittiin profiilianalyysillä, kosteuden vaikutusta yksisuuntaisella varianssianalyysillä ja ajan vaikutusta toistetut koeyksiköt-menetelmällä. Polynomianalyysillä selvitettiin, minkä asteinen polynomi parhaiten selitti havaintoja ajan suhteen. Työssä käytettiin mekanistisia malleja mineralisaation kuvauksessa. Kosteudella ja ajalla oli selvä yhteisvaikutus mineraalitypen kertymiseen maahan. Useimmissa tapauksissa sekä kosteudella että ajalla oli yksinäänkin merkitsevä vaikutus. Kosteuden vaikutusta typen mineralisaatioon eri maalajeissa verrattiin yksiselitteisimmin käyttämällä vedellä täyttynyttä huokostilavuutta. 1. asteen polynomi selitti ammonium- ja nitraattitypen yhteissumman muutosta ajan suhteen useimmissa tapauksissa. Mineraalityppeä kertyi eniten maahan, kun 50-80 % huokosten tilavuudesta oli täyttynyt vedellä ja nettomineralisaatio lakkasi, kun yli 80-90 % huokosten tilavuudesta oli täyttynyt vedellä. Eniten mineraalityppeä kertyi maahan, jonka orgaanisen aineksen pitoisuus oli suuri. Tuloksia arvioitiin säätöjituksen kannalta. Typen huuhtoutumista kasvukauden ulkopuolella voitaisiin vähentää nostamalla maan kosteus niin suureksi, että merkittävää netto-mineralisaatiota ei tapahtuisi. Kasvukaudella maan kosteuden voisi nostaa säätöjituksella mineralisaatiolle suotuisaksi.</p>		

Author and name of the thesis : Katri Rankinen Effect of moisture on soil nitrogen mineralization	
Date : 20.11.1992	Number of pages : 75
Department : Civil Engineering and Surveying	Professorship : Hydrology and Water Resources Management
Supervisor : Prof. Pertti Vakkilainen	
Instructor : M. Sc. Maija Paasonen-Kivekäs	
<p>In Finland non-point source pollution, mainly agriculture and fish farming, comprises the biggest single source of phosphorus and nitrogen to surface waters. Nutrient load is higher in spring and autumn than in summer and winter. Nitrate is an anion and soluble in water, so it is susceptible to losses through leaching. This research has been done to find out the effect of soil moisture on nitrogen mineralization. It was also investigated, if it is possible to regulate the amount of mineral nitrogen in soil by controlled drainage. The study was carried out in laboratory using incubation experiments. Soil samples were collected from lysimeter field of the Laboratory of Hydrology and Water Resources Management in Otaniemi, Espoo. Four soils were incubated in constant temperature for four different periods. Multivariate analysis of variance was used to study the effect of soil moisture on net nitrogen mineralization. Profile analysis was used to test the interaction between soil moisture and time. One-way analysis of variance was used to study the effect of soil moisture and repeated measures analysis the effect of time. Growth curve models were used to describe the effect of time to mineralization rate. Mineralization rates and kinetics were modelled by mechanistical models. There was significant interaction between soil moisture and time. Both time and soil moisture had significant effect on mineral nitrogen accumulation in soils. Optimum moisture for mineral nitrogen accumulation was when 50-80 % of the total pore space was filled with water. The accumulation decreased when over 80-90 % was filled with water. Highest amount of mineral nitrogen was in soil with high organic matter content. It could be possible to reduce the leaching of mineral nitrogen by controlled drainage. During growing season soil moisture could be optimum for nitrogen mineralization and in spring and autumn too high for mineral nitrogen accumulation.</p>	

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun vesitalouden laboratoriossa. Työn valvojana on toiminut professori Pertti Vakkilainen ja työn ohjaajana DI Maija Paasonen-Kivekäs vesitalouden laboratoriosta. Olen saanut arvokkaita neuvoja koejärjestelyissä professori Helinä Hartikaiselta Helsingin yliopiston maanviljelyskemian laitokselta. Laboratoriotyössä on neuvoja ja apua antanut erik.lab.mest. Aino Peltola. Tilastomatematiikkaa koskevissa kysymyksissä on neuvoja antanut DI Hannu Sirviö ja mekanistisia malleja koskevissa kysymyksissä TkL Juhani Kettunen. Tuloksia olen tarkastellut ja verrannut DI Ilona Bärlundin ja DI Helena Karvosen kanssa. Esitän kiitokseni saamastani avusta ja yhteistyöstä. Tutkimuksen rahoitti Salaojituksen Tukisäätiö, jolle esitän erityiset kiitokseni.

Espoossa 20.11.1992

Katri Rankinen

Katri Rankinen

Kuva 2.1	Lysimetrin periaatekaavio	5
Kuva 2.2	TKK:n lysimetrikentän asemapiirros	5
Kuva 2.3	Typen mineralisaatiota kuvaavien mallien rakenne a) yksivaiheinen prosessi b) kaksivaiheinen prosessi	19
Kuva 3.1	Eri maalajien suurimmat mineraalitypen määrät	20
Kuva 3.2	Mineralisoituneen typen määrät eri maalajeissa ja eri kosteuksissa a) lysimetrin 6 pintamaa b) hieta c) lysimetrin 9 pintamaa d) hiesu	21
Kuva 3.3	Mineraalitypen määrät ja osuudet erityyppisissä maalajeissa a) lysimetrin 6 pintamaa b) hiesu	22
Kuva 3.4	NH ₄ - ja NO ₃ -typen määrät sekä niiden summat eri tyyppisissä maalajeissa a) hieta, kosteus 5 til.-% b) lysimetrin 9 pintamaa, kosteus 18 til.-%	23
Kuva 3.5	pH:n muutos lysimetrin 6 pintamaassa kosteudessa 31 til.-%	24
Kuva 3.6	Maan kosteuden ja mineralisaation suhde a) lysimetrien pintamaat b) karkea hieta ja hiesu	27
Kuva 3.7	Mineraalitypen määrät eri maalajeissa ja eri kosteuksissa a) lysimetrin 6 pintamaa b) karkea hieta c) lysimetrin 9 pintamaa d) hiesu	34
Kuva 3.8	1. kertaluokan mallin kertoimien ja maan kosteuden välinen riippuvuus a) pintamaat b) hieta ja hiesu	41
Kuva 3.9	Ammoniumtypen ja nitraattitypen mitatut ja simuloituvat arvot a) lysimetrin 9 pintamaa, kosteus 31 til.-% b) hieta, kosteus 26 til.-%	42
Kuva 3.10	Mineraalitypen mitatut ja simuloituvat arvot, kun lähtötilanteena on orgaanisen typen varasto a) lysimetrin 9 pintamaa, kosteus 18 til.-% b) hiesu, kosteus 27 til.-%	42
Kuva 3.11	Mineraalitypen mitatut ja simuloituvat arvot, kun lähtötilanteena on potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto a) lysimetrin 6 pintamaa, kosteus 31 til.-% b) lysimetrin 9 pintamaa, kosteus 25 til.-%	43
Kuva 3.12	Mitatut ja simuloituvat arvot mineraalitypen määrälle hiesussa, kosteus 44 til.-% a) lähtötilanteena orgaanisen typen varasto b) lähtötilanteena potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto	43

Taulukko 2.1	Maalajien rakeisuudet	6
Taulukko 2.2	Maalajien typen ja hiilen osuudet	6
Taulukko 2.3	Maalajien fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia	7
Taulukko 2.4	Maanäytteiden kosteudet	8
Taulukko 2.5	Fysikaaliset määritykset ja käytetyt menetelmät	9
Taulukko 2.6	Kemialliset määritykset ja käytetyt menetelmät	10
Taulukko 3.1	Ilmakuivien maiden mineraalityppimäärät 67 vrk:n inkuboinnin jälkeen	22
Taulukko 3.2	Laboratoriokokeisiin perustuvat arviot mineralisoituneen typen määrälle	24
Taulukko 3.3	Lannoituksen vaikutus typen nettomineralisaatioon	26
Taulukko 3.4	Mineralisoituvan typen määrät arvioituna orgaanisen typen määrän perusteella	28
Taulukko 3.5	Vieraat havainnot mittausaineistossa	31
Taulukko 3.6	Kosteuden ja ajan yhteisvaikutus typen mineralisaatioon, merkitsevyystaso 5 %	33
Taulukko 3.7	Kosteuden vaikutus mineralisaatioon lysimetrissä 6, merkitsevyystaso 5 %	35
Taulukko 3.8	Kosteuden vaikutus mineralisaatioon lysimetrissä 9, merkitsevyystaso 5 %	36
Taulukko 3.9	Ajan vaikutus mineralisaatioon, merkitsevyystaso 5 %	37
Taulukko 3.10	Polynomialanalyysi mineraalitypelle ($\text{NO}_3 + \text{NH}_4$) ajan suhteen, merkitsevyystaso 5 %	38
Taulukko 3.11	Polynomialanalyysi ammoniumtypelle, merkitsevyystaso 5 %	38
Taulukko 3.12	Polynomialanalyysi nitraattitypelle, merkitsevyystaso 5 %	39
Taulukko 3.13	Mineralisaatiovakiot, kun lähtötilanteena on orgaanisen typen varasto	40
Taulukko 3.14	Mineralisaatiovakiot ammonifikaatiolle ja nitrifikaatiolle	40
Taulukko 3.15	Typen mineralisaatiovakiot ja potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto N_0	41
Taulukko 3.16	Maalajien kokonaistypen ja savipitoisuuden suhteet	44

TIIVISTELMÄ	i
ABSTRACT	ii
ALKUSANAT	iii
KUVALUETTELO	iv
TAULUKKOLUETTELO	v
1. JOHDANTO	1
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	4
2.1 Yleistä	4
2.2 Koemaat	4
2.3 Koejärjestely	7
2.4 Analyysimenetelmät	9
2.5 Tilastollisten hypoteesien testaaminen	10
2.5.1 Varianssianalyysi	10
2.5.2 Yksisuuntainen varianssianalyysi	11
2.5.3 Toistetut koeyksiköt	13
2.5.4 Profiilianalyysi	15
2.5.5 Polynomianalyysi	17
2.6 Mineralisaation ja nitrifikaation mekanistinen mallintaminen	18
2.6.1 Yleistä	18
2.6.2 Mineralisaation ja nitrifikaation kinetiikka	18
3. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	20
3.1 Mittaustulokset	20
3.2 Mittaustulosten tarkastelu	25
3.3 Arvio koejärjestelyn onnistumisesta	31
3.4 Kosteuden ja ajan vaikutus mineralisaatioon	32
3.5 Mineralisaation simuloinnit	39
4. JOHTOPÄÄTÖKSET	46
5. YHTEENVETO	48
LÄHDELUETTELO	
LIITTEET	

1. JOHDANTO

Peltoviljely, karjankasvatus ja kalankasvatus ovat tällä hetkellä keskeisimpiä vesistöjen kuormittajia Suomessa. On arvioitu (Rekolainen 1989), että maatalouden aiheuttama typpi-kuormitus on $760\text{--}2000 \text{ kg km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, joka vastaa $20\ 000\text{--}40\ 000 \text{ t}$ vuotuista kuormitusta. Pääosa fosfori- ja typpikuormituksesta tulee keväällä lumen sulamisen aikaan ja syksyllä syyssateiden aikaan.

Vesistöissä typpi aiheuttaa ekologisia ongelmia, mm. rehevöitymistä ja leväkukintoja. Veden suuri nitraattipitoisuus aiheuttaa myös terveysongelmia sekä ihmisille että karjalle. Lapsille nitraatti voi aiheuttaa *methemoglobiinianemiaa* tai *cyanosista*. Suomessa hyväksyttävän talousveden nitraattipitoisuuden raja on $30 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ eli 6.9 mg N l^{-1} ja maksimiarvo on $50 \text{ mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ eli 11.5 mg N l^{-1} (Anon. 1985). Vesi- ja ympäristöhallitus teki tutkimuksen haja-asutuksen vedenhankinnan kehittämiseksi, ja tämän tutkimuksen mukaan nitraattipitoisuus ylitti lääkintöhallituksen ohjearvon 18 % tutkituista kaivoista (Anon. 1990). Juomaveden korkea nitraattipitoisuus saattaa aiheuttaa myös karjalle ongelmia, kuten *methemoglobiinianemiaa*, A-vitamiinin puutosta, lisääntymisongelmia ja vähentynyttä maidontuotantoa (Bolt 1976). Lisäksi nitraatti voi reagoida muiden typpiyhdisteiden kanssa ja muodostaa karsinogeenisiä nitrosamiineja (Paul & Clark, 1989).

Maaperässä olevasta typestä yli 90 % on orgaanisena typpenä sitoutuneena maassa olevaan orgaaniseen ainekseen. Mineraalitypen tärkeimmät muodot ovat NH_4 ja NO_3 . Muita muotoja esiintyy maaperässä vain lyhyitä aikoja tietyissä olosuhteissa, esim. nitrifikaation ja denitrifikaation yhteydessä. Mineraalityppi on kasveille suoraan käyttökelpoisessa muodossa olevaa typpeä. Eri maalajien typpipitoisuudet vaihtelevat suuresti, ja typen määrään vaikuttavat myös muut tekijät, kuten ilmasto, topografia, kasvillisuus ja organismit, alku-peräinen aines ja aika (Stevenson 1985).

Typpeä tulee maahan biologisen typensidonnan tuloksena, sadeveden mukana, eläinten ja kasvien hajoamistuotteissa ja jätteissä sekä lannoitteissa (liite 1). Mineralisaatio on typen vapautumista orgaanisesta aineksestä epäorgaaniseen muotoon, kun mikrobit hajottavat maassa olevaa orgaanista ainesta. Mineralisaatio koostuu kahdesta osaprosessista, ammonifikaatiosta ja nitrifikaatiosta. Ammonifikaatiossa orgaanisista yhdisteistä tulee ammoniumia, ja nitrifikaatiossa ammonium hapettuu nitraatiksi. Nitrifikaatiossa lähtötuotteena on kationi, joka pidättyy maahan, ja lopputuotteena anioni, joka ei pidäty. Nitrifikaation seurauksena huuhtoutumiselle alttiin typen määrä lisääntyy ja maa happamoituu. Ammonifikaatioon osallistuvat monet eri mikrobit, eikä sen mekanismia tarkoin tunneta. Nitrifikaation aiheuttavat autotrofit bakteerit, jotka saavat energiaa hapettamalla ammoniumia ja nitriittiä. Nitrifikaatiota aiheuttavat mm. *Nitrosomonas* ja *Nitrobacter*. Nitrifikaatio on herkempi ympäristön olosuhteille kuin ammonifikaatio. Lämpimässä maassa ammonium

pyrkii hapettumaan nitraatiksi mahdollisimman nopeasti, joten ammoniumin määrä maassa on yleensä pieni.

Epäorgaaninen typpi katoaa maasta assimilatiossa eli kasvien typen otossa, denitrifikaatiossa, haihtumalla tai huuhtoutumalla. Ammoniumkationi saattaa myös sitoutua mineraalien kiderakenteeseen, jolloin se ei ole kasveille tai mikro-organismeille käyttökelpoinen. Nitraattianioni on vesiliukoinen, joten se huuhtoutuu helposti. Denitrifikaatiossa nitraatti muuttuu kaasumaiseen muotoon ja haihtuu ilmakehään. Immobilisaatiossa epäorgaanista ainesta sitoutuu orgaaniseen ainekseen. Mineralisaatio ja immobilisaatio ovat vastakkaisia reaktioita, eli aina kun tapahtuu mineralisaatiota, tapahtuu myös immobilisaatiota. Yleensä nettomineralisaatio on dominoiva reaktio. Orgaanisen aineksen nettomineralisaatio on pienempi kuin bruttomineralisaatio eikä anna oikeaa kuvaa maassa tapahtuvista muutoksista. Pieni nettomineralisaatio saattaa johtua joko matalasta biologisesta aktiivisuudesta tai korkeasta aktiivisuudesta, jos mineralisaatio ja immobilisaatio kumoavat toisensa. (Jansson & Persson 1985).

Typen mineralisaatiota maaperässä on tutkittu paljon. Koska typpilannoitus on kallista ja saattaa aiheuttaa ympäristöongelmia, on tutkittu mahdollisuuksia vähentää typen hävikkiä ja mahdollisuuksia arvioida typpilannoituksen tarvetta. Typen tappioita maaperässä aiheuttavat denitrifikaatio, haihtuminen ja huuhtoutuminen. Tutkimalla maaperän luontaista mineralisaatiota ja kasvukaudella potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrää on pyritty täsmentämään tarvittavan typpilannoituksen määrää. Lisäksi on pyritty löytämään rutiinimäärityksiin sopivia tapoja tutkia typen mineralisaatiota (Stanford & al. 1972, 1973, 1974).

Vesitalouden laboratoriossa tutkittiin kesällä 1991 kosteuden vaikutusta typen mineralisaatioon maaperässä ja tulosten perusteella arvioitiin säättöjituksen vaikutusta maaperässä tapahtuvaan mineralisaatioon. Säättöjituksessa salaojista purkautuvien kuivatusvesien poistuminen estetään laskuojan suulle rakennetun padon avulla. Padon avulla voidaan säädellä kuivatusta kasvukauden aikana. Salaojitusta voidaan käyttää myös pohjavesikasteluun, kun putkistoon pumpataan vettä ja nostetaan pohjavedenpinnan tasoa.

Ahonen (1991) tutki pohjavesikastelun ja säättöjituksen soveltuvuutta Suomessa. Ravinteiden osalta tulokseksi saatiin, että kokonaistypen huuhtoumat voivat vähentyä jopa 40%. Koska ravinnehuuhtoumia oli tutkittu vain tietokonemallilla, pidettiin tärkeänä mm. jatkaa tutkimusta maalajien ominaisuuksien ja paikallisten kosteusolojen vaikutuksista säättöjituksen toimintaan ja ravinnehuuhtoumiin.

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia kosteuden vaikutusta typen mineralisaatioon ja arvioida säättöjituksen vaikutuksia huuhtoutumisalttiin typen määrään maaperässä. Kuormituksen pienentämisen kannalta on edullista mahdollisimman pieni mineralisaatio syksyllä ja

keväällä. Toisaalta kasvukaudella mineralisaation olisi oltava voimakasta, sillä kasvit tarvitsevat typpeä ja lannoitustarve vähenee. Samalla kasvit vähentävät typen huuhtoutumista.

Typen mineralisaatiota maaperässä voidaan tutkia esimerkiksi kenttämittauksilla, aerobisella inkubaatiolla ja anaerobisella inkubaatiolla. Rankinen (1992) on esitellyt eri määrittystapoja tarkemmin. Tässä työssä koejärjestelyiksi valittiin aerobinen inkubointi laboratorioissa, koska se on yksinkertainen ja yleisesti käytetty menetelmä. Typen mineralisaatiota on tutkittu paljon vastaavan tyyppisillä koejärjestelyillä. Stanford & Smith (1972), Stanford & al. (1973), Stanford & al. (1974) ja Stanford & Epstein (1974) olivat tehneet laajan koesarjan, jolla pyrittiin selvittämään typen mineralisaation potentiaalia ja kinetiikkaa eri maalajeissa sekä kosteuden ja lämpötilan vaikutusta niihin. Cabrera & Kissel (1988a ja 1988b) tutkivat maanäytteiden käsittelyn vaikutusta typen mineralisaatioon. He vertasivat Stanford & Epsteinin (1974) käyttämää maanäytteiden käsittelyä mahdollisimman luonnontilaisiin ja häiriintymättömiin näytteisiin. Karvonen (1992) on tutkinut lämpötilan vaikutusta typen mineralisaatioon vastaavilla koejärjestelyillä ja maalajeilla, kuin tässä tutkimuksessa on käytetty.

Kosteuden vaikutusta mineralisaatioon on tutkittu mineralisaation optimilämpötilassa eli +35°C:ssa, johon lämpötila Suomessa harvoin nousee. Lisäksi maalajien mineralisaatio riippuu voimakkaasti mm. maalajin ominaisuuksista, ympäristötekijöistä ja aikaisemmasta lannoituksesta.

Tässä työssä esitetään ensin mittaustulokset ja niistä suoraan tehdyt johtopäätökset. Seuraavaksi esitetään tilastolliset käsittelyt ja niiden perusteella saadut tulokset ja viimeisenä esitetään käytetyt mallit ja niiden avulla saadut tulokset.

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Yleistä

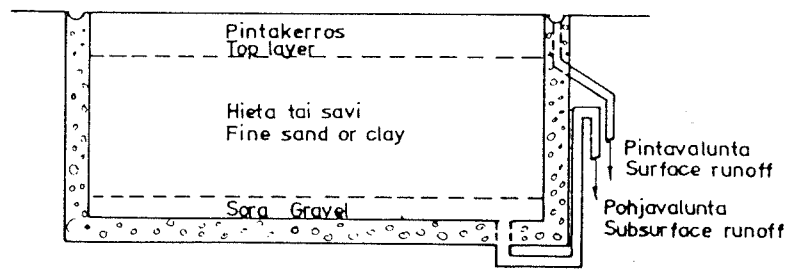
Kosteuden vaikutusta typen mineralisaatioon tutkittiin laboratoriossa tehdyillä inkubaatio-kokeilla, joissa oli neljä maalajia, neljä kosteutta ja neljä eri pituista inkubaatiojaksoa. Koejärjestely laadittiin muunnoksena Stanfordin & Epsteinin (1974) koejärjestelystä, jossa ilmakeivattu ja seulottu maa oli kostutettu tislattulla vedellä. Maanäytteitä oli inkuboitu vakiolämpötilassa (35 °C) 2 viikkoa, jonka jälkeen näytteistä oli määritetty niihin kertyneen mineraalitypen määrät. Stanfordin & Epsteinin (1974) koejärjestelystä poiketen maita inkuboitiin nyt neljä eripituista jaksoa, joista lyhin oli 11 ja pisin 67 vuorokautta. Inkubointilämpötila (20 °C) oli myös erilainen. Saatuja tuloksia käsiteltiin sekä tilastollisilla menetelmillä että mekanistisilla malleilla.

2.2 Koemaat

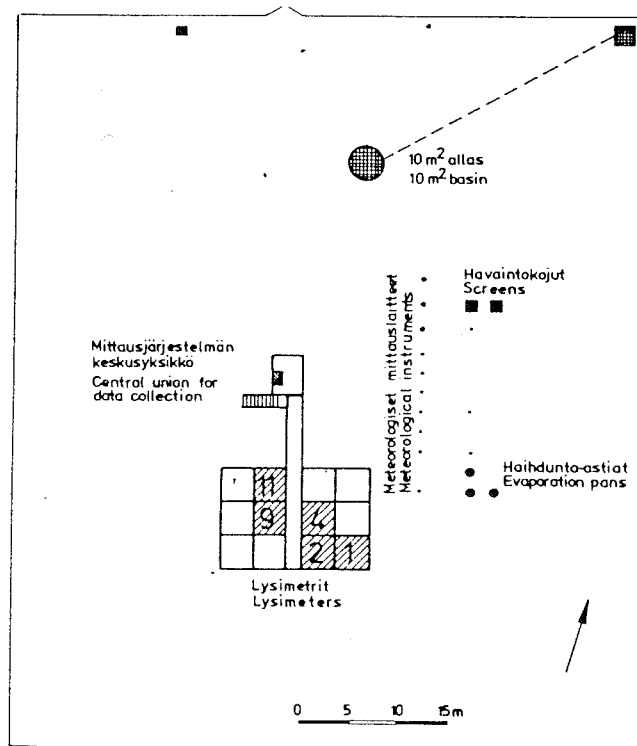
Maanäytteet haettiin TKK:n vesitalouden laboratorion lysimetrikentältä, joka sijaitsee Otaniemessä (60 °11'N, 24 °48'E). Lysimetrikentällä ovat aikaisemmin tehneet tutkimuksia mm. Hooli (1972) ja Vakkilainen (1982), ja lysimetrikentän maalajeista Al-Soufi (1983) ja Tenhunen (1988). Vuodesta 1989 on lysimetrikentällä ollut käynnissä tutkimus '*Typen huuhtoutuminen pinta- ja pohjavesiin*'.

Lysimetrikentällä on 12 lysimetriä, jotka on sijoitettu kahteen kuuden lysimetrin ryhmään. Lysimetrit ovat kuution muotoisia betonialtaita, joiden syvyys on 1.5 m ja ala 10 m². Lysimetrien pohjilla on 10 cm kerros soraa ja sen päällä tutkittavaa maalajia. Päälimmäisenä on noin 10 cm paksuinen pintakerros. Lysimetrin poikkileikkaus on kuvassa 2.1 ja kaavakuva lysimetrikentästä on kuvassa 2.2. Lysimetrien 2, 4 ja 6 maalajit ovat hietaa ja lysimetrien 9 ja 11 hiesua ja savea. Lysimetreissä 2, 4 ja 6 on ollut homogeeninen ruohopeite ja lysimetreissä 9 ja 11 on kasvanut ruohoa ja saunakukkaa (*Matricaria Perforata*). Saunakukat poistettiin lysimetreistä syksyllä 1990. Näiden lysimetrien kasvillisuus on ollut epähomogeenista. Bärlund (1992a) on tarkemmin selvittänyt lysimetrikentän maalajeja ja niiden ominaisuuksia.

Maanäytteet otettiin lysimetreistä 6 ja 9, siten että molemmista lysimetreistä otettiin erikseen pintamaa ja pohjamaa. Lysimetrissä 6 pintakerroksen paksuus oli noin 3-10 cm ja lysimetrissä 9 pintakerroksen paksuus oli noin 6-7 cm. Molempien lysimetrien pintamaista otettiin kokoomanäytteet kolmesta eri kohdasta näiltä syvyyksiltä. Pohjamaista otettiin myös kokoomanäytteet kolmesta eri kohdasta noin 10 cm:n syvyydeltä heti pintamaan alta.



Kuva 2.1 Lysimetrin periaatekaavio (Vakkilainen 1982, s. 18)



Kuva 2.2 TKK:n lysimetrikentän asemapiirros (Vakkilainen 1982, s. 19)

Lysimetriä 9 oli lannoitettu NPK-lannoitteella kesäkuussa 1989 1 kg/lysimetri ja lysimetriä 6 5 kg/lysimetri, jotka vastasivat 1000 kg/ha ja 5000 kg/ha. Lannoitteessa oli typpeä 10 %, josta ammoniumia 7 % ja nitraattia 3 %, fosforia 7 % ja kaliumia 14.1 %, joten typpilannoituksen määrä hehtaaria kohden oli lysimetrissä 9 100 kg ja lysimetrissä 6 500 kg. Aikaisemmin ei kumpaakaan lysimetriä ollut lannoitettu. Näytteet lysimetrin 6 pohjamaasta otettiin 8.5.1991 ja muut näytteet otettiin 4.6.1991.

Taulukko 2.1 Maalajien rakeisuudet

Lysim.	Näyte	<0.002 (mm)	0.002-0.02 (mm)	>0.02 (mm)	Maalaji kolmiosta	Maalaji rak.käyrältä
L6	pinta	7	3	90	Hieta	Karkea hieta
L6	pohja	5	5	90	Hieta	Karkea hieta
L9	pinta	9	2	89	Hieta	Karkea hieta
L9	pohja	26	29	45	Hieta (Hiue)	Hiesu

Maanäytteistä määritettiin vedenpidätyskäyrät, kuivatilavuuspainot, raekoostumukset märkäseulonnalla ja areometrikokeella sekä orgaanisen aineksen pitoisuus. Maalajien rakeisuudet ovat taulukossa 2.1. Lisäksi näytteistä määritettiin orgaaninen hiili, kokonaistyyppi, nitraattityppi, ammoniumtyppi ja pH. pH määritettiin sekä maa-vesi-suspensiosta että CaCl₂-suspensiosta. Taustamääritykset tehtiin ilmakeivatuista näytteistä. Maalajien kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia on taulukoissa 2.2 ja 2.3.

Maalajit määritettiin rakennusteknisen maalajiluokituksen (RT-luokitus) mukaisesti. Rakeisuuskäyrästä luettiin maalaji 50 %:n läpäisyarvon kohdalta. Maalajit määritettiin myös käyttämällä Hartikaisen (1990) esittämää maalajikolmiota, jota käytetään maataloudessa. Pintamaiden orgaanisen aineksen pitoisuus oli 6-12 massaprosenttia, joten ne luokiteltiin runsasmultaisiksi. Lysimetrin 6 pohjamaa oli karkeaa hietaa ja pintamaa oli runsasmultaista karkeaa hietaa. Lysimetrin 9 pohjamaa oli hiesua ja pintamaa oli runsasmultaista karkeaa hietaa. The U.S. Department of Agriculture käyttämästä maalajikolmiosta (Brady 1984 s. 44) saatiin englanninkieliset termit lysimetrin 9 maalajeille (pinta: loamy sand, pohja: loam) ja lysimetrin 6 maalajeille (pinta: sand, pohja: sand). Työssä on myöhemmin käytetty RT-luokituksen mukaisia nimiä.

Taulukko 2.2 Maalajien typen ja hiilen osuudet

Näyte	kok. N [mgN/g maata]	NH ₄ -N [ppm ¹⁾]	NO ₃ -N [ppm ¹⁾]	org. C [mgC/g maata]	C/N [%]
L6 pinta	0.786	1.63	0.53	63.55	80.99
L6 pohja	0.064	1.28	0.47	1.22	19.10
L9 pinta	0.641	1.55	0.45	53.71	83.80
L9 pohja	0.451	1.59	0.64	16.96	37.58

1) µg N/g kuivaa maata

Taulukko 2.3 Maalajien fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia

Näyte	Kuivatilavuuspaino [g/cm ³]	Org. aines [massa-%]	pH [H ₂ O]	pH [CaCl ₂]	CEC ¹⁾ [cmol/kg]
L6 pinta	1.117	7.94	5.26	4.32	17.31
L6 pohja	1.395	0.53	5.32	4.20	4.17
L9 pinta	1.161	7.78	5.34	4.41	17.16
L9 pohja	1.440	3.71	6.43	5.54	18.36

1) CEC (cation exchange capacity) = kationinvaihtokapasiteetti

2.3 Koejärjestely

Kokeessa oli neljä kosteustasoa, jotka jokaisella maalajilla olivat erilaiset. Hiesun ja hiedan kosteustasot valittiin Vakkilaisen (1982) määrittämien vedenpidätyskäyrien mukaan ja pintamaiden kosteustasot arvioitiin. Tutkimusten aikana maalajeista määritettiin uudet vedenpidätyskäyrät, jotka ovat liitteessä 9. Osa maalajien kosteustasoista valittiin kuivatettavissa olevan veden alueelta eli pF-arvoina 0,0-2,0. Lisäksi kosteustasojen valinnassa pyrittiin löytämään kullekin maalajille sellaiset kosteudet, että pieni kosteuden muutos tilavuusprosentteina ei vaikuttanut pF-arvoon. Kuivatuksella pohjavedenpinta pidetään 1.0-1.2 m:n alapuolella, jolloin 30 µm pienemmät huokokset tyhjenevät ja maan sanotaan olevan kenttäkapasiteettitilassa. Lakastumisrajaksi nimitetään imua, joka on noin 150 m. Tätä pienemmällä imulla sitoutuneet vedet ovat kasvien käytössä (Vakkilainen 1986 s. 85), joten yksi kosteustila valittiin mahdollisimman läheltä lakastumisrajaa. Koska varsinkin pintamaat saattavat kasvukaudella kuivua lähes ilmakeivaksi, niin tehtiin vielä ns. "nollakoe", eli ilmakeivattuja maita inkuboitiin 67 vrk:ta 20±0.5 °C:ssa. Kosteudet ovat taulukossa 2.4. Taulukossa on myös vedellä täyttyneiden huokosten tilavuus (WFP) ja maalajien kyllästyskosteudet. Kyllästyskosteudessa maan koko huokostilavuus on veden täyttämä, joten huokostilavuus arvioitiin laboratoriossa määritettyjen kyllästyskosteuksien perusteella. Tämän määritelmän perusteella vedellä täyttyneiden huokosten tilavuus oli maan kosteus prosentteina kyllästyskosteudesta.

