

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
RAKENNUS- JA MAANMITTAUSTEKNIIKAN OSASTO

Helena Karvonen

**LÄMPÖTILAN VAIKUTUS TYPEN MINERALISAATIOON
MAAPERÄSSÄ**

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

Tekijä ja työn nimi: Karvonen Helena Lämpötilan vaikutus typen mineralisaatioon maaperässä	
Päivämäärä : 17.10.1992	Sivumäärä : 107
Osasto : Rakennus- ja maanmittaustekniikka	Professuuri : vesitalous
Työn valvoja : Professori Pertti Vakkilainen	
Työn ohjaaja : diplomi-insinööri Maija Paasonen-Kivekäs	
<p>Tutkimuksella selvitettiin lämpötilan vaikutusta ammonium- ja nitraattitypen sekä niiden yhteispitoisuuden kehittymiseen neljässä eri maalajissa. Näytteitä inkuboitiin aerobeissa ja mahdollisimman optimaalisissa kosteusolosuhteissa 2.0, 4.5, 8.0 ja 15.0 °C lämpötiloissa eri pituisia aikoja (11, 25, 39 ja 67 vuorokautta). Aineistoon sovellettiin sekä nollannen että ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa noudattavia malleja. Mineraalista tyypeä kertyi eniten maalajista riippumatta niihin näytteisiin, joita pidettiin 15.0 °C lämpötilassa. Vastavasti vähiten sitä muodostui maalajista riippuen 2.0 tai 4.5 °C lämpötiloissa inkuboiduissa näytteissä. Havaittu mineraalisen typen määrä oli lähes aina suoraan verrannollinen maalajista mitattuihin orgaanisen typen ja hiilen määriin. Yleisesti ammonifikaatioreaktiot hallitsivat mineralisaatiota 2.0, 4.5 ja 8.0 °C lämpötiloissa nitrifikaation ollessa vallitseva prosessi 15.0 °C lämpötilassa. Sekä vesi- että kalsiumkloridispersensioista mitatut pH-arvot seurasivat hyvin mineraalisen typen pitoisuuden kehittymistä näytteissä. Inkubointiaika vaikutti alimmissa lämpötiloissa merkittävästi tuloksiin koko koejakson, mutta lämpötilan vaikutus tuli tilastollisesti merkittäväksi vasta eri pituisten inkubointijaksojen jälkeen. Nitrifikaatiota ja kokonaismineralisaatiota voitiin kuvata sekä nollannen että ensimmäisen kertaluokan kinetiikalla. Ensimmäisen kertaluokan kinetiikan soveltuvuudessa ei havaittu eroja sen suhteen, käytetiinkö potentiaalisesti mineralisoituvan typen varastona koko orgaanisen typen varastoa vai vain osaa siitä. Kumpikaan käytetyistä mallikuvauksista ei sopinut kuin välttävästi ammonifikaatio mallinnukseen. Keskimääräisen lämpötilakeroimen (Q_{10}) arvot eri maalajeissa vaihtelivat välillä 1.3-1.8. Mineralisaationopeudet ja malleilla lasketut kertoimet vastasivat hyvin vastavien tutkimusten tuloksia. Tutkimuksessa keskeisiä tuloksia olivat ammonifikaation vallitsevuus mineralisaatiossa kylmässä maassa sekä varsin suuri kokonaismineralisaatio jo matalissa lämpötiloissa. Pelto-olosuhteissa mineralisaatioon vaikuttavat pääasiassa lämpötila ja kosteus, johon voidaan vaikuttaa säätöojituksen avulla.</p>	

Author and name of the thesis : Karvonen Helena Effect of temperature on soil nitrogen mineralization	
Date : 17.10.1992	Number of pages : 107
Department : Civil Engineering and Surveying	Professorship : Hydrology and Water Resources Management
Supervisor : Prof. Pertti Vakkilainen	
Instructor : M.Sc. Maija Paasonen-Kivekäs	
<p>The scope of this work was to study effect of temperature on development of ammonium and nitrate nitrogen concentrations in four different soils. Soil samples were incubated aerobically under optimal moisture conditions. Temperatures used in this study were +2.0, 4.5, 8.0 and 15.0 °C and incubation periods lasted 11, 25, 39 and 67 days. Both zero and first order kinetic models were applied to the material. Accumulation of mineral nitrogen was the greatest in those samples, which were incubated at 15.0 °C. Respectively the accumulation was the least at the lowest temperatures used in this study (2.0 and 4.5 °C). Amount of mineral nitrogen was nearly always directly correlated to the amounts of organic carbon and nitrogen in the soil. Generally ammonification reactions dominated mineralization of nitrogen in low temperatures (2.0, 4.5 ja 8.0 °C) and nitrification reactions in 15.0 °C. pH-values measured from the water- and calciumchloride suspensions both followed well development of mineral nitrogen concentrations in the samples. Incubation time affected on the results during the whole testperiod in low temperatures, but the effect of temperature became statistically significant after different periods of incubation. Nitrification and total mineralization can be described with both zero and first order kinetics. No difference could be observed between first order kinetic models, where the whole supply of organic nitrogen or only a part of it was considered as potentially mineralizable nitrogen. Neither of the modeltypes (zero and first order kinetics) could be applied satisfactorily to ammonification. Values of the average temperature coefficients (Q_{10}) were 1.3-1.8. Now the main results were the dominance of ammonification in low temperatures and overall significance of mineralization during autumn and spring seasons. According the results of this study a control drainage can be utilized while reducing the washout of nitrogen from cropfields.</p>	

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun vesitalouden laboratoriossa professori Pertti Vakkilaisen valvonnassa. Ohjaajana toimi diplomi-insinööri Maija Paasonen-Kivekäs. Tutkimuksen rahoitti Salaojituksen tukisäätiö. Esitän parhaimmat kiitokset heille sekä kaikille vesitalouden laboratoriossa työskennelleille siitä tuesta ja avusta, mikä on mahdollistanut tämän tutkimuksen toteutumisen ja valmistumisen. Lisäksi kiitän ystäviäni heidän minua kohtaan osoittamastaan kärsivällisyydestä ja ymmärryksestä työn aikana. Erityiskiitokset osoitan arkkitehtiyltioppilas Mikko Soimakalliolle hänen avustaan työn kuvituksen muokkaamisessa.

Helsingissä lokakuussa 1992



Helena Karvonen

Kuva 1.1	Typen kokonaiskierto ja sen alakierrot [Janssonin ja Perssonin (1982) mukaan].	2
Kuva 1.2	Säätöojituksen yhteydet typen mineralisaatioon ja sitä sääteleviin tekijöihin.	7
Kuva 3.1	Nettomineralisaation maksimi- (A) ja minimiarvot (B) eri maalajeissa kuvattuina inkubointiajan suhteen. Suurimmat muutokset havaittiin 15.0 °C:ssa ja pienimmät lysimetrin 2 pohjamaata lukuun ottamatta 2 °C:ssa. Yksikkö [ppm] vastaa yksikköä [$\mu\text{g g}^{-1}$] kuivaa maata kohti laskettuna.	18
Kuva 3.2	Suurimmat (maksimiN) ja pienimmät (minimiN) mitatut nettomineralisaatioiden määrät eri maalajeissa verrattuna niistä mitattuihin orgaanisen hiilen ja typen pitoisuuksiin. Orgaanisen typen (org.N) pitoisuus on asteikolla ($\mu\text{g g}^{-1}$) 1/100 todellisesta.	19
Kuva 3.3	Lysimetrin 2 pohjamaan (A) ja pintamaan (B) sekä lysimetrin 9 pohjamaan (C) ja pintamaan (D) mineralisaatio kuvattuna lämpötiloittain ajan suhteen. Yksikkö [ppm] vastaa yksikköä [$\mu\text{g g}^{-1}$] kuivaa maata kohti laskettuna.	20
Kuva 3.4	Lysimetrin 2 pintamaan (A) ja pohjamaan (B) sekä lysimetrin 9 pintamaan (C) ja pohjamaan (D) ammonifikaatio kuvattuna lämpötiloittain ajan suhteen. Yksikkö MinN/[ppm] vastaa ammoniumtypen pitoisuutta kuivassa maassa [$\mu\text{g g}^{-1}$].	22
Kuva 3.5	Ammoniumtypen pitoisuuden nettomuutos lämpötilan suhteen eri maalajeissa 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Yksikkö MinN/[ppm] vastaa ammoniumtypen pitoisuutta kuivassa maassa [$\mu\text{g g}^{-1}$].	23
Kuva 3.6	Lysimetrin 2 pintamaan (A) ja pohjamaan (B) sekä lysimetrin 9 pintamaan (C) ja pohjamaan (D) nitrifikaatio kuvattuna lämpötiloittain ajan suhteen. Yksikkö MinN/[ppm] vastaa nitraattitypen pitoisuutta kuivassa maassa [$\mu\text{g g}^{-1}$].	24
Kuva 3.7	Nitraattitypen pitoisuuden nettomuutos lämpötilan suhteen eri maalajeissa 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Yksikkö MinN/[ppm] vastaa nitraattitypen pitoisuutta kuivassa maassa [$\mu\text{g g}^{-1}$].	25

- Kuva 3.8** Mineralisaation ja pH:n riippuvuus inkubointiajasta eri maalajeissa, kun lämpötila on 15.0 °C. Kuvassa on esitetty riippuvuus lysimetrien 2 pintamaassa (A) ja pohjamaassa (B) sekä lysimetrien 9 pintamaassa (C) ja pohjamaassa (D). Yksikkö MinN/[ppm] vastaa ammonium- ja nitraattitypen yhteismäärää kuivassa maassa [μgg^{-1}]. 26
- Kuva 3.9** Mitatut ja simuloidut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrien 9 pintamaassa (lineaarinen riippuvuus). Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 (A), 4.5 (B), 8.0 (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 41
- Kuva 3.10** Mitatut ja simuloidut mineraalityypen pitoisuudet lysimetrien 9 pintamaassa (lineaarinen riippuvuus). Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 (A), 4.5 (B), 8.0 (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 42
- Kuva 3.11** Mitatut ja simuloidut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrien 2 pintamaassa (eksponentiaalinen riippuvuus). Suluissa on ilmoitettu mallissa käytetty potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 (A), 4.5 (B), 8.0 (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 43
- Kuva 3.12** Mitatut ja simuloidut nitraattityypen pitoisuudet lysimetrien 2 pintamaassa (eksponentiaalinen riippuvuus). Suluissa on ilmoitettu mallissa käytetty potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 (A), 4.5 (B), 8.0 (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 44
- Kuva 3.13.** Nettomineralisaation (NH_4 ja NO_3^-) riippuvuus lämpötilasta lysimetrien 2 ja 9 pintamaissa (A) ja pohjamaissa (B). 46
- Kuva 3.14.** Kokonaismineralisaatiokerrointen (eksponentiaalinen riippuvuus) riippuvuus lämpötilasta lysimetrien 2 ja 9 pintamaissa (A) ja pohjamaissa (B). 46

Taulukko 2.1	Maalajien rakeisuusjakaumat (Bärlund 1992b, Rankinen 1992).	10
Taulukko 2.2a	Maalajien kemiallisia ominaisuuksia.	10
Taulukko 2.2b	Maalajien ominaisuuksia.	10
Taulukko 2.3	Koejärjestelyssä käytetyt lämpötilat ja kosteudet.	11
Taulukko 2.4a	Fysikaaliset määritykset (Rankinen 1992).	13
Taulukko 2.4b	Kemialliset määritykset (Rankinen 1992).	14
Taulukko 3.1	Nettomineralisaatio (ammonium- ja nitraattitypen summa) maalajeittain ja lämpötiloittain 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Pitoisuudet pinta-alaa kohden on laskettu 1 metrin paksuudessa kerroksessa.	21
Taulukko 3.2	Kokonaistypen pitoisuus eri maalajeissa sekä ennen 67 vuorokauden koejaksoa että sen jälkeen.	27
Taulukko 3.3	Aineiston ns. vieraat havainnot.	28
Taulukko 3.4	Inkubointilämpötilan ja ajan yhteisvaikutus 95 % luotettavuustasolla eri maalajeissa ammonifikaatiossa, nitrifikaatiossa ja kokonaismineralisaatiossa. Ne maalajit ja prosessit, joissa yhteisvaikutus on merkittävä Pillaisin testin mukaan, on merkitty tähdellä.	29
Taulukko 3.5a	Lämpötilan vaikutus ammonifikaatioon (1), nitrifikaatioon (2) ja kokonaismineralisaatioon (3) lysimetrissä 2. Numeroilla on merkitty ne tulokset, jotka ovat merkittäviä Scheffen testin mukaan (luotettavuustaso 95 %).	30
Taulukko 3.5b	Lämpötilan vaikutus ammonifikaatioon (1), nitrifikaatioon (2) ja kokonaismineralisaatioon (3) lysimetrissä 9. Numeroilla on merkitty ne tulokset, jotka ovat merkittäviä Scheffen testin mukaan (luotettavuustaso 95 %).	31

Taulukko 3.6a	Ajan vaikutus ammonifikaatioon (1), nitrifikaatioon (2) ja kokonaismineralisaatioon (3) lysimetriässä 2. Numeroilla on merkitty ne tulokset, jotka ovat merkittäviä Scheffen testin mukaan (luotettavuustaso 95 %).	34
Taulukko 3.6b	Ajan vaikutus ammonifikaatioon (1), nitrifikaatioon (2) ja kokonaismineralisaatioon (3) lysimetriässä 9. Numeroilla on merkitty ne tulokset, jotka ovat merkittäviä Scheffen testin mukaan (luotettavuustaso 95 %).	35
Taulukko 3.7	Polynomianalyysin tulokset ammonifikaatiolle. 95 % luotettavuustason tulokset on merkitty tähdellä.	37
Taulukko 3.8	Polynomianalyysin tulokset nitrifikaatiolle. 95 % luotettavuustason tulokset on merkitty tähdellä.	38
Taulukko 3.9	Polynomianalyysin tulokset kokonaismineralisaatiolle. 95 % luotettavuustason tulokset on merkitty tähdellä.	39
Taulukko 3.10	Mineralisaatiokertoimet ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle, kun prosessit ovat lineaarisia ajan suhteen.	40
Taulukko 3.11	Mineralisaatio kertoimet ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle, kun prosessit noudattavat ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa. Taulukossa oletetaan sekä koko orgaanisen typen varaston että vain osan siitä olevan potentiaalisesti mineralisoituvaa.	45
Taulukko 4.1	Nettomineralisaatio kg ha^{-1} metrin paksuisessa maakerroksessa sulan maan aikana eri maa-lajeissa. Jaksojen pituudet on laskettu vuoden 1988 kuukausien ilman keskilämpötilojen perusteella.	52
Taulukko 4.2	Mineralisoituvan typen määrän arvio orgaanisen typen määrän perusteella (Bärlund 1992a).	53

TIIVISTELMÄ	i
ABSTRACT	ii
ALKUSANAT	iii
KUVALUETTELO	iv
TAULUKKOLUETTELO	vi
1. JOHDANTO	1
1.1 Maaperän tyyppi ja sen kierto	1
1.2 Typen mineralisaatio	3
1.3 Lämpötilan vaikutus typen mineralisaatioon	4
1.4 Mineralisaatiotutkimuksen tavoitteet	6
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	9
2.1 Maanäytteet	9
2.2 Koejärjestely	11
2.3 Laboratorioanalyysit	12
2.4 Tilastolliset menetelmät	14
2.5 Mineralisaation kinetiikka	15
3. TULOKSET	18
3.1 Mittaustulokset	18
3.1.1 Kokonaismineralisaatio	18
3.1.2 Ammonifikaatio ja nitrifikaatio	21
3.1.3 pH-mittaukset	25
3.1.4 Kokonaistyyppi	27
3.2 Tilastolliset riippuvuudet	27
3.2.1 Aineiston vieraat havainnot	27
3.2.2 Lämpötilan ja ajan yhteisvaikutus	28
3.2.3 Lämpötilan vaikutus	29
3.2.4 Ajan vaikutus	33
3.2.5 Polynomianalyysi	37
3.3 Mineralisaatioprosessien simulointi	39