Hiedan kosteustasot olivat tilavuusprosentteina ilmaistuna 0 %, 5 %, 12 % ja 26 % eli pF-arvoina 4, 2.7, 2.3 ja 1.9. Hiesun kosteustasoiksi valittiin tilavuusprosentit 27 %, 36 %, 39 % ja 44 % eli pF-arvot 2.0, 0.7, 0.5 ja 0. Pintamaiden kosteustasot olivat massaprosentteina ilmaistuna 7 %, 14 %, 21 % ja 28 %, jotka lysimetrin 6 pintamaalla vastasivat noin tilavuusprosentteja 9 %, 17 %, 23 % ja 31 % ja lysimetrin 9 pintamaalla noin 10 %, 18 %, 25 % ja 36 %. Pintamaiden kostuttamisessa ei voinut käyttää aikaisemmin määritettyjä pF-

Taulukko 2.4 Maanäytteiden kosteudet

Näyte	Kosteus		Maaveden potentiaali ¹⁾			WFP ²⁾	kyllästys- ³⁾ kosteus til.-%
	massa-%	til.-%	pF	bar	MPa		
L6 pinta	7.94	8.9	5.5	316.2	0.3162	15.0	59.1
	15.24	17.0	4.7	50.1	0.0501	28.8	
	20.40	22.8	2.7	0.5	0.0005	38.6	
	27.28	30.5	1.8	0.06	0.00006	51.6	
L6 pohja	0.27	0.4	4	10.0	0.01	0.01	42.1
	3.26	4.5	2.7	0.5	0.0005	10.67	
	8.33	11.6	2.3	0.2	0.0002	27.55	
	18.52	25.8	1.9	0.08	0.00008	61.28	
L9 pinta	8.58	10.0	5.3	199.5	0.1995	19.54	51.0
	15.65	18.2	3.5	3.16	0.0032	35.6	
	21.37	24.8	2.5	0.32	0.0003	48.7	
	30.73	35.7	1.8	0.063	0.00006	70.0	
L9 pohja	18.57	26.70	2.0	0.1	0.0001	61.52	43.4
	24.63	35.50	0.7	0.005	0.000005	81.80	
	27.19	39.00	0.5	0.003	0.000003	89.86	
	30.62	44.00	0	0	0	100.0	

1) Maaveden potentiaalit nyt määritettyjen vedenpidätyskäyrien mukaan

2) Vedellä täyttyneiden huokosten tilavuus prosentteina maan huokoisuudesta

3) Kyllästyskosteus nyt tehtyjen määritysten mukaan, til.-%

tkäyriä, sillä lysimetrien 9 ja 11 pintamaat oli uusittu vuonna 1987. Kyllästyskosteudet olivat ilavuusprosentteina lysimetrin 9 pintamaalla noin 51.0 %, lysimetrin 6 pintamaalla 59.1 %, hiedalla 42.1 % ja hiesulla 43.4 %.

Näytteet ilmakeivattiin ja seulottiin 2 mm:n seulalla. Maat kostutettiin lisäämällä niihin tislattua vettä. Vesi lisättiin pipetoimalla tai sumutuspullolla, jotta kosteus olisi jakautunut mahdollisimman tasaisesti, ja samalla näytteitä sekoitettiin. Jokaisen maalajin jokainen kosteustila sekoitettiin yhdessä erässä. Tämän jälkeen näytteiden annettiin vielä seistä +4°C:ssa yön yli, ennen kuin ne jaettiin Erlenmayer-pulloihin inkubointia varten.

Kostutettua maata punnittiin noin 50 g pienisuisen 100 ml Erlenmayer-pulloon. Jokaisesta maalajista ja kosteudesta tehtiin kolme kerrannetta. Pullot peitettiin Parafilm-kalvoilla, joihin oli pistetty neulalla kaksi reikää. Parafilm-kalvo läpäisee ilman kaasuja, mutta ei vesihöyryä, joten näytteissä säilyi sekä oikea kosteus että aerobiset olosuhteet. Näytteitä säilytettiin ilmastoidussa huoneessa, jonka lämpötila oli vakio $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$. Inkubointijaksojen pituudet olivat 11, 25, 39 ja 76 vuorokautta. Inkuboinnin jälkeen näytteistä määritettiin NH_4 - ja NO_3 -typpi, kosteus ja pH. Analysoitavat näytteet valittiin kunkin inkubointijakson lopussa satunnaisesti.

2.4 Analyysimenetelmät

Fysikaaliset määrytykset ja käytetyt menetelmät ovat taulukossa 2.5 ja kemialliset määrytykset ovat taulukossa 2.6. Bärlund (1992b) on kuvannut analyysimenetelmät yksityiskohtaisesti.

Taulukko 2.5 Fysikaaliset määrytykset ja käytetyt menetelmät

Analyysi	Menetelmä	Viite	Huom.
vesipitoisuus	uunikuivatus	Anon. 1985 GLO -85 s.39	
humuspitoisuus	polttomenetelmä	Anon. 1985 GLO -85 s.21	
kuivatilavuuspaino		Anon. 1985 GLO -85 s.32	
rakeisuus	pesuseulonta	Anon. 1985 GLO -85 s.12	
	areometrikoe	Anon. 1985 GLO- 85 s.14	
vedenpidätyskyky	riippuva vesipatsas		<100 cm
	painekattila	Peters 1985, s.279	>100 cm

Maan pH tarkoittaa maasuspensiosta mitattujen vetyionien aktiivisuuden negatiivista logaritmia. pH-mittaukset on tehty myös inkubointijakson jälkeen, koska nitrifikaatiossa syntyy H^+ -ioneja, jotka happamoittavat maata. pH määritettiin sekä vesi- että CaCl_2 -suspensiosta. Suomalaisissa maissa $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ on yleensä noin 0,6 yksikköä korkeampi kuin $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$. Tämä johtuu siitä, että kalsiumkationit vaihtavat liuokseen vetyä maassa olevilta kationinvaihtopaikoilta.

Ammoniumin ja nitraatin määrä mitattiin FIA-jatkuvavirtausinjektioanalysaattorilla. Analyysit tehtiin laitteen omien ohjeiden mukaisesti. 10 g maanäytettä huiskutettiin 1 h 50 ml:ssa 2.0 M KCl-liuosta. Uutoksesta mitattiin siihen liunneen nitraatin ja ammoniumin määrä. Vesiliukoisesta nitraatista oletettiin uuttuvan kokonaan ja ammoniumista oletettiin uuttuvan vesiliukoinen sekä vaihtuva ammonium. Kokonaistyyppi määritettiin Kjeldahl-poltolla

Taulukko 2.6 Kemialliset määritykset ja käytetyt menetelmät

Analyysi	Menetelmä	Viite	Huom.
pH	pH(H ₂ O)	MacLean 1982	
	pH(CaCl ₂)	MacLean 1982	
NH ₄	T.A.N.(1): ASN 65-32/84	Anon. 1983-1987	
NO ₃	T.A.N.(1): ASN 65-31/84	Anon. 1983-1987	
kok N	T.A.N.(1): AN 30/87	Anon. 1983-1987	Kjeltabs Cu/3.5 (Cu) indikaattori 5 % difenyylimini
org C	Walkley-Black	Hesse 1971	
kationinvaihto- kapasiteetti	ammoniumuutto	Chapman 1965, Emteryd 1989	

käyttäen Kjeltec auto 1050- analysaattoria, ja sen oletettiin käsittävän sekä orgaanisen että epäorgaanisen typen.

Määritelmän mukaan kationinvaihtokapasiteetti on vaihtuvien kationien kokonaissumma, jonka maa pystyy adsorboimaan. Vaihtuvat kationit ovat yleensä saatavilla sekä kasveille että mikro-organismeille. Analyysissä korvattiin ensin maassa olleet vaihtuvat kationit jollain tunnetulla kationilla, ja lopuksi mitataan tämän kationin määrä maassa. Ensimmäiseen uuttamiseen käytettiin ammonium-onia ja ammonium-ionin määrä saatiin uuttamalla maa kaliumkloridiliuoksella (Emteryd 1989).

2.6 Tilastollisten hypoteesien testaaminen

2.6.1 Varianssianalyysi

Varianssianalyysillä tutkitaan usean normaalijakautuneen populaation odotusarvojen välisiä eroja. Havaintoaineistossa esiintyvä vaihtelu hajotetaan eri lähteistä peräisin oleviin osiin. Odotusarvoja koskevat päätelmät tehdään aineistossa esiintyvää vaihtelua mittaavan varianssin hajotelman perusteella. Varianssianalyysi on itse asiassa laaja kokoelma eri menetelmiä, joista valitaan sopiva analyysi koejärjestelyn perusteella. Seuraavassa esityksessä tarkastellaan yksisuuntaista varianssianalyysiä, toistettuja koeyksiköitä (Repeated Measures) ja profiilianalyysiä (Profile Analyses). Yksisuuntaisesta varianssianalyysistä on tarkemmin teoksessa Ranta & al. (1991) ja muut tarkastelut perustuvat teoksiin Srivastava & al. (1983) ja Morrison (1978). Käytetty ohjelmisto oli SAS GLM-proseduuri (Anon. 1990).

Tuloksista pyrittiin saamaan selville käsittelyjen tilastollinen merkitsevyys varianssianalyysin avulla. Jokainen maalaus tutkittiin erikseen. Käsittelyinä pidettiin kosteustasoja ja aikaa, eli haluttiin saada selville ajan ja kosteuden vaikutus mineralisaatioon, sekä se onko ajalla ja kosteudella yhteisvaikutusta. Ensimmäisenä aineistoon sovellettiin profiilianalyysiä, jolla tutkittiin kosteuden ja ajan yhteisvaikutusta. Jos niillä on voimakas yhteisvaikutus, niin kummankin koetekijän vaikutusta joudutaan tarkastelemaan erikseen. Kosteuden vaikutusta tarkasteltiin yksisuuntaisella varianssianalyysillä ja ajan vaikutusta toistetut koetekijätmenetelmällä. Seuraavassa on esitetty menetelmiä lähemmin.

2.6.2 Yksisuuntainen varianssianalyysi

Yksisuuntainen varianssianalyysi eli ANOVA (ANalysis Of VAriance) on yksinkertaisin muoto usean populaation odotusarvojen vertailussa. Pohjana on satunnaistettu koe. Lisäksi koeyksiköiden tulisi reagoida mahdollisimman samalla tavalla käsittelyihin. Tässä työssä yksisuuntaista varianssianalyysiä käytettiin, kun verrattiin mineralisaatiota eri kosteuksissa, sillä kosteuden suhteen kokeet olivat täydellisesti satunnaistettuja. Jokaista kosteustasoa pidettiin käsittelynä, ja jokaista kerrannetta koeyksikkönä. Kosteuden vaikutusta mineralisaatioon verrattiin jokaisena inkubointijaksona erikseen.

Oletetaan, että vertailtavia käsittelyjä on k kappaletta ja jokaisessa käsittelyssä on n kappaletta koeyksiköitä. Vertailtavien populaatioiden odotusarvot ovat $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$. Jokainen havainto x_{ij} muodostuu kahden termin summana:

$$x_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.1)$$

jossa ε_{ij} ovat virhetermejä. Virhetermeihin sisällytetään muista tekijöistä kuin populaatioiden odotusarvojen eroista johtuva vaihtelu. Täydellisesti satunnaistetussa kokeessa ainoa tunnettu vaihtelun aiheuttaja on käsittely, eli tässä tapauksessa kosteus. Kaikki muu vaihtelu sisällytetään tuntemattomille tekijöille. Virhetermit oletetaan riippumattomiksi ja noudattavan normaalijakautuneiksi yhteisenä odotusarvona 0 ja varianssina σ^2 .

Yksisuuntaisessa varianssianalyysissä tutkitaan sitä, ovatko populaatioiden odotusarvot samat, eli testin hypoteesipari on seuraava:

$$H: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

A: ainakin jokin odotusarvo poikkeaa muista

Varianssin hajotelmassa aineistossa esiintyvä kokonaisvaihtelu ositetaan käsittelyjen sisäiseen vaihteluun ja käsittelyjen väliseen vaihteluun.

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 = n \sum_{i=1}^k (\bar{x}_{i+} - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{i+})^2 \quad (2.2)$$

missä x_{ij} = käsittelyn i j:s havainto,
 n = havaintojen lukumäärä käsittelyä kohden
 k = vertailtavien populaatioiden lukumäärä
 \bar{x}_{i+} = otoskeskiarvo käsittelyssä i
 \bar{x} = yleiskeskisarvo

Tässä kaavassa on kolme neliösummaa (Sum of Squares), joille käytetään myös merkintöjä:

$$SS_{TOTAL} = SS_{TREATMENTS} + SS_{ERROR} \quad (2.3)$$

Termi SS_{TOTAL} kuvaa kokonaisvaihtelua havaintoaineistossa, termi $SS_{TREATMENTS}$ kuvaa käsittelyjen selittämää osaa kokonaisvaihtelusta ja termi SS_{ERROR} kuvaa käsittelyjen sisäistä vaihtelua eli jäännösvaihtelua.

Kun neliösummat jaetaan vapausasteluvuillaan, niin saadaan eri vaihtelulähteisiin liittyvät keskimääräiset neliösummat MS (Mean Squares). Näin lasketut keskimääräiset neliösummat $MS_{TREATMENTS}$ ja MS_{ERROR} ovat estimaatteja käsittelyn ja virhetermin variansseille nollahypoteesin ollessa tosi. Neliösumman vapausasteluku on siinä olevien yhteenlaskettavien lukumäärä vähennettynä estimoitujen keskiarvojen lukumäärällä, eli neliösumman $SS_{TREATMENTS}$ vapausasteluku on $k-1$ ja neliösumman SS_{ERROR} on $kn-k$.

Odotusarvojen vertailu perustuu F-suhteeseen, joka saadaan varianssiestimaattien suhteesta:

$$F = \frac{MS_{TREATMENT}}{MS_{ERROR}} \quad (2.4)$$

Nollahypoteesin ollessa voimassa F-suhde noudattaa Fisherin F-jakaumaa vapausasteilla $k-1$ ja $kn-k$.

2.6.3 Toistetut koeyksiköt

Toistuviksi mittauksiksi nimitetään mittauksia, joissa usea peräkkäinen käsittely on kohdistettu samaan koeyksikköön. Tällä menetelmällä tutkittiin ajan vaikutusta mineralisaatioon. Koska koejärjestelyjä ei voitu suorittaa satunnaistettuina ajan suhteen, niin todettiin, että tuloksia ei voitu olettaa ajan suhteen toisistaan riippumattomiksi. Jokaisessa samaa maalajia ja samaa kosteutta olevassa näytteessä ensimmäisen inkubointijakson aikana tapahtunutta mineralisaatiota voidaan pitää yhtä suurena, toisen inkubointijakson aikana samoin jne. Jokainen kosteus tutkittiin erikseen, niin että aikaa pidettiin yhtenä käsittelynä ja jokaista kerrannetta yhtenä koeyksikkönä. N:n koeyksikön ja p:n käsittelyn muodostaman kokeen malli voidaan esittää matriisimuodossa seuraavasti:

$$\mathbf{x}_j = \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\varepsilon}_j \quad (2.5)$$

missä $\boldsymbol{\mu}^T = (\mu_1, \dots, \mu_p)$ ja \mathbf{x}_j on $(p \times 1)$ vektori j:n koeyksikön tuloksista jokaisessa p:ssä käsittelyssä. Virhetermin $\boldsymbol{\varepsilon}_j$ oletetaan olevan multinormaalijakautunut $N_p(0, \boldsymbol{\Sigma})$.

Mikäli käsittelyt p kohdistuvat jokaiseen koeyksilöön satunnaisessa järjestyksessä, niin virhetermin kovarianssimatriisi on muotoa

$$\boldsymbol{\Sigma} = \sigma^2 \left[\mathbf{I}(1-\rho) + \rho \mathbf{e} \mathbf{e}^T \right], \quad (2.6)$$

missä $\mathbf{e}^T = (1, \dots, 1)$, σ^2 on havaintojen varianssi ja ρ on korrelaatio. Jos hypoteesi (2.6) jää voimaan, niin analyysi voidaan perustaa kaksisuuntaiseen varianssianalyysiin korjatuilla vapausasteilla (Milliken & Johnson 1984, s. 322). Mikäli tuloksia ei voi pitää satunnaisesti jakautuneina, niin ei voi myöskään tehdä mitään virhetermien kovarianssimatriisiin kohdistuvia oletuksia.

Aineistoa testattiin koeyksikköjen sisäisellä korrelaatiohypoteesilla. Tämän perusteella todettiin, että korrelaatorakennetta (2.6) ei voitu asettaa perusoletukseksi, vaan käytettiin oletusta

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{1p} \\ & \dots \\ \sigma_{p1} & \sigma_{pp} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Testimenetelmänä käytettiin Srivastavan & Carterin (1983, s. 331) esittämää testausta.

Olkoon koeyksiköitä $j = 1 \dots N$ kappaletta ja käsittelyjä $i = 1 \dots p$ kappaletta. Havainnot voidaan esittää taulukoituna

koeyksikkö	käsittely		
	1	...	p
1	x_{11}		x_{1p}
...		...	
N	x_{N1}		x_{Np}

Hypoteesipari on

$$H: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_p$$

A: ainakin jokin odotusarvo poikkeaa muista

Aineiston otoskeskiarvo ja kovarianssimatriisi ovat

$$\bar{\mathbf{x}} = N^{-1} \sum_{j=1}^N \mathbf{x}_j \quad (2.8)$$

$$S = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\mathbf{x}_j - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x}_j - \bar{\mathbf{x}})^T \quad (2.9)$$

Kontrastimatriisi $(p-1) \times p$ on muotoa

$$C = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ & 1 & -1 & \dots & 0 \\ & & \dots & \dots & \dots \\ 0 & & & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

eli testataan käsittelyjen välisiä parittaisia eroja. Väite H hylätään, jos testisuurelle T^2 pätee

$$T^2 = N\bar{\mathbf{x}}^T C^T (CSC^T)^{-1} C\bar{\mathbf{x}} \geq \frac{(N-1)(p-1)}{(N-p+1)} F_{p-1, N-p+1, \alpha} \quad (2.11)$$

2.6.4 Profiilianalyysi

Profiilianalyysissä tutkitaan, onko koeryhmien välillä yhteisvaikutusta eri käsittelyissä. Esimerkiksi voidaan verrata kahta ryhmää, joille on tehty samat testit. Tulosten keskiarvot voidaan esittää graafisesti, jolloin nähdään selvästi ryhmien keskiarvojen väliset erot. Jos erot ovat yhtä suuret jokaisen testin kohdalla, niin ryhmillä sanotaan olevan samanlaiset profiilit, joten käsittelyillä ei ole yhteisvaikutusta. Jos profiilit ovat erilaiset, niin käsittelyillä on yhteisvaikutusta.

Oletetaan, että meillä on J ryhmää ja jokaisesta ryhmästä j on valittu kokeeseen N_j koe-yksikköä. Kokeessa on p testiä. Tässä jokainen kosteus oli ryhmä, kerranne oli koe-yksikkö ja aika oli testi. Ryhmien välistä eroa testataan monimuuttujavarianssianalyysillä. Malli voidaan esittää matriisimuodossa p -vektoreina:

$$\mathbf{x}_{jk} = \boldsymbol{\mu}_j + \boldsymbol{\varepsilon}_{jk}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{jk} \sim N_p(0, \boldsymbol{\Sigma}) \quad (2.12)$$

Jokaiselle havainnolle

$$y_{jk}, \quad j = 1, \dots, J, \quad k = 1, \dots, N_j, \quad N_1 + \dots + N_J = N$$

Aineisto voidaan esittää taulukkona:

käsittely			
	1	...	p
1	x_{111}		x_{11p}
	x_{N11}		x_{N1p}
...		...	
J	x_{1J1}		x_{1Jp}
	x_{NJ1}		x_{NJp}

Jos määrittelemme:

$$\bar{y}_{j\cdot} = N_j^{-1} \sum_{k=1}^{N_j} y_{jk} \quad (2.13)$$

$$\bar{y}_{\cdot\cdot} = N^{-1} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{N_j} y_{jk} \quad (2.14)$$

Nelisummamatriisit ovat:

$$SS_{\text{TOTAL}} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{N_j} y_{jk} y_{jk}^T - N \bar{y}_{\cdot\cdot} \bar{y}_{\cdot\cdot}^T \quad (2.15)$$

$$SS_{\text{TREATMENT}} = \sum_{j=1}^J y_{j\cdot} y_{j\cdot}^T / N_j - N \bar{y}_{\cdot\cdot} \bar{y}_{\cdot\cdot}^T \quad (2.16)$$

$$SS_{\text{ERROR}} = SS_{\text{TOTAL}} - SS_{\text{TREATMENT}} \quad (2.17)$$

Profiilianalyysissä tutkitaan, ovatko odotusarvojen väliset erotukset joka testissä yhtäsuuret, eli hypoteesit yhteisvaikutukselle ovat seuraavat:

$$H_1 : C (\mu_1 - \mu_j) = \dots = C (\mu_{J-1} - \mu_j) = 0$$

A : ainakin jokin odotusarvo poikkeaa muista,

joissa C on kovarianssimatriisi kaavasta (2.11).

H_1 hylätään, mikäli testisuure U

$$U_{p-1, J-1, N-J} = \frac{|C(SS_{\text{ERROR}})C^T|}{|C(SS_{\text{ERROR}} + SS_{\text{TREATMENT}})C^T|} \geq U_{p-1, J-1, N-j, \alpha} \quad (2.18)$$

Mikäli hypoteesi H_1 hyväksytään, niin seuraavaksi tutkitaan väitettä, onko ryhmien välillä eroja eli:

$$H_2 : \mathbf{e}_p^T (\mu_1 - \mu_J) = \dots = \mathbf{e}_p^T (\mu_{J-1} - \mu_J) = 0$$

H_2 hylätään, mikäli

$$\frac{U_{p,J-1,N-J}}{\bar{U}_{p-1,J-1,N-J}} \geq U_{1,J-1,N-J-p+1,\alpha} \quad (2.19)$$

missä

$$U_{p,J-1,N-J} = \frac{|SS_{\text{ERROR}}|}{|SS_{\text{ERROR}} + SS_{\text{TREATMENT}}|} \quad (2.20)$$

tai vastaavasti

$$\frac{N-J-p+1}{J-1} \frac{(1-U)}{U} \approx F_{J-1,N-J-p+1,\alpha} \quad (2.21)$$

Lopuksi testataan, onko eri määrittelyjen tai olosuhteiden välillä eroa

$$H_3 : \mathbf{C} (\mu_1, \dots, \mu_J) \mathbf{e} = 0$$

Hypoteesi hylätään, mikäli

$$\frac{N(f-p+2)}{(p-1)} \bar{\mathbf{y}}_{..}^T \mathbf{C}^T (\mathbf{CVC}^T)^{-1} \mathbf{C} \bar{\mathbf{y}}_{..} \geq F_{p-1,f-p+2,\alpha} \quad (2.22)$$

missä $f = N-J$ ja $V = SS_{\text{ERROR}}$.

2.6.5 Polynomianalyysi

Polynomianalyysillä selvittiin, millaisilla kasvukäyrillä koetekijöiden vaikutusta mineralisaatioon voitiin kuvata. Kasvukäyriä voidaan kuvata lineaarisilla, neliömäisillä, kuutiollisilla jne. polynomeilla (Milliken & Johnson 1984, s. 124), eli tutkitaan, voidaanko tuloksia selittää ensimmäisen asteen yhtälöllä, toisen asteen yhtälöllä tai kolmannen asteen yhtälöllä jne. Ensimmäisen asteen yhtälö on muotoa $N(t) = at+b$, toisen asteen yhtälö on muotoa

$N(t) = at^2+bt+c$ ja kolmannen asteen yhtälö on muotoa $N(t) = at^3+bt^2+ct+d$. Yhtälöissä t on aika ja $N(t)$ mineraalitypen määrä hetkellä t . SAS-ohjelma käytti sovitukseen ortogonaalisia polynomeja.

2.7 Mineralisaatio- ja nitrifikaatioprosessien mallintaminen

2.7.1 Yleistä

Mekanistiset mallit pyrkivät kuvaamaan typen kiertoa kokonaisuudessaan tai ne ovat keskittyneet jonkin osaprosessin kuvaamiseen. Mallien käytössä pyritään prosessin ymmärtämiseen ja jonkin osaprosessin ennustamiseen. Usein ollaan kiinnostuneita esimerkiksi siitä, kuinka mineraalityppeä kertyy maahan. (Frissel & al. 1981 s. 3).

Mineralisaatiota voidaan kuvata yhdellä yhtälöllä tai sarjalla yhtälöitä. Eräissä mineralisaatiota kuvaavissa malleissa on otettu huomioon esimerkiksi maan orgaanisen aineksen erilaiset osuudet eli on otettu eri varastot esim. orgaanisen aineksen helposti ja vaikeasti hajoavalle fraktiolle. (Cabrera & Kissel 1988 ja Hansen & al. 1991).

Tässä työssä mekanismeja käytettiin selitettäessä mineralisaation kinetiikkaa ja määriteltäessä mineralisaationopeudet eri maalajeille ja kosteuksille.

2.7.2 Mineralisaation ja nitrifikaation kinetiikka

Typen mineralisaation oletettiin noudattavan ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa:

$$dN/dt = -k_{\min} * N \quad (2.23)$$

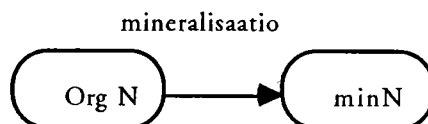
jossa N tarkoitti yksivaiheisessa prosessissa orgaanisen typen varastoa ja kaksivaiheisessa prosessissa ammonifikaatiossa orgaanisen typen varastoa ja nitrifikaatiossa ammoniumtypen varastoa.

Mallintamisessa käytettiin STELLA-ohjelmistoa (Anon. 1990). Yhtälöiden (2.23) numeeriseen ratkaisemiseen käytettiin Runge-Kutta- menetelmää.

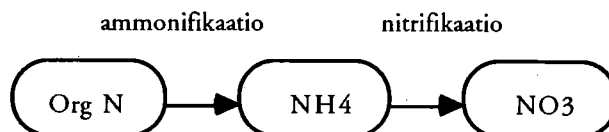
Orgaanisen typen, ammoniumtypen ja nitraattitypen alkuarvot malliin saatiin mittaus-tuloksista. Orgaanisen typen määrän arvioitiin olevan kokonaistypen ja mineraalitypen (NO_3+NH_4) erotus.

Aluksi valittiin mahdollisimman yksinkertainen lähestymistapa, eli mineralisaatiota mallinnettiin yksivaiheisena prosessina, jossa alkuvaraston suuruutena oli orgaanisen typen määrä (kuva 2.3a). Seuraavaksi mallinnettiin kaksivaiheinen prosessi, jossa ammonifikaation alkuvarastona oli orgaanisen typen määrä ja nitrifikaation alkuvarastona ammoniumtypen määrä, ja lopputuotteina ammonium- ja nitraattityppi (kuva 2.3b). Lopuksi mallia muutettiin, niin että alkuvarastona oli tietty osa orgaanisen typen määrästä, eli ns. potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä (N_0). Tässä pyrittiin samanlaiseen malliin kuin Cabrera & Kissel (1988). Potentiaalisesti mineralisoituvan typen varaston suuruus arvioitiin maksimi-mineralisaation perusteella, siten että aluksi varastona pidettiin mittauksista saatua maksimi-mineralisaatiota ja sitä lisättiin aina 20 %, kunnes löydettiin oikea suuruusluokka.

a)



b)



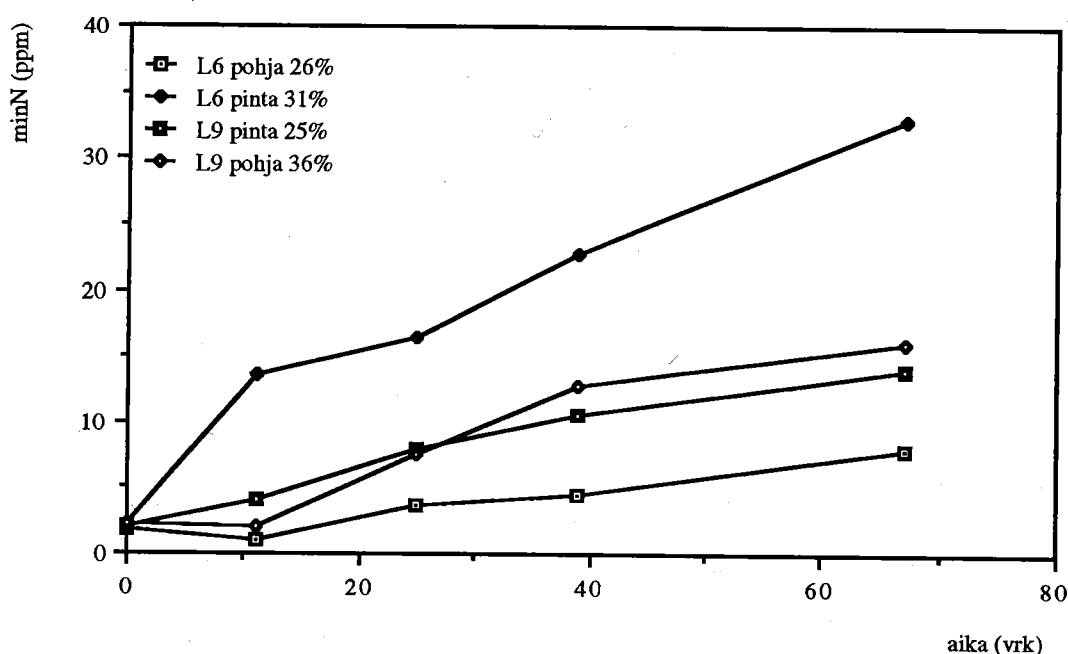
Kuva 2.3 Typen mineralisaatiota kuvaavien mallien rakenne
a) yksivaiheinen prosessi b) kaksivaiheinen prosessi

Mallien toimintaa tarkasteltiin eri parametriarvoilla vertaamalla havaittuja ja laskettuja arvoja toisiinsa. Parametrien alkuarvot valittiin kirjallisuuden perusteella. Kokonaismineralisaatiota kuvaava kerroin k_{\min} määritettiin maalajeille siten, että ammonifikaatiota ja nitrifikaatiota mallinnettiin yhtenä prosessina (Kuva 2.3a). Kaksivaiheisesta mallista saatiin typen mineralisaatiovakiot k_{amm} ja k_{nitr} , joista ensimmäinen kuvasi ammonifikaation ja jälkimmäinen nitrifikaation nopeutta. Mallin rakenne on kuvassa 2.3b. Kertoimien dimensiot ovat $1/d$.

3. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELO

3.1 Mittaustulokset

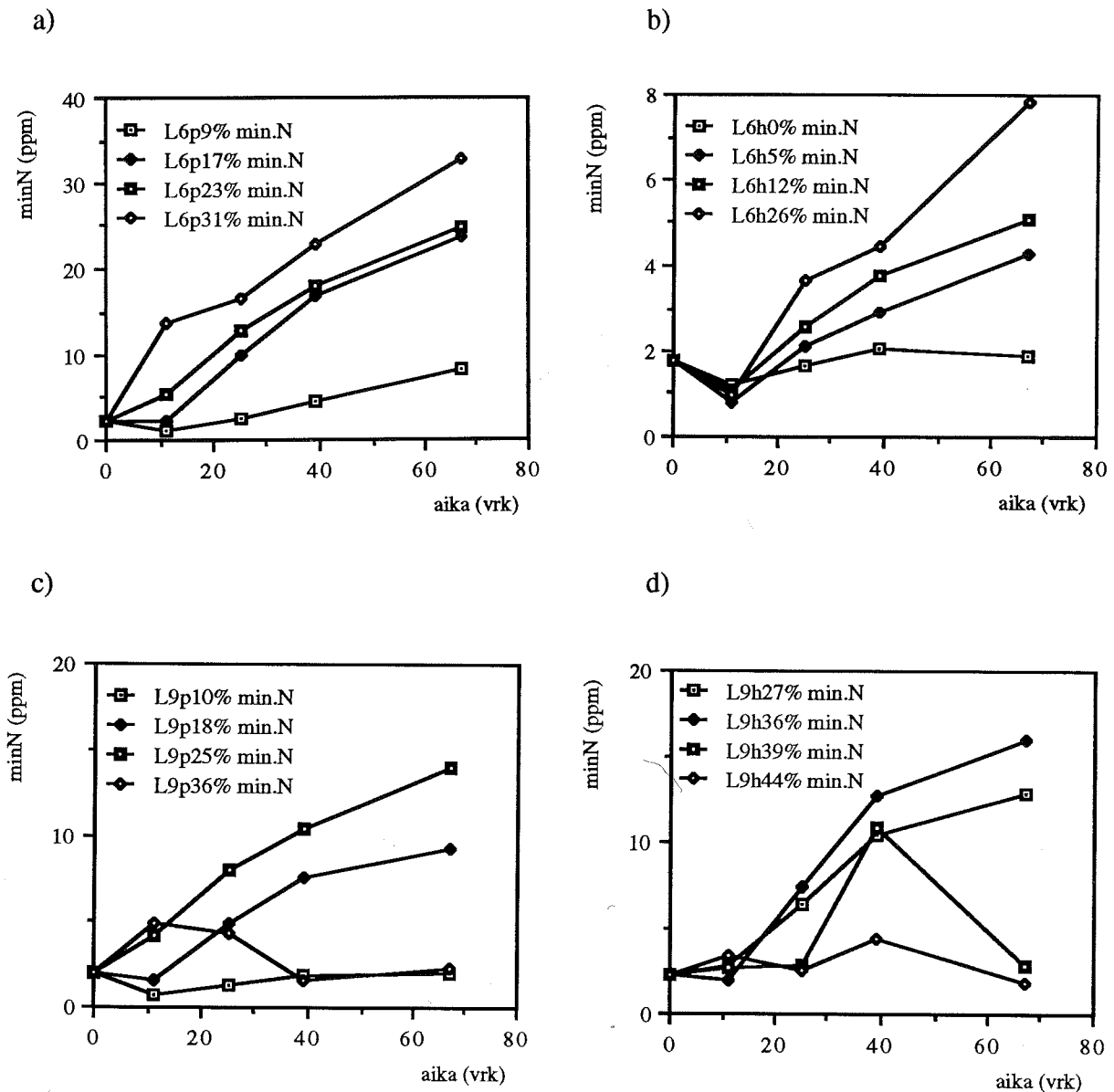
Typen mineralisaatiossa eri maalajeissa ja eri kosteustiloissa oli huomattavia eroja. Maksimi-mineralisaatiot 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen eri maalajeilla vaihtelivat 8-33 $\mu\text{gN g}^{-1}$ kuivaa maata (kuva 3.1). Yksityiskohtaiset tulokset ovat liitteessä 3. Tuloksissa on mukana maalajien alkuperäiset NO_3^- - ja NH_4^- -typen määrät.



Kuva 3.1 Eri maalajien suurimmat mineraalityypen määrät

Eniten mineralisaatiota tapahtui lysimetrin 6 pintamaassa ja vähiten hiedassa. Tutkitut kosteudet ovat taulukossa 2.4. Kaikki arviot maan vesipitoisuuden (til.-%) ja pF-arvojen välillä tehtiin nyt määritettyjen vedenpidätyskäyrien mukaan, joten lopulliset kosteudet poikkesivat siitä, mihin alunperin pyrittiin. Lysimetrin 6 pinta- ja pohjamaassa tapahtui eniten mineralisaatiota kosteimmissä olosuhteissa, eli hiedalla 26 ja pintamaalla 31 tilavuusprosentissa ja vähiten pienimmissä kosteuksissa eli hiedalla 0 ja pintamaalla 9 tilavuusprosentissa. Lysimetrin 9 pintamaassa tapahtui eniten mineralisaatiota 25 tilavuusprosentissa eli toiseksi suurimmassa kosteudessa. Lysimetrin 9 pohjamaassa mineralisaatio oli voimakainta toiseksi alhaisimmassa kosteudessa eli 36 tilavuusprosentissa. Tätä kosteammassa näytteissä typen mineralisaatio väheni huomattavasti molemmilla maalajeilla. 67 vuorokauden aikana tapahtunut suurin nettomineralisaatio oli hiedassa 6 $\mu\text{gN g}^{-1}$, lysimetrin 9 pintamaassa 12 $\mu\text{gN g}^{-1}$, hiesussa 14 $\mu\text{gN g}^{-1}$ ja lysimetrin 6 pintamaassa 31 $\mu\text{gN g}^{-1}$. Jos

mineraalitypen määrä lasketaan hehtaaria kohden 10 cm:n kerroksessa, niin se oli vastaavasti hiedassa 8.5 kg, lysimetrin 9 pintamaassa 13.9 kg, hiesussa 19.8 kg ja lysimetrin 6 pintamaassa 34.6 kg. Maalajien mineralisaatiot eri kosteuksissa ovat kuvassa 3.1.



Kuva 3.2 Mineralisoituneen typen määrät eri maalajeissa ja eri kosteuksissa
a) lysimetrin 6 pinta b) karkea hieta c) lysimetrin 9 pinta d) hiesu

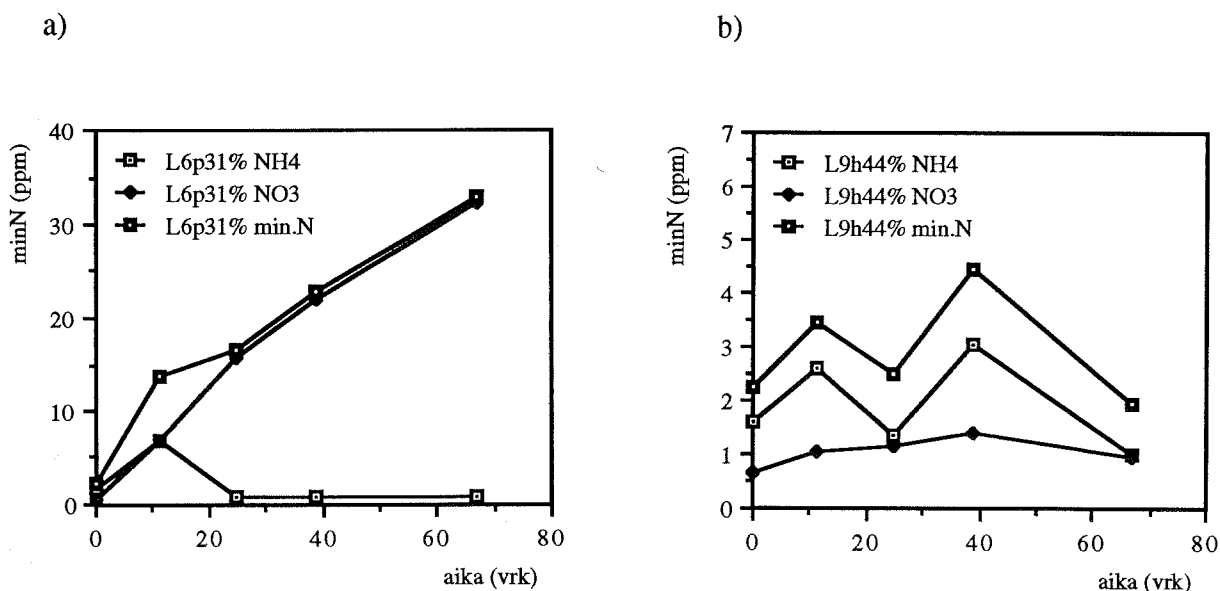
Näytteistä tehtiin myös ns. "nollakokeet", eli ilmakeivattuja maanäytteitä inkuboitiin $\pm 20^{\circ}\text{C}$:ssa 67 vuorokautta. Nämä tulokset ja maalajien tausta-arvot on esitetty taulukossa 3.2. Lysimetrin 6 pintamaan kosteus oli 2.0 til.-%, lysimetrin 9 pintamaan 1.9 til.-% ja hiesun 2.5 til.-%.

Taulukko 3.1 Ilmakuivien maiden mineraalityypimäärät 67 vrk:n inkuboinnin jälkeen

Näyte	Nollakoe		Tausta- arvot	
	NO ₃ [ppm ¹⁾]	NH ₄ [ppm ¹⁾]	NH ₄ [ppm ¹⁾]	NO ₃ [ppm ¹⁾]
L6 pinta	2.31	0.54	1.63	0.53
pohja			1.28	0.47
L9 pinta	2.01	0.48	1.55	0.45
pohja	1.73	0.52	1.59	0.64

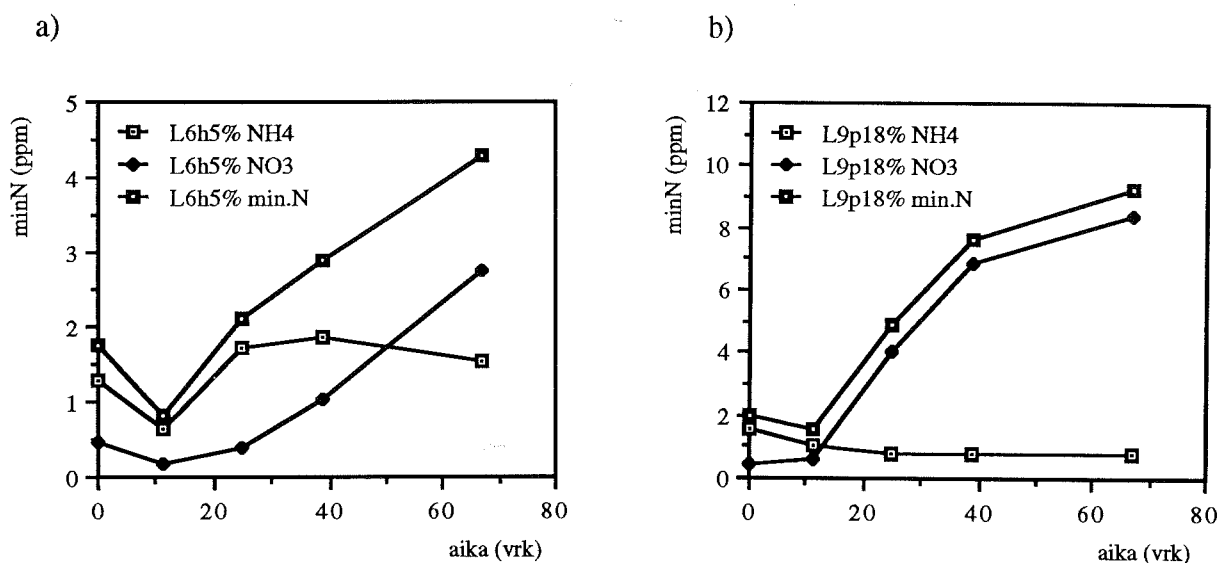
1) µg N/g kuivaa maata

Inkubointikokeissa kaikissa maanäytteissä ammoniumtypen määrä pysyi yleensä pienenä ja vain nitraatin määrä kasvoi. Ensimmäisen inkubointijakson aikana tapahtui ammoniumtypen määrässä kasvua, mutta seuraavien inkubointijaksojen aikana se väheni ja pysyi lopulta vakiona (kuva 3.3a). Lysimetrin 9 pinta- ja pohjamaan kosteimmissä näytteissä, joissa mineralisoituneen typen määrä oli pieni, ammoniumtypen määrä oli suurempi kuin nitraatin (kuva 3.3b). Näytteille ominaista oli myös se, että ensimmäisen inkubaatiojakson aikana näytteiden mineraalityypimäärä pieneni tai pysyi vakiona alhaisissa kosteuksissa (kuva 3.4).



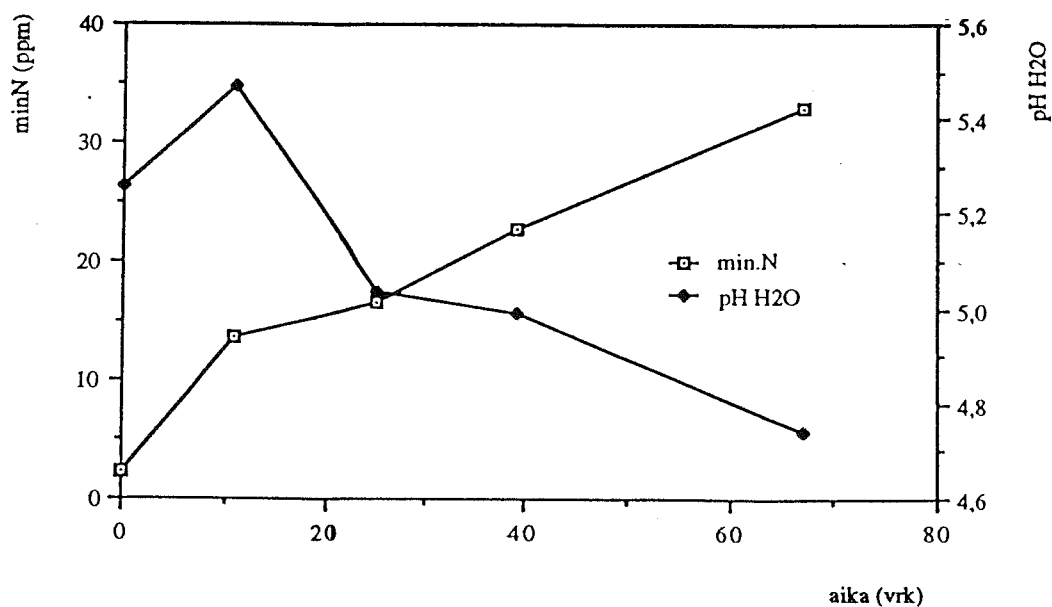
Kuva 3.3 Mineraalitypen määrät ja osuudet eri tyyppisissä maalajeissa
a) lysimetrin 6 pintamaa b) hiesu

Näytteiden pH laski järjestelmällisesti kaikkien inkubointijaksojen ajan. pH laski eniten niissä näytteissä, joissa nitrifikaatio oli suurin (kuva 3.5). Jokaisen näytteen pH oli kuitenkin ensimmäisen inkubointijakson jälkeen noussut, ja vasta tämän jälkeen alkoi laskea. Suuntaus oli sama sekä vesi- että kalsiumkloridisuspensiosta mitatuissa pH-arvoissa, mutta muutokset olivat suuremmat vesisuspensiosta mitatuissa arvoissa. Inkuboinnin jälkeen alhaisin pH(H₂O), 4.7, oli hiedan pintamaassa, jossa mineralisaatio oli korkein ja maalajin alku-peräinen pH alhainen. Suurin pH:n muutos, 0.73 pH-yksikköä, tapahtui lysimetrin 6 pintamaassa kosteudessa 31 tilavuusprosenttia, jossa mineralisaatio oli suurin. Maalajien pH:den alkuarvot ovat taulukossa 2.3.



Kuva 3.4 NH₄- ja NO₃-typen määrät sekä niiden summat erityyppisissä maalajeissa
a) karkea hiehta, kosteus 5 til.-% b) lysimetrin 9 pintamaa, kosteus 18 til.-%

Tuloksista arvioitiin vuotuinen mineralisaatio maan tilavuutta kohden sekä kasvukauden aikana että roudattoman kauden aikana. Termisen kasvukauden pituus, jolloin vuorokauden keskilämpötilat ovat yli 5°C, on Lounais-Suomessa 180 vrk (Kuusisto 1986, s.25). Roudattoman kauden pituutena pidettiin 230 vrk, ja muun ajan maan oletettiin olleen roudassa, jolloin mineralisaatiota ei oletettu tapahtuneen. Roudattoman kauden aikana mineralisaation oletettiin tapahtuneen maksimitheholla lämpötilassa 20°C, joten saadut tulokset ovat maksimiarvoja. Lämpötila vaikuttaa mineralisaationopeuteen siten, että nopeuden oletetaan kaksinkertaistuvan, kun lämpötila nousee 10 astetta (Stanford & al. 1973). Mineralisaation optimilämpötila on noin 35°C. Lisäksi maaperän mikrobiologinen aktiivisuus on suurempi pintakerroksissa kuin pohjakerroksissa. Tulokset ovat taulukossa 3.2.



Kuva 3.5 pH:n muutos lysimetrin 6 pintamaassa, kosteudessa 31 til.-%

Taulukko 3.2 Laboratoriokokeisiin perustuvat arvot mineralisoituneen typen määrälle

Näyte	Roudaton aika ¹⁾ Kasvukausi ²⁾		Näyte	Roudaton aika ¹⁾ Kasvukausi ²⁾	
	minN (g/m ³)	minN (g/m ³)		minN (g/m ³)	minN (g/m ³)
L6 pinta 9%	31.33	24.52	L9 pinta 10%	7.81	6.11
L6 pinta 17%	90.47	70.80	L9 pinta 18%	36.70	28.72
L6 pinta 23%	95.67	74.87	L9 pinta 25%	55.54	43.47
L6 pinta 31%	126.50	99.00	L9 pinta 36%	9.02	7.06
L6 pohja 0%	9.10	7.12	L9 pohja 27%	63.67	49.83
L6 pohja 5%	20.45	16.00	L9 pohja 36%	78.94	61.78
L6 pohja 12%	24.40	19.10	L9 pohja 39%	27.81	21.76
L6 pohja 26%	37.46	29.32	L9 pohja 44%	19.07	14.92

1) roudaton aika 230 vrk

2) kasvukausi 180 vrk

3.2 Mittaustulosten tarkastelu

Vähiten mineralisaatiota tapahtui 67 vrk inkubointijakson aikana hiedassa, jossa oli huomattavasti vähemmän orgaanista ainesta kuin muissa maalajeissa. Pintamaiden orgaanisen aineksen pitoisuus oli noin 15 kertaa suurempi kuin hiedan ja noin kaksi kertaa suurempi kuin saven. Suurin osa maaperässä olevasta typestä on sitoutunut orgaanisiin yhdisteisiin, joten maissa, joiden orgaanisen aineksen pitoisuus on suuri, on yleensä suurempi potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto kuin mineraalimaissa. Vaikeasti mineralisoituu aromaattisiin, heterosyklisiin humiineihin sitoutunut tyyppi ja helposti mineralisoituvia ovat mikrobeista, kasveista ja eläimistä peräisin olevat aminohapot, peptidit, proteiinit ja proteidit (Furrer & Stauffer 1986).

Vaikka sekä lysimetrin 6 pintamaan ja lysimetrin 9 pintamaan fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet olivat samat (taulukot 2.1, 2.2 ja 2.3), niin lysimetrin 6 pintamaassa tapahtui huomattavasti enemmän mineralisaatiota.

Karvonen (1992) tutki lämpötilan vaikutusta typen mineralisaatioon. Koejärjestelyt olivat samantyyppiset kuin tässä esitetyt, mutta maalajit olivat hiesua ja pintamaata lysimetristä 9 ja hietaa ja pintamaata lysimetristä 2. Lysimetriä 2 ei ollut lannoitettu. Pintamaan orgaanisen aineksen pitoisuus oli 10.16 %, kokonaistyphen määrä 0.901 mg g⁻¹ ja C/N-suhde 53.37. Hiedan vastaavat arvot olivat 0.51 %, 0.053 mg g⁻¹ ja 29.58. Lysimetrin 2 pintakerroksen paksuus oli noin 20 cm ja lysimetrissä oli huomattavastirehevämpi kasvillisuus kuin lysimetrissä 6. Korkein lämpötila kokeessa oli 15 °C. Tässä lämpötilassa korkein nettomineralisaatio 25.8 ppm tapahtui lysimetrin 2 pintamaassa ja pienin nettomineralisaatio 2.7 ppm hiedassa. Eri maalajien suurimpia nettomineralisaatioita on verrattu taulukossa 3.3. Nettomineralisaatio oli hietalysimetrien pintamaissa suurempi kuin lysimetrin 9 pintamaassa. Tämä voi johtua siitä, että näissä pintamaissa on helposti hajoavia orgaanisia yhdisteitä.

Lysimetrin 6 pintamaassa nettomineralisaatio on 20 % korkeampi kuin lysimetrin 2 pintamaassa ja pohjamaassa 125 % korkeampi kuin lysimetrin 2 pohjamaassa. Erot selittyvät lämpötilan nousulla ja pohjamaan matalammalla C/N-suhteella. Lysimetrissä 6 oli huomattavasti heikompi kasvillisuus kuin lysimetrissä 2, joten pintamaiden orgaanisen aineksen rakenne voi olla erilainen. Tämän vuoksi varsinkin lysimetrin 6 pohjamaan korkeampi nettomineralisaatio saattaa johtua myös lannoituksesta. Lysimetriä 6 oli lannoitettu vuonna 1989 NPK-lannoitteella 500 kgN ha⁻¹. Lysimetrin 9 pintamaata oli myös lannoitettu samana vuonna, mutta lannoitteen määrä oli ollut 100 kgN ha⁻¹. Lannoituksen on havaittu lisäävän typhen mineralisaatiota maaperässä. Janssonin & Perssonin (1985, s.237) mukaan lannoitus lisää maan oman typhen mineralisaatiota ja kasvien typhen ottoa. Tätä on selitetty erilaisilla lannoituksen aiheuttamilla fysikaalisilla ja kemiallisilla muutoksilla, esim. juurten kasvulla ja pH:n muutoksella, jotka vaikuttavat mikrobien toimintaan, sekä ritsosfäärissä tapahtuvilla

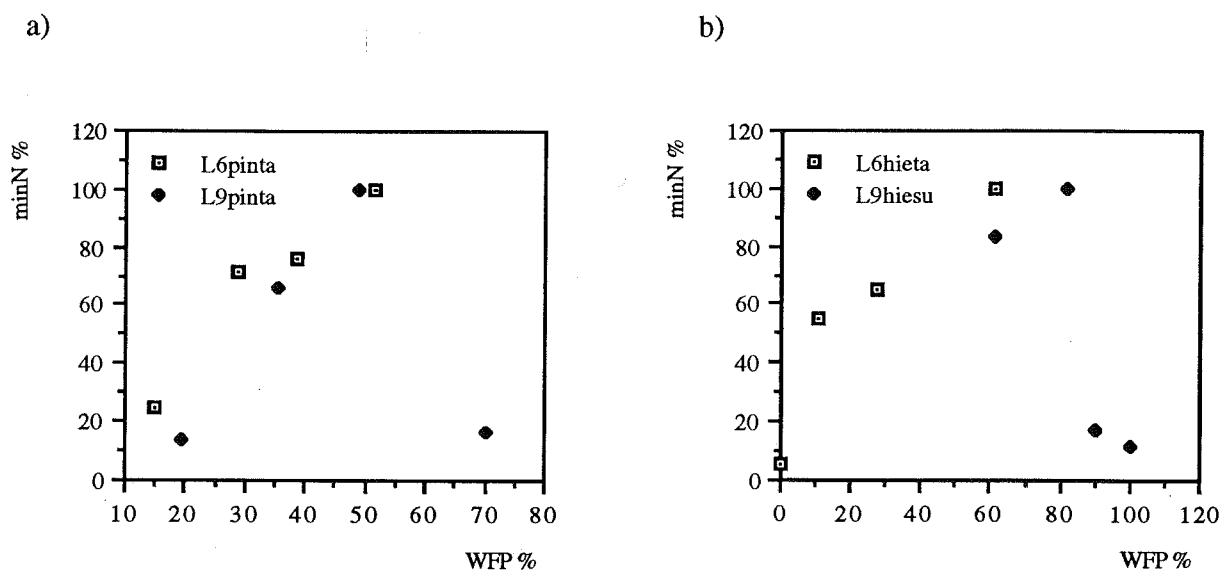
Taulukko 3.3 Lannoituksen vaikutus typen nettomineralisaatioon

Näyte	Lannoitus [kg N/ha]	Lämpötila [C°]	Nettomineralisaatio [ppm ¹⁾]
L2 pinta	0	15	25.8
L2 pohja	0	15	2.7
L9 pinta	100	15	10.3
L9 pohja	100	15	15.4
L6 pinta	500	20	30.8
L6 pohja	500	20	6.1
L9 pinta	100	20	12.0
L9 pinta	100	20	13.7

1) µg N/g kuivaa maata

reaktioilla. Broadbent (1965) ei pidä mitään näistä yksistään riittävänä selityksenä, vaan olettaa, että kyseessä on usean eri tekijän yhteisvaikutus.

Hietaa lukuunottamatta maalajit noudattivat suhteellisen hyvin kirjallisuudesta löytyneitä arvioita maan kosteuden ja mineralisaation välisestä suhteesta. Stanfordin & Epsteinin (1974) mukaan mineralisaatiomaksimi tapahtui, kun maankosteus oli välillä 0.33-0.1 bar eli 80-90 % maan huokostilavuudesta oli täyttynyt vedellä. Reichmanin (1966) mukaan typen mineralisaatio oli suoraan verrannollinen maan kosteuteen, kun kosteus oli 0.2-15 bar. Reichmanin tutkimat maalajit olivat hiesua (fine sandy loam ja loam) ja Stanfordin & Epsteinin tutkimat maalajit vaihtelivat hiedasta hiesusaveen (fine sandy loam, silty clay loam). Nyt tehdyissä kokeissa mineralisaatio hiesussa väheni 0.1 bar imussa, mutta pintamaassa vasta 1 bar imussa. Hiedan kaikki kosteustasot olivat sellaisia, että paineena ilmaistuna niissä ei olisi pitänyt lähdekirjallisuuden mukaan tapahtua mineralisaatiota. Kuitenkin hiedan maksimimineralisaatio tapahtui suurimmassa tutkitussa kosteudessa. Tähän oletettavasti oli syynä hiedan suuri raekoko verrattuna muihin maalajeihin. Jos näitä lukuja vertaa vedellä täytettyyn huokostilavuuteen, niin tulokset ovat paremmin vertailukelpoisia. Kaikilla maalajeilla mineralisaatio ehtyy, kun yli 90 % huokostilavuudesta on täynnä vettä. Pintamailla kriittinen arvo vaikuttaa olevan jo noin 70 % (taulukko 2.4). Typen mineralisaation ja kosteuden suhteet voidaan esittää graafisesti niin, että vaaka-akselilla on vedellä täyttyneen huokostilavuuden suhde ja pystyakselilla mineralisaatio prosentteina maksimimineralisaatiosta (kuva 3.6). Maksimimineralisaatio tapahtuu, kun 50-80 % huokosten tilavuudesta on täyttynyt vedellä. Alexanderin (1964) mukaan optimi vesipitoisuus ammonifikaatiolle on 50-75 % maan maksimivedenpidätyskyvystä.



Kuva 3.6 Maan kosteuden ja mineralisaation välinen riippuvuus mittaustulosten perusteella. Min N (%) on ammonium- ja nitraattitypen määrä % maksimimäärästä. WFP on vedellä täyttyneiden huokosten tilavuus prosentteina maan huokoisuudesta a) lysimetrien pintamaat b) karkea hieta ja hiesu

Optimikosteutta kosteammissa näytteissä ei havaittu tapahtuvan nettomineralisaatiota. Mineralisaatio on saattanut loppua hapen puutteen vuoksi tai mineraalityppi on saattanut kadota näytteistä denitrifikaatiossa tai sitoutua takaisin orgaaniseen ainekseen immobilisaatiossa. Schmidtin (1985) mukaan hapen määrä on nitrifikaatioon osallistuville bakteereille rajoittava tekijä ja huokosissa oleva vesi rajoittaa hapen määrää. Toisaalta denitrifikaatio kasvaa kosteuden lisääntyessä ja hapen vähetessä. Yleensä kentällä denitrifikaatio on vähäistä tai puuttuu kokonaan, jos maan kosteustaso on alle 60 % vedenpidätyskyvystä (Paul & Clark 1989, s. 157).

Koejärjestely vaikuttaa saatuihin tuloksiin huomattavasti, sillä mm. maiden kuivaamisen ja uudelleen kostuttamisen oletetaan lisäävän mineralisaatiota. Mineralisaation lisääntymisen on todettu riippuvan maan orgaanisen hiilen määrästä ja siitä, kuinka kauan maanäytettä on säilytetty kuivattuna (Hesse 1971, s. 186). Koemaita säilytettiin kuivattuina 0-1 viikkoa, joten Hessen sivulla esittämän diagrammin mukaan koejärjestely olisi lisännyt mineralisaatiota pintamaissa <math>< 5 \text{ mg}/100 \text{ g}</math> maata. Tulos ei kuitenkaan ole suoraan vertailukelpoinen, koska mailla on erilaiset C/N-suhteet. Muiden maalajien C-pitoisuus oli pienempi kuin pintamaiden, joten koejärjestelyn vaikutus oli myös pienempi. Cabrera & Kissel (1988a) vertasivat tämän tyyppisellä koejärjestelyllä saatuja tuloksia kenttämittauksiin, ja totesivat, että laboratoriokokeiden perusteella tehdyt arviot mineralisaatiosta saattavat johtaa huomattaviin (67-343 %) yliarviointeihin. He vertasivat myös koejärjestelyjä, joissa toisessa maata kuivattiin ja kostutettiin uudelleen ja toisessa otettiin mahdollisimman häiriintymättömät

näytteet kentältä. Näytteitä inkuboitiin samanlaisissa olosuhteissa. Heidän mukaan mineralisaatio kuivatuissa näytteissä oli huomattavasti suurempi kuin mineralisaatio häiriintymättömissä näytteissä (Cabrera & Kissel 1988b). Lisäksi maiden kostutustavalla, eli maan veden määrällä ja jakautumisella, oli vaikutusta typen mineralisaatioon (Cassman & Munns 1980). Kuivatun maan kostuttamista sekoittamalla siihen tislattua vettä ei pidetty luotettavana menetelmänä, sillä kosteus jakaantui maahan epätasaisesti. Stanford & Smith (1972) asettivat kyseenalaiseksi inkubaatiokokeet suljetussa astiassa, sillä näytteeseen saattaa muodostua varsinkin pitkien, kymmeniä viikkoja kestävien inkubaatiojaksojen aikana mineralisaatiota ehkäisevät olosuhteet esim. pH:n laskun tai mikrobien aineenvaihdunta-tuotteiden vuoksi.

Taulukossa 3.2 on arvioitu inkubaatiokokeiden perusteella lysimetreissä tapahtuvaa mineralisaatiota. Tuloksia on verrattu lysimetrimittakaavassa v.1990 tehtyihin kokeisiin (Bärlund 1992a), joiden tulokset ovat taulukossa 3.4. Lysimetreissä tapahtunut mineralisaatio arvioitiin orgaanisen typen määrän perusteella, siten että 1 % tai 2 % orgaanisesta tyypestä mineralisoituisi vuosittain. Lysimetrien maiden keskimääräiset kosteudet olivat hiedan pintamaassa noin 30, hiedassa 15, hiesun pintamaassa 24 ja hiesussa 43 til.-%. Lysimetrien 2 ja 4 maalajit olivat hietaa, lysimetrin 9 hiesua. Inkubaatiokokeiden perusteella tehdyt arviot ovat suuremmat kuin taulukossa 3.4 olevat arviot, koska lämpötilan on oletettu olevan koko ajan 20°C. Lisäksi mineralisaatio tapahtuu voimakkaammin pintakerroksissa. Cassman & Munns (1980) tutki mineralisaatiota 108 cm syvässä maaprofiilissa ja sai tulokseksi, että 42 % mineralisoituneesta tyypestä oli pinnassa 18 cm syvässä kerroksessa.

Taulukko 3.4 Mineralisoituvan typen määrät arvioituna orgaanisen typen määrän perusteella (Bärlund 1992)

Lysim.	OrgN pinta [g/m ³]	OrgN pohja [g/m ³]	1%pinta [g/m ³]	2%pinta [g/m ³]	1%pohja [g/m ³]	2%pohja [g/m ³]
2	2300	110	23	47	1.2	2.2
4	1900	120	19	39	1.2	2.3
9	750	620	7.5	15	6.2	12

Taulukon tulokset ovat samaa suuruusluokkaa, ainoastaan hiedan mineralisaatio on laboratoriokokeiden perusteella huomattavasti suurempi, noin viisinkertainen. Tämä voi johtua koejärjestelyistä tai siitä, että lysimetriä 6 oli lannoitettu vuonna 1989 huomattavasti enemmän kuin muita lysimetrejä.

Kosteus vaikuttaa typen nettomineralisaatioon maaperässä siten, että mineraalitypen määrä on suurin silloin, kun 50-80 % maan huokostilavuudesta on täyttynyt vedellä. Kun maan kosteus kasvaa, niin mineraalitypen määrä vähenee tuntuvasti. Esimerkiksi hiesussa kosteuden muutos 36 til.-%:sta 39 til.-%:iin vähentää mineraalitypen määrää kasvukaudella 40 kg ha^{-1} 10 cm kerroksessa eli 67 % maksimiarvosta. Pintamaahan kertyneen mineraalitypen suurimman ja pienimmän määrän välillä oli eroa 30 kg ha^{-1} eli noin 70 %. Typen huuhtoutumista kasvukauden ulkopuolella voitaisiin vähentää nostamalla maan kosteus niin suureksi, että merkittävää nettomineralisaatiota ei tapahtuisi. Kasvukaudella maan kosteuden voisi pitää säätöojituksella mineralisaatiolle suotuisalla tasolla. Kenttäkokeilla pitäisi vielä tutkia, kuinka paljon säätöojituksella voi muuttaa kasvukaudella ja syksyllä maan kosteutta eri kerroksissa.