4. TULOSTEN TARKASTELU	47
4.1 Mittaustulosten tarkastelu	47
4.1.1 Aineiston ja tulosten luotettavuuden arviointi	50
4.2 Mittaustulosten vertailu	51
4.3 Tilastollisten riippuvuuksien tarkastelu	53
4.4 Simulointitulosten tarkastelu ja vertailu	54
5. JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET JATKOTUTKIMUKSIKSI	57
6. YHTEENVETO	60
LÄHDELUEITTELO	64
LIITELUEITTELO	68
LIITTEET	
1 Ammonium- ja nitraattitypen pitoisuus sekä niiden summa maanäytteissä eri lämpötiloissa ja inkubointijaksoilla.	73
2 Mineralisaation profiilit lämpötilan suhteen eri maalajeissa.	77
3 pH-arvojen kehittyminen ajan suhteen eri maalajeissa ja lämpötiloissa.	78
4 Mittaustuloksista lasketut mineralisaationopeudet [$\mu\text{g g}^{-1}\text{vrk}^{-1}$] eri maalajeissa.	80
5 Mitatut ja simuloituvat ammonium-, nitraatti- ja mineraalitypen pitoisuudet eri maalajeissa. Simuloinnissa on käytetty nollannen kertaluokan kinetiikkaa.	84
6 Mitatut ja simuloituvat ammonium-, nitraatti- ja mineraalitypen pitoisuudet eri maalajeissa. Simuloinnissa on käytetty ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa.	96

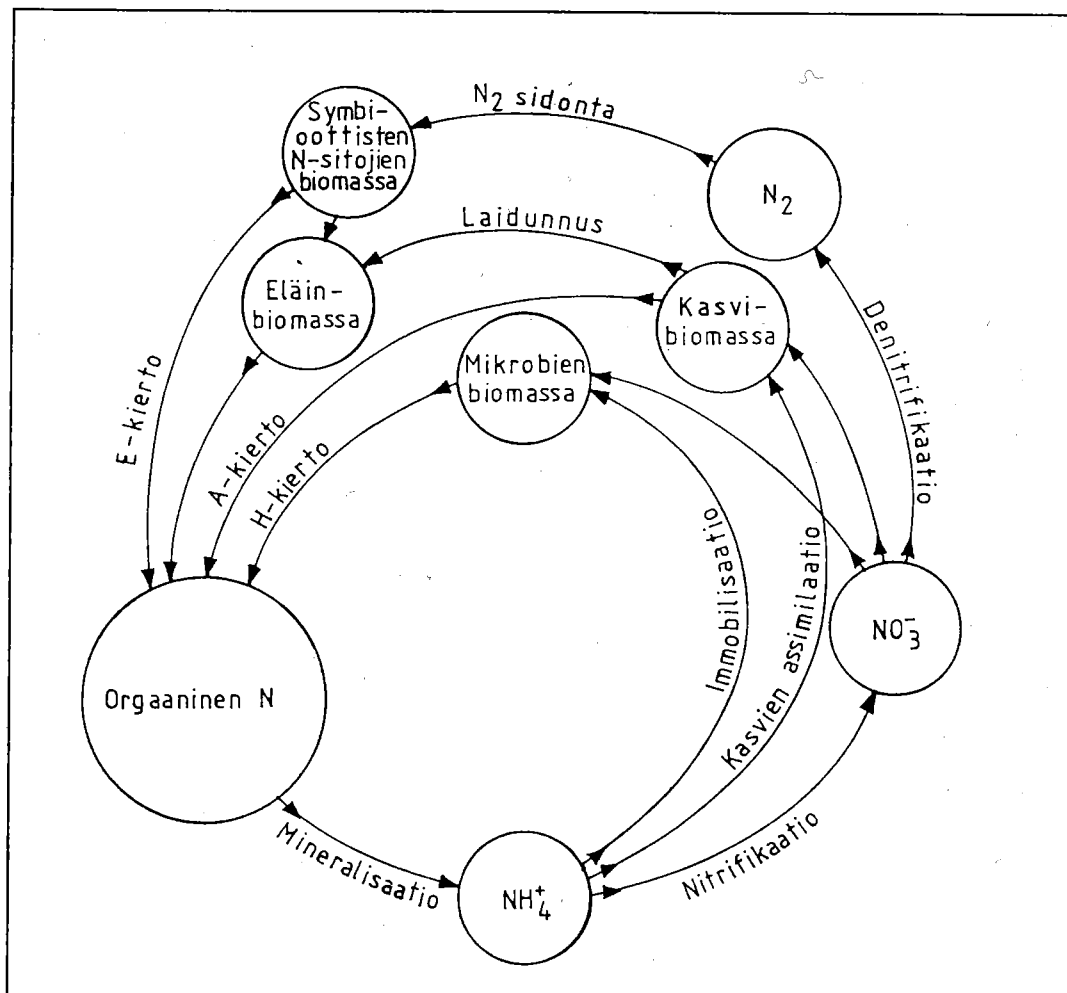
1 JOHDANTO

1.1 Maaperän typpi ja sen kierto

Typeä esiintyy maaperässä orgaanisissa ja epäorgaanisissa muodoissa. Yli 90 % useimpien maalajien pintakerroksen typestä on sitoutuneena orgaanisiin yhdisteisiin, kuten amideihin, aminohappoihin, aminosokereihin ja nukleiinihappoihin (Stevenson 1982, Chen ja Avnimelech 1986). Ainoastaan muutama kilogramma maaperän typestä hehtaaria kohden laskettuna on epäorgaanisessa muodossa ja tällöinkin se esiintyy useilla eri hapetusluvuilla. Tavallisimpia typen yhdisteitä maaperässä ovat mineraaliset NH_4^+ -, NO_3^- - ja NO_2^- -ionit sekä sen kaasumaiset muodot N_2 ja N_2O (Young ja Aldag 1982). NH_4^+ -ionit voivat olla joko sitoutuneena (*fixed ammonium*) maan kationinvaihtopaikkoihin tai vapaasti vaihdettavissa (*exchangeable ammonium*) muiden maavedessä esiintyvien kationien kanssa (Stevenson 1982).

Orgaanisiin yhdisteisiin tai maan kationinvaihtopaikkoihin vahvasti sitoutunut typpi ei ole kasvien kannalta käyttökelpoisessa muodossa. Sen sijaan maaveteen liuenneita nitraatti- ja ammoniumioneita kasvit ottavat juurillaan osmoosin avulla. Viljelykasvit hyödyntävät tästä maaperään lannoitteena lisäystä tai muuten niiden käytettävänä olevasta vapaasta typestä keskimäärin 50-75 %. Suurin osa käyttämättä jäävästä typestä kulkeutuu valumavesien mukana pois pelloilta (Stevenson 1982). Erityisesti hiekkaisilla maalajeilla nitraatti- ja ammoniumionit voivat huuhtoutuvat rankkasateiden ja sulamisvesien mukana tai liiallisen kastelun seurauksena pois juuristokerroksesta (Paul ja Clark 1989). Vesistöissä typen epäillään aiheuttavan rehevöitymistä ja meressä se toimii usein levien kasvua säätelevä niin sanottuna minimiravinteena (Welch 1980). Juomaveden sisältämät suuret NO_3^- -pitoisuudet aiheuttavat lapsilla ja eläimillä metahemoglobiininemiaa, ja muiden tyyppiyhdisteiden kanssa reagoidessaan nitraattityppi saattaa muodostaa karsinogeenisia nitrosamiineja (Paul ja Clark 1989). NO_2^- -ionit, joita normaaleissa olosuhteissa esiintyy vain niukasti maaperässä, ovat helposti huuhtoutuvia ja hyvin myrkyllisiä monille mikro-organismeille.

Maaperän typpi on jatkuvassa kierrossa ilmakehän ja vesistöjen sisältämän typpen kanssa. Typpen kokonaiskierto koostuu kolmesta alakierrosta, jotka ovat alkuainetyppen kierto (E-kierto) sekä autotrofinen (A-kierto) ja heterotrofinen kierto (H-kierto). Typpen kokonaiskierto on esitetty alakiertoineen kuvassa 1.1.



Kuva 1.1. Typpen kokonaiskierto ja sen alakierrot [Janssonin ja Perssonin (1982) mukaan].

Alkuainetyppen kierron tehtävänä on yhdistää ilmakehän typpivarasto eliökehään. Siihen kuuluvia prosesseja ovat kaasumaisen N_2 -typpen biologinen sidonta sekä nitraatin denitrifikaatio. Autotrofisessa vaiheessa typpi siirretään tuottajatasolta ensimmäisen ja sitä korkeamman asteen kuluttajille. Se sisältää muun muassa kasvien mineraalisen typpen oton eli assimilaation sekä kasveissa tapahtuvan yksinkertaisten orgaanisten typpiyhdisteiden valmistuksen. Heterotrofista kiertoa

pitää yllä orgaanista hiiltä hiililähteenään käyttävien mikro-organismien toiminta. Tähän alakiertoon kuuluvat typen mineralisaatio ja immobilisaatio (Jansson ja Persson 1982). Heterotrofit eliöt palauttavat eliökehään sitoutuneen typen epäorgaanisiksi yhdisteiksi maaperään ja siitä edelleen ilmakehän typpivarastoon.

1.2 Typen mineralisaatio

Typen mineralisaatiolla tarkoitetaan typen orgaanisten muotojen hajoamista mineraaliseksi ammoniakiksi sekä ammoniumioneiksi (Stevenson 1982, Jansson ja Persson 1982). Orgaanisten tyyppiyhdisteiden hajoamistuotteena syntyvä NH_3 ionisoituu maaperässä NH_4^+ -ioneiksi ammonifikaatiossa. Reaktioyhtälöissä 1.1, 1.2 ja 1.3 on ammonifikaatio esitetty pääosiltaan:



Ionisoitumista säätelevistä tekijöistä tärkein on pH. Ammonifikaation kannalta ovat olosuhteet parhaimmillaan, kun pH on lähellä neutraalia eli sen arvot ovat välillä 6-7. Tätä happamammissa olosuhteissa ammoniakkin hävikki maaperästä haihtumalla tulee merkittäväksi (Stevenson 1982). Lämpötila ja kosteus yhdessä vaikuttavat ammonifikaatioon siten, että ammoniumtyppi pyrkii kerääntymään kylmään ja märkään maahan (Paul ja Clark 1989).

Tavallisesti mineralisaatioon sisällytetään ammonifikaation lisäksi nitrifikaatio (Stevenson 1982). Nitrifikaatio muodostuu kahdesta perättäisestä hapettumisreaktiosta, joissa NH_4^+ -ionit hapettuvat aluksi NO_2^- -ioneiksi ja edelleen NO_3^- -ioneiksi (Paul ja Clark 1989). Maaperässä, sedimentissä ja vedessä nitrifikaatio on puhtaasti biokemiallinen, *Nitrobacter*- ja *Nitrosomonas*-suvun bakteerien aineenvaihdunnan tuloksena tapahtuva reaktio. Suurin osa, jopa 90 % maaperän mineraalilisestä tyypestä on NO_3^- -muodossa. Osuus kuitenkin vaihtelee maalajin ja sen ominaisuuksien sekä vallitsevien olosuhteiden mukaan niin, että se saattaa pienimmillään olla 15-40 % (Poovarodom ja Tate 1988). Nitraatin osuus maaperän epäor-

gaanisesta tyyppistä nousee ammoniumin osuutta suuremmaksi, koska suotuisissa olosuhteissa bakteerit hapettavat nopeasti kaiken vapaan ammoniumin.

Nitrifikaatiota säätelevistä tekijöistä tärkeimmät ovat NH_4^+ -ionien saatavuus, ympäristön happi- ja hiilidioksidipitoisuus sekä pH ja lämpötila (Schmidt 1982). Nitrifikaatio on aerobinen reaktio, jonka edellytyksenä on maaperän kohtuullinen happipitoisuus. Maaperän sisältämän hapen määrää säätelevät puolestaan sen kosteus ja rakenne (Schmidt 1982, Paul ja Clark 1989). Myös orgaanisen aineksen määrä vaikuttaa nitrifikaatioon, sillä sen biologinen hajoaminen saattaa aiheuttaa maaperässä hapen puutetta (Paul ja Clark 1989). Nitrifikaatiota ei enää havaita pH:n laskiessa arvojen 4.0-4.5 alapuolelle. Toisaalta nitrifikaatio tulee pH:sta riippumattomaksi vasta arvoilla 6-8 ihannealueen ollessa välillä 6.6-8.0 (Schmidt 1982, Paul ja Clark 1989). Lämpötila vaikutuksia nitrifikaatioon on tarkasteltu kohdassa 1.3. Lämpötilan, kosteuden, happipitoisuuden ja muiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta nitrifikaatio seuraa vuodenaikaisvaihtelua (Paul ja Clark 1982).

1.3 Lämpötilan vaikutus typen mineralisaatioon

Lämpötila vaikuttaa voimakkaasti hapen liukoisuuteen veteen ja biokemiallisten reaktioiden reaktionopeuksiin. Yleensä reaktionopeudet kasvavat lämpötilan kohotessa, mutta hapen liukoisuus veteen on kääntäen verrannollinen lämpötilaan. Elävien organismien hapenkulutus pienenee lämpötilan laskiessa, mikä johtuu niiden aineenvaihdunnan hidastumisesta. Biologinen toiminta vaatiikin tavallisimmin lämpötilan, joka on useita asteita veden jäätymispisteen yläpuolella (Firestone 1982).

Lämpötila vaikuttaa merkittävästi myös biokemialliseen nitrifikaatioprosessiin. Ammoniumin hapettuminen on hidasta alle $+5\text{ }^\circ\text{C}$ ja toisaalta yli $+40\text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa. Optimin arvioidaan laboratoriotutkimusten perusteella olevan $+30\text{-}35\text{ }^\circ\text{C}$ välillä. Kenttäolosuhteissa nitrifikaation ihannelämpötilan arvoon vaikuttavat kaikki maaperässä vallitsevat tekijät yhdessä. Esimerkiksi lauhkeilla alueilla nitrifikaatio on suurinta keväisin sekä syksyisin ja hitainta talvella sekä kesällä (Paul ja Clark 1989). Alin lämpötila, jossa nitrifikaatiota on laboratoriotutkimusten perusteella

havaittu tapahtuvan on $+2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tyler et al. 1959). Onkin mahdollista, että nitrifikaatio suosii alhaisia lämpötiloja sellaisissa orgaanisissa maalajeissa, joissa on suuri mikrobiologinen aktiivisuus. Tällöin heterotrofien organismien NH_4^+ -ionien tarve on pienempi ja toisaalta hapen liukoisuus maaveteen suurempi kuin korkeissa lämpötiloissa (Schmidt 1982).