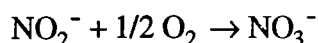
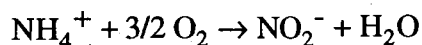
Maalajien C/N suhteet ovat taulukossa 2.2a. Tasapainoisessa viljelymaassa C/N suhde on noin 25. Jos suhde on alle 20, niin se suosii mineralisaatiota ja jos suhde on yli 30, niin se suosii immobilisaatiota. Hietaa lukuunottamatta kaikkien maalajien C/N suhde oli kuitenkin yli 25. Jansson & Perssonin (1985, s. 241) mukaan C/N suhde saattaa toisinaan olla harhaanjohtava, sillä orgaaniset yhdisteet voivat olla sellaisessa muodossa, etteivät mikroorganismit voi niitä käyttää. Tällaisia muotoja ovat mm. useiden kasvien työttömät ligniinit ja turvemaiden yhdisteet, joissa on vähän typpeä. C/N suhdetta tarkasteltaessa on otettava myös huomioon, että nyt tutkitut maalajit eivät ole olleet maanviljelykäytössä. Lisäksi nyt tutkittiin erikseen pintamaa ja pintakerroksen alapuolella oleva kerros, eli kaksi eri maalajia. Yleensä maanviljelymaassa tarkastellaan kyntökerrosta eli noin 20 cm:ä syvää kerrosta, joka on yhtä maalajia. Lysimetrikokeissa (Bärlund 1992a) todettiin, että C/N suhteet vaihtelivat, niin että pintamaassa ne olivat suurimmillaan syksyllä ja hiesussa keväällä. C/N suhteiden keskiarvo oli hiedalla ja hiesulla noin 20 ja pintamailla 35-54.

Ensimmäisen inkubointijakson aikana kuivimmissa näytteissä mineraalitypen määrä pysyi vakiona tai väheni. Tämä saattoi johtua maalajien korkeasta C/N-suhteesta, joka alussa suosii immobilisaatiota. Tosin pintamaiden suuremmissa kosteuksissa tapahtui mineralisaatiota, vaikka näiden maiden C/N-suhde oli korkein. Toisaalta tausta-arvot määritettiin käytännön syistä vasta loppukesästä, joten maanäytteissä oli voinut tapahtua säilytyksen aikana mineralisaatiota, joka oli lisännyt alun mineraalitypen määrää. Taulukossa 3.1 on verrattu 67 vrk:tta inkuboitujen ilmakeivattujen näytteiden arvoja tausta-arvoihin. 5 % riskitasolla merkittävät erot ovat ainoastaan pintamaiden ammoniumtypen määrässä. Miller & Johnson (1964) oli myös saanut tulokseksi, että lähes ilmakeivassa ja lähes kyllästyskosteudessa olevassa maassa tapahtui ammoniumtypen kasaantumista. Näiden tulosten perusteella voisi päätellä, ettei $+4^{\circ}\text{C}$:ssa säilytetyissä näytteissä ole tapahtunut ammonifikaatiota eikä nitrifikaatiota. Yksi syy korkeisiin tausta-arvoihin voi olla siinä, että määritykset tehtiin suoraan ilmakeivasta maasta.

Ammoniumtyypen määrä pysyi lähes vakiona koko inkubointijakson ajan. Tämä saattoi johtua ainakin kahdesta seikasta: uuttomenetelmästä ja typen prosesseista maaperässä. Maanäyteistä uutettiin typpi 2 M KCl-liuokseen. Tämä uutaa maasta vesiliukoisen typen eli nitraattityypen ja vaihtuvan ammoniumin. Nommik & Vahtras (1985, s. 130) määrittelevät ammoniumtyypen eri fraktiot siten, että vaihtuva typpi liukenee uutossa K-suolaliuokseen, mutta maapartikkeleihin sitoutunut ammonium ei liukene. Pysyvästi sitoutunut ammonium on kasveille ja mikrobeille käyttökelpoista, mutta hyvin pienessä määrin (Nommik & Vahtras 1985, s. 143-152). Vaihtuva ammonium on kiinnittynyt maarakeen pinnalle, mutta vaihtuu siitä helposti maanesteeseen ja pysyvästi sitoutunut ammonium on kiinnittynyt niin lujasti kerrosväleihin, että ei vaihdu sieltä maanesteeseen. Yleensä maanviljelymaassa mineralisoitunut ammoniumtyppi nitrifioituu nopeasti, joten maassa olevan ammoniumin määrä on pieni.

Paul & Clarkin (1989) mukaan optimi pH(CaCl₂) nitrifikaatiolle vaihtelee 6.6-8.0. Nitrifikaatio vähenee, jos pH on alle 6.0 ja estyy kokonaan, jos pH on alle 4.5. Furrer & Staufferin (1986) mukaan nitrifikaation optimi pH on välillä 8-9 ja mineralisaation optimi pH välillä 7-8. Nitrifikaatio lakkaa, kun pH laskee alle 5:n. Schmidtin (1982) mukaan nitrifikaatio on riippumaton pH:sta välillä 6-8 ja pH 4 on nitrifikaation alaraja.

pH laski järjestelmällisesti koko koejakson ajan, ja eniten niissä näytteissä, joissa nitrifikaatio oli suurin. Oletettavasti pH:n lasku johtui juuri nitrifikaatiosta, sillä nitrifikaatiossa maahan syntyy H⁺ -ioni. Nitrifikaation reaktioyhtälöt ovat seuraavat:



Näytteiden pH oli koko inkubointiajan alle 6.0, joten alhainen pH vähensi mineralisaatiota. Ainostaan hiesnäytteiden pH oli koko ajan yli 4.5, joten sillä ei ollut vaikutusta mineralisaatioon. Kahden suurimman kosteustason, joissa ei tapahtunut juurikaan mineralisaatiota, pH(CaCl₂) oli noin 5.8. Koska pH ei näytteissä laskenut, niin näytteissä ei ilmeisesti missään vaiheessa ole tapahtunut nitrifikaatiota. Saman huomaa myös lysimetrin 9 pintamaan kosteimmissä näytteessä, jonka pH oli noussut lähes 4.6:ään. Lysimetrin 9 pintamaan pH(CaCl₂) oli kaikkien inkubointijaksojen ajan yli 4.5, mutta lysimetrin 6 pintamaan ja pohjamaan pH(CaCl₂) oli alle 4.5, joten alhaisen pH:n olisi pitänyt estää nitrifikaatio. Näin ei kuitenkaan käynyt. pH(CaCl₂) laski myös, kun näytteissä tapahtui nitrifikaatiota, myttä pH:n laskun huomasi parhaiten pH(H₂O):sta. pH(H₂O) laski alle 5:n vain lysimetri 6 pintamaissa kolmessa kosteimmissä näytteessä, kun inkubointiaika oli 67 vuorokautta.

3.3 Arvio koejärjestelyn onnistumisesta

Kolmen rinnakkaisnäytteen välisiä eroja tarkasteltiin laskemalla tuloksista keskiarvot, keskihajonnat ja vaihteluvälit. Esitetyt tulokset ovat kolmen rinnakkaisnäytteen keskiarvoja. Tulosten vaihteluvälit olivat noin 1-15 % luokkaa joten rinnakkaisnäytteiden mittaustulosten välinen hajonta oli pientä.

Aineistosta etsittiin vieraat havainnot analysoimalla aineistoa, siitä laskettuja vaihtelukertoimia ja laboratoriomittausten aikana tehtyjä muistiinpanoja. Vieraiksi havainnoiksi katsottiin sellaiset tulokset, jotka muunsivat aineistoa niin, ettei se ollut normaalijakautunutta. Valinta tehtiin jäännöstermien perusteella. Näiden mittausten vaihtelukerroin oli huomattavasti suurempi kuin vaihtelukertoimet keskimäärin. Yleensä vaihtelukertoimet vaihtelivat 1-25 %, mutta vierashavainnoilla ne olivat yleensä yli 50 %. Lisäksi laboratorioanalyysien aikaisissa muistiinpanoissa oli näiden näytteiden kohdalla joitain huomautuksia. Vieraat havainnot on esitetty taulukossa 3.5. Nämä havainnot on poistettu, kun tuloksista on piirretty kuvia. Tuloksia ei poistettu tilastollisesta käsittelystä, sillä käytetty ohjelma (SAS GLM-proseduuri) ei sallinut puuttuvia havaintoja monimuuttuja-analyysissä.

Näytteiden kosteustasot pysyivät suhteellisen muuttumattomina koko koejakson ajan. Missään näytteessä kosteuden muutos ei ollut niin suuri, että se olisi voinut aiheuttaa huomattavaa epävarmuutta tuloksiin. Kosteuden suurimman vaihtelun keskiarvo oli noin 0.60 massaprosenttia koko koejakson aikana, mutta suurin ero ei aina ollut ensimmäisen ja viimeisen inkubointijakson välillä. Aineisto testattiin Kruskal-Wallisin yksisuuntaisella varianssianalyysillä, jonka mukaan 5 % riskitasolla ainoastaan lysimetrin 9 pintamaan kosteudessa 7 % ja pohjamaan kosteudessa 26 % oli tapahtunut muutoksia. Pohjamaassa ero oli 0.73 massaprosenttia ja pintamaassa 1.21 massaprosenttia. Typen mineralisaatiota koskevissa tuloksissa ei havaittu tilastollisesti merkittäviä poikkeamia.

Taulukko 3.5 Vieraat havainnot mittaussaineistossa

Näyte	Kosteus [%]	Kerranne	Aika [vrk]	Analyysi
L6 pohja	13	3	25	NO ₃
L6 pohja	5	1	39	NO ₃
L9 pinta	28	1	25	NH ₄
L9 pohja	40	3	39	NO ₃

Näytteiden kostutuksessa ei täysin päästy niihin kosteuksiin, joihin pyrittiin. Pintamaille ei ollut valmista vedenpidätyskäyrää, joten mm. pintamaiden kostuttaminen jouduttiin tekemään arvioimalla. Lisäksi humusmaan kostuttaminen lisäämällä kuivaan maahan vettä onnistui huonosti, joten tällä koejärjestelyllä ei ole ilmeisesti päästy maksimikosteuteen. Maat kostutettiin Vakkilaisen (1982) määrittämien vedenpidätyskäyrien mukaan. Hiedan vedenpidätyskäyrä oli pF-arvojen 0 ja 1 välillä jyrkkä, joten maalajissa ei päästy lähelle kyllästyskosteutta. Hiesun pF-käyrät poikkesivat huomattavasti toisistaan, siten että nyt määritettyjen vedenpidätyskäyrien mukaan maalajin vedenpidätyskyky oli pienempi. Lysimetri 9 ei ole homogeeninen, vaan pintakerroksissa on eri maalaji kuin pohjakerroksissa (Bärlund 1992a). Tämän vuoksi 10-20 cm syvyydellä vedenpidätyskykykin on erilainen.

Kaikkien näytteiden pH oli alle 6.0, jolloin alhaisen pH:n pitäisi vähentää nitrifikaatiota. Ainoastaan niiden hiesunäytteiden, joissa ei tapahtunut nitrifikaatiota, pH oli yli 6.6 eli nitrifikaation pH optimi. Useiden näytteiden pH inkuboinnin aikana oli alle 4.5, jolloin nitrifikaation pitäisi lakata. Näytteiden suurin mineralisaatio tapahtui lysimetrin 6 pintamaassa, jossa pH oli inkuboinnin ajan alle 4.5, eli näissä kokeissa pH ei ehkäisyt nitrifikaatiota. pH:n laskulla on saattanut kuitenkin olla typen mineralisaatiota hillitsevä vaikutus, mutta mineraalitypen lisääntyminen oli kuitenkin melko lineaarista.

Vesitalouden laboratoriossa otettiin kesällä 1991 käyttöön uusi FIA-analysointilaitteisto. Laitteen toimitus viivästy, joten sen sisäänajo osui juuri ensimmäiselle analysointikerralle. Tämän vuoksi hietänäytteiden ensimmäisen inkubaatiojakson kohdalla voi tuloksissa olla virhettä. Ensimmäinen määrittäminen (hieta, 11 vrk) ei ole luotettava, sillä näytteet seisoivat viikonlopun yli. Ilmeisesti tämän seurauksena pintamaan näytteiden ammonium- ja nitraattityypen määrät ovat samat.

3.4 Kosteuden ja ajan vaikutus mineralisaatioon

Varianssianalyysillä tarkasteltiin ainoastaan ammoniumtypen ja nitraattityypen yhteissummaa. Mittaustuloksia analysoitiin ensin monimuuttujavarianssianalyysillä siten, että käsittelyinä olivat aika ja kosteus. Tulokseksi saatiin jokaiselle maalajille, että kosteudella ja ajalla oli voimakas yhteisvaikutus typen mineralisaatioon. Tämän vuoksi testiä ei voinut jatkaa ensimmäistä hypoteesiparia pidemmälle (kts. 2.1). Tulokset ovat taulukossa 3.6. Mineralisaatiosta jokaisessa lysimetrissä piirrettiin profiilikuvat (kuva 3.7).

Kosteuden vaikutusta tutkittiin yksisuuntaisella varianssianalyysillä, sillä kosteuden suhteen koejärjestely oli satunnaistettu. Jokainen aika tutkittiin erikseen, niin että jokaista kosteutta pidettiin yhtenä käsittelynä. Tulokset ovat taulukoissa 3.7 ja 3.8. Tähdellä on merkitty ne keskiarvot, jotka ovat 95 % luottamustasolla merkitseviä Scheffén parittaisen vertailutestin

Taulukko 3.6 Kosteuden ja ajan yhteisvaikutus typen mineralisaatioon, merkitsevyystaso 5 %

Näyte	F ¹⁾	Pr>F ²⁾
L6 pinta	417.10	0.0001
L6 pohja	267.00	0.0001
L9 pinta	219.65	0.0001
L9 pohja	39.82	0.0001

1) Testisuureen arvo

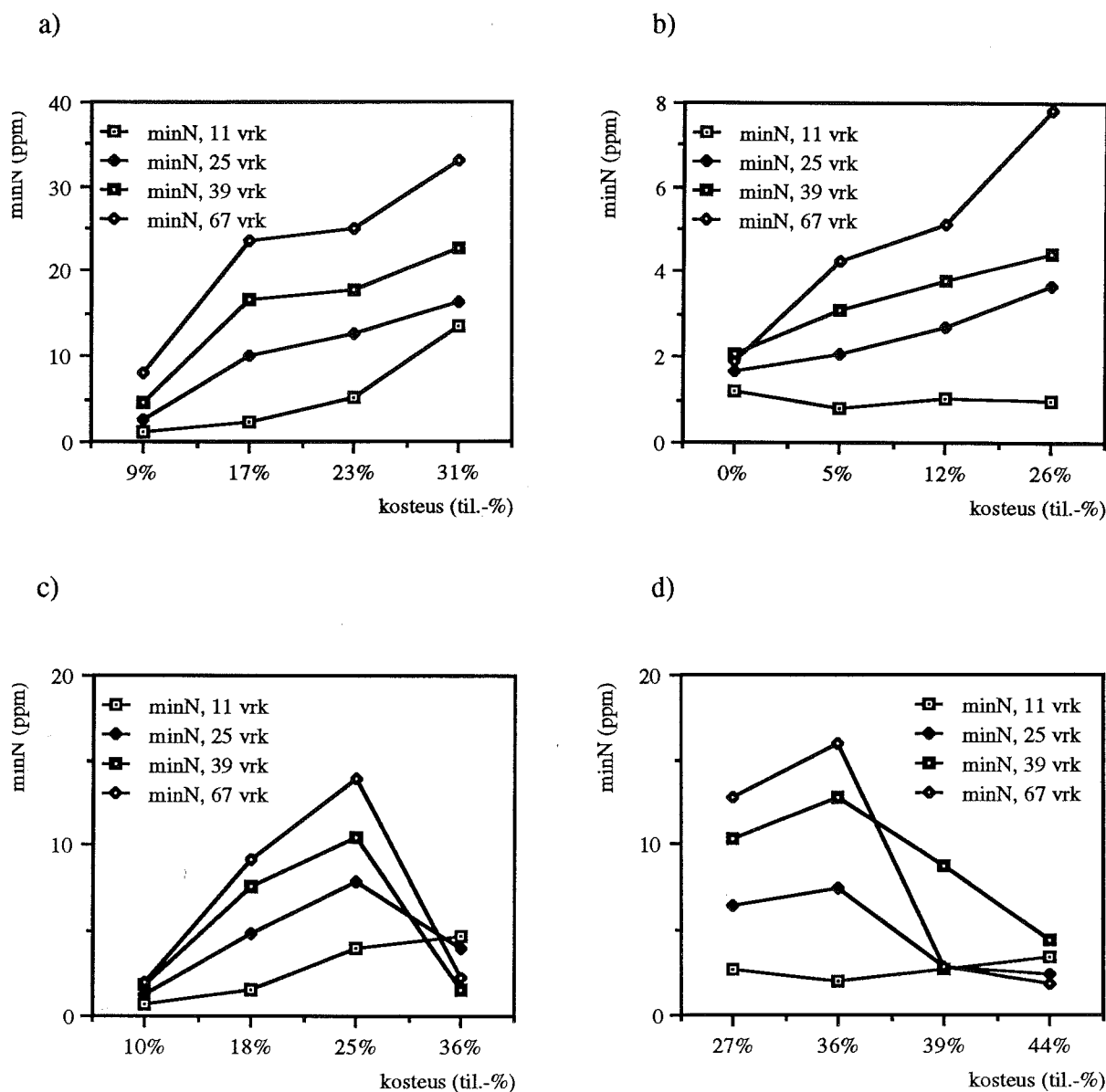
2) Tarkka merkitsevyystaso

mukaan. Niiden kosteuksien väliin on vedetty viiva, joiden välillä ei ole eroa. 67 vrk:n inkuboinnin jälkeen kosteudella on selvä vaikutus typen mineralisaatioon kaikissa muissa näytteissä, paitsi lysimetri 6 pintamaan kosteuksien 17 ja 23 til.-%, lysimetri 9 pintamaan kosteuksien 10 ja 36 til.-% ja hiesun kosteuksien 39 ja 46 til.-% välillä. Lysimetrin 6 pintamaassa kosteustasot ovat ilmeisesti niin lähellä toisiaan, ettei sillä typen mineralisaation kannalta ole merkitystä. Vedellä täyttyneiden huokosten tilavuudessa on vain 10 % ero.

Lysimetrin 9 pintamaassa ei ole eroa kuivimman ja kosteimman näytteen välillä. Hiesussa kahden kosteimman näytteen välillä ei ole eroa. Hiedassa ensimmäisen inkubaatiojakson aikana merkittävä ero oli syntynyt ainoastaan kosteuksien 0 ja 5 til.-% välille. Ensimmäisen inkubaatiojakson aikana hiedassa tapahtui mineraalityypen vähenemistä ilmeisesti immobilisaation vuoksi, mutta seuraavien inkubaatiojaksojen aikana syntyi eri kosteustasojen välille merkittäviä eroja.

Ajan vaikutusta tutkittiin toistetut koeyksiköt-menetelmällä, sillä tulokset eivät olleet ajan suhteen toisistaan riippumattomia. Jokainen kosteus tutkittiin erikseen, niin että aikaa pidettiin yhtenä käsittelynä. Tulokset taulukkoon 3.8 on saatu kaavasta 2.10. Tulokset, joiden välisen eron luotettavuustaso on yli 95 %, on merkitty tähdellä. Niiden tulosten välissä on viiva, joilla ei ole eroa. Tarkat tulokset ovat liitteessä 7. Ajalla on merkittävä vaikutus typen mineralisaatioon. Mineraalityypen määrä on pysynyt samana yleensä vain ensimmäisen inkubaatiojakson (0-11 vrk) aikana sekä viimeisen jakson aikana (39-67 vrk). Ensimmäisen inkubaatiojakson aikana mineralisaatiota ei tapahtunut hiesunäytteissä eikä lysimetrin 6 pintamaan kosteudessa 17 til.-%. Viimeisen inkubaatiojakson aikana mineralisaatiota ei tapahtunut hiesunäytteissä, joiden kosteudet olivat 36 ja 39 til.-%, hiedan kosteudessa 0 til.-% ja lysimetrin 9 pintamaan kosteudessa 36 til.-%. Jaksolla 25-39 vrk mineralisaatiota ei tapahtunut hiedan kosteudessa 26 til.-%. Hiesun kosteudessa 39 til.-% ei tapahtunut merkittävää mineralisaatiota koko 67 vrk jakson aikana. Analyysillä saatiin selville ainoastaan merkittävät muutokset mineraalityypen määrässä, ei mineraalityypen

merkittävää lisääntymistä. Merkittäväksi muutokseksi tulkittiin myös mineraalityypen määrän väheneminen esim. immobilisaation tai denitrifikaation vuoksi. Esimerkiksi hiedan kosteudessa 0 til.-% näyttää mineraalityypen määrässä tapahtuneen merkittäviä muutoksia, vaikka mineraalityypen määrä on kasvanut vain $0.15 \mu\text{g g}^{-1}$ maata 67 vuorokauden inkuboinnin aikana.



Kuva 3.7 Mineraalityypen määrä eri maalajeissa ja eri kosteuksissa

a) lysimetrin 6 pintamaa

b) karkea hieta

c) lysimetrin 9 pintamaa

d) hiesu

Taulukko 3.7 Kosteuden vaikutus mineralisaatioon lysimetrissä 6, merkitsevyystaso 5 %

Näyte	Aika [vrk]	Kosteus [til.-%]	Kosteus [til.-%]	Kosteus [til.-%]	Kosteus [til.-%]		
L6 pinta	11	9	9	17	23	31	
		17		*	*	*	
		23			*	*	
						*	
	25	25	9	9	17	23	31
			17		*	*	*
			23			*	*
							*
	39	39	9	9	17	23	31
			17		*	*	*
			23			*	*
							*
67	67	9	9	17	23	31	
		17		*	*	*	
		23			*	*	
						*	
L6 pohja	11	5	5	12	26	0	
		12				*	
		26				*	
						*	
	25	25	0	0	5	12	26
			5			*	*
			12			*	*
							*
	39	39	0	0	5	12	26
			5		*	*	*
			12			*	*
							*
67	67	0	0	5	12	26	
		5		*	*	*	
		12			*	*	
						*	

*) Mittaustulosten keskiarvojen välillä on merkitsevä ero

-) Mittaustulosten keskiarvojen välillä ei ole merkitsevää eroa

Taulukko 3.8 Kosteuden vaikutus mineralisaatioon lysimetrisssä 9, merkitsevyystaso 5 %

Näyte	Aika [vrk]	Kosteus [til.-%]	Kosteus [til.-%]			
L9 pinta	11	10	10	18	25	36
		18		*	*	*
		25		*	*	*
	25	10	10	36	18	25
		36		*	*	*
		18		*	*	*
	39	36	36	10	18	25
		10		*	*	*
		18		*	*	*
	67	10	10	36	18	25
		36		*	*	*
		18		*	*	*
L9 pohja	11	36	36	40	26	46
		40				
		26				
	25	44	44	39	27	36
		39		*	*	*
		27		*	*	*
	39	44	44	39	27	36
		39		*	*	*
		27		*	*	*
	67	44	44	39	27	36
		39		*	*	*
		27		*	*	*

*) Mittaustulosten keskiarvojen välillä on merkitsevä ero

-) Mittaustulosten keskiarvojen välillä ei ole merkitsevää eroa

Taulukko 3.9 Ajan vaikutus mineralisaatioon, merkitsevyystaso 5 %

Näyte	Kosteus [til.-%]	Aika [vrk]				
		0	11	25	39	67
L6 pinta	9 %	*	*	*	*	
	17 %	—	*	*	*	
	23 %	*	*	*	*	
	31 %	*	*	*	*	
L6 pohja	0 %	*	*	*		—
	5 %	*	*	*	*	*
	12 %	*	*	*	*	*
	26 %	*	*	—	*	*
L9 pinta	10 %	*	*	*		—
	18 %	*	*	*	*	*
	25 %	*	*	*	*	*
	36 %	*	*	*		—
L9 pohja	27 %	—	*	*	*	*
	36 %	—	*	*		—
	39 %	—	—	—	—	—
	44 %	—	*	*	*	*

*) Mittaustulosten keskiarvojen välillä on merkitsevä ero

-) Mittaustulosten keskiarvojen välillä ei ole merkitsevää eroa

Polynomianalyysistä saatiin selville, minkä asteinen polynomi parhaiten selittäisi havaintoja ajan suhteen. Polynomianalyysin tulokset ovat taulukoissa 3.10-3.12. Tulokset, joiden luotettavuustaso on 95 %, on merkitty tähdellä. 1. asteen termi selittää ammonium- ja nitraattitypen yhteissumman muutosta ajan suhteen kaikissa muissa tapauksissa paitsi lysimetrin 9 pinta- ja pohjamaan kosteimmissä näytteissä. Ammoniumin määrän kasvamista selitti parhaiten 1. tai 3. asteen polynomit. Nitraattitypen muutosta voidaan kaikissa tapauksissa selittää 1. asteen polynomilla. Mitä korkeamman asteen polynomi on kyseessä, sitä epälinearisempi on riippuvuus ajan suhteen.

Taulukko 3.10 Polynomianalyysi mineraalityypelle (NO_3+NH_4) ajan suhteen, merkitsevyystaso 5 %

Näyte	Kosteus [tilavuus-%]	Polynomin aste			
		1.	2.	3.	4.
L6 pinta	9 %	*	*	*	
	17 %	*	*	*	*
	23 %	*	*	*	*
	31 %	*	*	*	*
L6 pohja	0 %	*		*	*
	5 %	*		*	*
	12 %	*		*	*
	26 %	*	*	*	*
L9 pinta	10 %	*	*	*	*
	18 %	*		*	*
	25 %	*	*	*	*
	36 %			*	
L9 pohja	27 %	*	*	*	
	36 %	*		*	
	39 %	*			
	44 %				*

Taulukko 3.11 Polynomianalyysi ammoniumtyypelle, merkitsevyystaso 5 %

Näyte	Kosteus [tilavuus-%]	Polynomin aste			
		1.	2.	3.	4.
L6 pinta	9 %	*		*	*
	17 %	*			*
	23 %	*		*	*
	31 %	*		*	*
L6 pohja	0 %	*		*	*
	5 %	*	*	*	*
	12 %		*	*	*
	26 %	*	*	*	*
L9 pinta	10 %	*	*	*	
	18 %	*	*	*	
	25 %	*		*	*
	36 %			*	
L9 pohja	27 %	*		*	
	36 %			*	
	39 %	*	*		
	44 %	*			*

Taulukko 3.12 Polynomianalyysi nitraattitypelle, merkitsevyystaso 5 %

Näyte	Kosteus [tilavuus-%]	Polynomien aste			
		1.	2.	3.	4.
L6 pinta	9 %	*	*		
	17 %	*	*	*	
	25 %	*	*	*	*
	31 %	*	*		*
L6 pohja	0 %	*		*	*
	5 %	*	*		
	12 %	*	*	*	
	26 %	*	*		*
L9 pinta	10 %	*		*	*
	18 %	*	*	*	*
	25 %	*	*	*	*
	36 %	*			*
L9 pohja	27 %	*	*	*	
	36 %	*			*
	39 %	*			
	44 %	*			

3.5 Mineralisaation simuloinnit

Mineralisaatiokertoimet yksivaiheiselle mineralisaatiolle (kuva 2.3a) on annettu taulukossa 3.13 ja ammonifikaatiolle ja nitrifikaatiolle (kuva 2.3b) saadut kertoimet taulukossa 3.14. Typen ammonifikaatiolle ja nitrifikaatiolle mitatut ja simuloidut arvot sekä mineralisaatiolle mitatut ja simuloidut arvot ovat kuvina ajan suhteen liitteissä 4 ja 5. Kertoimet mineralisaatiolle, kun lähtötilanteeksi oletetaan orgaanisen typen varaston sijasta pienempi potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto, ovat taulukossa 3.15. Mineraalitypelle mitatut ja simuloidut arvot on piirretty kuviksi ajan suhteen. Kuvat ovat liitteessä 6. Maan kosteuden ja mineralisaatiokertoimien suhde tapauksessa, jossa orgaanisen typen varasto oli lähtötilanteena, on piirretty kuvaan 3.8 K_{\max} on 1.0 ja se vastaa maksimimineralisaatiota. Kertoimet (taulukko 3.13) on suhteutettu kussakin tapauksessa maksimimineralisaatiota vastaaviin kertoimiin.