Yleensä ammonifikaatioreaktiot toimivat nitrifikaatioreaktioita paremmin sekä suurissa kosteuspitoisuuksissa että alhaisissa lämpötiloissa (Stevenson 1982). Lämpötilan kasvaessa ammoniakkin poistuminen haihtumalla voi tulla merkittäväksi erityisesti sellaisilla maalajeilla, joilla on alhainen kationinvaihtokapasiteetti (Stevenson 1982). Tällöin lähtöaineiden puute alkaa rajoittaa nitrifikaatiota ja lämpötilan noususta syntyvä hyöty vähenee. Lisäksi vapaa ammoniakki on myrkyllistä nitrifioiville bakteereille. Ammonifikaation ja nitrifikaation keskinäistä tasapainoa ja vuorovaikutuksia ääriolosuhteissa ei ole tutkittu, vaikka mineralisaatiota on osoitettu tapahtuvan hyvinkin matalissa lämpötiloissa ja vaihtelevissa kosteuspitoisuuksissa. Myös lämpötilan ja kosteuden yhteisvaikutusten tarkastelu on usein puutteellista siitä huolimatta, että ne ovat kaksi tärkeintä mineralisaatioon vaikuttavaa tekijää.

Sitä osaa maaperän orgaanisesta tyypestä, jota mikrobit pystyvät käyttämään hyväkseen mineralisaatiossa kutsutaan potentiaalisesti mineralisoituvaksi tyypeksi (N_o). Orgaanisen aineksen ominaisuuksista riippuen voi joko koko orgaanisen tyyden varasto tai vain osa siitä olla potentiaalisesti mineralisoituvaa (Cabrera ja Kissel 1988). Stanford et al. (1974) ovat esittäneet laskentamenetelmän potentiaalisesti mineralisoituvan tyyden määrän arvioimiseksi. Useissa laboratoriotutkimuksissa on havaittu potentiaalisesti mineralisoituvan tyyden määrän olevan riippumaton lämpötilasta (Stanford et al. 1973a, Poovarodom ja Tate 1988). Tämän mukaan mineralisaatio riippuu ainoastaan ammonifioivien ja nitrifioivien mikro-organismien toimintaa rajoittavista tekijöistä. Lisäksi Poovarodomin ja Taten (1988) tulokset osoittavat, että kokonaismineralisaatio riippuu suotuisten kosteusolosuhteiden vallitessa vain lämpötilasta sen ollessa välillä $+5\text{-}35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jos kosteus ei rajoita mineralisaatiota, niin mineralisaationopeus noin kaksinkertaistuu jokaista lämpötilassa tapahtuvaa 10 asteen nousua kohden (Stanford et al. 1973a). Tosin tämä ei eräiden tutkimusten mukaan päde alle $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa (Welch 1980). Vaikka

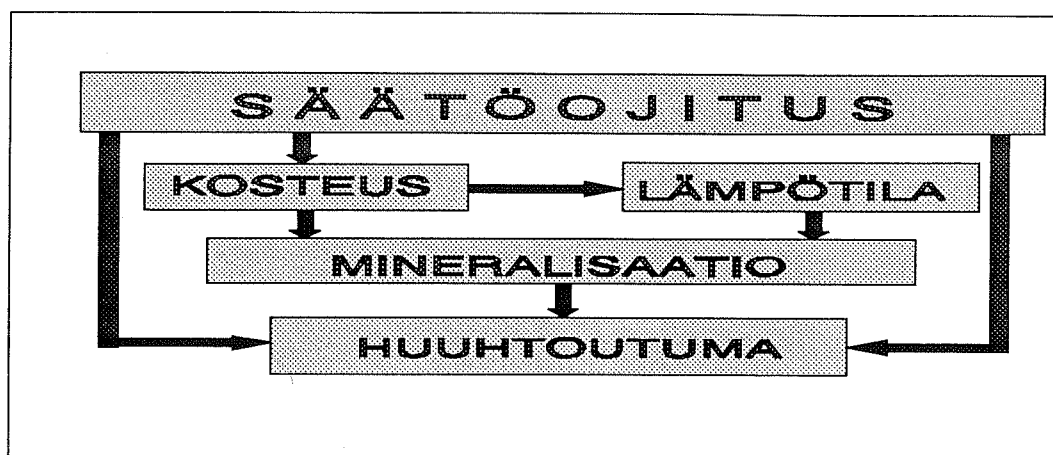
mineralisaatiota on laboratoriotutkimuksissa (Tyler et al. 1959) todettu tapahtuvan alle +5 °C lämpötilassa, ei kylmässä maassa tapahtuvaa mineralisaation kinetiikkaa tai reaktionopeuksien riippuvuuksia ole kirjallisuudessa esitetty. Tästä johtuen myös yleinen oletamus mineralisaation päättymisestä +5 °C lämpötilassa on kiistanalainen.

1.4 Mineralisaatiotutkimuksen tavoitteet

Teknillisen korkeakoulun vesitalouden laboratoriossa on käynnissä tutkimusprojekti, jolla pyritään selvittämään typen prosesseja maaperässä ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi arvioidaan typen eri muotojen määrää maaprofiilissa ja valumavesissä. Tarkoituksena on löytää keinoja, joiden avulla voitaisiin pienentää maataloudesta tulevaa typpihuuhtoumaa.

Mittauksia typen esiintymisestä maaperässä, kasvustossa ja läpihuuhtoutuneessa vedessä on tehty Teknillisen korkeakoulun lysimetrikentällä vuosina 1989-1992. Tutkimuksissa on käytetty eri maalajeja, lannoitusta ja kasvipeitettä. Mittausten perusteella on arvioitu muun muassa vuotuista typpitasetta, huuhtoumien vuodenaikavaihtelua sekä niiden riippuvuutta lannoitemääristä. Mittausjakson 1990-1991 tuloksia on yksityiskohtaisesti käsitellyt Bärlund (1992a, 1992b).

Ahonen (1991) on selvittänyt tietokonesimuloinnin avulla säätöojituksen vaikutusta typen huuhtoumaan suomalaisessa peltomaassa. Selvityksen mukaan säätöojituksella voidaan pienentää mineraalisen typen huuhtoumaa jopa 40 %. Säätöojitus vaikuttaa varsinaisen huuhtoutumisen lisäksi mineralisaatiota sääteleviin tekijöihin, kuten maaperän kosteuteen ja lämpötilaan (kuva 1.2). Jotta huuhtoumasta saataisiin parempi käsitys, tarvitaan Ahosen (1991) esittämien tietokonesimulointiin perustuvien tulosten lisäksi kenttä- ja laboratoriomittauksia. Tärkeää on myös tuntea mineralisaatioon vaikuttavat tekijät ja niiden säädeltävyys säätöojituksen avulla.



Kuva 1.2. Säätoojituksen yhteydet typen mineralisaatioon ja sitä sääteleviin tekijöihin.

Rankinen (1992) on tutkinut laboratoriomittauksin kosteuden vaikutusta typen mineralisaatioon eri maalajeissa. Tutkimuksessa näytteitä inkuboitiin +20 °C vakiolämpötilassa ja eri kosteuspitoisuuksissa yhteensä 67 vuorokautta. Rankisen (1992) tulokset ilmentävät lähinnä kasvukauden olosuhteita, jolloin kosteudella on suurempi vaikutus mineralisaatioon kuin lämpötilalla. Kuitenkin mineraalisen typen huuhtoutumisesta huomattava osa tapahtuu viileinä vuodenaikoina, jolloin valumat ovat suurimmillaan.

Tämän tutkimuksen koejärjestelyt vastasivat pääosiltaan Rankisen (1992) tutkimuksen koejärjestelyitä. Myös tutkimukseen valitut maalajit vastasivat ominaisuuksiltaan Rankisen (1992) käyttämiä maalajeja. Mineralisaatiota mitattiin +2.0, 4.5, 8.0 ja 15.0 °C lämpötiloissa ja näytteiden kosteus säädettiin kunkin maalajin osalta sellaiseksi ettei se merkittävästi rajoittanut mineralisaatioprosesseja. Näytteitä inkuboitiin laboratorio-olosuhteissa, jotta mineralisaatiota mahdollisesti häiritsevät ja rajoittavat tekijät saatiin poistettua tai hallintaan. Lisäksi tulokset olivat näin paremmin vertailukelpoisia muiden vastaavien tutkimusten tulosten kanssa. Tuloksia verrattiin Rankisen (1992) tuloksiin ja Otaniemen lysimetrikentällä tehtyihin havaintoihin (Bärlund 1992a). Tuloksia arvioitiin myös muiden tutkimusten perusteella.

Tulosten perusteella pyrittiin arvioimaan typen mineralisaationopeutta sekä mineraalisen typen varaston suuruutta maaperässä. Tässä yhteydessä arvioitiin myös mineraalisen typen varastosta vapautuvan mineraalisen typen määrää viileinä

2

vuodenaikoina, kuten keväällä ja syksyllä. Lisäksi tutkittiin ammonifikaation ja nitrifikaation keskinäistä suhdetta alhaisissa lämpötiloissa, mikä tarjosi mahdollisuuden tehdä arvioita ammonium- ja nitraattitypen määristä maaperässä.

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Maanäytteet

Tutkimuksessa käytettiin Teknillisen korkeakoulun vesitalouden laboratorion lysimetrikentältä otettuja maanäytteitä. Kenttä sijaitsee Espoon Otaniemessä (60 °11'N, 24 °48'E). Kokeisiin valittiin neljä eri maalajia, jotka otettiin lysimetreistä 2 ja 9. Tässä työssä lysimetristä 2 on käytetty lyhennettä L2 ja lysimetristä 9 lyhennettä L9. Lysimetrikenttää ja lysimetrien rakennetta ovat esitelleet yksityiskohtaisemmin muun muassa Rankinen (1992) ja Vakkilainen (1982).

Molemmista lysimetreistä otettiin erikseen pinta- ja pohjamaata joulukuussa 1991. Lysimetrissä 9 pintakerroksen paksuus oli noin 7 cm ja lysimetrissä 2 lähes 10 cm. Lysimetrien 2 ja 9 pintamaiden orgaanisen aineksen pitoisuudet olivat noin 10 ja 8 massaprosenttia (taulukko 2.2b), joten ne luokiteltiin runsasmultaisiksi. Sekä lysimetrin 2 että lysimetrin 9 pintamaa luokiteltiin kokonaisuudessaan runsasmultaiseksi karkeaksi hiedaksi (Bärlund 1992a, Rankinen 1992). Pohjamaiden näytteet koottiin heti pintakerroksien alta noin 10 cm syvyydestä. Lysimetrin 2 pohjamaa oli karkeaa hietaa ja lysimetrin 9 pohjamaa hiesua (Bärlund 1992a, Rankinen 1992). Rankinen (1992) on kuvannut tarkemmin tässä käytettyjä maalajien luokitteluperusteita. Maalajien raakoostumukset ja luokitusten tulokset on koottu taulukkoon 2.1. Lysimetriä 9 on lannoitettu kerran vuonna 1989. NKP-lannoitetta lisättiin tällöin 1000 g lysimetriä kohden, joka vastaa arvoa 1000 kg ha^{-1} . Typen osuus lannoitteessa oli 10 % (100 g lysimetriä kohti), josta ammoniumtyppeä oli 70 % ja nitraattityppeä 30 %. Lannoitteessa oli lisäksi fosforia 7 % ja kaliumia 14 %. Lysimetriä 2 ei ole lannoitettu. Näytteitä säilytettiin näytteenottokosteudessa ennen varsinaisten kokeiden alkua $+4.5 \text{ °C}$ lämpötilassa noin 4 viikkoa.

Alkumäärittäjinä kustakin maalajista mitattiin orgaanisen hiilen, kokonaistypen ja ammoniumtypen pitoisuudet sekä nitraatti- ja nitriittitypen yhteismäärä. Lisäksi mitattiin pH sekä vesi- että CaCl_2 -suspensioista. Maalajien vedenpidätyskäyrät ja kuivatilavuuspainot on määritetty vesitalouden laboratoriossa aikaisempien tutkimusten yhteydessä (Bärlund 1992b, Rankinen 1992, Vakkilainen 1982). Taulukoi-

hin 2.2a sekä 2.2b on koottu maalajien ominaisuuksia ja fysikaalisista määrittämenetelmistä on esitetty yhteenvetotaulukko 2.4a.

Taulukko 2.1. Maalajien rakeisuusjakaumat (Bärlund 1992b, Rankinen 1992).

Näyte	<0.002mm [läpäisy-%]	0.002-0.02 [läpäisy-%]	>0.02 [läpäisy-%]	Maalaji kolmiosta	Maalaji rakeisuuskäyrältä
L2 pinta	12	29	59	Hieta	Hieno hieta
L2 pohja	7	4	89	Hieta	Karkea hieta
L9 pinta	9	2	89	Hieta	Hieno hieta
L9 pohja	26	29	45	Hieta	Hiesu

Taulukko 2.2a. Maalajien kemiallisia ominaisuuksia.

Näyte	kok. N [mgg ⁻¹]	NH ₄ -N ¹⁾ [ppm]	NO ₃ -N ¹⁾ [ppm]	org. C [mgg ⁻¹]	C/N	CEC [cmolk ⁻¹]
L2 pinta	0,901	19,27	1,79	48,09	53,37	33,77
L2 pohja	0,053	2,92	0,91	1,57	29,58	4,61
L9 pinta	0,437	0,04	1,36	40,35	92,33	17,16
L9 pohja	0,311	0,00	1,68	12,09	38,87	18,36

1) µgg⁻¹ kuivaa maa-ainesta

Taulukko 2.2b. Maalajien ominaisuuksia.

Näyte	kuivatila- vuuspaino [gcm ⁻³]	org.aines ¹⁾ [%]	pH [vesi]	pH [CaCl ₂]
L2 pinta	0,859	10,157	5,65	4,78
L2 pohja	1,467	0,508	6,28	5,31
L9 pinta	1,161	7,869	5,61	4,60
L9 pohja	1,440	3,524	6,68	5,85

1) massaprosentteina kuivasta maa-aineksesta

2.2 Koejärjestely

Koejärjestely suunniteltiin Rankisen (1992) esittämän koejärjestelyn pohjalta siten, että kosteuden sijasta muuttujana käytettiin lämpötilaa. Maanäytteitä ilmakeivattiin huoneenlämmössä kunnes niiden kosteuspitoisuus oli maalajista riippuen 0.03-2.70 massaprosenttia. Kuivatut näytteet siivilöitiin ennen kostuttamista # 2 mm:n seulalla juurenpalasten ja kivien poistamiseksi. Näytteiden kostutus suoritettiin sumuttamalla niihin tislattua vettä ja sekoittamalla huolellisesti. Kostutus tehtiin kerroksittain, jotta vesi saatiin leviämään mahdollisimman tasaisesti. Näytteiden kosteuden annettiin tämän jälkeen tasaantua +4.5 °C lämpötilassa yön yli. Kosteustasot valittiin Rankisen (1992) esittämien tulosten perusteella. Valitut kosteustasot olivat sellaiset ettei kosteuden oletettu rajoittavan mineralisaatiota. Tosin lysimetrin 2 pohjamaan kosteustaso oli ilmeisesti optimia pienempi. Taulukossa 2.3 esitetyt kosteustiedot on laskettu Rankisen (1992) esittämien tulosten pohjalta.

Taulukko 2.3. Koejärjestelyssä käytetyt lämpötilat ja kosteudet.