Kuvista voi päätellä, että simuloidut arvot ammonifikaatiolle eivät kovin hyvin vastaa mitattuja arvoja, koska ne eivät ota huomioon alussa tapahtuvaa voimakasta ammoniumtypen lisääntymistä (kuva 3.7). Simuloidut arvot pelkälle mineralisaatiolle vastaavat paremmin mitattuja arvoja (kuva 3.8). Ilmeisesti käytetyt mallit (kuva 2.3) ovat liian yksinkertaisia

Taulukko 3.13 Mineralisaatiovakiot, kun lähtötilanteena on orgaanisen typen varasto

Näyte ja kosteus [til.-%]	k_{min} [d ⁻¹]	Näyte ja kosteus [til.-%]	k_{min} [d ⁻¹]
L6 pinta 9%	0.0001	L9 pinta 10%	0.000001
L6 pinta 17%	0.00042	L9 pinta 18%	0.00017
L6 pinta 23%	0.00043	L9 pinta 25%	0.00029
L6 pinta 31%	0.0006	L9 pinta 36%	0.00001
L6 pohja 0%	0.0001	L9 pohja 27%	0.00037
L6 pohja 5%	0.0006	L9 pohja 36%	0.0004
L6 pohja 12%	0.00075	L9 pohja 39%	0.00003
L6 pohja 26%	0.0014	L9 pohja 44%	0.00005

Taulukko 3.14 Mineralisaatiovakiot ammonifikaatiolle ja nitrifikaatiolle

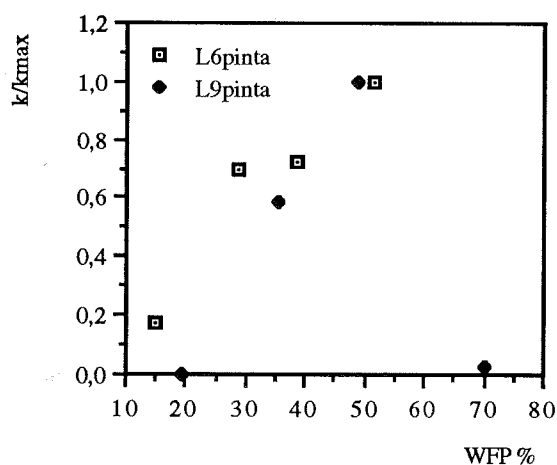
Näyte ja kosteus [til.-%]	k_{amm} [d ⁻¹]	k_{nitr} [d ⁻¹]	Näyte ja kosteus [til.-%]	k_{amm} [d ⁻¹]	k_{nitr} [d ⁻¹]
L6 pinta 9%	0.00011	0.10	L9 pinta 10%	0.000001	0.0125
L6 pinta 17%	0.0004	0.23	L9 pinta 18%	0.00015	0.2
L6 pinta 23%	0.00045	0.19	L9 pinta 25%	0.00025	0.5
L6 pinta 31%	0.0007	0.13	L9 pinta 36%	0.0000025	0.006
L6 pohja 0%	0.00005	0.0001	L9 pohja 27%	0.00035	0.21
L6 pohja 5%	0.00045	0.02	L9 pohja 36%	0.00052	0.10
L6 pohja 12%	0.001	0.025	L9 pohja 39%	0.0002	0.03
L6 pohja 26%	0.0015	0.025	L9 pohja 44%	0.00003	0.002

Taulukko 3.15 Typen mineralisaatiovakiot ja potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto N_0

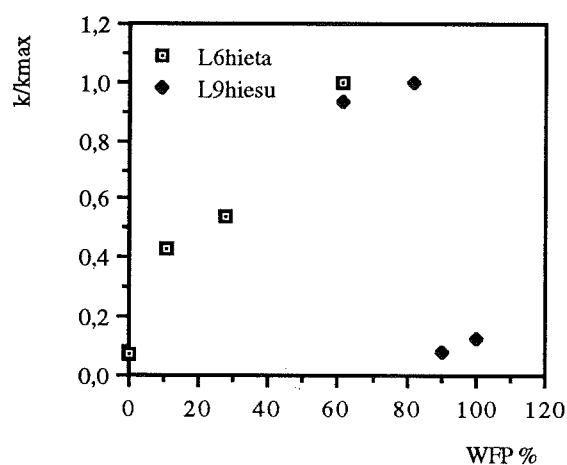
Näyte ja kosteus [til.-%]	N_0 [ppm ¹]	k_{min} [d ⁻¹]	Näyte ja kosteus [til.-%]	N_0 [ppm ¹]	k_{min} [d ⁻¹]
L6 pinta 9%	47	0.015	L9 pinta 10%	20	0.0001
L6 pinta 17%		0.0095	L9 pinta 18%		0.007
L6 pinta 23%		0.009	L9 pinta 25%		0.013
L6 pinta 31%		0.0018	L9 pinta 36%		0.0001
L6 pohja 0%	35	0.0001	L9 pohja 27%	20	0.011
L6 pohja 5%		0.001	L9 pohja 36%		0.017
L6 pohja 12%		0.0015	L9 pohja 39%		0.0006
L6 pohja 26%		0.0025	L9 pohja 44%		0.001

1) $\mu\text{g N/g}$ kuivaa maata

a)



b)

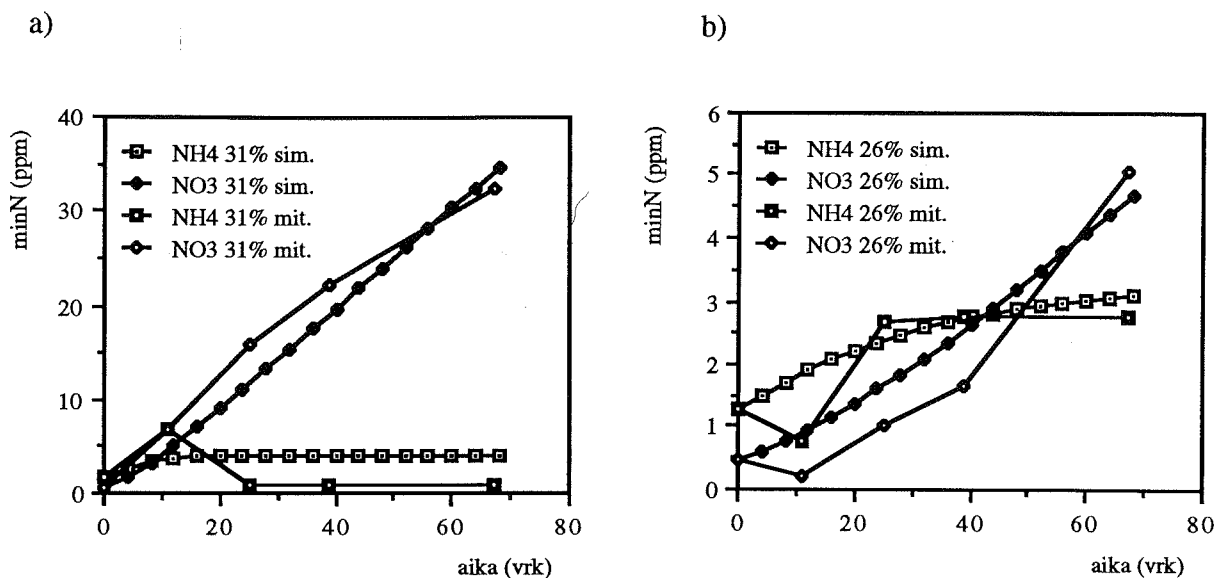


Kuva 3.8

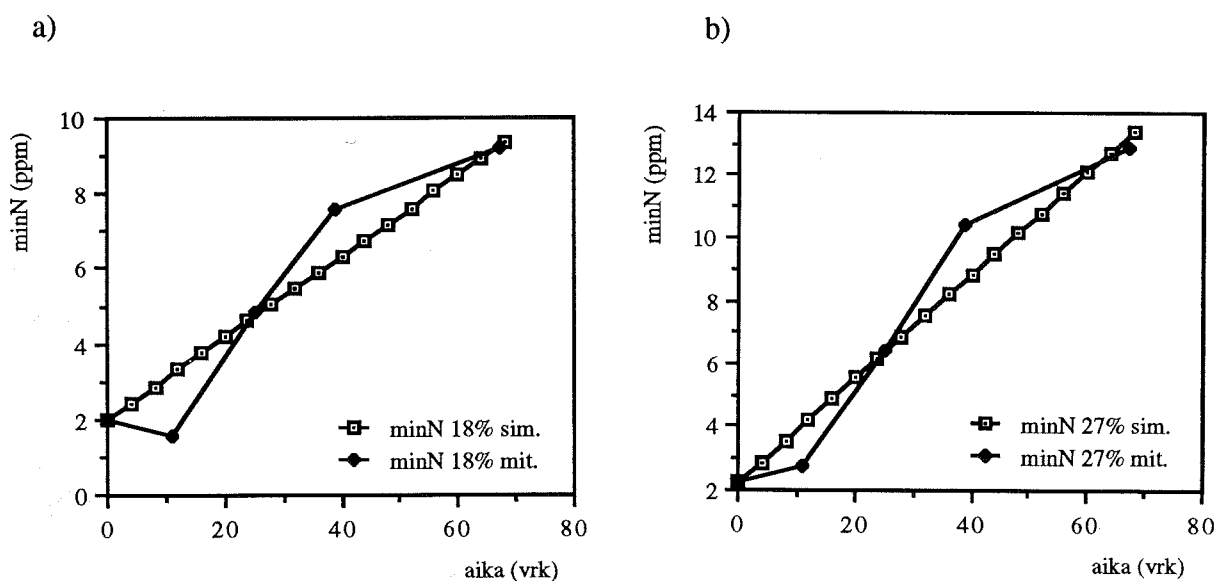
1. kertaluokan mallin kertoimien ja maan kosteuden välinen riippuvuus. WFP on vedellä täyttyneiden huokosten tilavuus prosentteina maan huokoisuudesta. Kertoimet saatu mallista, jossa tarkastellaan koko org. typen varastoa

a) lysimetrien pintamaat

b) karkea hieta ja hiesu

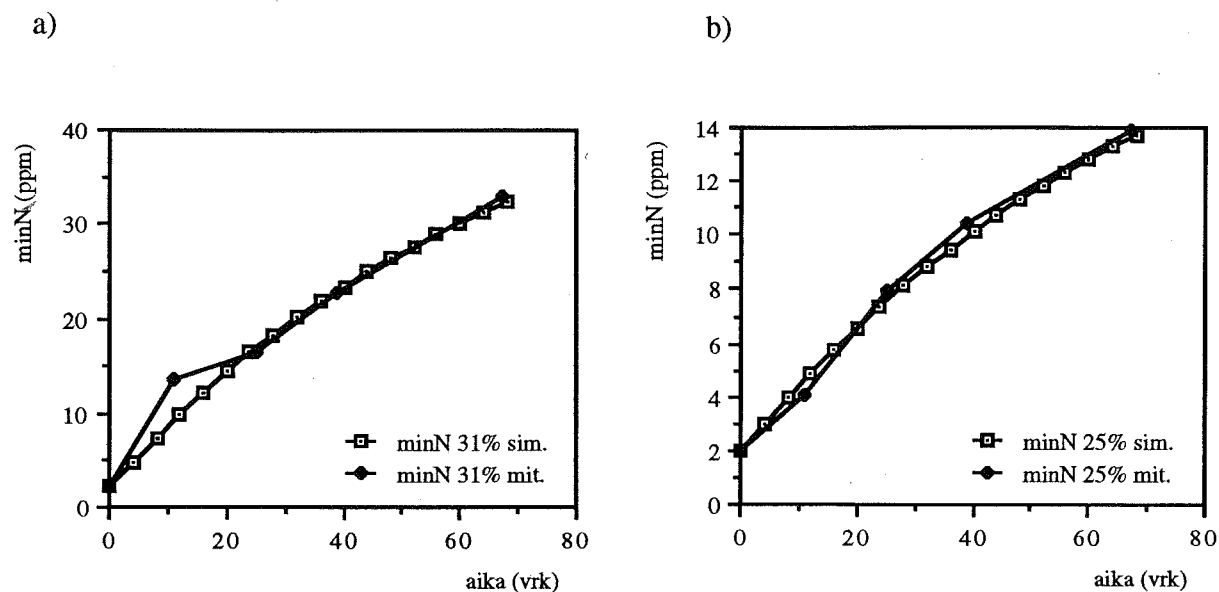


Kuva 3.9 Ammoniumtyypen ja nitraattityypen mitatut ja simuloituvat arvot
a) lysimetrin 6 pintamaa, kosteus 31 til.-% b) karkea hieta, kosteus 26 til.-%

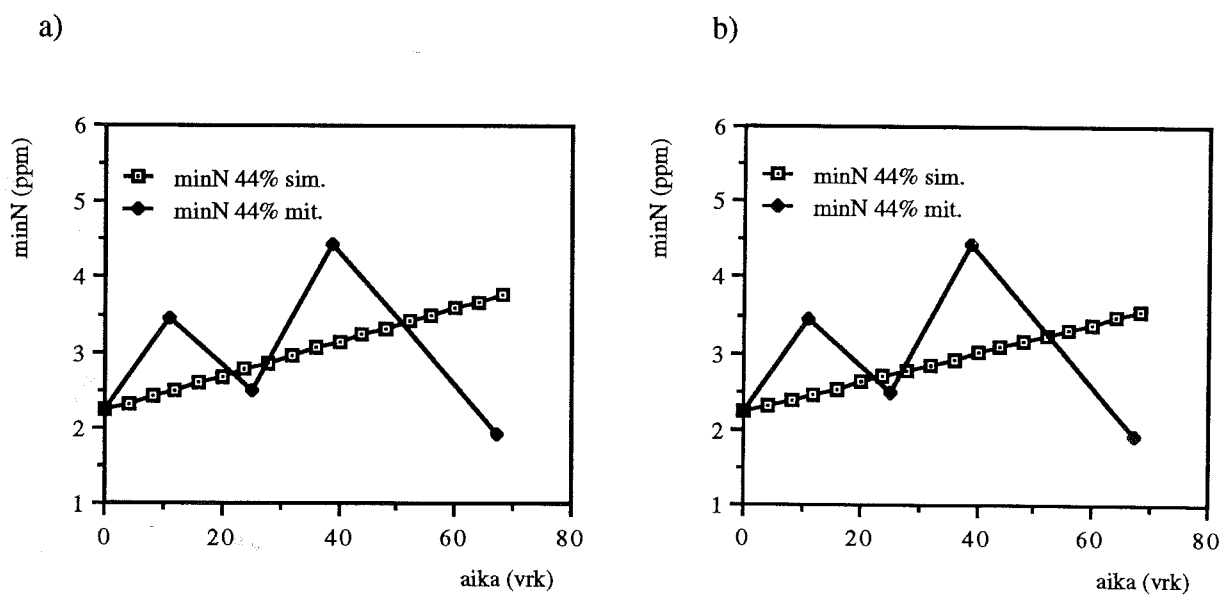


Kuva 3.10 Mineraalityypen mitatut ja simuloituvat arvot, kun lähtötilanteena on orgaanisen tyyppien varasto a) lysimetrin 9 pintamaa, kosteus 18 til.-%
b) hiesu, kosteus 27 til.-%

kuvaamaan tapahtuneita prosesseja. Malleista puuttuu mm. denitrifikaatio, jota näytteissä on voinut tapahtua inkuboinnin aikana. Samoin malleista puuttuu immobilisaatio, jota selvästi on kuivemmissä näytteissä tapahtunut. Mittaustuloksia vastasi parhaiten malli, jossa oli arvioitu potentiaalisesti mineralisoituvan tyyppien määrä (taulukko 3.15 ja kuva 3.11). Niissä näytteissä, joissa mineralisaatiota ei tapahtunut, mikään malli ei ollut kovin hyvä (kuva 3.12).



Kuva 3.11 Mineraalityypen mitatut ja simuloidut arvot, kun lähtötilanteena on potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto
 a) lysimetrin 6 pintamaa, kosteus 31 til.-%
 b) lysimetrin 9 pintamaa, kosteus 25 til.-%



Kuva 3.12 Mitatut ja simuloidut arvot mineraalityypen määrälle hiesussa, kosteus 44 til.-%
 a) lähtötilanteena orgaanisen typen varasto
 b) lähtötilanteena potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto

Potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto oli lysimetrin 6 pintamaalla 6 % ja pohjamaalla 55 % kokonaistypen määrästä sekä lysimetrin 9 pintamaalla 3 % ja pohjamaalla 4 % kokonaistypen määrästä. Stanfordin (1974) tutkimuksessa potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä vaihteli 5.8-19.3 % kokonaistypen määrästä eri maalajeilla ja eri syvyyksissä.

Vaikka lysimetrin 6 ja 9 pintamaiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet olivat samantyyppiset, niin lysimetrin 6 pintamaassa tapahtui huomattavasti enemmän mineralisaatiota ja potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto oli suurempi. Tämä voi johtua siitä, että lysimetriä 6 oli lannoitettu enemmän. Kuitenkin tausta-arvojen mineraali- ja kokonaistyyppimäärät olivat samaa luokkaa molemmilla maalajeilla, joten lannoitus ei ollut vaikuttanut niihin.

Typen mineralisaatiokertoimet kasvoivat, kun lähtötilanteena olleen typen varastoa pienennettiin. Taulukossa 3.14 nitrifikaatiokertoimet ovat suuremmat kuin ammonifikaatiokertoimet. Mineralisaatio oli herkempi ammonifikaatiokertoimen muutokselle kuin nitrifikaatiokertoimen, esim. lysimetrin 6 pintamaalla kosteuksissa 23 ja 31 til.-%. Nitrifikaatiolle suotuisissa olosuhteissa maassa oleva ammoniumtyyppi pyrkii nopeasti hapettumaan nitraatiksi.

Cabrera & Kissel (1988a) jakoivat mallissa maan orgaanisen aineksen kahteen osaan, helposti hajoavaan ja vaikeasti hajoavaan. He totesivat tällaisen mallin kuvaavan paremmin inkubaatiokokeita kuin mallin, jossa orgaaninen aines on yhdessä varastossa.

Cabrera & Kissel (1988b) olivat tutkineet mineraalityypen määrää inkubaatiokokeissa sekä häiriityissä että häiriintymättömissä näytteissä. Häiriityt näytteet oli kuivattu ja seulottu 2 mm seulalla. Häiriintymättömät näytteet oli otettu kentältä suoraan lieriöihin. Tulokseksi saatiin, että häiriityissä näytteissä tapahtuu enemmän mineralisaatiota kuin häiriintymättömissä näytteissä, varsinkin 28 ensimmäisen vuorokauden aikana. Näiden tulosten perusteella

Taulukko 3.16 . Maalajien kokonaistypen ja savipitoisuuden suhteet

Näyte	Savi [mg/g maata]	Kokonaistyyppi [mgN/g maata]	Savi/kokN
L6 pinta	70	0.786	89
L6 pohja	50	0.064	781
L9 pinta	90	0.641	140
L9 pohja	260	0.451	576

yrityttiin ennustaa kentällä tapahtunutta mineralisaatiota, mutta tulokset johtivat huomattaviin mineralisaation yliarviointeihin. Mineralisaatiota voitiin ennustaa häirittyjen kokeiden perusteella ensimmäisten 28 vrk jälkeen yhden varaston mallilla, mikäli maassa oli matala savi/kokonaistyyppisuhde. Maan savespitoisuuden vaikutusta typen mineralisaatioon perusteltiin sillä, että savi estää mikrobeja hajottamasta orgaanista ainesta. Lysimetrien maalajien saven ja kokonaistypen suhteet ovat taulukossa 3.16. Cabreran (1988) tuloksiin verrattuna ainoastaan pintamaiden savi/kok.N-suhde on matala.

Cabreran (1988) esittämää menetelmää ei voitu soveltaa tähän aineistoon, koska inkubointijaksojen määrä oli liian pieni ja inkubointimenetelmä erilainen. Cabreran (1988) kokeessa inkubointijaksojen pituudet olivat 14, 28, 56, 84, 112, 140, 196 ja 224 vuorokautta ja mineraalityppi poistettiin näytteistä huuhtomalla. Stanford & al. (1974) pyrkivät löytämään potentiaalisesti mineralisoituvan typen varaston regressioanalyysillä, mutta tämäkään menetelmä ei sopinut tähän aineistoon, koska mittausten määrä oli niin pieni.

Polynomianalyysin mukaan kaikkia näytteitä ei voi selittää ensimmäisen asteen yhtälöllä. Ensimmäisen asteen yhtälö sopii hyvin kokonaismineralisaation selittämiseen kaikissa muissa tapauksissa paitsi lysimetrin 9 pintamaan kosteimmassa ja pohjamaan kosteimmassa näytteessä. Näissä näytteissä kosteus haittasi mineralisaatiota.

4. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kosteudella on selvä vaikutus typen mineralisaatioon neljässä erityyppisessä maalajissa. Kosteudella ja ajalla on voimakas yhteisvaikutus, ja ajalla oli selvä vaikutus mineraalityypen kertymiseen myös erikseen tarkasteltuna. Ainoastaan hiesun kosteudessa 39 til.-% ajalla ei ollut vaikutusta mineraalityypen kertymiseen. 67 vrk:n inkuboinnin jälkeen kosteudella oli selvä vaikutus mineralisaatioon kaikissa muissa näytteissä paitsi lysimetrin 6 pintamaan kosteuksien 17 ja 23 til.-%, lysimetrin 9 pintamaan kosteuksien 10 ja 36 til.-% sekä hiesun kosteuksien 39 ja 46 til.-% välillä. Lysimetrin 6 pintamaassa kosteustasot olivat ilmeisesti niin lähellä toisiaan, ettei sillä typen mineralisaation kannalta ollut merkitystä. Hiesun kosteimpiin näytteisiin (39 ja 46 til.-%) ei kertynyt mineraalityppeä. Lysimetrin 9 pintamaan kosteimpaan näytteeseen (36 til.-%) ei myöskään kertynyt mineraalityppeä, joten sen ja kuivimman näytteen (10 til.-%) välillä ei ollut merkitsevää eroa.

Typen mineralisaation kannalta erityyppisten maiden kosteutta oli parempi verrata käytämällä vedellä täyttyntä huokostilavuutta, kuin esim. kosteusprosentteja tai pF-arvoja. Mineralisaatio näyttää loppuvan, kun vedellä täyttyntä huokostilavuus on noin 80-90 %, pintamaalla jo 70 %:ssa. Pintamaan erilaiseen tulokseen saattaa vaikuttaa maiden esikäsitteily, joka on muuttanut erityisesti pintamaan ominaisuuksia. Mineralisaatiolle optimaalinen kosteustila näyttää olevan, kun 50-80 % huokostilavuudesta on täyttyntä vedellä. Mineraalityypen määrä kasvaa maan kosteuden kasvaessa, mutta vähenee nopeasti kun optimikosteus on ylitetty.

Nyt käytettyä koejärjestelyä on arvosteltu mm. koska maiden esikäsitteily, erityisesti kuivaaminen, lisää mineralisaatiota (Hesse 1971, Cabrera & Kissel 1988a) tai inkubointi astiassa saattaa johtaa mineralisaatiolle epäedullisiin olosuhteisiin (Stanford 1985). Nyt tehtyjen kokeiden perusteella arvioitua mineralisaatiota verrattiin Bärlundin (1992a) maan orgaanisen aineksen perusteella tekemiin arviointeihin lysimetrikentällä tapahtuvasta mineralisaatiosta. Tulokset ovat samaa suuruusluokkaa, ainoastaan hiedan mineralisaatio on laboratorio-kokeiden perusteella huomattavasti suurempi, noin viisinkertainen. Tämä voi johtua siitä, että lysimetriä 6 oli lannoitettu vuonna 1989 huomattavasti enemmän kuin muita lysimetrejä.

Laboratoriokokeiden perusteella voidaan olettaa, että säätösalaajituksella voidaan vähentää typen huuhtoutumista, jos kasvukauden ulkopuolella maan kosteus nostetaan niin suureksi, että yli 80 % maan huokostilavuudesta on täyttyntä vedellä. Kasvukaudella maan kosteuden pitäisi olla mineralisaatiota suosiva, jolloin 50-80 % huokostilavuudesta on täyttyntä vedellä. Esimerkiksi hiesussa kosteuden muutos 36 til.-%:sta 39 til.-%:iin vähentää mineralisaatiota kasvukaudella 40 kg ha⁻¹. Pintamaassa muutos optimikosteudessa tapahtuneen mineralisaation ja mineralisaation loppumisen välillä on myös noin 40 kg ha⁻¹ 10 cm syvässä maakerroksessa.

Lysimetrien 6 ja 9 pintamaiden ominaisuudet olivat hyvin samankaltaiset. Molempien maalaji oli sama, kokonaistypen ja mineraalitypen sekä hiili/typpi-suhteet olivat samaa suuruusluokkaa. Lysimetriä 6 oli lannoitettu kesällä 1989 500 kg ha⁻¹ ja lysimetriä 9 100 kg ha⁻¹. Lysimetrin 6 pintamaan maksimimineralisaatio oli 2.5-kertainen lysimetrin 9 pintamaan maksimimineralisaatioon verrattuna. Maksimimineralisaatiossa maalajien kosteus oli samaa luokkaa, noin 50 % huokosista oli täytynyt vedellä. 1. kertaluokan kinetiikalla kuvattiin mineralisaatioprosessia. Mineralisoituvan typen varastona käytettiin sekä koko orgaanisen typen varastoa että vain osaa siitä, nk. potentiaalisesti mineralisoituvaa tyyppiä. Lysimetrin 6 pintamaassa oli potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto 2.4-kertainen lysimetrin 9 pintamaahan verrattuna, mutta mineralisaatiokertoimien arvoissa ei ollut paljon eroja (0.0018 lysimetrissä 6 ja 0.0013 lysimetrissä 9). Hietalysimetrin pintamaan korkeampi mineralisaatiopotentiaali voi johtua helposti hajoavasta orgaanisesta aineksesta tai lannoituksesta.

Nyt tutkittiin vain kosteuden vaikutusta typen mineralisaatioon vakio- 20°C , jonka arvioitiin olevan maksimilämpötila Suomessa kasvukauden aikana. Kosteuden ohella lämpötilalla on huomattava vaikutus mineralisaatioon varsinkin keväällä ja syksyllä, jolloin huuhtoutuminen on suurinta. Karvonen (1992) on tutkinut mineralisaatiota $2.0\text{--}15^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa tässä tutkimuksessa käytetyillä maalajeilla. Laboratoriokokeiden perusteella on vaikea tehdä tarkkoja arvioita kentällä mineralisoituvan typen määristä, koska esim. kosteuden ja lämpötilan yhteisvaikutusta ei täysin tunneta. Mineralisaatiota olisikin tutkittava kenttäolosuhteissa, jotta saataisiin käsitys sen todellisesta vaikutuksesta huuhtoutumisaltiin typen määrään. Erityisesti pitäisi tutkia säätoojituksen vaikutusta maan kosteuteen juuristokerroksessa kasvukaudella ja kasvukauden ulkopuolella, sillä suurin osa mineralisaatiosta tapahtuu pintakerroksessa.

5. YHTEENVETO

Työn tarkoitus oli inkubointikokein selvittää kosteuden vaikutus typen mineralisaatioon maaperässä. Koejärjestelyssä oli vakio lämpötila (+20 °C), neljä inkubointijaksoa (11, 25, 39 ja 67 vrk), neljä maalajia ja neljä kosteutta jotka vaihtelivat ilmakeivasta lähelle kyllästyskosteutta. Rinnakkaisnäytteitä oli kolme.

Maanäytteet haettiin Vesitalouden laboratorion lysimetrikentältä, kahdesta eri lysimetristä (6 ja 9). Kummastakin otettiin erikseen pintakerros ja sen alta noin 10 cm syvyydeltä pohjamaata. Lysimetri 6 maalaji oli karkeaa hietaa ja pintamaa runsasmultaista karkeaa hietaa. Lysimetrin 9 maalaji oli hiesua ja pintamaa runsasmultaista karkeaa hietaa. Maat kuivattiin ilmakeiviksi ja seulottiin 2 mm seulalla. Maat kostutettiin tislattulla vedellä, joka lisättiin pipetoimalla ja sumutuspullolla. Kosteuden annettiin tasaantua yön yli, ja maa jaettiin 100 ml:n Erlenmayer-pulloihin, jotka peitettiin Parafilm-kalvoilla. Inkuboinnin jälkeen maanäytteistä määritettiin NH_4^- ja NO_3^- -tyypet sekä pH. Taustamäärityksinä tehtiin NH_4^- , NO_3^- ja kokonaistyyppi, orgaaninen hiili, kationinvaihtokapasiteetti ja pH. Lisäksi määritettiin maalajien raakoostumukset ja vedenpidätyskäyrät.

Suurin nettomineralisaatio eri maalajeilla ja eri kosteuksissa vaihteli 6-31 $\mu\text{gN g}^{-1}$ kuivaa maata. Lysimetrin 6 pintamaassa tapahtui eniten mineralisaatiota, kun kosteus oli 31 til.-% ja pohjamaassa, kun kosteus oli 26 til.-%. Lysimetrin 9 pintamaahan kertyi eniten mineraalityppeä kosteudessa 25 til.-% ja pohjamaahan 36 til.-%. Tätä kuivemmissä näytteissä tapahtui vähemmän mineralisaatiota, samoin lysimetrin 9 maalajeilla tätä kosteammassa maalajeissa. Kosteuden vaikutusta mineralisaatioon eri maalajeissa oli yksiselitteisintä verrata vedellä täyttynyttä huokostilavuutta. Mineralisaatiomaksimissa 50-80 % huokosten tilavuudesta oli täyttynyt vedellä. Mineralisaatio lakkasi, kun yli 80-90 % huokosten tilavuudesta oli täyttynyt vedellä. Lysimetrin 6 pintamaahan kertyi huomattavasti enemmän mineraalityppeä kuin lysimetrin 9 pintamaahan, vaikka niiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet olivat samat. Tämä saattoi johtua lannoituksesta tai orgaanisen aineksen laadusta.

Ajan ja kosteuden vaikutusta mineralisaatioon tutkittiin varianssianalyysillä. Profiili-analyysillä saatiin selville, että ajalla ja kosteudella on kaikissa tapauksissa voimakas yhteisvaikutus typen mineralisaatioon. Yksisuuntaisella varianssianalyysillä tutkittiin kosteuden vaikutusta typen mineralisaatioon ja toistetut koeyksiköt-menetelmällä ajan vaikutus. Kosteudella oli merkittävä vaikutus typen mineralisaatioon (taulukot 3.6 ja 3.7). 67 vrk:n inkuboinnin jälkeen kosteudella oli selvä vaikutus mineralisaatioon kaikissa muissa näytteissä paitsi lysimetrin 6 pintamaan kosteuksien 17 ja 23 til.-%, lysimetrin 9 pintamaan kosteuksien 10 ja 36 til.-% sekä hiesun kosteuksien 39 ja 46 til.-% välillä. Lysimetrin 6 pintamaassa kosteustasot olivat niin lähellä toisiaan, ettei sillä typen mineralisaation kannalta

ollut merkitystä. Muissa näytteissä (hiesun kosteudet 39 ja 46 til.-% ja lysimetrin 9 pintamaan kosteus 36 til.-%) kosteus vähensi mineraalitypen kertymistä maahan. Ajalla oli selvä vaikutus typen mineralisaatioon (taulukko 3.8), paitsi hiesun kosteudessa 39 til.-%, jossa mineraalitypen määrässä ei tapahtunut merkittäviä muutoksia koko 67 vuorokauden inkuboinnin aikana.

Työssä käytettiin mekanistisia malleja selitettäessä mineralisaation kinetiikkaa ja määriteltäessä mineralisaationopeudet eri maalajeille ja kosteuksille. Käytetyistä malleista parhaiten selitti mittaustuloksia se, jossa lähtötilanteena oli potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto. Lysimetrin 6 pintamaassa oli suurin potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto 47 ppm. Hiedassa se oli 35 ppm ja lysimetrin 9 pintamaassa sekä hiesussa 20 ppm.

Saatuja mittaustuloksia arvioitiin säättösalaajituksen kannalta, ja tultiin siihen tulokseen, että typen huuhtoutumista kasvukauden ulkopuolella voitaisiin vähentää nostamalla maan kosteus niin suureksi, että merkittävää nettomineralisaatiota ei tapahtuisi. Kasvukaudella kosteuden pitäisi olla mineralisaatiota suosiva, jolloin 50-80 % huokostilavuudesta on täyttynyt vedellä. Kasvukauden ulkopuolella maan kosteuden pitäisi ehkäistä mineralisaatiota, jolloin yli 80 % huokostilavuudesta on täyttynyt vedellä.

KIRJALLISUUSLUETTELO

ANON. 1983-1987. Tedator Application Notes: AN 65/83, ASN 65-32/84, ASN 65-31/84, AN 30/87, AN 50/84, ASN 50-01/84, AN 51/84, ASN 51-01/84, AN 62/83, ASN 62-02/83, AN 69/83.

ANON. 1985. Talousveden terveydellisen laadun valvonta. Lääkintöhallituksen yleiskirje nro 1862. Helsinki, Lääkintöhallitus. 17 s.

ANON. 1985. GLO-85. Geotekniset laboratorio-ohjeet, I luokituskokeet. Helsinki, Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry. Rakentajain Kustannus Oy. 107 s.

ANON. 1990. Haja-asutuksen vedenhankinnan kehittäminen. Helsinki, Vesi- ja ympäristöhallitus. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja - sarja A. 80 s.

ANON. 1990. Stella II, User's Guide. Hanover, High Performance Systems, Inc. 218 s.

ANON. 1990. SAS/STAT User's Guide. Version 6, Fourth Edition, vol 1. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

AHONEN J. 1991. Säättöojituksen ja pohjavesikastelun käyttö ja soveltuvuus Suomessa. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, vesitalous. Diplomityö, 63 s.

ALEXANDER M. 1964. Introduction to Soil Microbiology. 2 p. New York, John Wiley & Sons, Inc. 472 s.

BOLT G. H., Bruggenwert M. G. M. (toim.). 1976. Soil Chemistry. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company. 281 s.

BRADY N. C. 1984. The Nature and Properties of Soils, 9. p. New York, Macmillian Publishing Company. 737 s.

BROADBENT F. E. 1965. Effect of Fertilizer Nitrogen on the Release of Soil Nitrogen. *Soil Science Society Proceedings*, s. 692-695.

BÄRLUND I. 1992a. Typen fraktiot ja huuhtoutuminen maaperässä. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, vesitalous. Diplomityö, 89 s.

BÄRLUND I. 1992b. Typpitutkimuksen koejärjestelyt ja havaintoaineisto TKK:n lysimetrikentällä toukokuu 1990-toukokuu 1991. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, vesitalous. Erikoistyö, 25 s.

CABRERA M. L., Kissel D. E. 1988a. Potentially Mineralizable Nitrogen in Disturbed and Undisturbed Soil Samples. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, s. 1010-1015.

CABRERA M. L., Kissel D. E. 1988b. Evaluation of a Method to Predict Nitrogen Mineralized from Soil Organic Matter Under Field Conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, s. 1027-1031.

CASSMAN K. G. & Munns D. N. 1980. Nitrogen Mineralization as Affected by Soil Moisture, Temperature and Depth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, s. 1233-1237.

CHAPMAN H. D. 1965. Cation-Exchange Capacity. Teoksessa: Black E. A. (toim.). *Methods of Soil Analysis, Part 1. Agronomy No. 9.* Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy Inc. S. 891-901.

EMTERYD O. 1989. Chemical and Physical Analysis of Inorganic Nutrients in Plant, Soil, Water and Air. Umeå, Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för Skoglig Ståndortslära, Stencil No.10. 181 s.

FRISSEL M. J. et al. 1981. Systematic Comparison of the Models Described. Models for the Behaviour of Nitrogen in Soil and Uptake by Plant. Comparison between Different Approaches, Wageningen, the Netherlands, 28.1-1.2.1980. Wageningen, Centre for Agricultural Publishing and Documentation. s. 3-30.

FURRER O. J., Stauffer W. 1986. Stickstoff in der Landwirtschaft. *Gas-Wasser-Abwasser* 66, 7, s. 460-471.

HANSEN S., Jensen H. E., Nielsen N. E., Svendsen H. 1991. Simulation of Biomass Production, Nitrogen Uptake and Nitrogen Leaching in Spring Barley Crop Production. Nitrogen and Phosphorus in Soil and Air. Project Abstracts of the Danish NPo Research Programme; NPo-forskning fra Miljøstyrelsen Nr. A Abstracts. Miljøministeriet, Miljøstyrelsen. s. 167-195.

HARTIKAINEN H. 1990. Maaperäopin luennot. Maanviljelyskemia ja -fysiikka, Maatalousmetsätieteellinen tiedekunta, Helsingin Yliopisto, Viikki.

HESSE P. R. 1971. A Textbook of Soil Chemical Analysis. London, John Murray Ltd. 520s.

JANSSON S. L., Persson J. 1985. Mineralization and Immobilization of Soil nitrogen. Teoksessa: Stevenson F. J. (toim.) Nitrogen in Agricultural Soils, 2 p. Agronomy no 22. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy. s. 229-248.