Näyte		L2 pinta	L2 pohja	L9 pinta	L9 pohja
Maalaji		hieno hieta	karkea hieta	hieno hieta	hiesu
Lämpötilat	[°C]	2/4,5/8/15	2/4,5/8/15	2/4,5/8/15	2/4,5/8/15
Kosteus	[massa-%]	28	19	21	28
	[tilavuus-%]	24	28	23	36
Maaveden potentiaali					
	[pF]	²⁾ 1,8	²⁾ 1,8	2,6	0,5
	[bar]	²⁾ 0,06	²⁾ 0,08	0,32	0,003
	[MPa]	²⁾ 0,00006	²⁾ 0,00008	0,00006	0,000003
WFP ¹⁾	[%]	²⁾ 52	²⁾ 61	48	90
Kyllästyskosteus	[til-%]	²⁾ 59	²⁾ 42	51	43

¹⁾ Vedellä täyttyneiden huokosten tilavuus prosentteina maan huokostilavuudesta

²⁾ Arvioitu lysimetrin 6 arvojen perusteella

Näytteet jaettiin osanäytteisiin punnitsemalla pienenisuihin Erlenmeyr-pulloihin kostutettua maata noin 50 grammaa kuhunkin. Inkubointipullon suu peitettiin Parafilm-kalvolla, johon pistettiin neulalla kaksi reikää. Muut ilmakehän kaasut paitsi vesihöyry läpäisevät kalvon, joten inkubointi tapahtui aerobeissa olosuhteissa kosteustason pysyessä lähes muuttumattomana.

Inkubointilämpötiloiksi valittiin +2.0, +4.5, +8.0 ja +15.0 °C, joita pidettiin mahdollisimman vakioina (± 0.5 °C). Alin lämpötila valittiin kirjallisuudessa esiintyneen tiedon perusteella, jonka mukaan mineralisaatiota tapahtuu +2.8 °C lämpötilassa (Tyler et al. 1959). Yleensä mineralisaation oletetaan päättyvän lämpötilan laskiessa +5 °C:een (Paul ja Clark 1989), joka otettiin yhdeksi tutkimuslämpötilaksi. Kustakin maalajista ja lämpötilasta tehtiin kolme kerrannetta, joten näytteitä tuli yhteensä 192.

Näytteisiin kertyneen mineraalityypen määrää mitattiin 11, 25, 39 ja 67 vuorokauden kuluttua inkuboinnin aloittamisesta. Kunkin inkubointijakson jälkeen analysoitavat näytteet valittiin jokaisesta lämpötilasta täysin satunnaisesti. Näytteistä mitattiin ammoniumtyypen pitoisuus sekä nitriitti- ja nitraattityypen yhteismäärä. Lisäksi mitattiin kosteuspitoisuus ja pH (vesi- ja CaCl₂- suspensiot). Inkuboinnin loputtua määritettiin vielä kokonaistyyppi eri lämpötiloissa pidetyistä näytteistä.

2.3 Laboratorioanalyysit

Inkuboinnin jälkeen näytteistä otettiin 10 gramman osanäyte 100 ml:n muovipulloon ja 5 gramman osanäyte pH-putkeen. Mineralisoitunut tyyppi uutettiin lisäämällä suurempaan osanäytteeseen 50 ml 2.0 M kaliumkloridia (KCl) ja sekoittamalla sitä mekaanisessa sekoittajassa tunnin ajan. Menettelyllä saadaan uutettua kokonaan vesiliukoiset nitraatti- ja ammoniumtyppi sekä vaihtuva ammoniumtyppi. Maapartikkelit poistettiin sentrifugioimalla suspensiota 5 minuuttia ja suodattamalla se paperisuodattimen (Wathman 618) lävitse. Uutoksia säilytettiin +4.5 °C lämpötilassa seuraavaan päivään, jolloin kemialliset analyysit tehtiin.

Taulukko 2.4a. Fysikaaliset määritykset (Rankinen 1992).

Analyysi	Menetelmä	Viite
vesipitoisuus	uunikuivatus (105 °C)	Anon.1985 GLO -85 s.39
humuspitoisuus	poltto	Anon.1985 GLO -85 s.21
kuivatilavuuspaino		Anon.1985 GLO -85 s.32
rakeisuus	pesuseulonta	Anon.1985 GLO -85 s.12
	aerometrikoe	Anon.1985 GLO -85 s.14
vedenpidätyskyky	riippuva vesipatsas (< 100 cm)	
	painekattila (>100 cm)	Black 1982, s.279

Ammoniumtypen pitoisuus sekä nitraatti- ja nitriittitypen yhteismäärä mitattiin uutoksesta käyttäen FIAMET AUTOANALYZER -jatkuvirtausinjektioanalysaattoria ja siihen liittyvää mikrotietokoneohjelmaa FIASTAR II (versio 1.05). Analyysit suoritettiin laitteiston ohjeiden mukaisesti (taulukko 2.4b). Kokonaistyyppi määritettiin Kjeldahl-poltolla käyttäen KJELTEC-AUTO 1050 -laitteistoa. Menetelmällä saadaan mitattua orgaanisen ja epäorgaanisen typen kokonaismäärä.

pH-näytteisiin lisättiin 5 ml tislattua vettä ja niitä ravisteltiin käsin. Noin 10 minuutin kuluttua näytteistä mitattiin pH(vesi) ja niihin lisättiin kuhunkin tippa kalsiumkloridiliuosta (CaCl_2). Lisäyksen jälkeen putkia ravisteltiin puoli tuntia mekaanisessa sekoittajassa ja lopuksi mitattiin pH(CaCl_2). CaCl_2 -lisäyksen jälkeen vaihtuvat kationit korvautuvat Ca^{2+} -ioneilla ja vapautuvat vetyionit alentavat pH:ta.

Kationinvaihtokapasiteettia (CEC) määritettäessä korvataan maassa olevat vaihtuvat kationit aluksi jollakin tunnetulla kationilla. Mittaamalla sitten tämän tunnetun kationin määrä, saadaan selville maassa adsorboituneena olevien kationien yhteissumma. Tässä tutkimuksessa käytettiin ammoniumioneja korvaamaan vaihtuvat kationit, jonka jälkeen ammoniumin määrä mitattiin kaliumkloridiuutoksesta (Emteryd 1989).

Kemiallisissa määrityksissä noudatetut menetelmät ja niiden viitteet on koottu taulukkoon 2.4b. Sekä kemiallisia että fysikaalisia määrityksiä (taulukko 2.4a) on tarkemmin esitelty Bärnlund (1992b).

Taulukko 2.4b. Kemialliset määritykset (Rankinen 1992).

Analyysi	Menetelmä	Viite	Huomioitavaa
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. typpi	T.A.N. ₍₁₎ : AN 30/87	Anon. 1983-1987	Kjeltabs Cu/ 3.5 (Cu)
org. hiili	Walkley-Black	Hesse 1971	indikaattori 5 % difenyylimiini
CEC	ammoniumuutto	Chapman 1965, Emteryd 1989	

2.4 Tilastolliset menetelmät

Varianssianalyysi on yleistys t-testistä, jonka avulla verrataan kahden populaation keskiarvoja. Varianssianalyysin avulla havaintoaineistossa esiintyvä, neliösummilla kuvattava vaihtelu hajotetaan yksittäisen tuloksen sisäisistä ja havaintojen välisistä lähteistä peräisin oleviin osiin. Testin nimen mukaisesti keskiarvoja koskevat päätelmät tehdään aineistossa esiintyvää vaihtelua mittaavan varianssin hajotelman avulla. Koska varianssianalyysi on itse asiassa laaja kokoelma eri menetelmiä, määräävät koejärjestelyt millaisen testin avulla aineisto analysoidaan.

Aineistossa esiintyneet niin kutsutut vieraat havainnot johtuivat esimerkiksi näytteiden käsittely- ja analyysivirheistä ja ne aiheuttavat häiriöitä aineiston normaalijakautuneisuuteen. Aineisto palautettiin likimain normaalijakautuneeksi poistamalla siitä nämä selvästi virheelliset tulokset. Korjauksen jälkeen keskiarvojen välisiä eroja voitiin tutkia samanaikaisesti käyttämällä varianssianalyysiä. Tässä tutkimuksessa on käytetty pääasiassa yksisuuntaista varianssianalyysiä (*Oneway Anova*) ja monimuuttujavarianssianalyysissä (*Manova*) toistettujen koeyksiköiden menetelmää (*Repeated Measures*). Näitä menetelmiä ja niiden soveltamista nyt käytettyyn koejärjestelyyn on Rankinen (1992) kuvannut yksityiskohtaisemmin.

Aineiston analysointi aloitettiin soveltamalla monimuuttajavarianssianalyysiä. Sen avulla tutkittiin ajan ja lämpötilan mahdollista yhteisvaikutusta mineralisaatioon eri maalajeissa. Ammonifikaatiota ja nitrifikaatiota sekä kokonaismineralisaatiota tarkasteltiin erikseen, ja niissä kaikissa pidettiin käsittelyinä aikaa ja inkubointilämpötilaa. Lämpötilan vaikutusta ammonifikaatioon, nitrifikaatioon ja kokonaismineralisaatioon selvitettiin yksisuuntaisella varianssianalyysillä, koska lämpötilan suhteen tuloksia voitiin pitää satunnaistettuina. Jokainen aika tutkittiin erikseen, siten että kutakin lämpötilaa pidettiin yhtenä käsittelynä. Toistuviksi mittauksiksi kutsutaan sellaisia mittauksia, joissa samaan koeyksikköön on kohdistettu useita käsittelyjä. Nyt toistuvien mittausten menetelmällä testattiin ajan merkitystä mineralisaatioon. Testissä jokaista lämpötilaa tarkasteltiin erikseen siten, että kutakin inkubointijaksoa pidettiin yhtenä käsittelynä. Koska monimuuttajavarianssianalyysin tulosten mukaan aineistoon voitiin soveltaa ajankin suhteen yksisuuntaista varianssianalyysiä, myös sitä käytettiin tehokkaamman testauksen saavuttamiseksi. Tässä yhteydessä aineistolle tehtiin myös profiilianalyysi.

2.5 Mineralisaation kinetiikka

Mineralisaatioprosessien dynamiikkaa kuvataan yleisesti matemaattisilla malleilla, joiden rakenne vaihtelee muun muassa sovelluskohteen ja käytettävissä olevan lähtöaineiston mukaan. Mineralisaatiota mallinnetaan joko yksittäisenä prosessina tai jakamalla se erillisiin osaprosesseihin, esimerkiksi ammonifikaatioon ja nitrifikaatioon. Kosteus ja lämpötila ovat mineralisaatioprosesseja rajoittavia tekijöitä, joiden vaikutukset otetaan malleissa huomioon erilaisina funktioina.

Tilastollisten tarkastelujen yhteydessä tehtiin polynomianalyysi, jonka avulla tutkittiin ammonifikaation, nitrifikaation sekä kokonaismineralisaation riippuvuutta ajasta. Prosessien voitiin olettaa noudattavan nollannen kertaluokan kinetiikkaa silloin, kun mineraalityypen määrän riippuvuus ajasta oli lineaarinen. Tämä riippuvuus voidaan esittää yleisessä muodossa:

$$N_m = k * t + a \quad (2.1)$$

jossa N_m = mineraalityypen määrä hetkellä t

k = kerroin

t = aika

a = mineraalisen typen alkupitoisuus

Yhtälössä oleva kerroin (k) edustaa sitä vakionopeutta, jolla mineraalisen typen määrä muuttuu ajan suhteen. Kertoimen yksikkö on $\mu\text{gg}^{-1}\text{vrk}^{-1}$. Kerroin a puolestaan kuvaa mineraalisen typen pitoisuutta ajanhetkellä t=0, ja sen yksikkö on μgg^{-1} . Kertoimet k ja a ratkaistiin mittausaineistosta pienimmän neliösumman menetelmällä.

Kuvattaessa mineralisaatioprosesseja ensimmäisen kertaluokan kinetiikalla on mineraalityypen määrän muutos riippuvainen myös potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrästä. Riippuvuus voidaan esimerkiksi Stanfordin ja Smithin (1972) mukaan kirjoittaa muodossa:

$$N_m = N_o (1 - e^{-kt}), \quad (2.2)$$

jossa N_o = potentiaalisesti mineralisoituva typpi

Potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä (N_o) arvioitiin aluksi yhtä suureksi kuin ennen inkubointia mitattu kokonaistypen määrä vähennettynä nitriitti-, nitraatti- ja ammoniumtypen määrillä. Kaiken orgaanisen typen oletettiin siis sisältyvän alkuvarastoon. Toisessa lähestymistavassa alkuvaraston suuruutta arvioitiin suurimman havaitun mineralisaation perusteella. Tällöin vain osa orgaanisesta tyyppistä olisi potentiaalisesti mineralisoituvaa, kuten Cabrera ja Kissel (1988) ja Rankinen (1992) ovat malleissaan esittäneet.

Stanfordin ja Smithin (1972) yhtälöstä (2.2) ratkaistiin analyyttisesti kerrointen arvot inkubointijaksoittain. Eri jaksoille lasketuista kertoimista otettiin jaksojen pituuksien suhteen painotettu keskiarvo. Näin saatiin jokaiselle maalajille ja lämpötilalle kertoimen alkuarvo, jota muutettiin vähitellen kunnes mitatut ja

lasketut arvot poikkesivat toisistaan mahdollisimman vähän. Mitattuja ja simuloituja tuloksia vertailtiin graafisesti. Aluksi mineralisaatiota tarkasteltiin yhtenä prosessina, jolle ratkaistiin mineralisaatiokerroin k_{\min} . Lisäksi tarkasteltiin tilannetta, jossa mineralisaatio koostui kahdesta osaprosessista. Tällöin ammonifikaatiolle ja nitrifikaatiolle ratkaistiin erikseen kertoimet k_{amm} ja k_{nitr} . Kertoimien yksiköksi tuli vrk^{-1} . Saatuja tuloksia verrattiin kirjallisuusarvoihin ja vastaavan tyyppisten tutkimusten (Rankinen 1992) tuloksiin.

Mineralisaation riippuvuutta lämpötilasta tarkasteltiin laskemalla eri maalajeille keskimääräinen lämpötilakerroin (Q_{10}). Se kuvaa prosessinopeuden muuttumista lämpötilan noustessa 10 °C. Lämpötilakerroin laskettiin sijoittamalla 15 ja 2 °C:ssa inkuboitujen näytteiden nettomineralisaatiot kaavaan 2.3 (Welch 1980).

$$Q_{10} = \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^{10/T_1 - T_2} \quad (2.3)$$

jossa k_1 = nettomineralisaatio lämpötilassa 1
 k_2 = nettomineralisaatio lämpötilassa 2
 T = lämpötila, $T_1 > T_2$

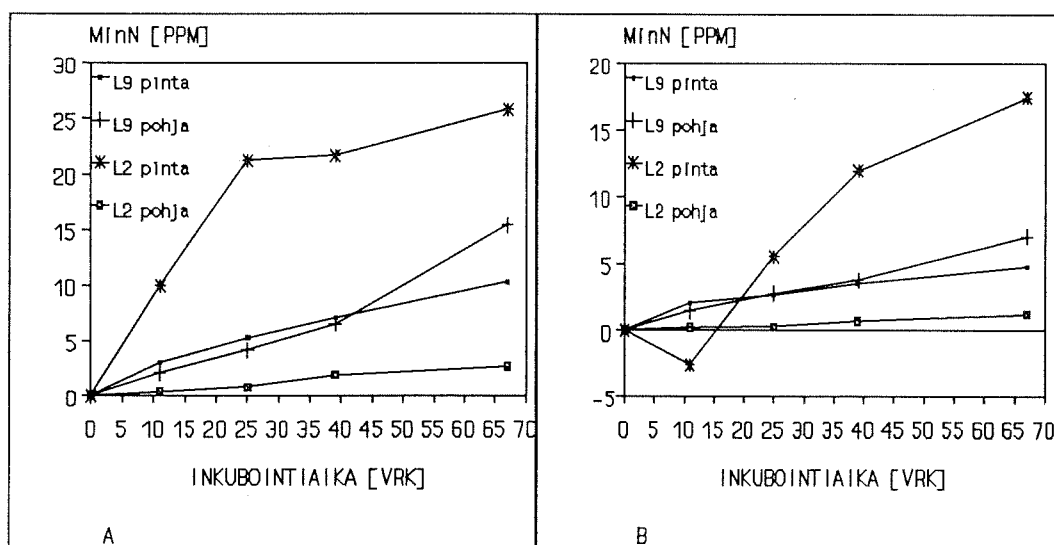
Havaittujen nettomineralisaatioiden ja ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa soveltamalla saatujen mineralisaatiokertoimien (k_{\min}) riippuvuutta lämpötilasta tarkasteltiin myös graafisesti.