KARVONEN H. 1992. Lämpötilan vaikutus typen mineralisaatioon maaperässä. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, vesitalous. Diplomityö, 107 s.

KUUSISTO E. 1986. Hydrologian meteorologisia perusteita. Teoksessa: Mustonen S. (toim.). Sovellettu hydrologia. Mänttä, Vesiyhdistys r.y. s. 82-93.

McLEAN E. O. 1982. Soil pH and Lime Requirement. Teoksessa: Page, A. L. (toim.). Methods of Soil Analysis, Part 2, 2. p, Agronomy no. 9. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy. s.199-224.

MILLER R. D., Johnson D. D. 1964. The Effect of Soil Moisture Tension on Carbon Dioxide Evolution, Nitrification and Nitrogen Mineralization. *Soil Sci. Soc. Proc. S.* 644-647.

MILLIKEN G. A., Johnson D. E. 1984. Analysis of Messy Data. Belmont, Lifetime Learning Publications. 473 s.

MORRISON D. 1978. Multivariate Statistical Methods. New York, McGraw-Hill International Book Company. 415 s.

NOMMIK H., Vahtras K. 1985. Retention and Fixation of Ammonium and Ammonia in Soils. Teoksessa: Stevenson F. J. (toim.) Nitrogen in Agricultural Soils. 2 p. Agronomy no 22. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy. s. 123-222.

PAUL E. A., Clark. 1989. Soil Microbiology and Biochemistry. San Diego, Academic Press, Inc. 273 s.

PETERS D. B. 1965. Water Availability. Teoksessa: Black E. A. (toim.). Methods of Soil Analysis, Part 1. Agronomy No. 9. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy Inc. s. 279-285.

RANKINEN K. 1992. Maaperässä tapahtuvan typen mineralisaation määrittäminen. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, vesitalous. Erikoistyö, Vesitalous, 23 s.

RANTA E., Rita H., Kouki J. 1991. Biometria- Tilastotiedettä ekologeille. Helsinki, Yliopistopaino. 569 s.

REICHMAN G. A., Grunes D. L., Viets F. G. 1966. Effect of Soil Moisture on Ammonification and Nitrification in two Northern Plains Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 30, s. 363-366.

REKOLAINEN S. 1989. Phosphorus and Nitrogen Load from Forest and Agricultural Areas in Finland. *Aqua Fennica* 19,2, s. 95-107.

SCHMIDT E. L. 1985. Nitrification in Soil. Teoksessa: Stevenson, F. J. (toim.) Nitrogen in Agricultural Soils. 2 p. Agronomy no 22. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy. s. 253-283.

SRIVASTAVA M. S., Carter E. M. 1983. An Introduction to Applied Multivariate Statistics. New York, Elsevier Science Publishing Co, Inc. 394 s.

STANFORD G., Smith S. J. 1972. Nitrogen Potentials of Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36, s. 465-470.

STANFORD G., Frere M. H., Schwaninger D. H. 1973. Temperature Coefficient of Soil Nitrogen Mineralization. *Soil Science* 115, 4, s. 321-323.

STANFORD G., Carter J. N., Smith S. J. 1974. Estimates of Potentially Mineralizable Soil Nitrogen based on Short-term Incubations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38, s. 99-102.

STANFORD G., Epstein E. 1974. Nitrogen Mineralization-Water Relations in Soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38, s. 103-107.

STANFORD G. 1985. Assessment of Soil Nitrogen Availability. Teoksessa: Stevenson F. J. (toim.) Nitrogen in Agricultural Soils. 2 p. Agronomy no 22. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy. s. 651-688.

STEVENSON F. J. 1985. Origin and Distribution of Nitrogen in Soil. Teoksessa: Stevenson F. J. (toim.) Nitrogen in Agricultural Soils. 2 p. Agronomy no 22. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy. s. 1-39.

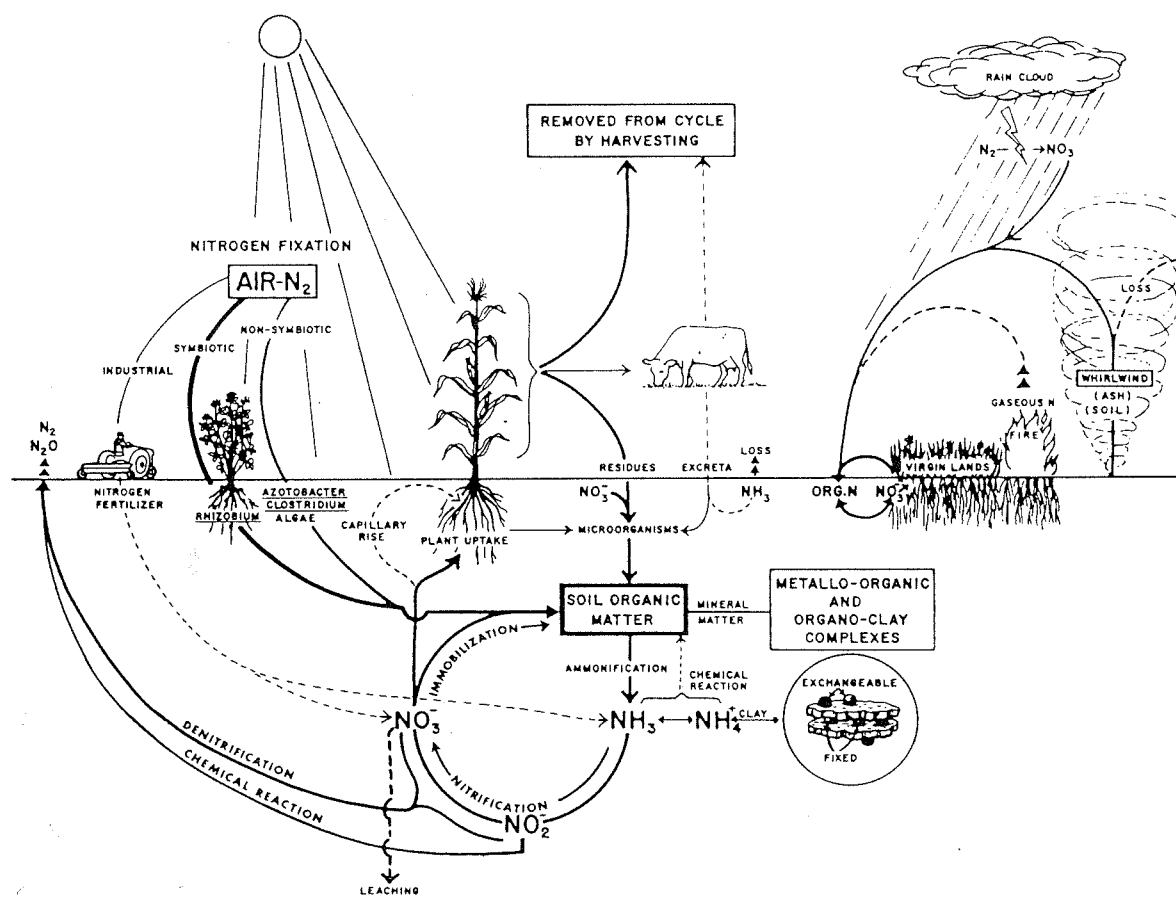
VAKKILAINEN P. 1982. Maa-alueilta tapahtuvan haihdunnan arvioinnista. Acta Universitatis Ouluensis, series C, Technica no. 20, Vesirakennustekniikan laitos, Oulun yliopisto. 146 s.

VAKKILAINEN P. 1986. Maavedet. Teoksessa: Mustonen S.(toim.). Sovellettu hydrologia. Mänttä, Vesiyhdistys r.y. s. 82-93.

LIITE 1	1
Kuva 1. Typen kierto	1
LIITE 2	
Kuva 1. Näytteiden ottoa lysimetrikentällä keväällä 1991	2
Kuva 2. Maanäytteiden käsittely: kuivaus ja seulominen	2
Kuva 3. Eri kosteustilassa olevia maanäytteitä	3
Kuva 4. Maanäytteiden inkuboiminen Parafilm-kalvolla peitetyissä Erlenmayer-pulloissa	3
LIITE 3 Typen mineralisaatio ajan suhteen eri maalajeissa	4
Kuva 1. Mineraalitypen määrät lysimetrin 6 pintamaassa eri kosteuksissa	4
Kuva 2. Mineraalitypen määrät hiedassa eri kosteuksissa	5
Kuva 3. Mineraalitypen määrät lysimetrin 9 pintamaassa eri kosteuksissa	6
Kuva 4. Mineraalitypen määrät hiesussa eri kosteuksissa	7
LIITE 4 Mineraalitypen määrälle simuloidut arvot, kun lähtötilanteena oli orgaanisen typen varasto	8
Kuva 1. Mineraalitypen määrälle mitatut ja simuloidut arvot. Maalaji lysimetrin 6 pintamaa.	8
Kuva 2. Mineraalitypen määrälle mitatut ja simuloidut arvot. Maalaji hieta.	9
Kuva 3. Mineraalitypen määrälle mitatut ja simuloidut arvot. Maalaji lysimetrin 9 pintamaa.	10
Kuva 4. Mineraalitypen määrälle mitatut ja simuloidut arvot. Maalaji hiesu.	11
LIITE 5 Ammonium- ja nitraattitypelle mitatut ja simuloidut arvot	12
Kuva 1. Ammonium- ja nitraattitypelle mitatut ja simuloidut arvot. Maalaji lysimetrin 6 pintamaa.	12
Kuva 2. Ammonium- ja nitraattitypelle mitatut ja simuloidut arvot. Maalaji hieta.	13
Kuva 3. Ammonium- ja nitraattitypelle mitatut ja simuloidut arvot. Maalaji lysimetrin 9 pintamaa.	14
Kuva 4. Ammonium- ja nitraattitypelle mitatut ja simuloidut arvot. Maalaji hiesu.	15

LIITE 6	Mineraalityypen määrälle simuloitut arvot, kun lähtötilanteena oli potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto.	16
	Kuva 1. Mineraalityypen määrälle mitatut ja simuloitut arvot. Maalaji lysimetrin 6 pintamaa.	16
	Kuva 2. Mineraalityypen määrälle mitatut ja simuloitut arvot. Maalaji hieta.	17
	Kuva 3. Mineraalityypen määrälle mitatut ja simuloitut arvot. Maalaji lysimetrin 9 pintamaa.	18
	Kuva 4. Mineraalityypen määrälle mitatut ja simuloitut arvot. Maalaji hiesu.	19
LIITE 7		20
	Taulukko 1. Kosteuden vaikutus mineralisaatioon lysimetrissä 6.	20
	Taulukko 2. Kosteuden vaikutus mineralisaatioon lysimetrissä 9.	21
	Taulukko 3. Ajan vaikutus mineralisaatioon lysimetrissä 6.	22
	Taulukko 4. Ajan vaikutus mineralisaatioon lysimetrissä 9.	23
LIITE 8	Maalajien rakeisuudet	24
	Kuva 1. Lysimetrin 6 rakeisuusjakaumat	24
	Kuva 2. Lysimetrin 9 rakeisuusjakaumat	24
LIITE 9	Maalajien vedenpidätyskäyrät	25
	Kuva 1. Lysimetrin 6 vedenpidätyskäyrät	25
	Kuva 2. Lysimetrin 9 vedenpidätyskäyrät	26

LIITE 1



Kuva 1 Typen kierto (Stevenson 1985, s. 2)

LIITE 2



Kuva 1 Näytteiden ottoa lysimetrikentällä keväällä 1991



Kuva 2 Maanäytteiden käsittely: kuivaus ja seulominen

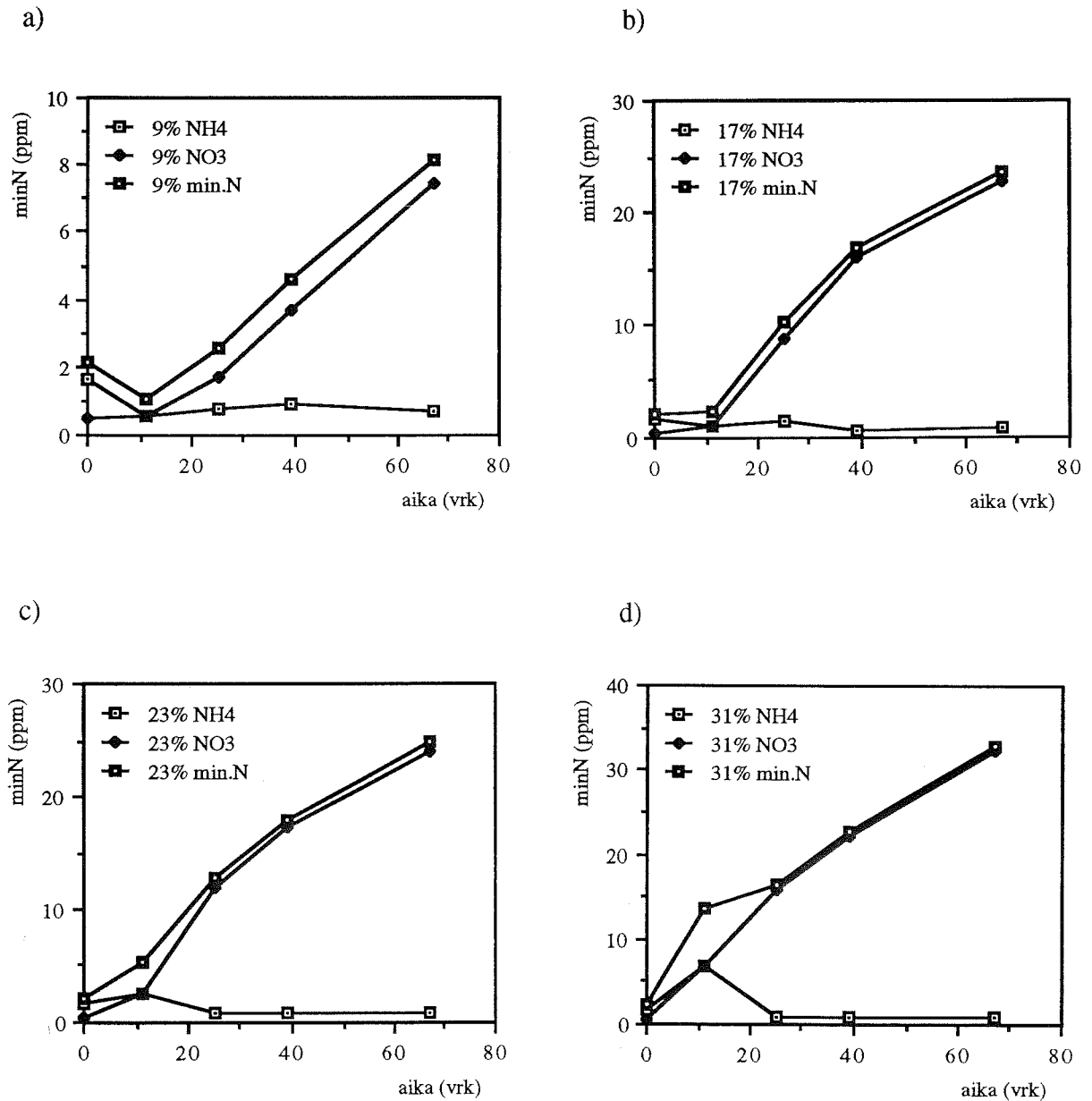


Kuva 3 Eri kosteustilassa olevia maanäytteitä

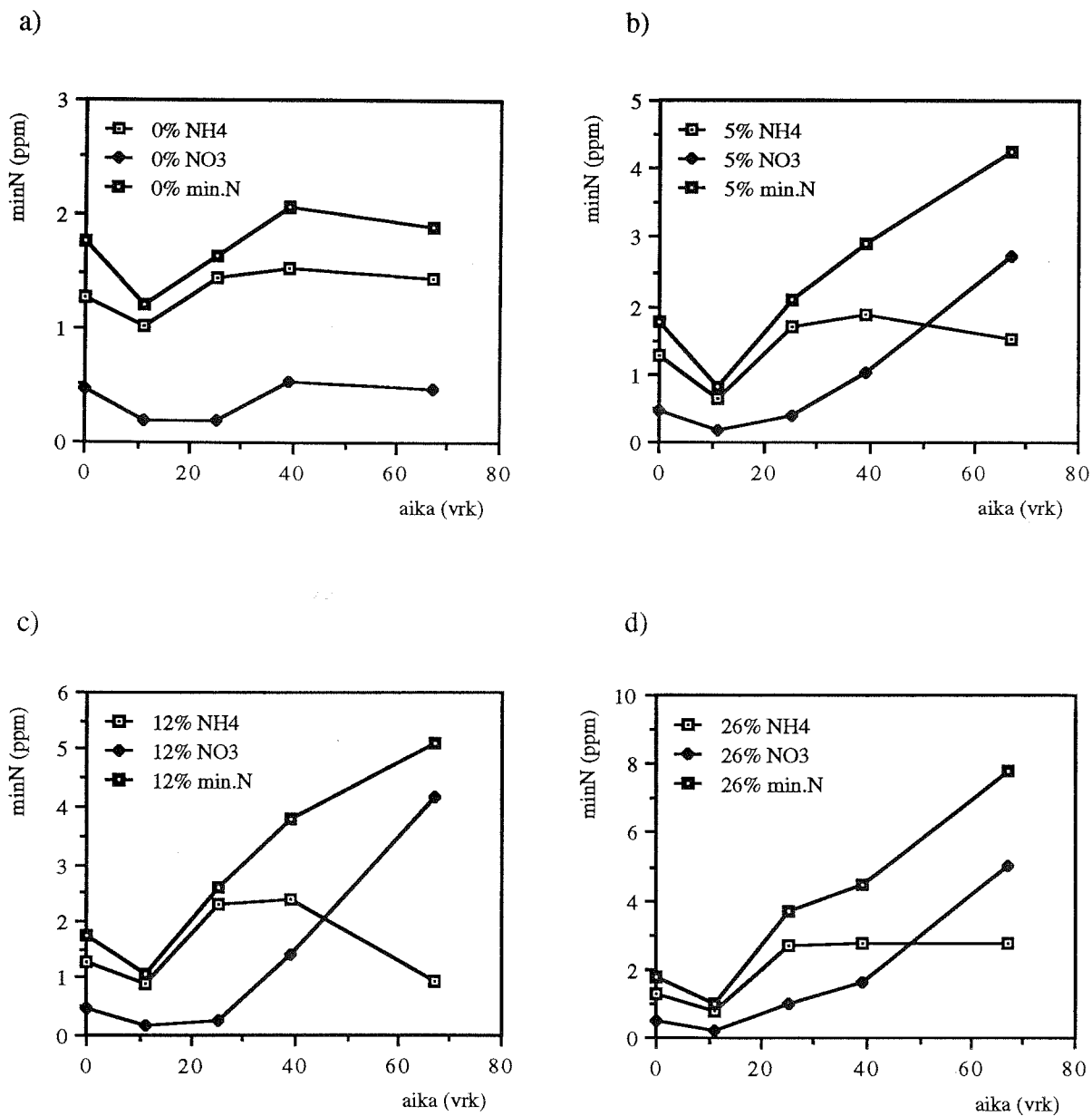


Kuva 4 Maanäytteiden inkuboiminen Parafilm-kalvoilla peitetyissä Erlenmayer-pulloissa

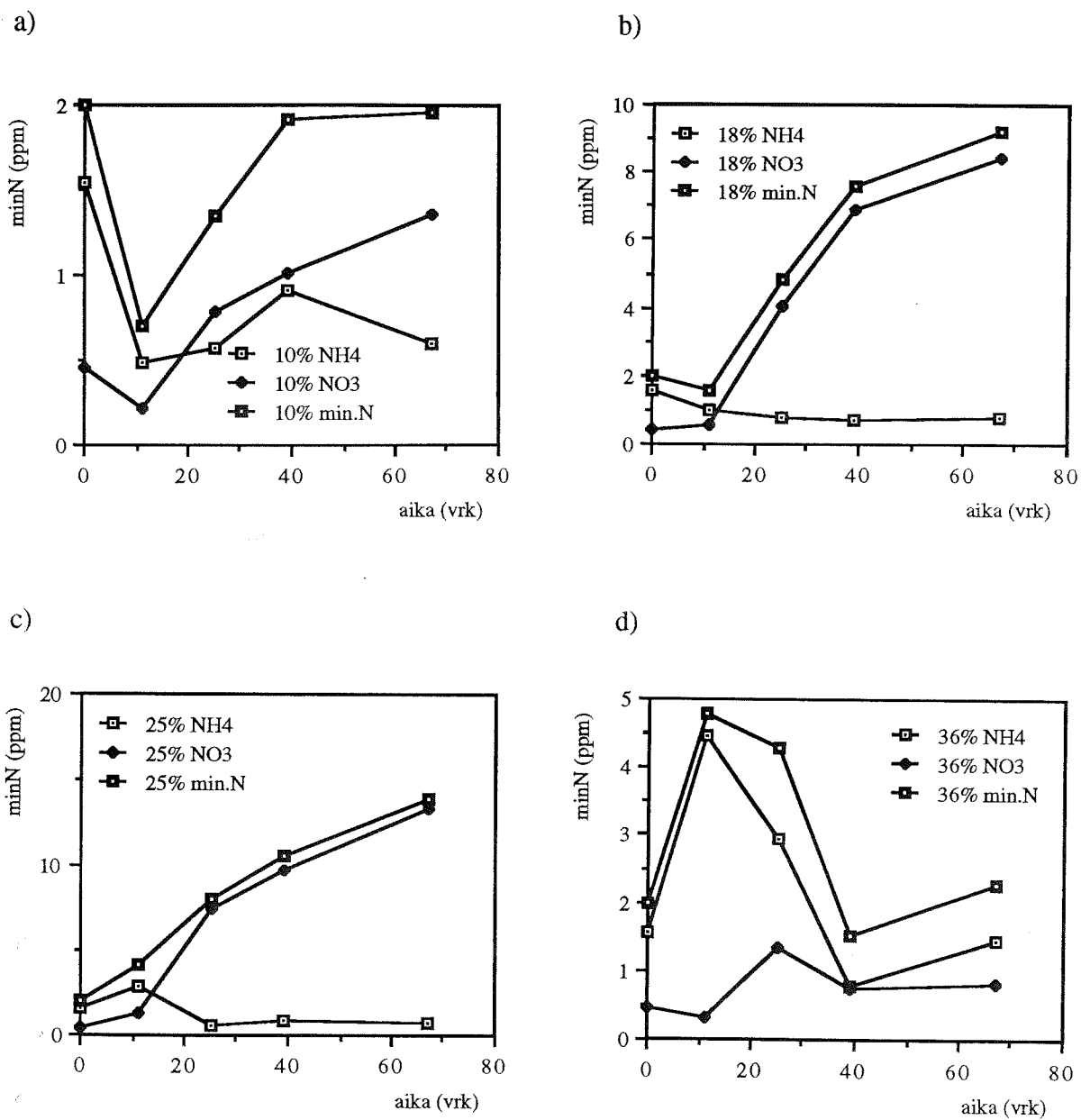
LIITE 3 Typen mineralisaatio ajan suhteen eri maalajeissa



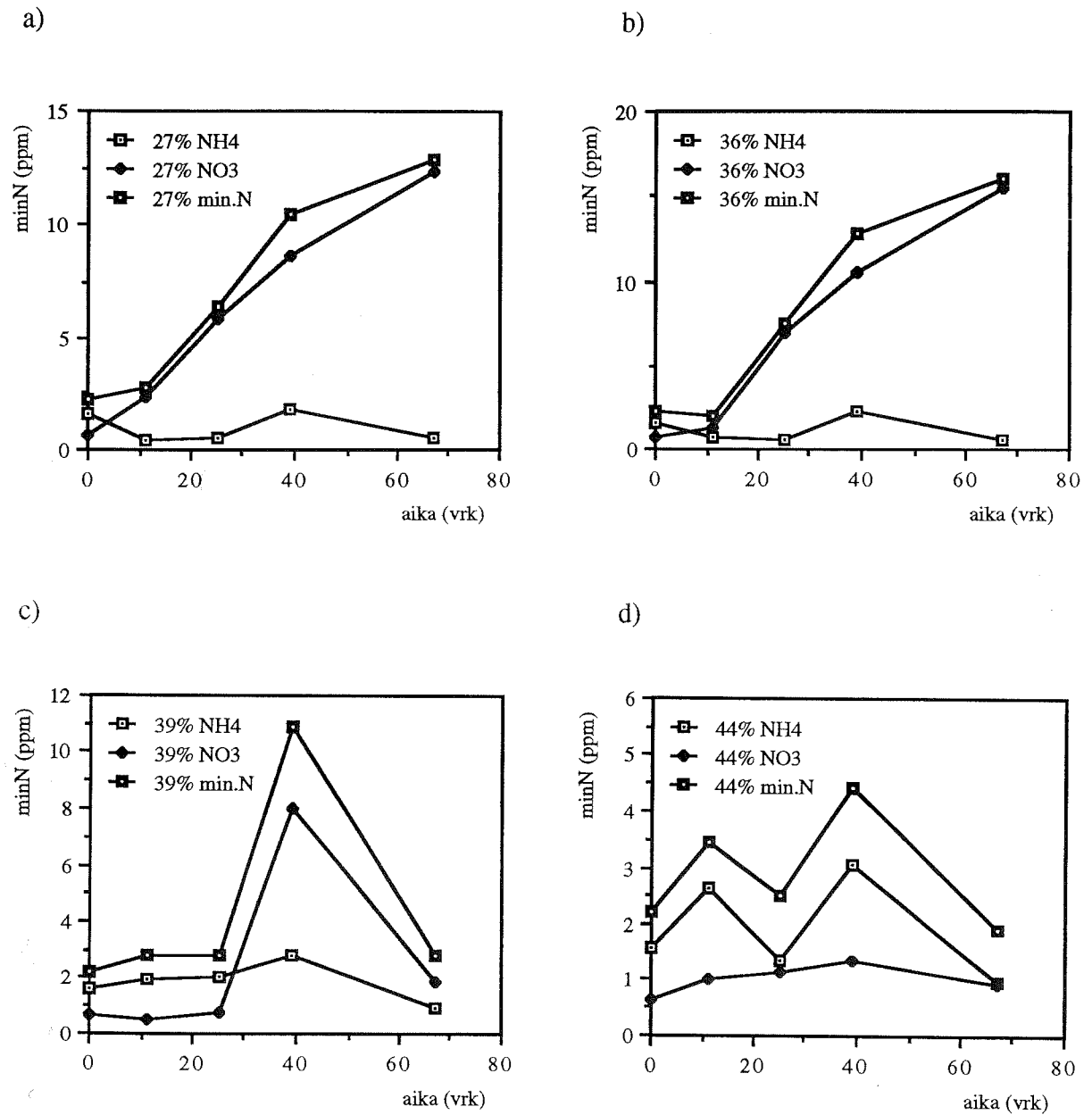
Kuva 1 Mineraalityypen määrät lysimetrin 6 pintamaassa eri kosteuksissa
 a) 9 til.-% b) 17 til.-% c) 23 til.-% d) 31 til.-%



Kuva 2 Mineraalityypen määrät karkeassa hiedassa eri kosteuksissa
 a) 0 til.-% b) 5 til.-% c) 12 til.-% d) 26 til.-%

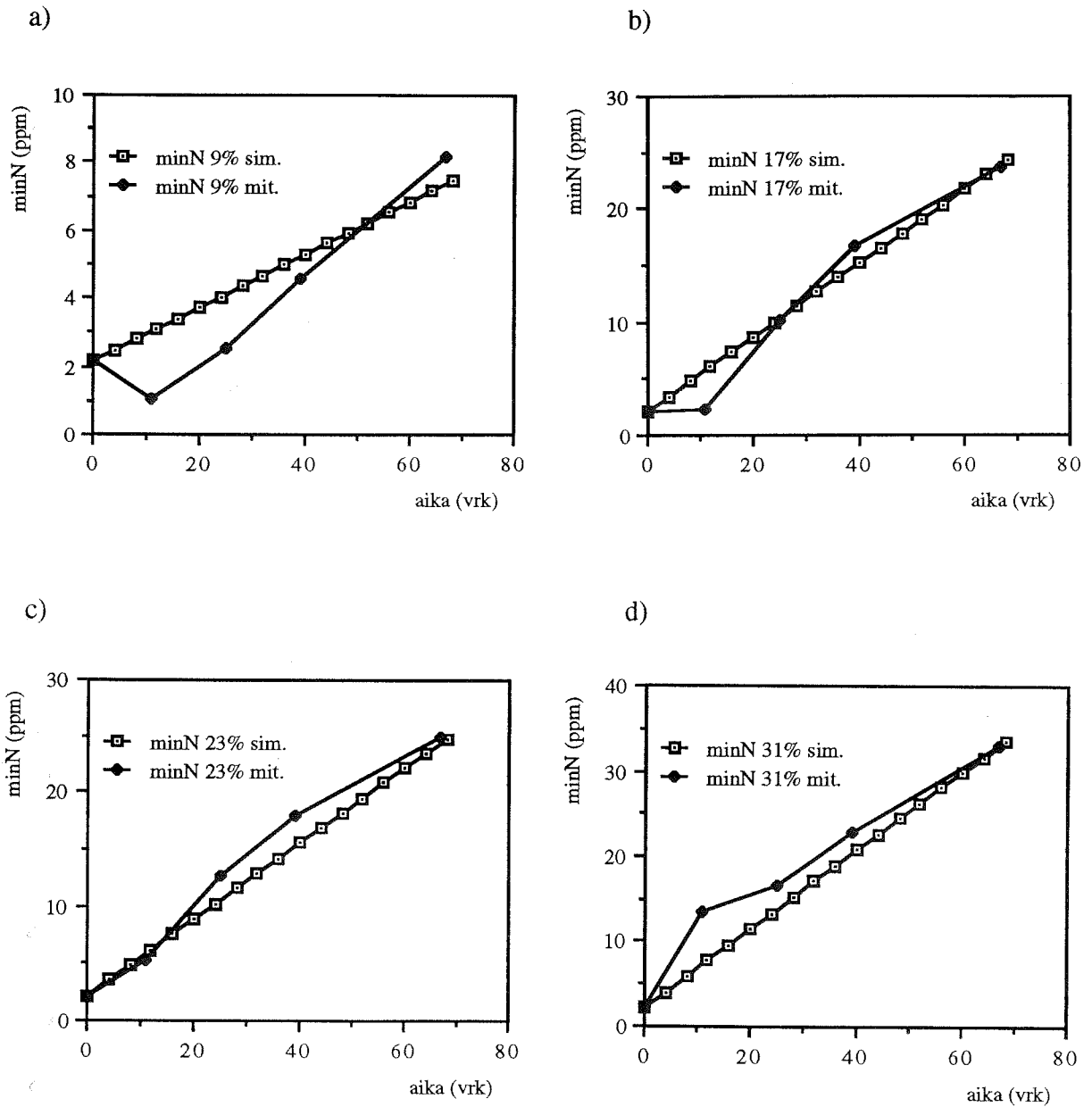


Kuva 3 Mineraalitypen määrät lysimetrin 9 pintamaassa eri kosteuksissa
 a) 10 til.-% b) 18 til.-% c) 25 til.-% d) 36 til.-%

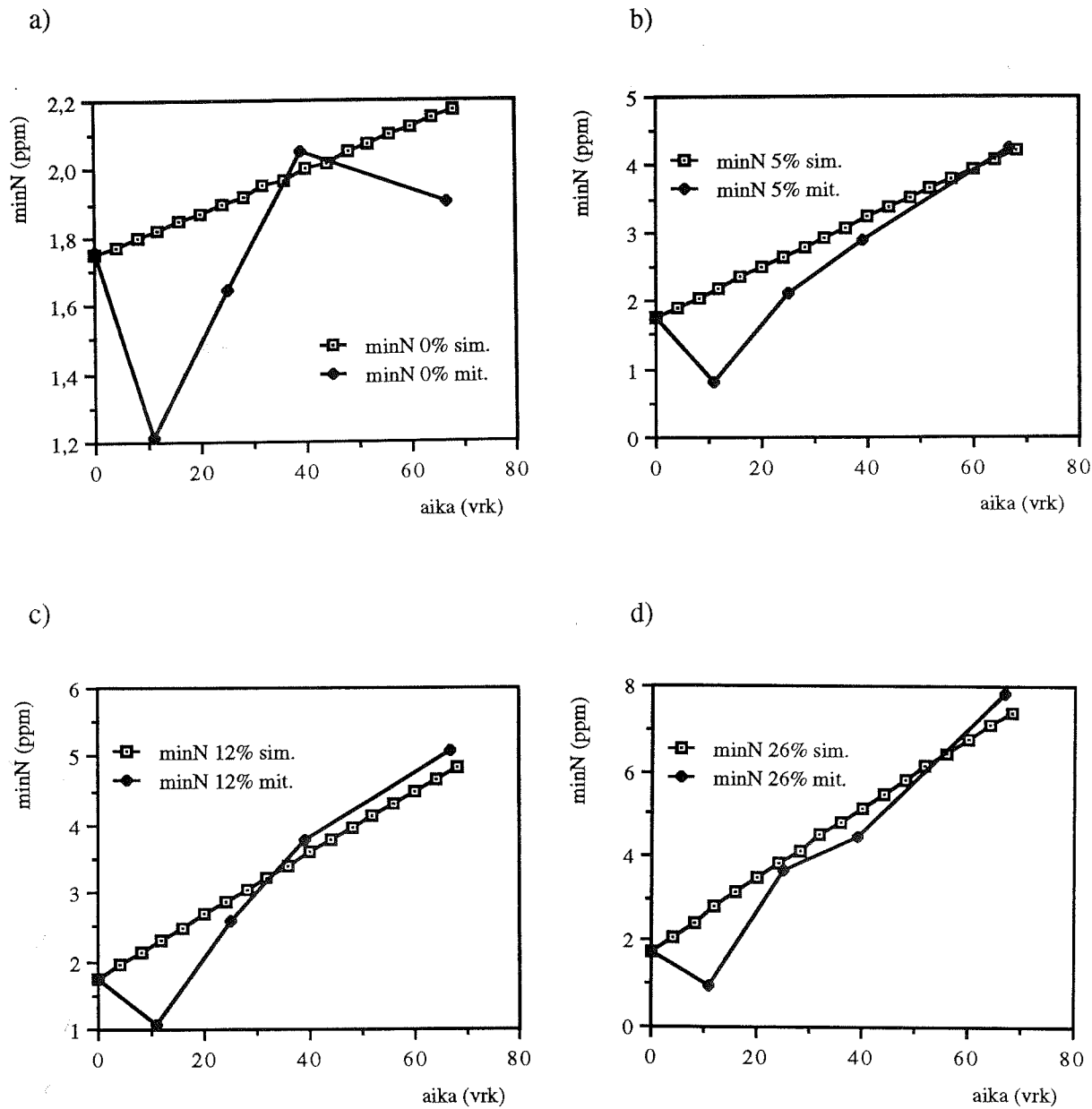


Kuva 4 Mineraalityypen määrät hiesussa eri kosteuksissa
 a) 27 til.-% b) 36 til.-% c) 39 til.-% d) 44 til.-%

LIITE 4 Mineraalitypen määrille simuloidut arvot, malli kuvassa 2.3

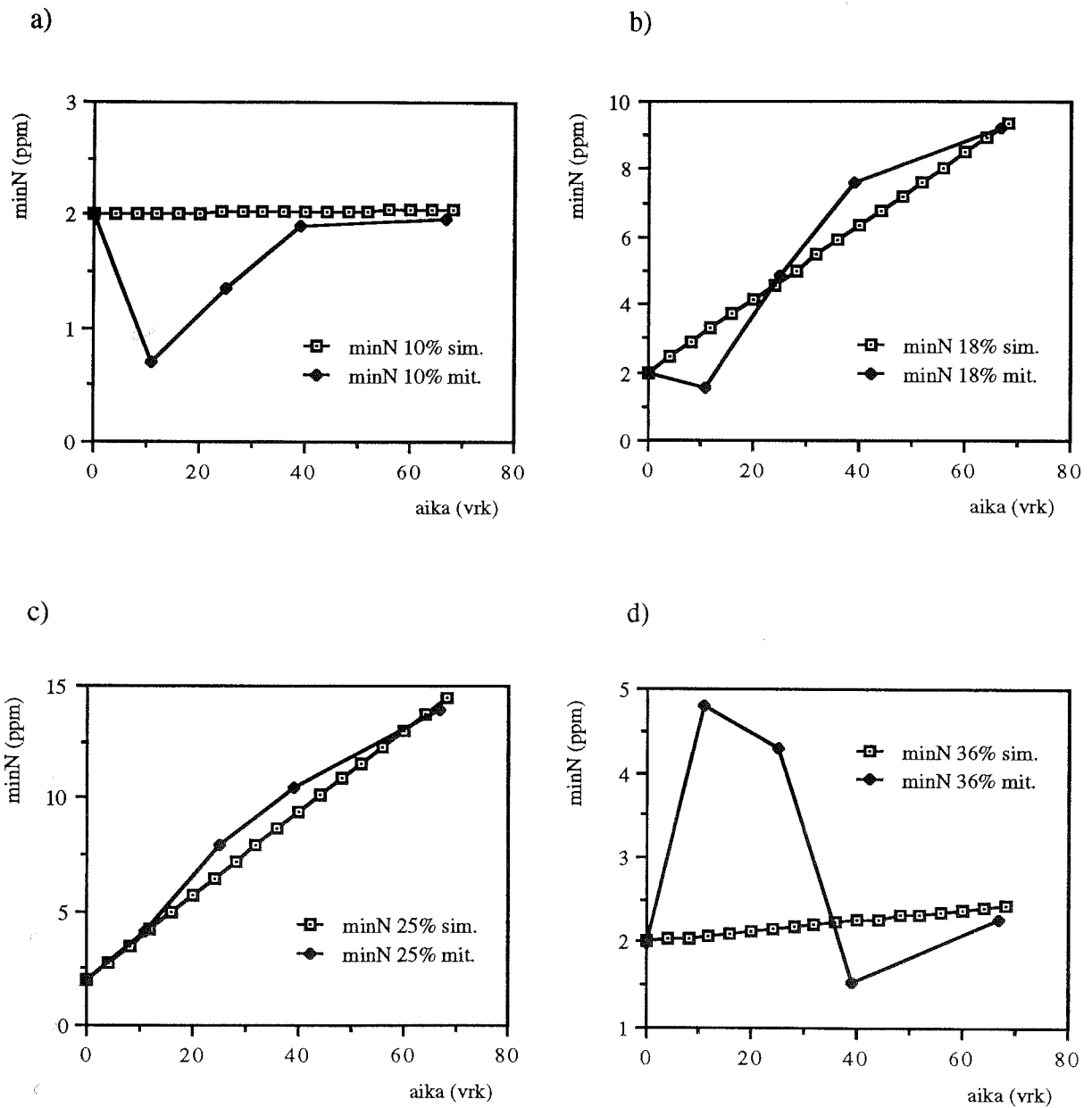


Kuva 1 Mineraalitypen määrille mitatut ja simuloidut arvot, kun lähtökohtana oli orgaanisen typen varasto. Maalaji lysimetrin 6 pintamaa. a) kosteus 9 til.-% b) kosteus 17 til.-% c) kosteus 23 til.-% d) kosteus 31 til.-%

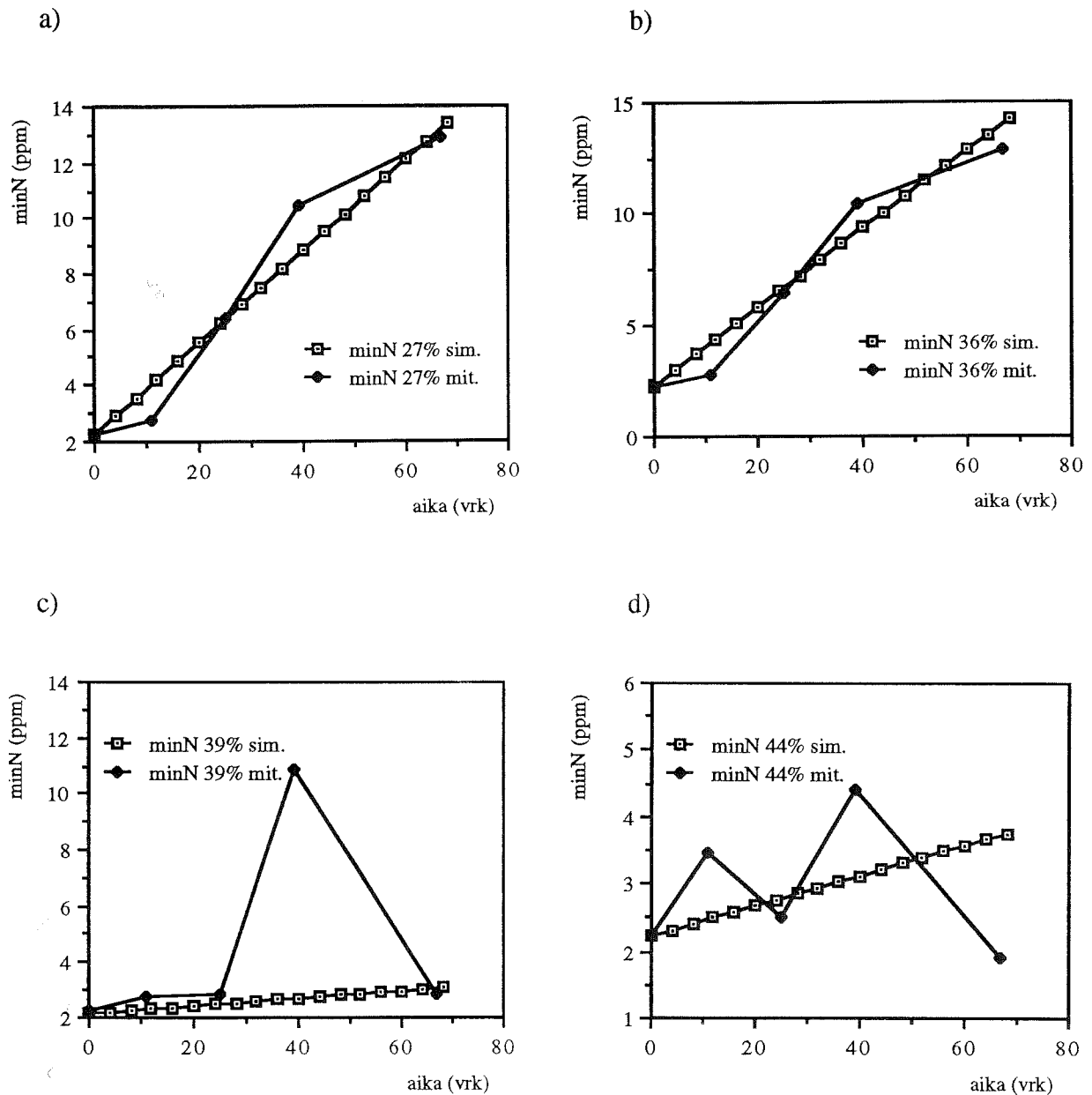


Kuva 2

Mineraalityypen määrille mitatut ja simuloidut arvot, kun lähtökohtana oli orgaanisen tyypen varasto. Maalaji karkea hietä. a) kosteus 0 til.-% b) kosteus 5 til.-% c) kosteus 12 til.-% d) kosteus 26 til.-%

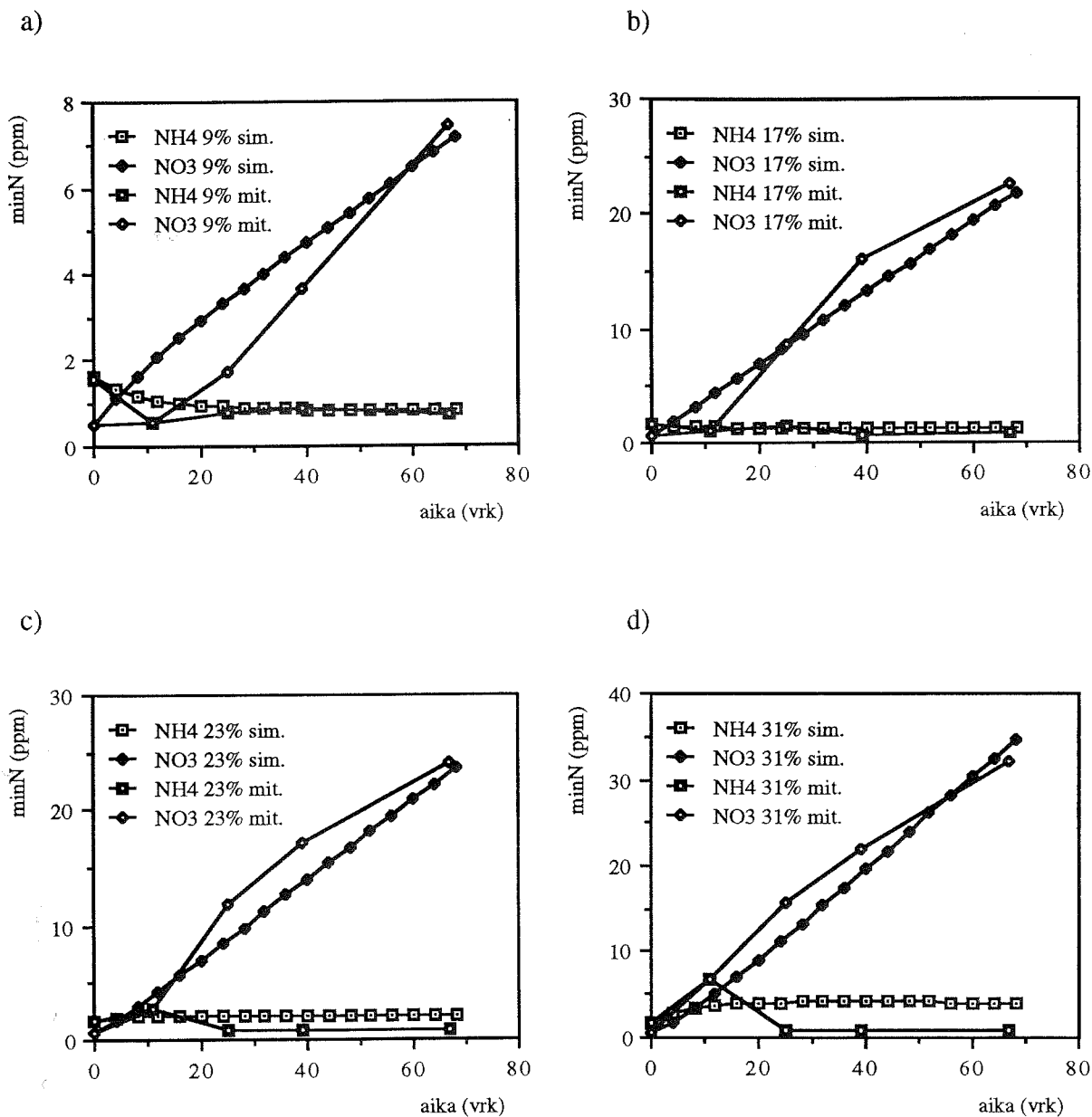


Kuva 3 Mineraalityyppien määrille mitatut ja simuloitut arvot, kun lähtökohtana oli orgaanisen typpien varasto. Maalaji lysimetrin 9 pintamaa.
 a) kosteus 10 til.-% b) kosteus 18 til.-% c) kosteus 25 til.-%
 d) kosteus 36 til.-%

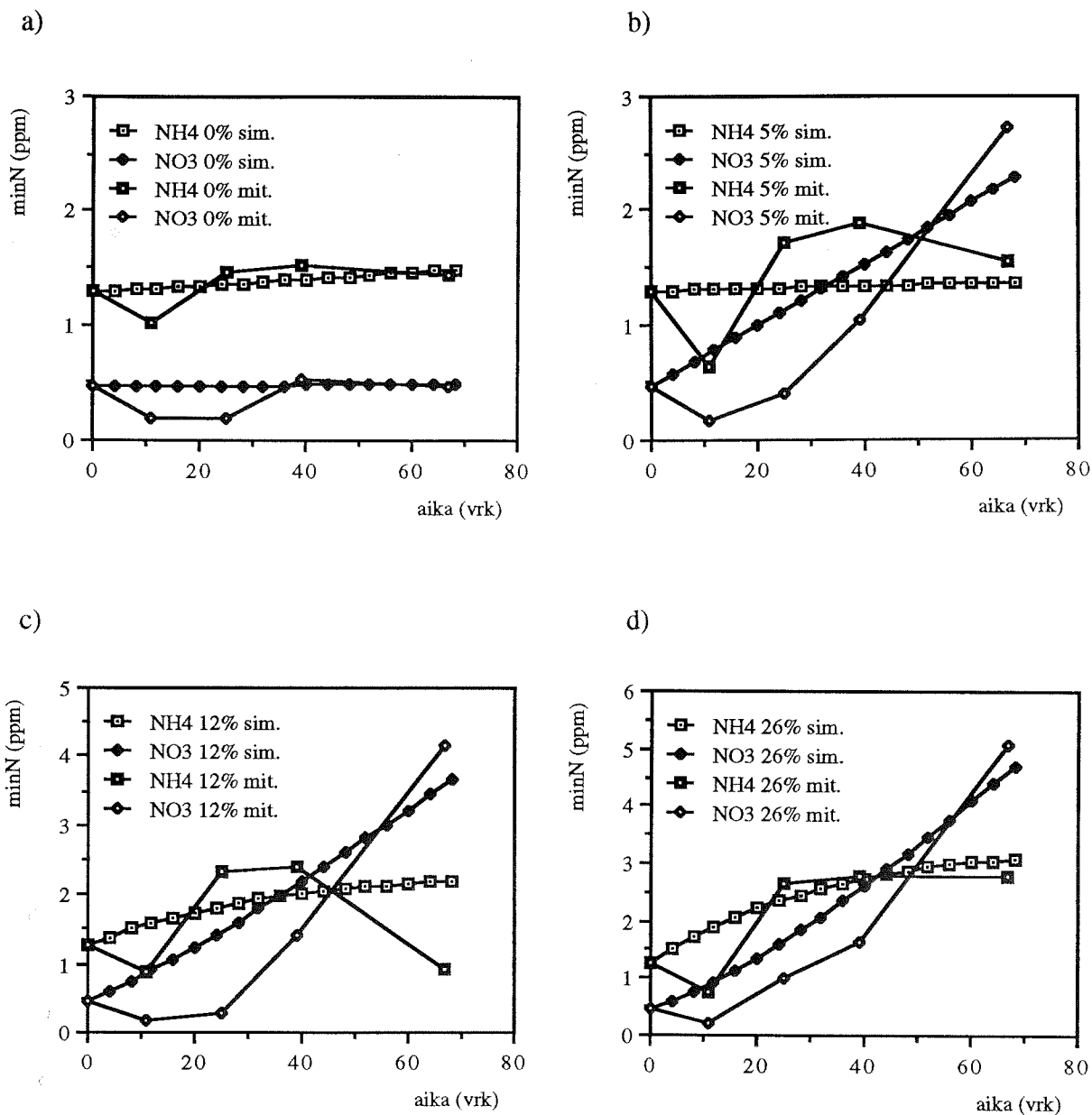


Kuva 4 Mineraalitypen määrille mitatut ja simuloitua arvoja, kun lähtökohtana oli orgaanisen tyypin varasto. Maalaji hiesu. a) kosteus 27 til.-% b) kosteus 36 til.-% c) kosteus 39 til.-% d) 44 til.-%

LIITE 5 Typen ammonifikaatiolle ja nitrifikaatiolle simuloituvat arvot

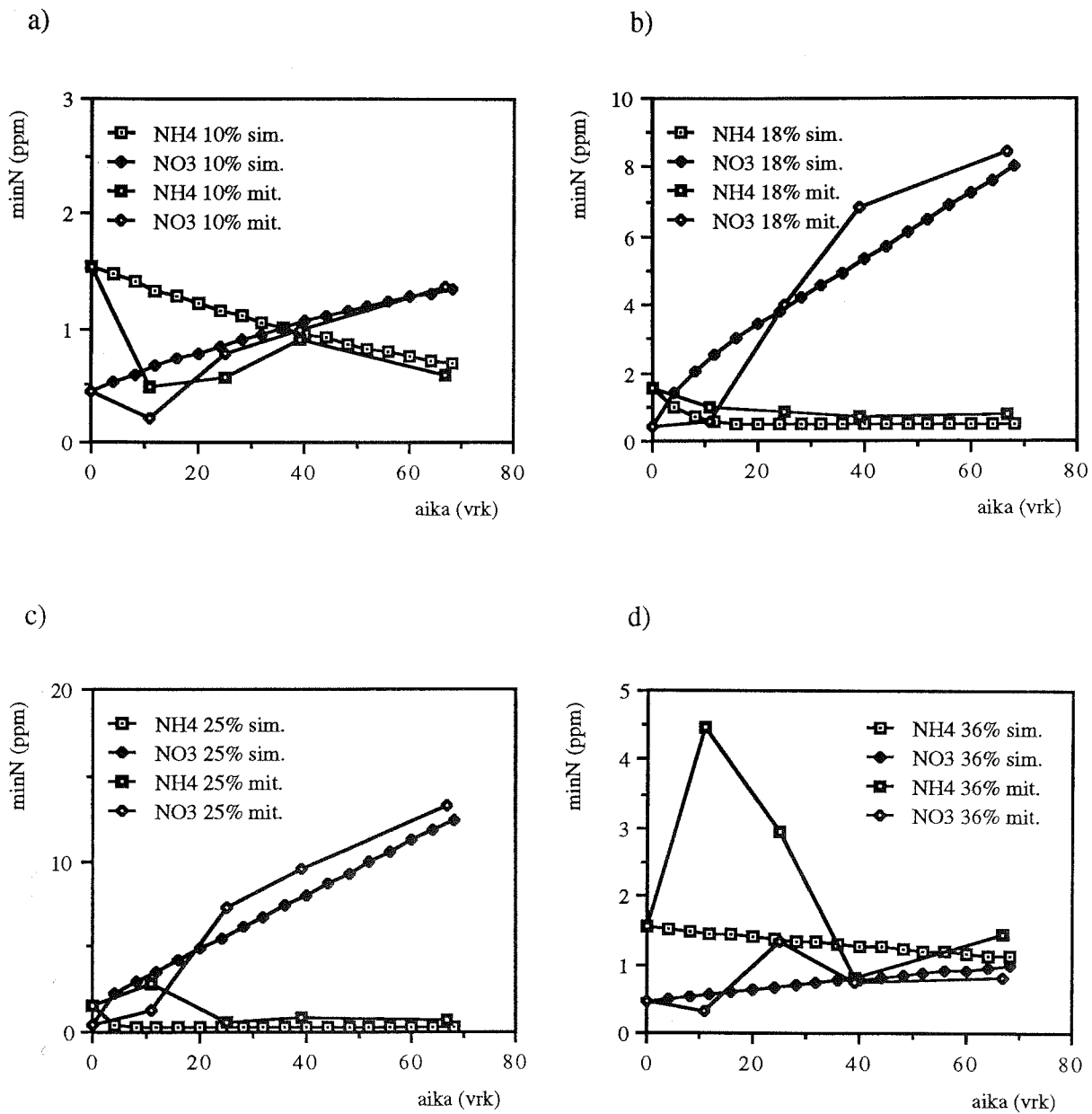


Kuva 1 Ammonium- ja nitraattitypen määrille mitatut ja simuloituvat arvot. Maalaji lysimetrin 6 pintamaa. a) kosteus 9 til.-% b) kosteus 17 til.-% c) kosteus 23 til.-% d) kosteus 31 til.-%

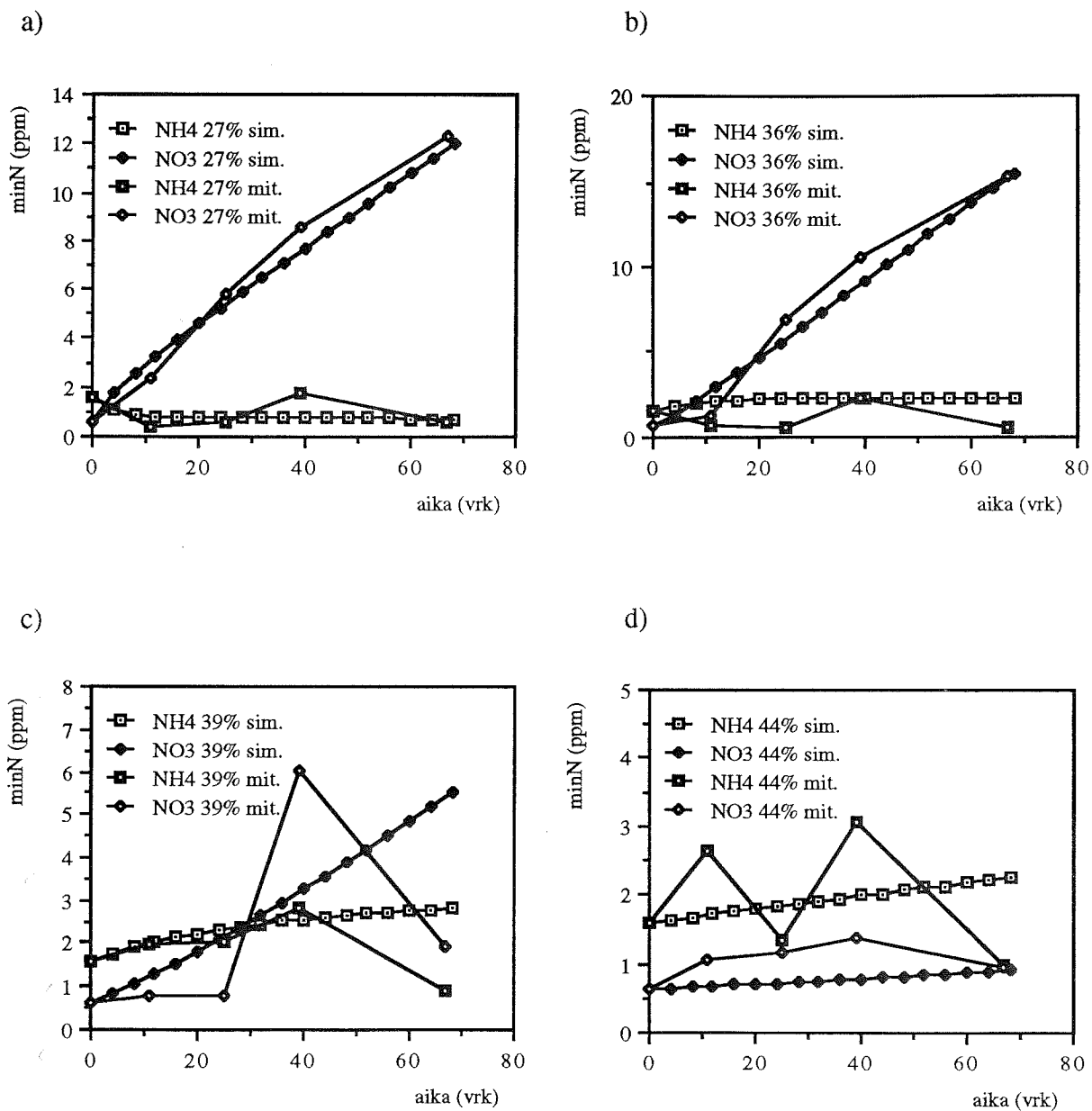


Kuva 2

Ammonium- ja nitraattitypen määrille mitatut ja simuloidut arvot. Maalaji karkea hietä. a) kosteus 0 til.-% b) kosteus 5 til.-% c) kosteus 12 til.-% d) kosteus 26 til.-%

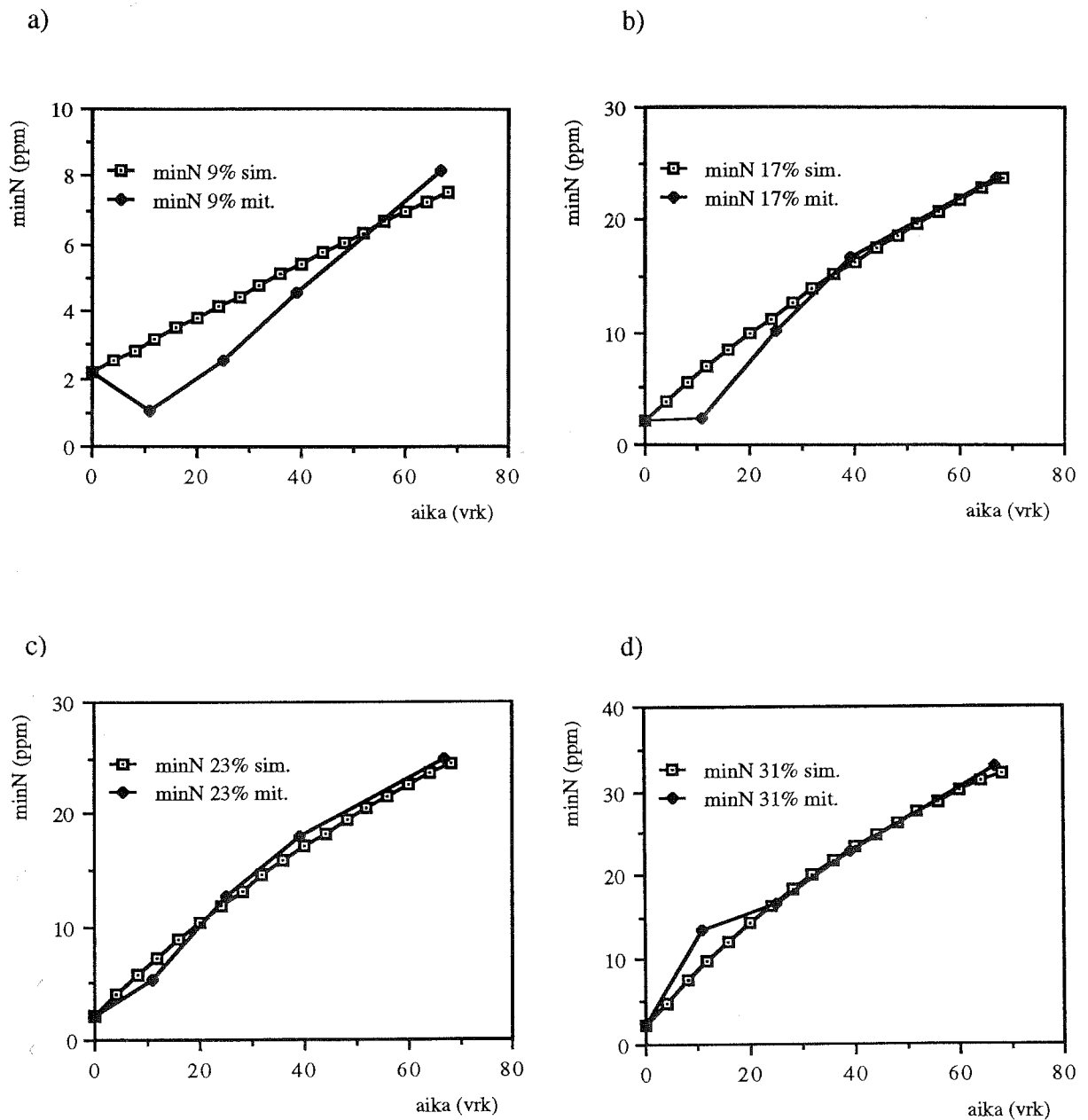


Kuva 3 Ammonium- ja nitraattitypen määrille mitatut ja simuloituvat arvot. Maalaji lysimetrin 9 pintamaa. a) kosteus 10 til.-% b) kosteus 18 til.-% c) kosteus 25 til.-% d) kosteus 36 til.-%