3 TULOKSET

3.1 Mittaustulokset

3.1.1 Kokonaismineralisaatio

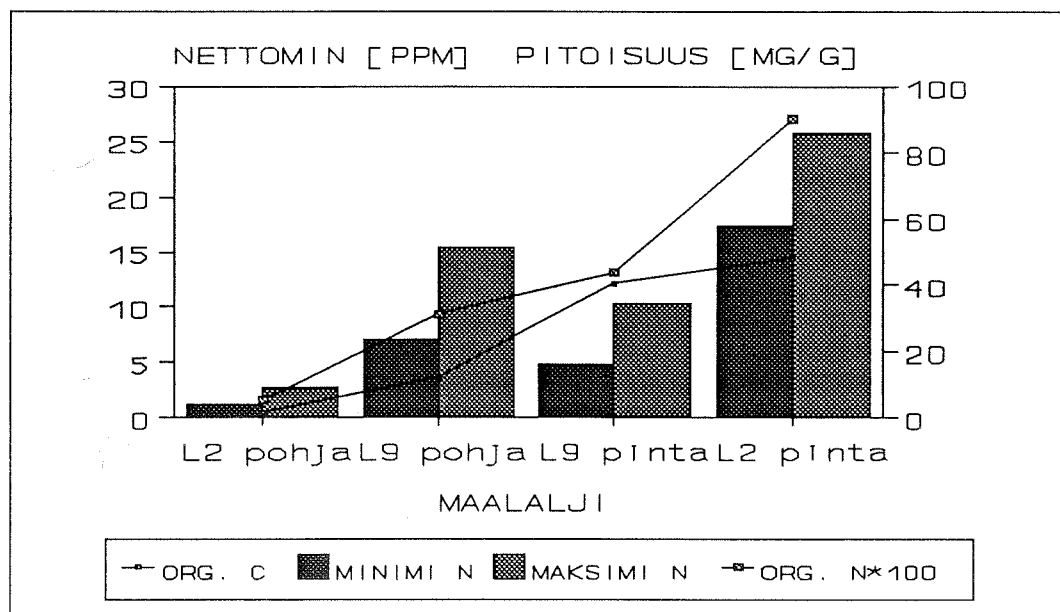
Mineraalista typpeä kerääntyi eniten niihin näytteisiin, joita pidettiin koejärjestelyn korkeimmassa 15.0 °C lämpötilassa. Vähiten mineraalista typpeä muodostui näytteisiin koejärjestelyn alhaisimmassa 2.0 °C lämpötilassa. Tulos oli molempien ääriarvojen kohdalla samanlainen kaikissa maalajeissa ja jokaisella inkubointijaksolla (kuva 3.3) yhtä maalajia lukuun ottamatta. Muista näytteistä poiketen lysimetrin 2 pohjamaassa mineralisaatiominimi havaittiin näytteissä, joita oli inkuboitu 4.5 °C:ssa. Kuvassa 3.1 on esitetty eri maalajien suurimmat ja pienimmät nettomineralisaatiot ajan suhteen. Nettomineralisaatio on laskettu inkubointijakson jälkeen mitatun pitoisuuden ja alkupitoisuuden erotuksena, jolloin pitoisuuksien pienentyminen näkyy kuvissa negatiivisena arvona. Lisäksi kaikissa tulosten esittelyissä on käytetty normaalijakautuneeksi korjattua aineistoa, josta on poistettu niin kutsutut vieraat havainnot (kohta 3.2.1).



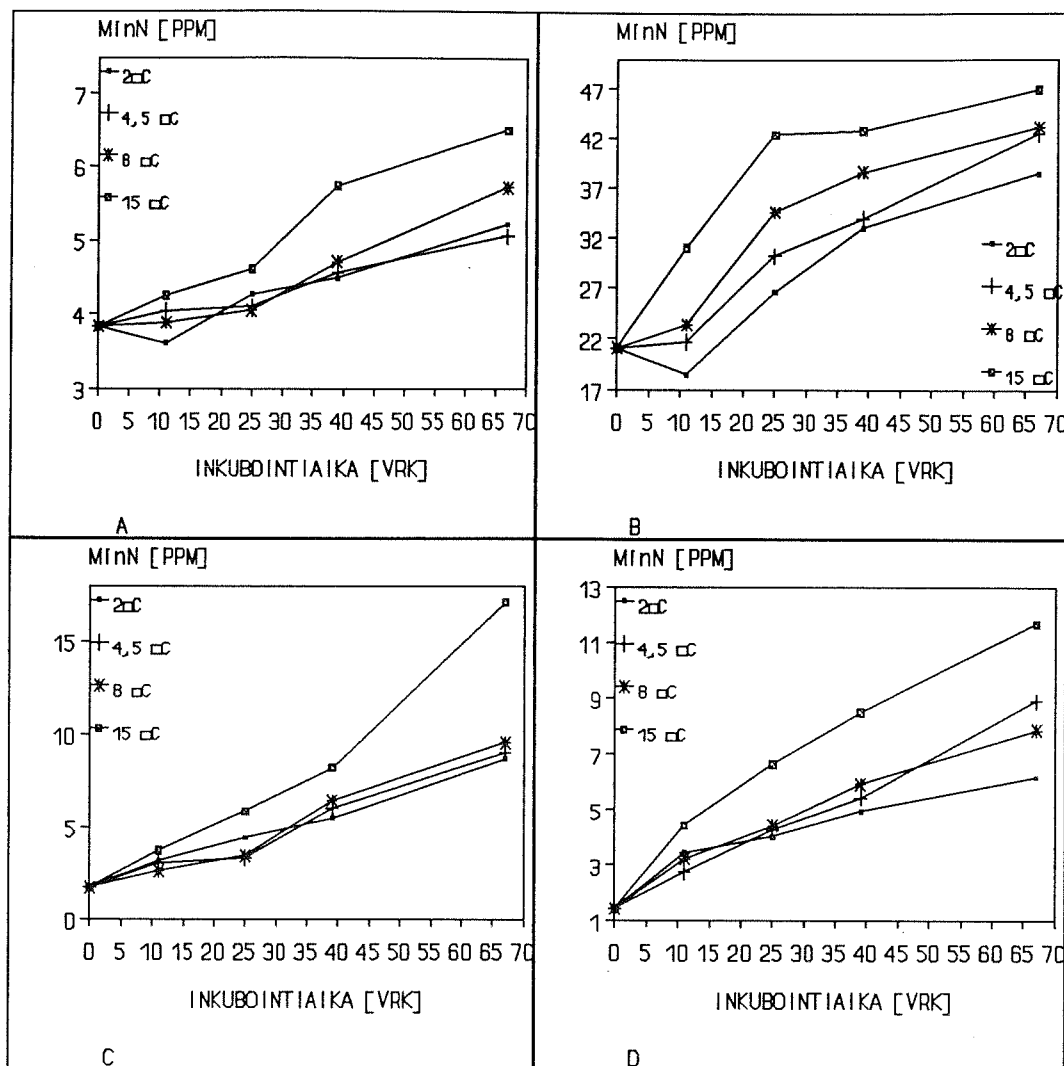
Kuva 3.1. Nettomineralisaation maksimi- (A) ja minimiarvot (B) eri maalajeissa kuvattuna inkubointiajan suhteen. Suurimmat muutokset havaittiin 15.0 °C:ssa ja pienimmät lysimetrin 2 pohjamaata lukuun ottamatta 2.0 °C:ssa. Yksikkö [ppm] vastaa yksikköä [μgNg^{-1}] kuivaa maata kohti.

Nettomineralisaatiossa havaittiin eroja maalajien ja lämpötilojen kesken. Voimakkainta mineraalisen typen muodostuminen oli lysimetrin 2 pintamaassa, jossa netto-

mineralisaatio 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen oli 25.81 μg grammassa kuivaa maata. Tämä vastaa noin 3.3 kilogramman lisäystä mineraalisen typen määrään päivittäin hehtaarilla metrin paksuisessa maakerroksessa kevät- ja kesäkuukausien aikana, jolloin maan lämpötila on noin 15.0 °C (taulukko 3.1). Muissa maalajeissa suurimmat mitatut nettomineralisaatiot vaihtelivat välillä 2.7-15.4 $\mu\text{g}\text{g}^{-1}$ (kuva 3.1a). Lysimetrin 2 pohjamaassa havaittiin kaikkein pienin, 1.2 $\mu\text{g}\text{g}^{-1}$ lisäys mineraalisen typen määrässä 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Pinta-alaa kohden laskettuna se vastaa noin 0.25 kg kasvua mineraalisen typen varastossa peltohehtaarilla (yhden metrin paksuinen kerros) päivittäin syys- ja kevätkuukausien aikana, jolloin lämpötilan on noin 5.0 °C (taulukko 3.1). Minimimineralisaatiot vaihtelivat lysimetrin 9 pintamaan 4.8 $\mu\text{g}\text{g}^{-1}$ (0.84 $\text{kgha}^{-1}\text{vrk}^{-1}\text{m}^{-1}$) ja lysimetrin 2 pintamaan 17.4 $\mu\text{g}\text{g}^{-1}$ (2.2 $\text{kgha}^{-1}\text{vrk}^{-1}\text{m}^{-1}$) välillä (kuva 3.1b). Yleisesti mineraalista tyyppiä kertyi sitä vähemmän mitä matalampaa inkubointilämpötilaa käytettiin ja toisaalta mitä pienempi oli kyseisen maalajin orgaanisen hiilen ja typen pitoisuus (kuva 3.2). Kuvassa 3.3 on esitetty mineralisaation riippuvuus ajasta lämpötiloittain ja maalajeittain.



Kuva 3.2. Suurimmat (maksimiN) ja pienimmät (minimiN) mitatut nettomineralisaatioiden määrät eri maalajeissa verrattuna niistä mitattuihin orgaanisen hiilen ja typen pitoisuuksiin. Orgaanisen typen (org.N) pitoisuus on asteikolla (mgg^{-1}) 1/100 todellisesta.



Kuva 3.3. Lysimetrin 2 pohjamaan (A) ja pintamaan (B) sekä lysimetrin 9 pohjamaan (C) ja pintamaan (D) mineralisaatio kuvattuna lämpötiloittain ajan suhteen. Yksikkö [ppm] vastaa yksikköä [$\mu\text{g g}^{-1}$] kuivaa maata kohti laskettuna.

Mineraalisen typen nettomuutos oli selvästi suurempi 15.0 °C kuin muissa tutkituissa lämpötiloissa (kuva 3.3, taulukko 3.1). Toisaalta vertailtaessa nettomineralisaatiota 2.0, 4.5 ja 8.0 °C lämpötiloissa havaittiin niiden välillä vain pieniä eroja 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Lysimetrin 2 pintamaassa ja lysimetrin 9 pohjamaassa mineraalisen typen määrä lisääntyi inkubointilämpötilan kasvaessa. Lysimetrin 2 pohjamaassa mineraalisen typen määrän kasvu oli voimakkaampaa 2.0 °C kuin 4.5 °C lämpötilassa. Mineraalisen typen määrän muutos oli kuitenkin 8.0 ja 15.0 °C lämpötiloissa suurempi kuin 2.0 °C lämpötilassa. Lysimetrin 9 pintamaassa 4.5 °C inkuboiduissa näytteissä nettomineralisaatio oli suurempi kuin

8.0 °C lämpötilassa pidetyissä näytteissä. Muutoin mineraalista typpeä kerääntyi lysimetrin 9 pintamaasta otettuihin näytteisiin sitä enemmän mitä korkeampaa inkubointilämpötilaa käytettiin.

Taulukko 3.1 Nettomineralisaatio (ammonium- ja nitraattitypen summa) maala-jeittain ja lämpötiloittain 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Pitoisuudet pinta-alaa kohden on laskettu 1 metrin paksuisessa kerroksessa.

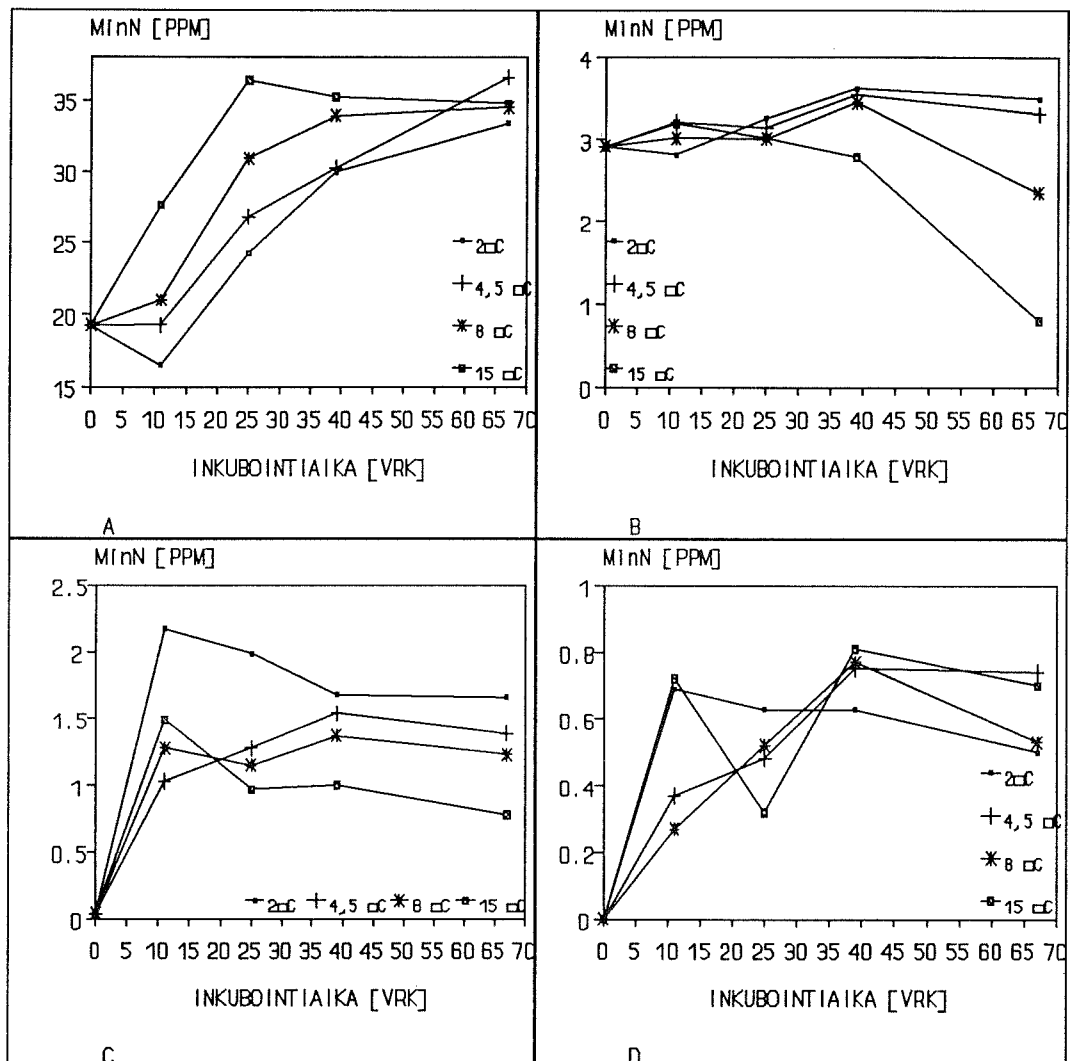
Näyte	Pitoisuus- yksikkö	Lämpötila			
		2,0 °C	4,0 °C	8,0 °C	15,0 °C
L2 pinta	ppm ¹⁾	17,4	21,3	22,0	25,8
	kg ha ⁻¹	150	183	189	222
L2 pohja	ppm ¹⁾	1,4	1,2	1,9	2,7
	kg ha ⁻¹	21	17	28	40
L9 pinta	ppm ¹⁾	4,8	7,5	6,5	10,3
	kg ha ⁻¹	56	87	76	120
L9 pohja	ppm ¹⁾	7,0	7,4	7,9	15,4
	kg ha ⁻¹	101	107	114	222

¹⁾ ammonium- ja nitraattitypen yhteispitoisuus μgg^{-1} kuivasta maa-aineksesta

3.1.2 Ammonifikaatio ja nitrifikaatio

Suurimmat ammoniumtypen pitoisuudet havaittiin niissä näytteissä, joita oli inkuboitu joko 2.0 tai 4.5 °C lämpötilassa. Suurin ammoniumtypen pitoisuuden muutos mitattiin 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen lysimetrin 2 pintamaassa, jossa se oli $17.29 \mu\text{gg}^{-1}$ eli $149 \text{ kg ha}^{-1}\text{m}^{-1}$. Muissa maalajeissa maksimit olivat huomattavasti pienempiä nettoammonifikaation vaihdellessa välillä $0.58\text{-}1.62 \mu\text{gg}^{-1}$ ($8.7\text{-}18.9 \text{ kg ha}^{-1}\text{m}^{-1}$). Vähiten ammoniumtyppeä kerääntyi näytteisiin, joita pidettiin 15.0 °C lämpötilassa. Poikkeuksia olivat lysimetrin 2 pintamaa ja lysimetrin 9 pohjamaa, joissa minimi havaittiin 2.0 °C lämpötilassa. Näissä näytteissä maksimi todettiin 4.5 °C:ssa. Ammoniumtypen muutos oli kaikkein pienin lysimetrin 9 pohjamaassa, jossa sen määrä kasvoi $0.5 \mu\text{gg}^{-1}$ ($7 \text{ kg ha}^{-1}\text{m}^{-1}$) 67 vuorokaudessa. Lysimetrin 2 pohjamaassa ammoniumtypen määrä väheni 67 vuorokauden aikana

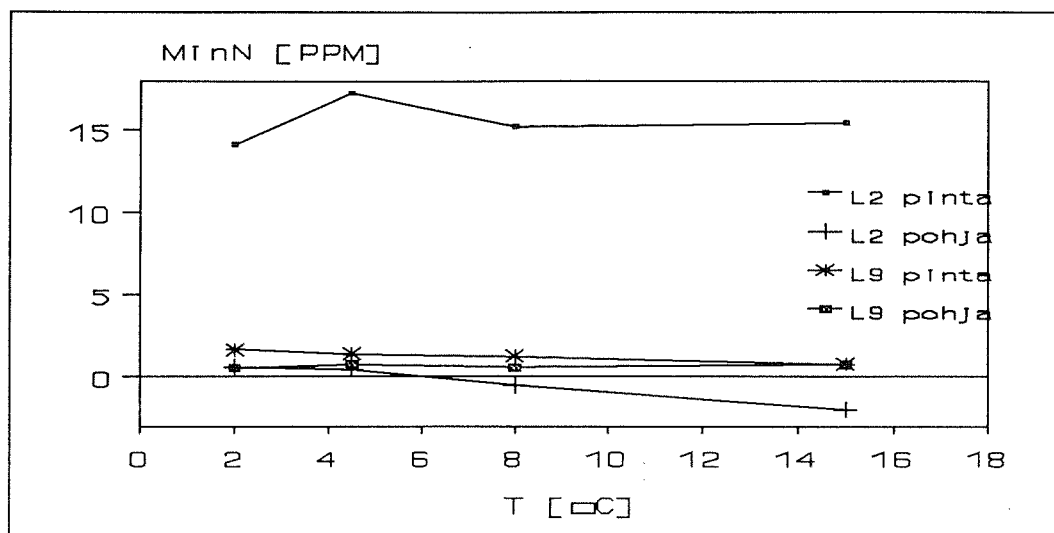
suudesta $2.12 \mu\text{g}^{-1}$, mikä vastaa 31 kg ha^{-1} poistumaa metrin syvyyisestä pohjamaakerroksesta (kuva 3.4, liite 1).



Kuva 3.4 Lysimetrin 2 pintamaan (A) ja pohjamaan (B) sekä lysimetrin 9 pintamaan (C) ja pohjamaan (D) ammonifikaatio kuvattuna lämpötiloittain ajan suhteen. Yksikkö MinN/[ppm] vastaa ammoniumtypen pitoisuutta kuivassa maassa [μg^{-1}].

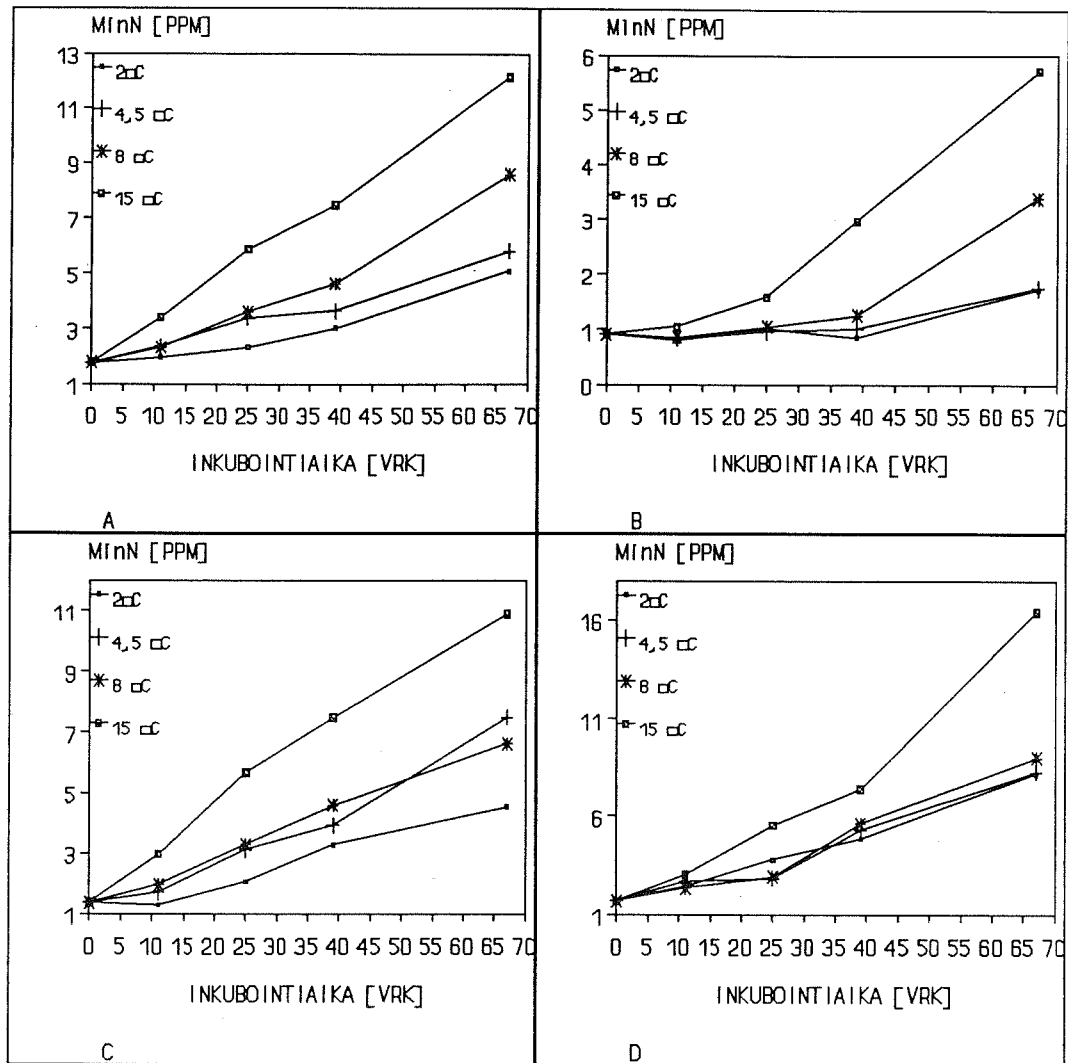
Ammonifikaation voimakkuudessa ei lämpötilan muuttuessa tapahtunut juuri lainkaan muutoksia. Ero suurimman ja pienimmän ammoniumpitoisuuden välillä eri maalajeissa oli keskimäärin $1.2 \mu\text{g}^{-1}$. Ammoniumtypen pitoisuus hieman aleni lämpötilasta riippuen 25 tai 39 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Matalimmissa lämpötiloissa (2.0 ja 4.5 °C) taitekohta havaittiin myöhemmin kuin 8.0 ja 15.0 °C lämpötiloissa pidetyissä näytteissä. Kuvassa 3.5 on esitetty ammoniumtypen

pitoisuuden muuttuminen lämpötilan suhteen eri maalajeissa, kun näytteitä on inkuboitu 67 vuorokautta.



Kuva 3.5 Ammoniumtyypen pitoisuuden nettomuutos lämpötilan suhteen eri maalajeissa 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Yksikkö MinN/[ppm] vastaa ammoniumtyypen pitoisuutta kuivassa maassa [$\mu\text{g g}^{-1}$].

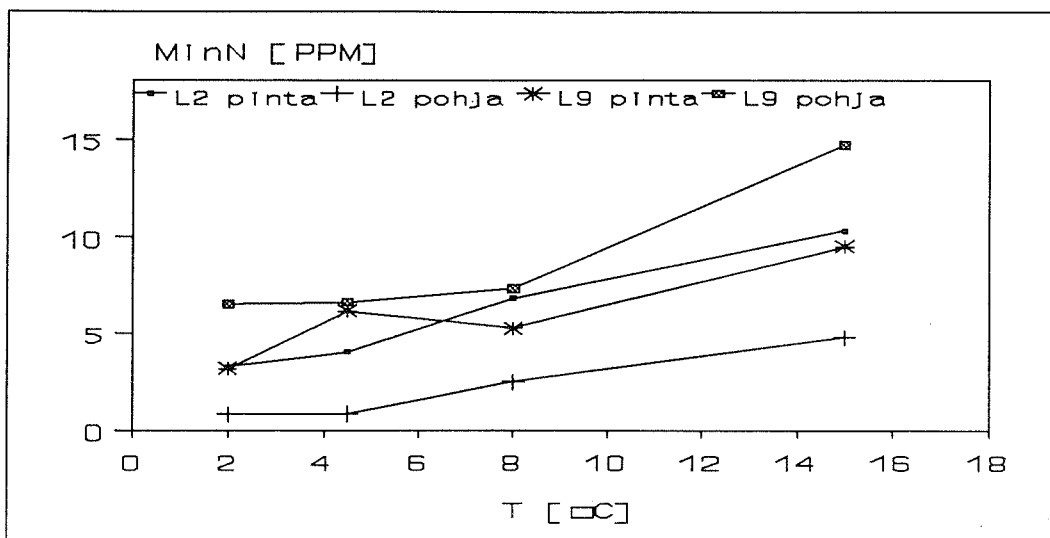
Tutkituissa maalajeissa suurimmat nitraattityypen määrät havaittiin 15.0 °C lämpötilassa. Vastaavasti nitraattityypen määrät olivat pienimmät koejärjestelyn matalimmassa 2.0 °C lämpötilassa pidetyissä näytteissä. Voimakkainta nitraattityypen kertyminen oli 67 vuorokauden aikana lysimetrin 9 pohjamaasta otetussa näytteessä, jossa sen nettolisäys oli $14.72 \mu\text{g g}^{-1}$ kuivaa maata kohden laskettuna. Se vastaa 211 kg ha^{-1} lisäystä nitraattityypen määrään yhden metrin paksuisessa maakerroksessa noin kahden kuukauden aikana. Pienin nitraattipitoisuuden muutos mitattiin lysimetrin 2 pohjamaassa, jossa sitä oli $0.81 \mu\text{g g}^{-1}$ ($12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$). Erot korkeimmassa (15.0 °C) ja matalimmassa (2.0 °C) lämpötilassa pidettyjen näytteiden nitraattityypen pitoisuuksien välillä olivat keskimäärin $6.4 \mu\text{g g}^{-1}$ (kuva 3.6, liite 1). Kuvassa 3.7 on esitetty nitraattityypen pitoisuuden riippuvuus lämpötilasta eri maalajeissa koejakson lopussa. Nitraattityypen määrä laski hieman ensimmäisen 11 vuorokauden aikana lysimetrin 2 pohjamaassa alimmissa käytetyissä lämpötiloissa (2.0, 4.5 ja 8.0 °C) sekä lysimetrin 9 pintamaassa 2.0 °C lämpötilassa pidetyissä näytteissä. Muutoin nitraattityypen määrä kasvoi kaikilla aikaväleillä käytetystä lämpötilasta ja tutkitusta maalajista riippumatta.



Kuva 3.6 Lysimetrin 2 pintamaan (A) ja pohjamaan (B) sekä lysimetrin 9 pintamaan (C) ja pohjamaan (D) nitrifikaatio kuvattuna lämpötiloittain ajan suhteen. Yksikkö MinN/[ppm] vastaa nitraattitypen pitoisuutta kuivassa maassa [$\mu\text{g g}^{-1}$].

Kaikissa maalajeissa ja jokaisella inkubointijaksolla lähinnä nitraattitypen määrä kasvoi ammoniumtypen pitoisuuksien pysyessä melko tasaisesti ensimmäisen ja toisen inkubointijakson aikana saavutetuissa tasoissa. Ammoniumtypeä mitattiin nitraattitypeä runsaammin ainoastaan lysimetrin 2 pintamaassa jokaisella inkubointijaksolla käytetystä lämpötilasta riippumatta. Lisäksi sen pohjamaassa ammoniumin pitoisuus pysyi nitraattipitoisuutta suurempana kaikissa muissa lämpötiloissa ja aikajaksoilla, paitsi 8.0 °C:ssa 67 vuorokauden sekä 15.0 °C:ssa 39 ja 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Lysimetrin 9 maalajeissa nitraattipitoisuus oli

koko inkuboinnin ajan erilaisista lämpötiloista huolimatta suurempi kuin ammoniumpitoisuus.