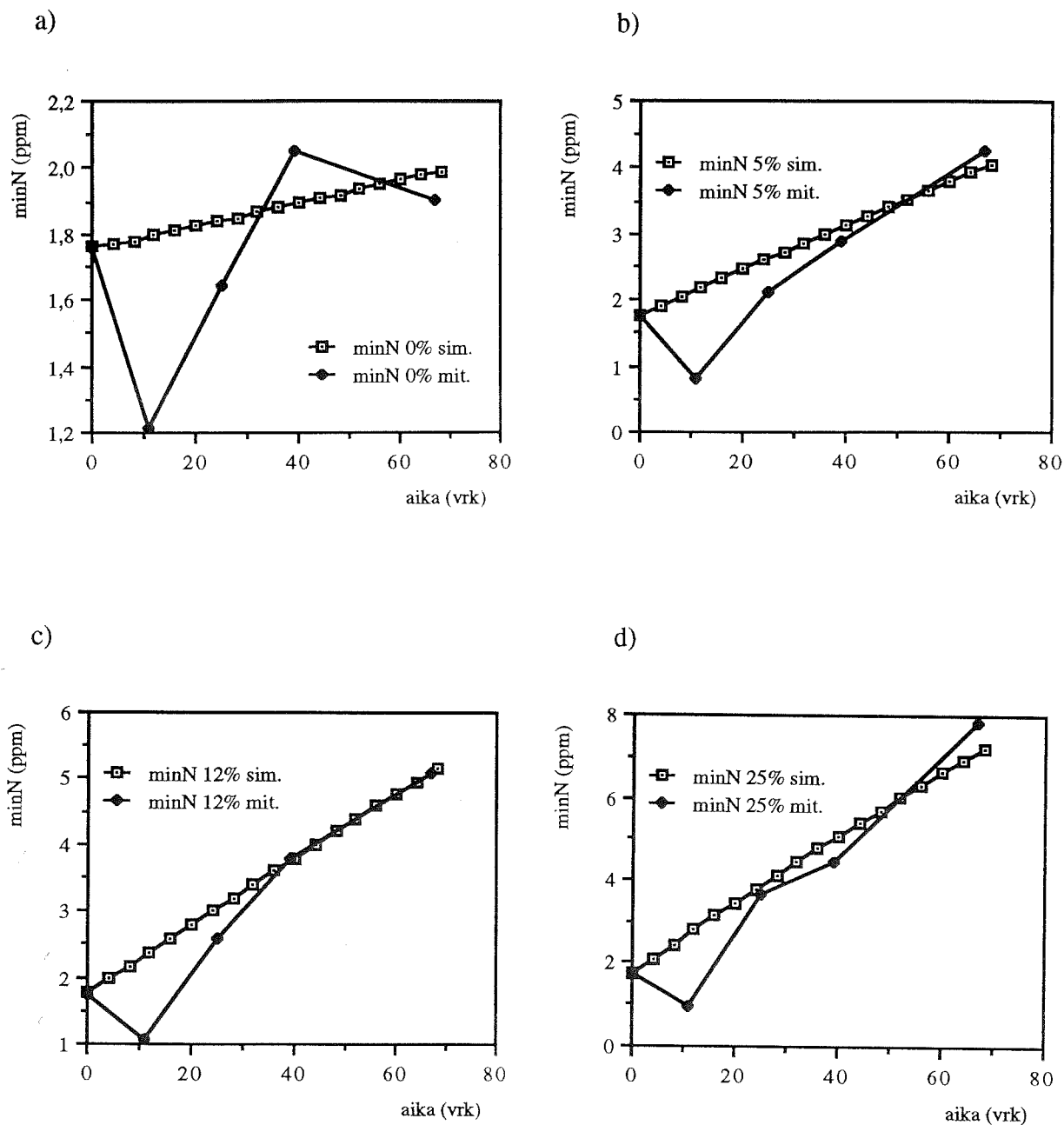


Kuva 4 Ammonium- ja nitraattityypen määrille mitatut ja simuloitunut arvot. Maalaji hiesu. a) kosteus 27 til.-% b) kosteus 36 til.-% c) kosteus 39 til.-% d) 44 til.-%

LIITE 6 Typen mineralisaatiolle simuloidut arvot, malli kuvassa 2.4

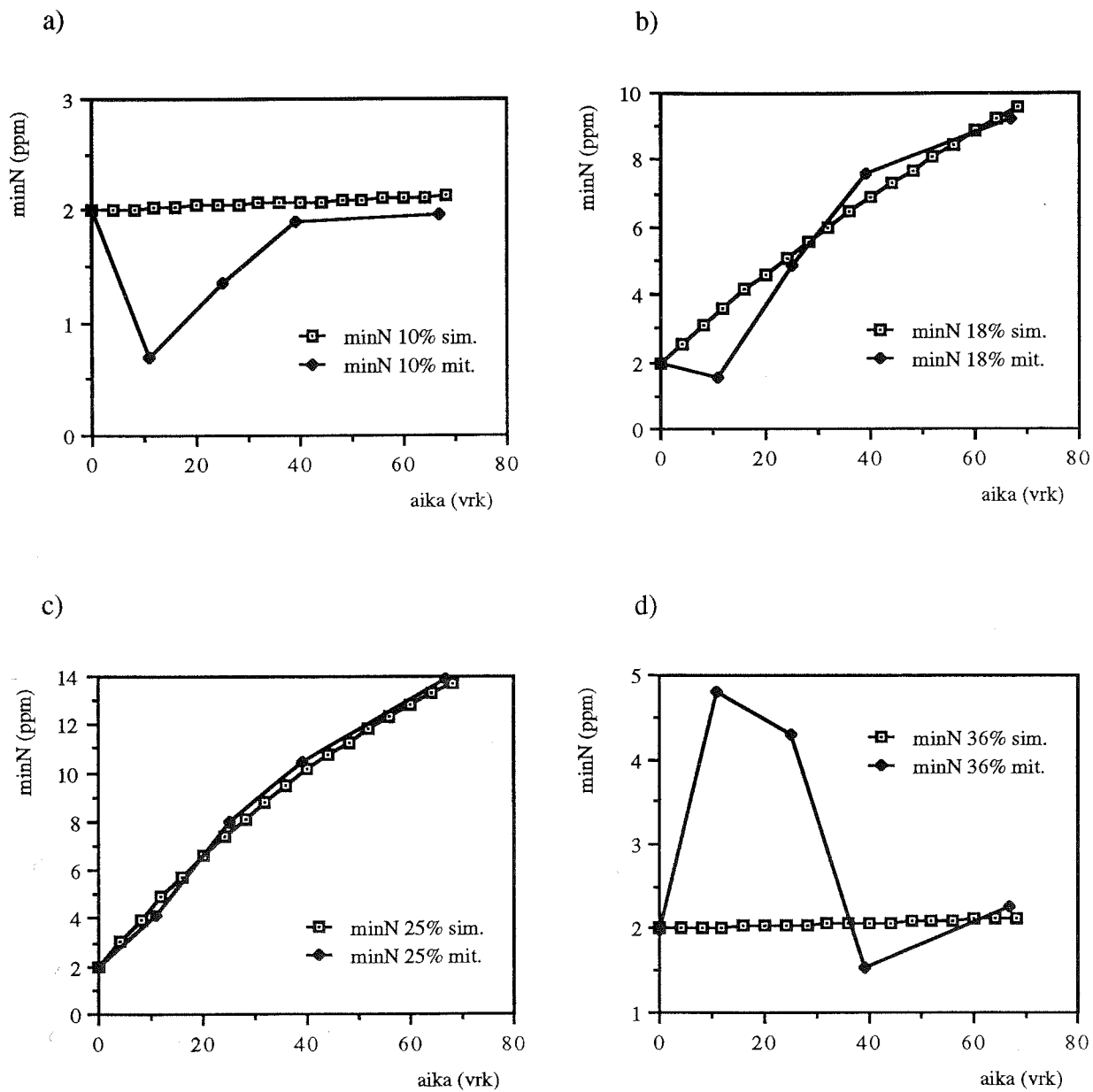


Kuva 1 Mineraalityypen määrille mitatut ja simuloidut arvot, kun lähtökohtana oli potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto. Maalaji lysimetrin 6 pintamaa. a) kosteus 9 til.-% b) kosteus 17 til.-% c) kosteus 23 til.-% d) kosteus 31 til.-%



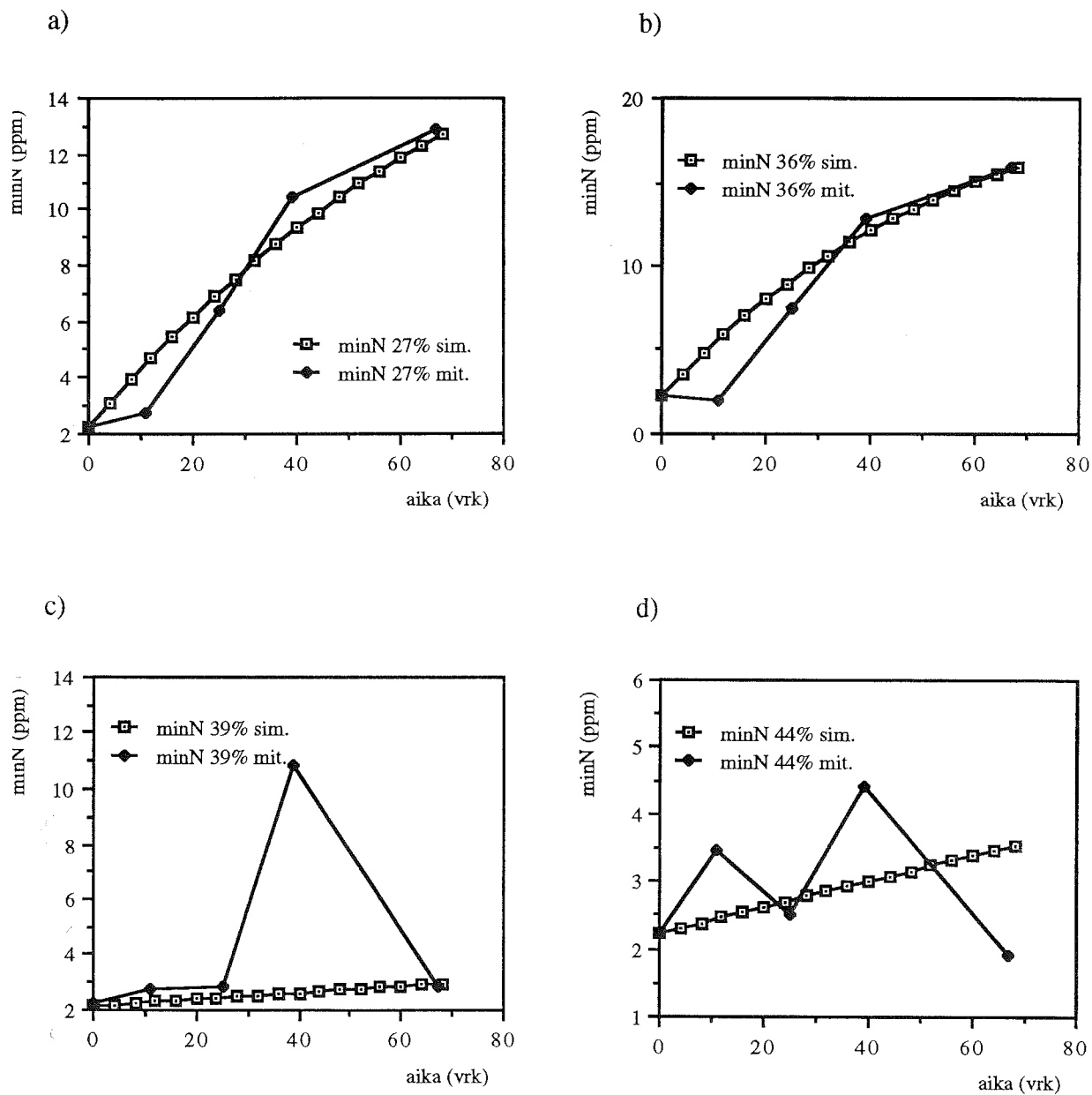
Kuva 2

Mineraalitypen määrille mitatut ja simuloidut arvot, kun lähtökohtana oli potentiaalisesti mineralisoituvan tyven varasto. Maalaji karkea hieta.
 a) kosteus 0 til.-% b) kosteus 5 til.-% c) kosteus 12 til.-% d) kosteus 26 til.-%



Kuva 3

Mineraalityyppien määrille mitatut ja simuloituvat arvot, kun lähtökohtana oli potentiaalisesti mineralisoituvan tyypin varasto. Maalaji lysimetrin 9 pintamaa. a) kosteus 10 til.-% b) kosteus 18 til.-% c) kosteus 25 til.-% d) kosteus 36 til.-%



Kuva 4 Mineraalitypen määrille mitatut ja simuloitua arvoja, kun lähtökohtana oli potentiaalisesti mineralisoituvan typen varasto. Maalaji hiesu. a) kosteus 27 til.-% b) kosteus 36 til.-% c) kosteus 39 til.-% d) 44 til.-%

LIITE 7

Taulukko 1 Kosteuden vaikutus mineralisaatioon lysimetrissä 6, merkitsevyystaso 5%

Näyte	Aika	Kosteus	Ka:n ero ¹⁾	Merkitsevyys
L6 pinta	11	9% vs 17%	-0.9406	*
		9% vs 23%	-4.0172	*
		9% vs 31%	-12.3466	*
		17% vs 23%	-3.0767	*
		17% vs 31%	-11.4060	*
		23% vs 31%	-8.3293	*
	25	9% vs 17%	-7.5743	*
		9% vs 23%	-10.1673	*
		9% vs 31%	-13.9667	*
		17% vs 23%	-2.5933	*
		17% vs 31%	-6.3923	*
		21% vs 28%	-3.7993	*
	39	9% vs 17%	-12.2043	*
		9% vs 23%	-13.3770	*
		9% vs 31%	-18.2563	*
		17% vs 23%	-1.1727	*
		17% vs 31%	-6.0520	*
		21% vs 28%	-4.8793	*
	67	9% vs 17%	-15.4210	*
		9% vs 23%	-16.7740	*
		9% vs 31%	-24.8133	*
17% vs 23%		-1.3530	*	
17% vs 31%		-9.3923	*	
21% vs 28%		-8.0393	*	
L6 pohja	11	0% vs 5%	0.3940	*
		0% vs 12%	0.15167	
		0% vs 26%	0.24833	
		5% vs 12%	-0.24233	
		5% vs 26%	-0.14567	
		12% vs 26%	0.09667	
	25	0% vs 5%	-0.4510	
		0% vs 12%	-1.0823	*
		0% vs 26%	-2.0337	*
		5% vs 12%	-0.6313	*
		5% vs 26%	-1.5623	*
		12% vs 26%	-0.9513	*
	39	0% vs 5%	-1.0767	*
		0% vs 12%	-1.7367	*
		0% vs 26%	-2.3837	*
		5% vs 12%	-0.6600	*
		5% vs 26%	-1.3070	*
		12% vs 26%	-0.6470	*
	67	0% vs 5%	-2.37033	*
		0% vs 12%	-3.19600	*
		0% vs 26%	-5.92500	*
5% vs 12%		-0.82567	*	
5% vs 26%		-3.55467	*	
12% vs 26%		-2.72900	*	

1) Verrattavien kosteuksien keskiarvojen välinen ero

Taulukko 2 Kosteuden vaikutus mineralisaatioon lysimetrissä 9, merkitsevyystaso 5%

Näyte	Aika	Kosteus	Ka:n ero ¹⁾	Merkitsevyys
L9 pinta	11	10% vs 18%	-0.88233	*
		10% vs 25%	-3.27000	*
		10% vs 36%	-4.1080	*
		18% vs 25%	-2.38767	*
		18% vs 36%	-3.22567	*
		25% vs 36%	-0.838	*
	25	10% vs 18%	-3.5063	*
		10% vs 25%	-6.8500	*
		10% vs 36%	-2.6367	*
		18% vs 25%	-3.3437	*
		18% vs 36%	0.8697	
		25% vs 36%	4.2133	*
	39	10% vs 18%	-5.6853	*
		10% vs 25%	-8.5400	*
		10% vs 36%	0.3833	
		18% vs 25%	-2.8547	*
		18% vs 36%	6.0687	*
		25% vs 36%	8.9233	*
	67	10% vs 18%	-7.2553	*
		10% vs 25%	-12.2360	*
		10% vs 36%	-0.3033	
18% vs 25%		-4.9807	*	
18% vs 36%		6.9520	*	
25% vs 36%		11.9327	*	
L9 pohja	11	27% vs 36%	0.8243	
		27% vs 39%	0.0257	
		27% vs 44%	-0.665	
		36% vs 39%	-0.7987	
		36% vs 44%	-1.4900	
		39% vs 44%	-0.6913	
	25	27% vs 36%	-1.0647	
		27% vs 39%	3.6057	*
		27% vs 44%	3.9137	*
		36% vs 39%	4.6703	*
		36% vs 44%	4.9783	*
		39% vs 44%	0.3080	
	39	27% vs 36%	-2.338	
		27% vs 39%	1.580	
		27% vs 44%	5.993	*
		36% vs 39%	3.918	
		36% vs 44%	8.331	*
		39% vs 44%	4.413	*
67	27% vs 36%	-3.0870	*	
	27% vs 39%	10.0660	*	
	27% vs 44%	10.9493	*	
	36% vs 39%	13.1530	*	
	36% vs 44%	14.0363	*	
	39% vs 44%	0.8833		

1) Verrattavien kosteuksien keskiarvojen välinen ero

Taulukko 3 Ajan vaikutus mineralisaatioon lysimetrisssä 6, merkitsevyytaso 5%

Näyte	Kosteus	Aika	F 1)	Pr>F 2)	Merkitsevyytaso	
L6 pinta	9%	0-11	453.83	0.0022	*	
		11-25	41.12	0.0235	*	
		25-39	91.63	0.0107	*	
		39-67	382.94	0.0026	*	
	17%	0-11	0.17	0.7165		
		11-25	719.32	0.0014	*	
		25-39	1894.21	0.0005	*	
		39-67	395.69	0.0025	*	
	23%	0-11	266.86	0.0037	*	
		11-25	577.88	0.0017	*	
		25-39	588.44	0.0017	*	
		39-67	216.42	0.0046	*	
	31%	0-11	936.44	0.0011	*	
		11-25	139.58	0.0071	*	
		25-39	465.18	0.0021	*	
		39-67	559.56	0.0018	*	
	L6 pohja	0%	0-11	170.87	0.0058	*
			11-25	484.57	0.0021	*
			25-39	32.99	0.029	*
			39-67	6.88	0.1198	
5%		0-11	2535.40	0.0004		
		11-25	97.02	0.0102	*	
		25-39	710.29	0.0014	*	
		39-67	65.04	0.015	*	
12%		0-11	274.07	0.0036	*	
		11-25	102.75	0.0096	*	
		25-39	48.19	0.0201	*	
		39-67	127.82	0.0077	*	
26%		0-11	115.19	0.0086	*	
		11-25	300.53	0.0033	*	
		25-39	11.60	0.0764		
		39-67	8462.92	0.0001	*	

1) Testisuureen arvo

2) Tarkka merkitsevyytaso

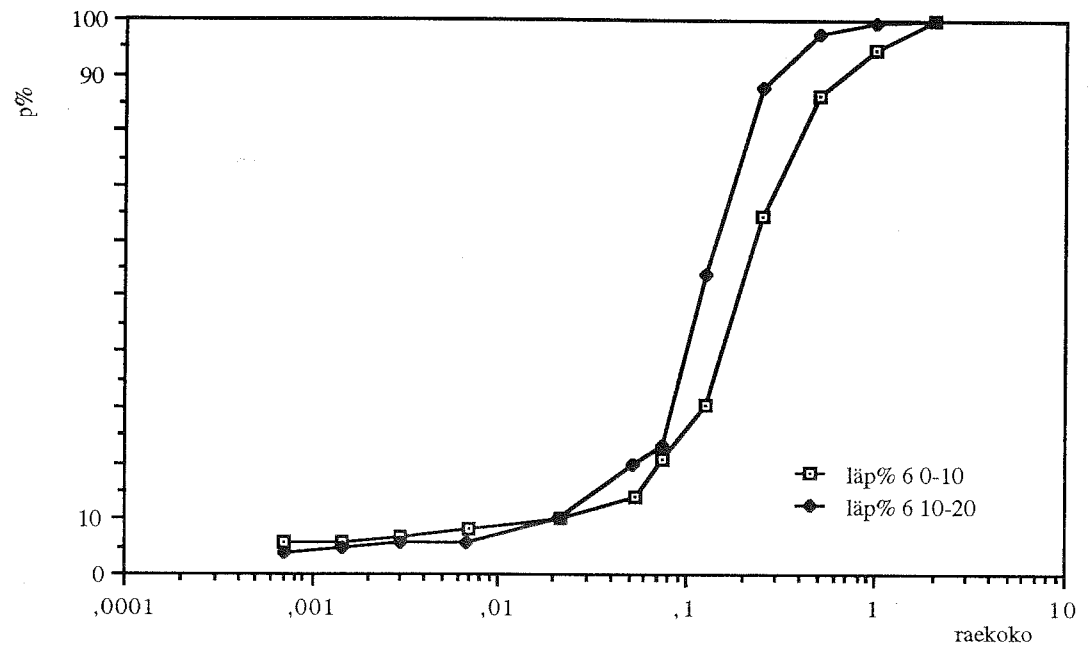
Taulukko 4 Ajan vaikutus mineralisaatioon lysimetrisssä 9, merkitsevyystaso 5%

Näyte	Kosteus	Aika	F 1)	Pr>F 2)	Merkitsevyys
L9 pinta	10%	0-11	279.98	0.0036	*
		11-25	234.31	0.0042	*
		25-39	79.37	0.0124	*
		39-67	15.51	0.0588	
	18%	0-11	26.46	0.0358	*
		11-25	1054.89	0.0009	*
		25-39	622.33	0.0016	*
		39-67	19.16	0.0484	*
	25%	0-11	3429.44	0.0003	*
		11-25	3938.06	0.0003	*
		25-39	252.65	0.0039	*
		39-67	102.56	0.0096	*
	36%	0-11	4012.70	0.0002	*
		11-25	3.59	0.1986	*
		25-39	22.06	0.0425	*
		39-67	6.64	0.1234	
L9 pohja	27%	0-11	2.06	0.2874	
		11-25	88.86	0.0111	*
		25-39	225.79	0.0044	*
		39-67	153.21	0.0065	*
	36%	0-11	1.29	0.3739	
		11-25	454.01	0.0022	*
		25-39	61.31	0.0159	*
		39-67	3.06	0.2225	
	39%	0-11	1.45	0.3514	
		11-25	0.02	0.9011	
		25-39	7.86	0.1071	
		39-67	5.22	0.1497	
	44%	0-11	4.46	0.1692	
		11-25	80.69	0.0122	*
		25-39	40.11	0.024	*
		39-67	29.46	0.0323	*

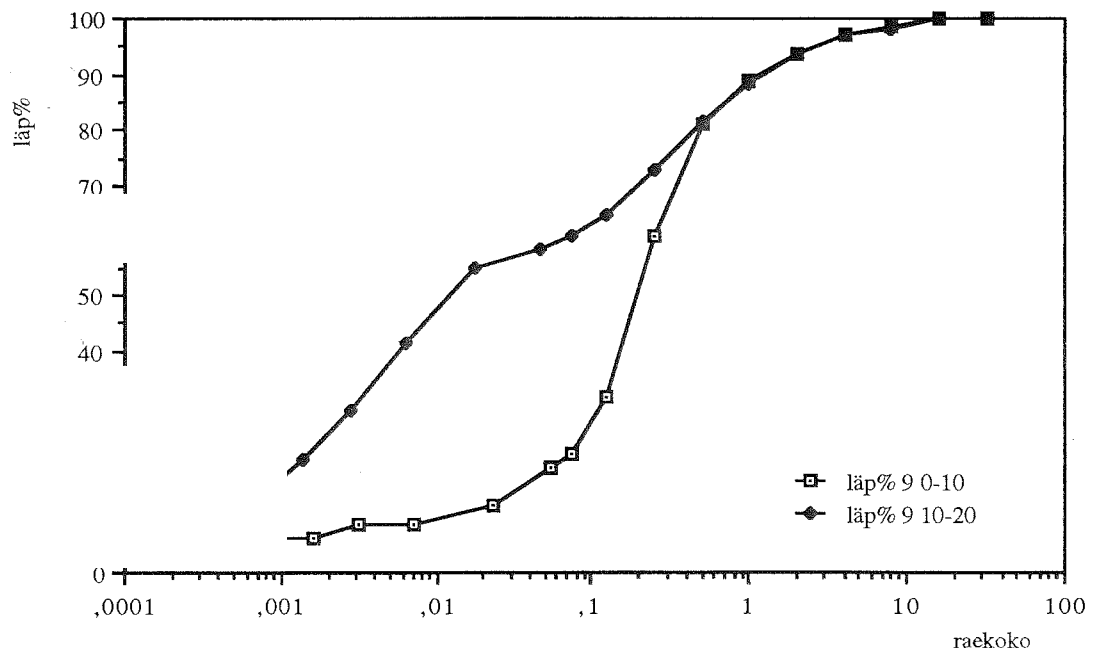
1) Testisuureen arvo

2) Tarkka merkitsevyystaso

LIITE 8 Maalajien rakeisuudet



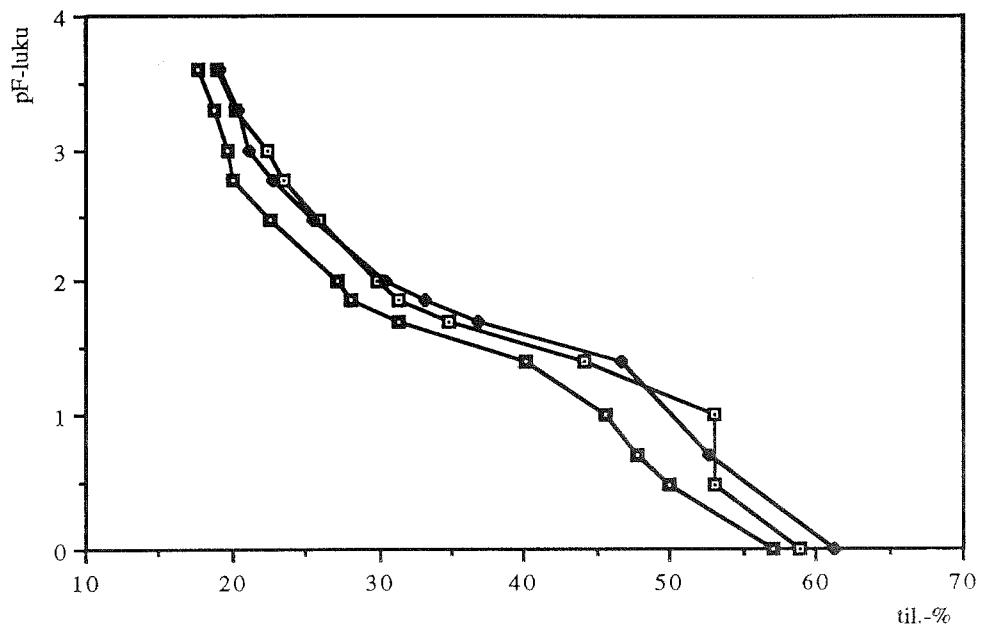
Kuva 1 Lysimetrin 6 rakeisuusjakaumat



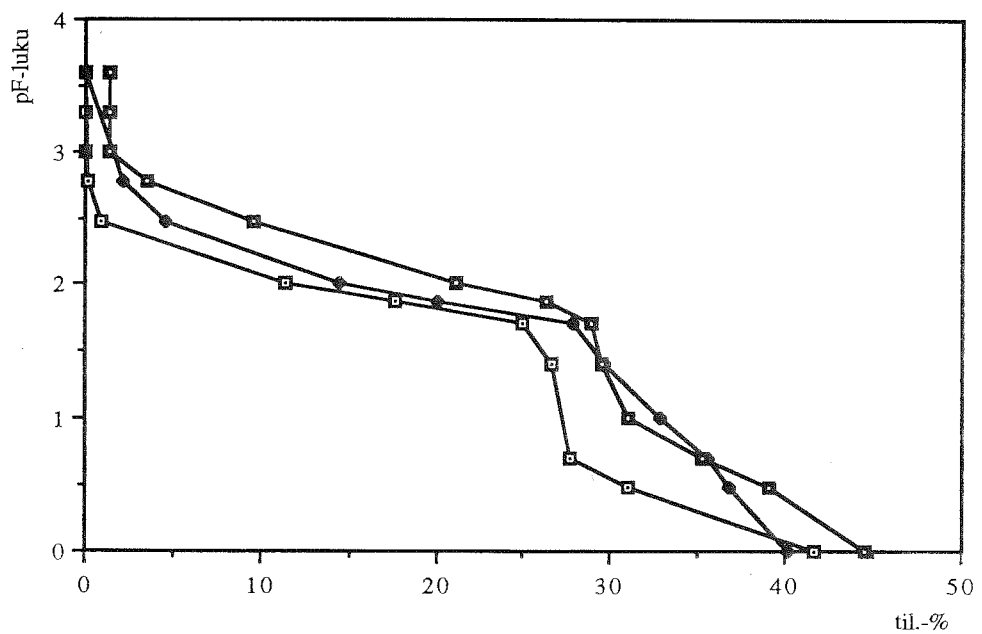
Kuva 2 Lysimetrin 9 rakeisuusjakaumat

LIITE 9 Maalajien vedenpidätyskäyrät

a)

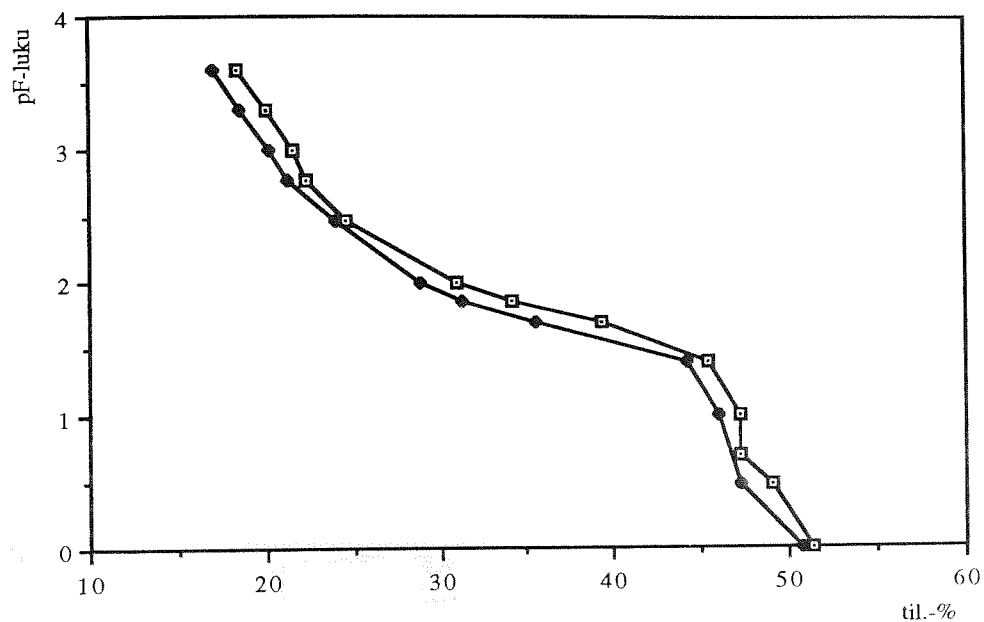


b)

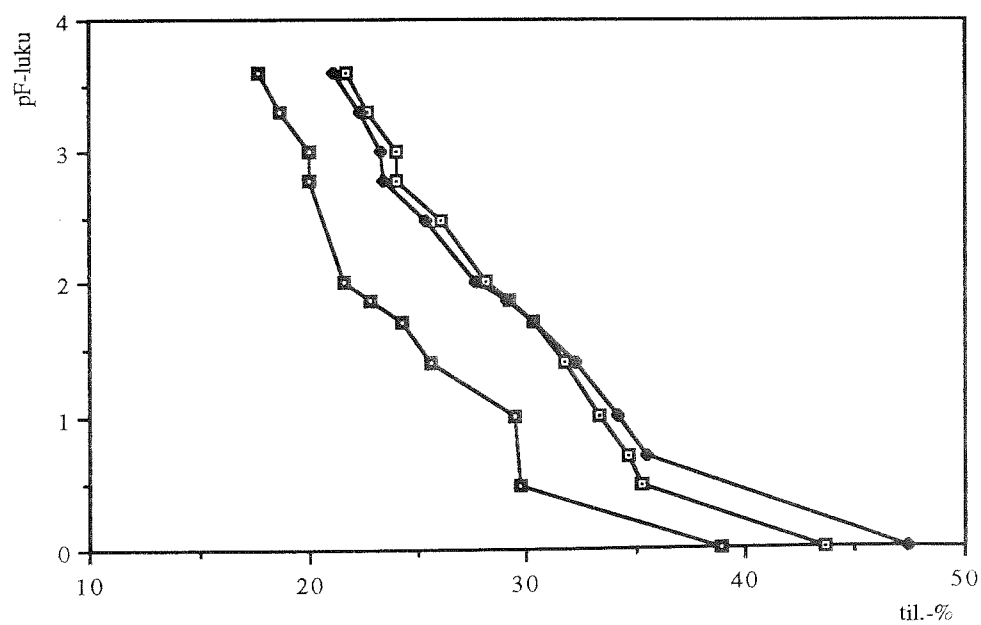


Kuva 1 Lysimetrin 6 vedenpidätyskäyrät (kolme rinnakkaiskoetta)
 a) pintamaa b) karkea hieta

a)



b)



Kuva 2

Lysimetrin 9 vedenpidätyskäyrät (kolme rinnakkaiskoetta)
 a) pintamaa b) hiesu