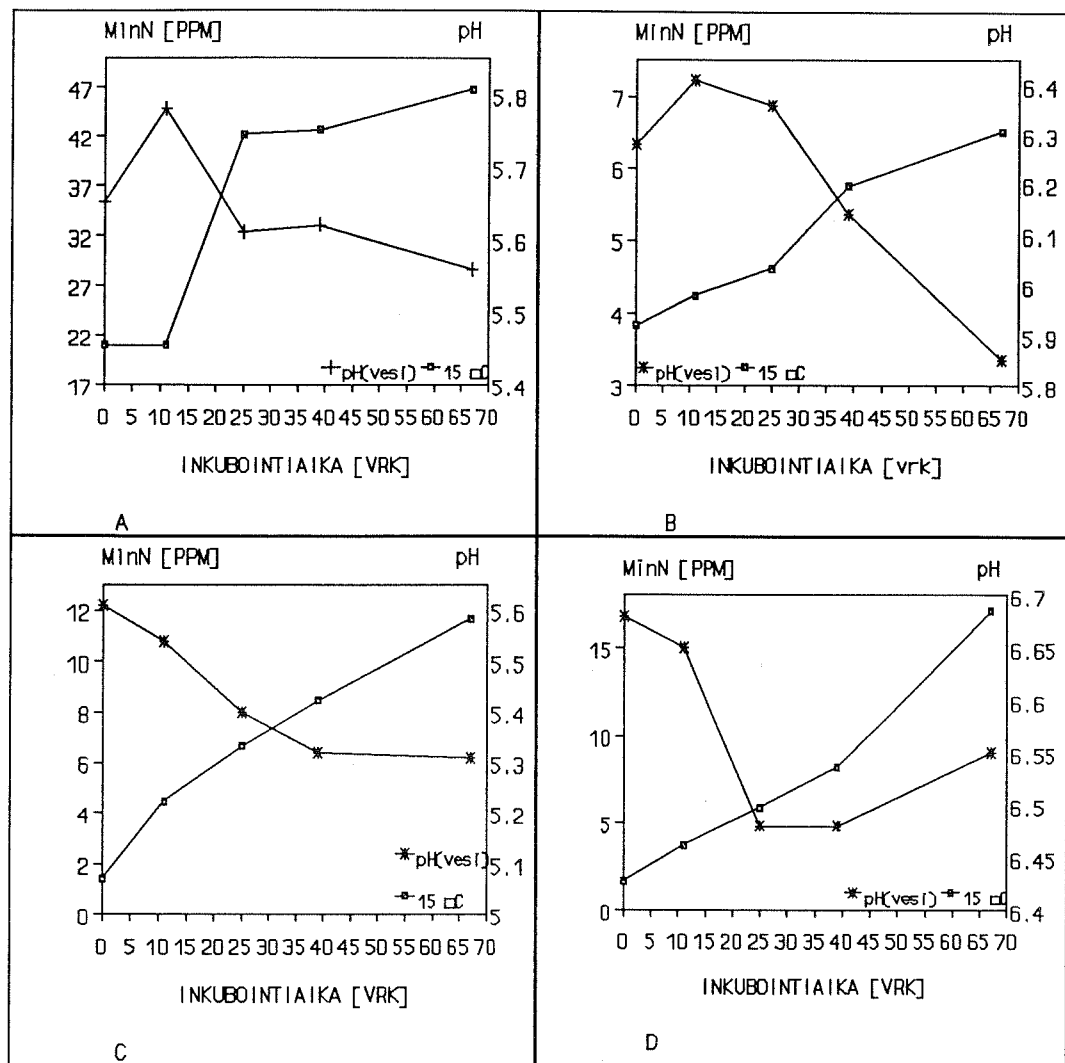


Kuva 3.7 Nitraattitypen pitoisuuden nettomuutos lämpötilan suhteen eri maalajeissa 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Yksikkö MinN/[ppm] vastaa nitraattitypen pitoisuutta kuivassa maassa [$\mu\text{g g}^{-1}$].

Maanäytteiden lisäksi ammonium- ja nitraattitypen määrä mitattiin koejakson lopussa tislattua vettä sisältävistä näytteistä, joita oli inkuboitu 14 vuorokautta 2.0 ja 4.5 °C lämpötiloissa. Näistä alemmassa lämpötilassa käytettiin kuutta kerrannetta ja 4.5 °C:ssa kolmea. Vesissä ei havaittu ammonium- tai nitraattitypen pitoisuuksien nousua kummassakaan käytetyistä lämpötiloista.

3.1.3 pH-mittaukset

pH-arvot olivat kääntäen verrannollisia mineralisoituneen typen määrään kaikissa maalajeissa. Sekä kalsiumkloridi- että vesisuspensiosta mitatut pH-lukemat pienenevät mineralisoituneen typen määrän kasvaessa. Kuvassa 3.8 on esitetty eri näytteissä havaittujen maksimimineralisaatioiden ja niiden pH(vesi) arvojen riippuvuus ajasta.



Kuva 3.8 Mineralisaation ja pH:n riippuvuus inkubointiajasta eri maalajeissa, kun inkubointilämpötila on 15.0 °C. Kuvassa on esitetty riippuvuus lysimetrin 2 pintamaassa (A) ja pohjamaassa (B) sekä lysimetrin 9 pintamaassa (C) ja pohjamaassa (D). Yksikkö MinN/[ppm] vastaa ammonium- ja nitraattitypen yhteismäärää kuivassa maassa [μgg^{-1}].

Alhaisin pH(vesi) arvo (5.31) mitattiin lysimetrin 9 pintamaassa, kun näytettä oli inkuboitu 15.0 °C lämpötilassa 67 vuorokautta. Lysimetrin 2 pintamaassa pH(vesi)-arvo oli inkuboinnin lopussa 5.77. Vastaavasti lysimetrin 2 pohjamaassa pH(vesi) laski inkuboinnin aikana arvoon 5.85 ja lysimetrin 9 pohjamaassa arvoon 6.57. Lysimetrin 2 maalajeissa havaittiin ensimmäisen inkubointijakson (0-11 vrk) ja lysimetrin 9 pohjamaassa viimeisen jakson (39-67 vrk) aikana pH(vesi)-arvon nousua, kun näytteitä inkuboitiin 15.0 °C lämpötilassa. Liitteessä 3 on esitetty graafisesti pH(vesi)-arvojen kehittyminen ajan suhteen eri maalajeissa ja lämpötiloissa.

3.1.4 Kokonaistyyppi

Koko koejakson päätteeksi eri lämpötiloissa inkuboiduista näytteistä määritettiin kokonaistypen pitoisuudet. Kaikkien käytettyjen maalajien kokonaistyyppipitoisuudet on esitetty taulukossa 3.2, johon on vertailun vuoksi sisällytetty myös ennen inkubointia mitatut kokonaistypen pitoisuudet. Sekä lysimetrin 2 että 9 pintamaissa kokonaistypen määrä oli inkuboinnin lopussa suurempi kuin ennen inkubointia. Tyypillisäys oli keskimäärin 0.12 mg grammassa kosteaa maata, mikä on noin 17 % alkupitoisuudesta. Molempien lysimetrien pohjamaissa typen määrä pieneni alkupitoisuuteen verrattuna. Poikkeus oli lysimetrin 2 maalaji, jonka 8.0 °C lämpötilassa pidetyssä näytteessä kokonaistypen pitoisuus kohosi 5 $\mu\text{g g}^{-1}$ (noin 9 % alkupitoisuudesta). Tuloksia ei ole taulukossa 3.2 korjattu näytteiden kosteuspi- toisuuksien suhteen.

Taulukko 3.2 Kokonaistypen pitoisuus eri maalajeissa sekä ennen 67 vuorokau- den inkubointia että sen jälkeen.

Näyte	Alku- pitoisuus [mg g^{-1}] ¹	Loppupitoisuus [mg g^{-1}] ²			
		2°C	4,5°C	8°C	15°C
L2 pinta	0,901	1,069	1,032	1,066	1,069
L2 pohja	0,053	0,036	0,037	0,058	0,038
L9 pinta	0,437	0,511	0,504	0,507	0,535
L9 pohja	0,311	0,297	0,298	0,306	0,301

¹ pitoisuus kosteassa maassa

² pitoisuus kuivassa maassa

3.2 Tilastolliset riippuvuudet

3.2.1 Aineiston vieraat havainnot

Mittaustulosten tilastollinen tarkastelu aloitettiin tutkimalla aineiston normaali-
lijakautuneisuutta SPSS/PC+ -tilastomatematiikkaohjelmalla. Aluksi niin kutsuttuja
vieraita havainnoja etsittiin tutkimusaineistosta tarkastelemalla ja vertailemalla ana-

lyysituloksia sekä laboratorioanalyysien aikana tehtyjä muistiinpanoja. Rinnakkaisnäytteistä laskettiin myös aritmeettinen keskiarvo ja keskihajonta, sekä niiden suhteesta vaihtelukerroin. Vaihtelukertoimet olivat huomattavasti suuremmat mahdollisten vieraiden havaintojen kohdalla kuin aineistossa muutoin saman analyysin osalta. Kun vaihtelukerroin oli yleensä välillä 1-10 %, niin vierailta havainnoilla se vaihteli 24-91 % välillä. Tosin vaihtelukerroin heijastaa myös analyysia varten mitatun maan punnituksessa tapahtuneita epätarkkuuksia, eikä se ole siten täysin luotettava arviointimenetelmä. Myös laboratoriokirjanpidossa voidaan näiden vieraiden havaintojen kohdalla yleensä löytää huomautuksia. Lopullinen valinta tehtiin tilastollisen analyysin tuloksena saatujen jäännössarjojen perusteella. Vieraat havainnot on esitetty taulukossa 3.3 .

Tuloksissa esitetyt arvot ovat rinnakkaishavaintojen keskiarvoja sen jälkeen, kun aineistosta on poistettu edellä mainitut vieraat havainnot. Myös kuvaajien piirtämisessä on käytetty keskiarvoja ja normaalijakautuneeksi korjattua aineistoa.

Taulukko 3.3 Aineiston vieraat havainnot.

Näyte	Lämpötila [°C]	Kerranne	Aika [vrk]	Analyysi
L9 pinta	-	2	0	NH ₄
L9 pinta	8	2	39	NH ₄
L9 pohja	4	2	11	NH ₄
L9 pohja	15	1	67	NO ₃
L2 pohja	-	1	0	NO ₃

3.2.2 Lämpötilan ja ajan yhteisvaikutus

Analysoitaessa mittaustuloksia monimuuttajavarianssianalyysillä havaittiin, että inkubointilämpötilalla ja ajalla on merkittävä yhteisvaikutus ammonifikaatioon ja nitrifikaatioon sekä kokonaismineralisaatioon kaikissa maalajeissa käytettäessä 95

% luotettavuustasoa (taulukko 3.4). Poikkeus oli lysimetrin 2 pintamaa, jonka ammonifikaatiossa ja kokonaismineralisaatiossa ei ajan ja lämpötilan välillä havaittu Pillaisin testin mukaan merkitsevää yhteisvaikutusta. Toisaalta Hotel- lingsin ja Willesin testit osoittivat tässäkin maalajissa merkittävää ajan ja lämpötilan yhteisvaikutusta. Keskiarvot, jotka ovat Pillaisin parittaisen vertailutestin mukaan merkittäviä 95 % luotettavuustasolla, on taulukossa 3.4 merkitty tähdellä. Monimuuttujavarianssianalyysin tulosten perusteella tarkastelua jatkettiin kaikkien maalajien osalta erikseen sekä lämpötilan että ajan suhteen. Lisäksi liitteessä 2 on esitetty mineralisaatioiden profiilikuvat lämpötilan suhteen eri maalajeissa.

Taulukko 3.4 Inkubointilämpötilan ja ajan yhteisvaikutus 95 % luotettavuustasolla eri maalajeissa ammonifikaatiossa, nitrifikaatiossa ja kokonaismineralisaatiossa. Ne maalajit ja prosessit, joilla ajan ja lämpötilan yhteisvaikutus on merkittävä Pillaisin testin mukaan, on merkitty tähdellä.

Näyte	Prosessi	Testi			
		Pillais	Hotellings	Willes	
L2 pinta	ammonifikaatio	0,111	0,001	0,008	
	nitrifikaatio	0,007	0,000	0,000	*
	kokonaismineralisaatio	0,310	0,000	0,003	
L2 pohja	ammonifikaatio	0,002	0,000	0,000	*
	nitrifikaatio	0,013	0,000	0,000	*
	kokonaismineralisaatio	0,001	0,000	0,000	*
L9 pinta	ammonifikaatio	0,037	0,002	0,004	*
	nitrifikaatio	0,028	0,000	0,000	*
	kokonaismineralisaatio	0,030	0,000	0,000	*
L9 pohja	ammonifikaatio	0,008	0,015	0,007	*
	nitrifikaatio	0,007	0,003	0,004	*
	kokonaismineralisaatio	0,003	0,000	0,001	*

3.2.3 Lämpötilan vaikutus

Lämpötilan vaikutusten analysoinnissa käytettiin yksisuuntaista varianssianalyysiä, koska tulokset olivat inkubointilämmön suhteen täysin satunnaistettuja. Jokainen aika tutkittiin erikseen siten, että lämpötiloja pidettiin erillisinä käsittelyinä. Tulokset on esitetty maalajeittain ammonifikaation, nitrifikaation ja kokonaismineralisaation osalta taulukoissa 3.5a ja 3.5b. Taulukoissa on merkitty numerotun-

nuksin ne lämpötilaparit, joiden variansseissa oli merkittävä ero Scheffen parittaisen vertailutestin mukaan 95 % luotettavuustasolla.

Taulukko 3.5a Lämpötilan vaikutus ammonifikaatioon (1), nitrifikaatioon (2) ja kokonaismineralisaatioon (3) lysimetrissä 2. Numeroilla on merkitty ne tulokset, jotka ovat merkittäviä Scheffen testin mukaan (luotettavuustaso 95 %).

Näyte	Aika [vrk]	Lämpötila [°C]	Lämpötila [°C]			
			2,0	4,5	8,0	15,0
L2 pinta	11	2,0				
		4,5				
		8,0	1 3			
		15,0	1 2 3	1 2 3	1 2 3	
	25	2,0				
		4,5	1 3			
		8,0	1 2 3			
		15,0	1 2 3	1 2 3	1 2 3	
	39	2,0				
		4,5	2			
		8,0	2 3	2		
		15,0	1 2 3	2 3	2	
	67	2,0				
		4,5				
		8,0	2 3	2		
		15,0	2 3	2 3	2	
L2 pohja	11	2,0				
		4,5	1 3			
		8,0	1			
		15,0	1 2 3	3	1 3	
	25	2,0				
		4,5				
		8,0				
		15,0	2	2 3	2 3	
	39	2,0				1
		4,5				1
		8,0				1
		15,0	2 3	2 3	2 3	
	67	2,0			1	1
		4,5			1	1
		8,0	2	2 3		1
		15,0	2 3	2 3	2 3	

Taulukko 3.5b Lämpötilan vaikutus ammonifikaatioon (1), nitrifikaatioon (2) ja kokonaismineralisaatioon (3) lysimetrisissä 9. Numeroilla on merkitty ne tulokset, jotka ovat merkittäviä Scheffen testin perusteella (luotettavuustaso 95 %).

Näyte	Aika [vrk]	Lämpötila [°C]	Lämpötila [°C]			
			2,0	4,5	8,0	15,0
L9 pinta	11	2,0		1		
		4,5	2			
		8,0	2			
		15,0	2	2 3	2	
	25	2,0		1	1	1
		4,5	2			
		8,0	2			
		15,0	2 3	2 3	2 3	
	39	2,0				1
		4,5				1
		8,0				
		15,0	2 3	2 33	2 3	
	67	2,0				1
		4,5	2 3			
		8,0	2 3			
		15,0	2 3	2 3	2 3	
L9 pohja	11	2,0		1	1 3	
		4,5				
		8,0				
		15,0	2 3	1 3	1 2 3	
	25	2,0				1
		4,5				
		8,0				
		15,0		2 3	2 3	
	39	2,0				
		4,5				
		8,0				
		15,0	2 3	2 3	2 3	
	67	2,0				
		4,5				
		8,0				
		15,0	2 3	2 3	2 3	

Lysimetrin 2 pohjamaassa kaikkien muiden lämpötilojen paitsi 2.0 ja 4.5 °C välisissä tuloksissa havaittiin merkittävä ero 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Lysimetrin 9 pintamaassa merkittävä ero oli vain 2.0 ja 15.0 °C lämpötiloissa mitattujen ammoniumtyypen pitoisuuksien välillä. Muissa maalajeissa ammoniumpitoisuuksien erot eri lämpötilojen välillä eivät inkuboinnin lopussa olleet merkittäviä. Inkuboinnin alussa, 11 ja 25 vuorokauden inkuboinnin jälkeen lämpötilan vaikutus ammoniumpitoisuuksien muutoksiin oli vielä selvästi havaittavissa kaikissa maalajeissa. Myöhemmin vaikutus heikkeni niin, että korkeimpien lämpötilojen kesken ei enää voitu havaita merkittäviä eroja. Tällöin ainoastaan 2.0 tai 4.5 °C ja 15.0 tai 8.0 °C välillä pitoisuuserot ovat tilastollisesti merkittäviä.

Vain lysimetrin 9 pintamaassa havaittiin nitraattityypen pitoisuuksissa merkittäviä eroja tutkimuksessa käytettyjen lämpötilojen välillä 11 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Siinäkin ainoastaan 15.0 °C erosi muista käytetyistä lämpötiloista. Vähitellen myös muissa maalajeissa muodostui merkittäviä eroja eri lämpötilojen välille. Vertailtaessa nitraattityypen pitoisuuksia toisiinsa 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen oli lysimetrin 9 pohjamaa ainoa, jossa eri lämpötilojen välisissä tuloksissa ei havaittu merkittäviä eroja.

Kokonaism mineralisaation määrissä oli selviä eroja 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen kaikissa muissa maalajeissa, paitsi lysimetrin 9 pohjamaassa. Lisäksi lysimetrin 2 pohjamaassa ei havaittu eroa 15.0 ja 8.0 °C välillä. Lysimetrin 2 pohjamaassa lämpötila vaikutti mineraalisen tyypen pitoisuuteen sitä enemmän mitä pidemmän ajan näytteitä oli inkuboitu. Vaikutus alkoi kuitenkin heiketä viimeisen inkubointijakson aikana eli aikavälillä 39-67 vuorokautta. Lysimetrin 2 pohjamaassa merkittäviä kokonaistyyppien pitoisuuseroja voitiin eri inkubointijaksoilla havaita 15.0 °C ja sitä alempien lämpötilojen (2.0, 4.5 ja 8.0 °C) välillä. Myös lysimetrin 9 pintamaassa lämpötilan merkitsevyys mineraalisen tyypen pitoisuuksien kannalta kasvaa ajan mukana, kun alkujaksoilla ero oli merkittävä vain 15.0 ja 4.5 °C lämpötiloissa havaittujen pitoisuuksien välillä. Lysimetrin 9 pohjamaassa tilanne oli alun osalta samanlainen kuin pintamaassakin, mutta inkuboinnin lopussa ei eroja eri lämpötilojen välillä havaittu lainkaan.

3.2.4 Ajan vaikutus

Ajan vaikutusta tutkittiin aluksi toistettujen koeyksiköiden menetelmällä, koska tulokset eivät olleet ajan suhteen tarkasteltuna toisistaan riippumattomia. Monimuuttujanvarianssianalyysin tulosten osoitettua, että aineistoon voidaan soveltaa yksisuuntaista varianssianalyysiä, käytettiin myös sitä tehokkaamman testauksen saavuttamiseksi. Varianssianalyysi antaa tulokseksi ammonium-, nitraatti- ja kokonaistypen määrien merkittävät muutokset suunnasta riippumatta ja siten mineraalisen typen väheneminenkin on mukana tuloksissa. Taulukoissa 3.6a ja 3.6b ovat koottuina tulokset yksisuuntaisista varianssianalyyseistä eli ajan vaikutuksesta ammonifikaatioon, nitrifikaatioon ja kokonaismineralisaatioon.

Ajan vaikutus ammoniumpitoisuuksiin inkuboinnin aikana vaihteli tapausittain. Lysimetrin 2 pintamaassa 2.0 °C lämpötilassa pidetyissä näytteissä ammoniumpitoisuuksien erot olivat merkittäviä koko 67 vuorokauden inkuboinnin ajan. 4.5 °C lämpötilassa pidetyissä eri maalajien näytteissä ei ammoniumin määrissä tapahtunut muutoksia 39 vuorokauden jälkeen. 8.0 ja 15.0 °C lämpötiloissa ammoniumpitoisuuksien kasvu päättyi 25 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Lysimetrin 2 pohjamaassa ainoastaan 2.0 °C pidetyissä näytteissä ajalla oli merkittävä vaikutus ammoniumpitoisuuksien kehittymiseen. Vaikutus päättyi 25 vuorokauden jälkeen. Lysimetrin 9 pintamaassa 67 vuorokauden jälkeen mitatut ammoniumtypen määrät erosivat merkittävästi vain näytteiden alkupitoisuuksista lämpötilasta riippumatta. Lysimetrin 9 pohjamaassa ammoniumtypen pitoisuuksien kasvu päättyi lämpötilasta riippuen siten, että mitä korkeammassa lämpötilassa näytettä inkuboitii sen myöhemmin ajan vaikutus siinä päättyi. 2.0 °C lämpötilassa näytteitä inkuboidessa ei ammoniumin määrä muuttunut merkittävästi koko aikana, 4.5 ja 8.0 °C lämpötiloissa ammoniumin määrän kasvu päättyi 25 vuorokauden ja 15 °C lämpötilassa 39 vuorokauden jälkeen.

Nitraattitypen pitoisuuksiin ajalla oli merkittävä vaikutus kaikissa maalajeissa ja jokaisessa lämpötilassa 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen. Myös tätä lyhyemmällä inkubointijaksolla erot aikaisempiin nitraattipitoisuuksiin olivat yleensä merkitseviä lämpötilasta riippumatta. Tosin erot ilmenevät varsinkin 2.0 ja 4.5 °C kohdalla vasta 25 tai 39 vuorokauden jälkeen.

Taulukko 3.6a. Ajan vaikutus ammonifikaatioon (1), nitrifikaatioon (2) ja kokonaismineralisaatioon (3) lysimetrissä 2. Numeroilla on merkitty ne tulokset, jotka ovat merkittäviä Scheffen testin mukaan (luotettavuustaso 95 %).

Näyte	Lämpötila [°C]	Aika [vrk]	Aika [vrk]				
			0	11	25	39	67
L2 pinta	2,0	0					
		11	1 3				
		25	1 3	1 3			
		39	1 2 3	1 2 3	1 3		
		67	1 2 3	1 2 3	1 2 3	1 2 3	
	4,5	0					
		11					
		25	1 2 3	1 2 3			
		39	1 2 3	1 2 3			
		67	1 2 3	1 2 3	1 2 3	2 3	
	8,0	0					
		11					
		25	1 2 3	1 2 3			
		39	1 2 3	1 2 3	2		
		67	1 2 3	1 2 3	2 3	2	
	15,0	0					
		11	1 3				
		25	1 2 3	1 3			
		39	1 2 3	1 2 3			
		67	1 2 3	1 2 3	2	2	
L2 pohja	2,0	0					
		11					
		25	1	1 3			
		39	1 3	1 3	1		
		67	1 2 3	1 2 3	2 3	2 3	
	4,5	0					
		11					
		25					
		39	1 3				
		67	2 3	2 3	2 3	2	
	8,0	0					1
		11					1
		25					1
		39	1 3	3	1 3		1
		67	2 3	2 3	2 3	2 3	
	15,0	0					1
		11	1			1	1
		25	3				1
		39	2 3	2 3	2 3		1
		67	2 3	2 3	2 3	2 3	

Taulukko 3.6b. Ajan vaikutus ammonifikaatioon (1), nitrifikaatioon (2) ja kokonaismineralisaatioon (3) lysimetrisä 9. Numeroilla on merkitty ne tulokset, jotka ovat merkittäviä Scheffen testin mukaan (luotettavuustaso 95 %).

Näyte	Lämpötila [°C]	Aika [vrk]	Aika [vrk]				
			0	11	25	39	67
L9 pinta	2,0	0					
		11	1 3				
		25	1 3				
		39	1 2 3	2 3	2		
		67	1 2 3	2 3	2 3	2	
	4,5	0					
		11	1 3				
		25	1 2 3	3			
		39	1 2 3	2 3			
		67	1 2 3	2 3	2 3	2 3	
	8,0	0					
		11	1 3				
		25	1 2 3	2			
		39	1 2 3	2 3	2 3		
		67	1 2 3	2 3	2 3	2 3	
	15,0	0					
		11	1 2 3				1
		25	1 2 3	2 3			
		39	1 2 3	2 3	2 3		
		67	1 2 3	2 3	2 3	2 3	
L9 pohja	2,0	0					
		11	1 2 3				
		25	1 2 3	2 3			
		39	1 2 3	2 3	2 3		
		67	1 2 3	2 3	2 3	2 3	
	4,5	0					
		11	3				
		25	1 3				
		39	1 2 3	1 2 3	2 3		
		67	1 2 3	1 2 3	2 3	2 3	
	8,0	0					
		11	1				
		25	1 2 3	1			
		39	1 2 3	1 2 3	1 2 3		1
		67	1 2 3	1 2 3	2 3	2 3	
	15,0	0					
		11	1		1		
		25	1 3				
		39	1 2 3	2 3	1		
		67	1 2 3	2 3	1 2 3	2 3	

Mineraalisen typen kokonaismäärään ajalla oli merkittävä vaikutus. Lysimetrin 2 pintamaassa 8.0 °C inkuboiduissa näytteissä aika ei vaikuttanut mineraalisen typen määrään enää 39 vuorokauden jälkeen. 15.0 °C lämpötilassa vaikutus päättyi 25 vuorokauden jälkeen. Lysimetrin 2 pohjamaan näytteissä, joita pidettiin 4.0 °C lämpötilassa aika vaikutti mineraalisen typen pitoisuuksiin 39 vuorokauden ajan. Muissa lämpötiloissa ajan vaikutus mineraalisen typen määrään säilyi koko 67 vuorokauden koejakson. Lysimetrissä 9 ajan vaikutus oli merkittävä kaikissa käytetyissä lämpötiloissa. Sen pintamaassa ei 2.0 °C lämpötilassa inkuboiduissa näytteissä havaittu 39 vuorokauden jälkeen merkittäviä muutoksia kokonaistypen määrissä.

3.2.5 Polynomianalyysi

Polynomianalyysillä selvitettiin nitrifikaatiota ja ammonifikaatiota sekä kokonaismineralisaatiota kuvaavien yhtälöiden asteluvut. Analyysissä pidettiin riippumattomana muuttujana aikaa, jonka suhteen ammonium-, nitraatti- ja kokonaistyyppi- toisuuksia tarkasteltiin. Ammonifikaation tulokset on esitetty taulukossa 3.7, nitrifikaation taulukossa 3.8 ja kokonaismineralisaation taulukossa 3.9. Yli 95 % luotettavuustason tulokset on niissä merkitty tähdellä. Ammoniumtyypen määrän muutoksia ajan suhteen selittivät analyysin mukaan parhaiten ensimmäisen asteen yhtälöt maalajista riippumatta. Lysimetrin 9 pintamaan ammonifikaatiota selittivät myös toisen asteen yhtälöt. Lämpötilaa 4.5 °C lukuun ottamatta myös kolmannen asteen yhtälöt selittivät ammonifikaatiota eri maalajeissa (taulukko 3.7).

Taulukko 3.7 Polynomianalyysin tulokset ammonifikaatiolle. 95 % luotettavuustason tulokset on merkitty tähdellä.

Näyte	Lämpötila [°C]	Polynomin aste		
		1.	2.	3.
L2 pinta	2,0	*	*	*
	4,5	*		*
	8,0	*	*	*
	15,0	*	*	
L2 pohja	2,0	*		*
	4,5	*		
	8,0	*	*	*
	15,0	*	*	*
L9 pinta	2,0	*	*	*
	4,5	*	*	
	8,0	*	*	*
	15,0	*	*	*
L9 pohja	2,0	*	*	*
	4,5	*		
	8,0	*	*	*
	15,0	*	*	*

Ensimmäisen ja toisen asteen yhtälöt selittivät nitraattitypen muutoksia parhaiten. Näistä ensimmäisen asteen yhtälöt sopivat kaikkiin maalajeihin ja lämpötiloihin. Lukuunottamatta lysimetrin 9 pohjamaata 15,0 °C lämpötilassa myös toisen asteen yhtälöt soveltuivat kaikissa tapauksissa. Kolmannen asteen yhtälöt kuvasivat nitraatin muodostumista lysimetrin 2 pintamaassa inkubointilämpötilasta riippumatta (taulukko 3.8).

Taulukko 3.8 Polynomianalyysin tulokset nitrifikaatiolle. 95 % luotettavuustason tulokset on merkitty tähdellä.

Näyte	Lämpötila [°C]	Polynomin aste		
		1.	2.	3.
L2 pinta	2,0	*	*	*
	4,5	*	*	*
	8,0	*	*	*
	15,0	*	*	
L2 pohja	2,0	*	*	*
	4,5	*	*	*
	8,0	*	*	*
	15,0	*	*	*
L9 pinta	2,0	*	*	
	4,5	*	*	
	8,0	*	*	
	15,0	*	*	
L9 pohja	2,0	*	*	*
	4,5	*	*	
	8,0	*	*	
	15,0	*		

Ammonium- ja nitraattitypen yhteissumman kehittymistä eli kokonaismineralisaatiota ajan suhteen selittivät polynomianalyysin perusteella parhaiten ensimmäisen

asteen yhtälöt kaikissa käytetyissä maalajeissa ja lämpötiloissa (taulukko 3.9). Lysimetrin 2 pohjamaassa soveltui myös toisen asteen yhtälö.

Taulukko 3.9 Polynomianalyysin tulokset kokonaismineralisaatiolle. 95 % luotettavuustason tulokset on merkitty tähdellä.

Näyte	Lämpötila [°C]	Polynomin aste		
		1.	2.	3.
L2 pinta	2,0	*	*	*
	4,5	*	*	*
	8,0	*		*
	15,0	*	*	
L2 pohja	2,0	*	*	
	4,5	*	*	
	8,0	*	*	
	15,0	*	*	
L9 pinta	2,0			
	4,5	*	*	*
	8,0	*		
	15,0	*		*
L9 pohja	2,0	*	*	*
	4,5	*	*	
	8,0	*	*	
	15,0	*		

3.3 Mineralisaatioprosessien simulointi

Polynomianalyysin perusteella havaittiin ensimmäisen asteen yhtälöiden yleisesti kuvaavan ammonifikaatiota, nitrifikaatiota ja kokonaismineralisaatiota ajan suhteen. Tällöin voitiin olettaa, että lineaarisen yhtälön kulmakerroin kuvaa vakionopeudella tapahtuvaa mineralisaatioprosessia tietyssä lämpötilassa eli prosessi noudattaa nollannen kertaluokan kinetiikkaa. Nämä regressioanalyysin avulla määritettyjen lineaaristen suorien kulmakertoimet on annettu taulukossa 3.10. Kuvassa 3.9 on

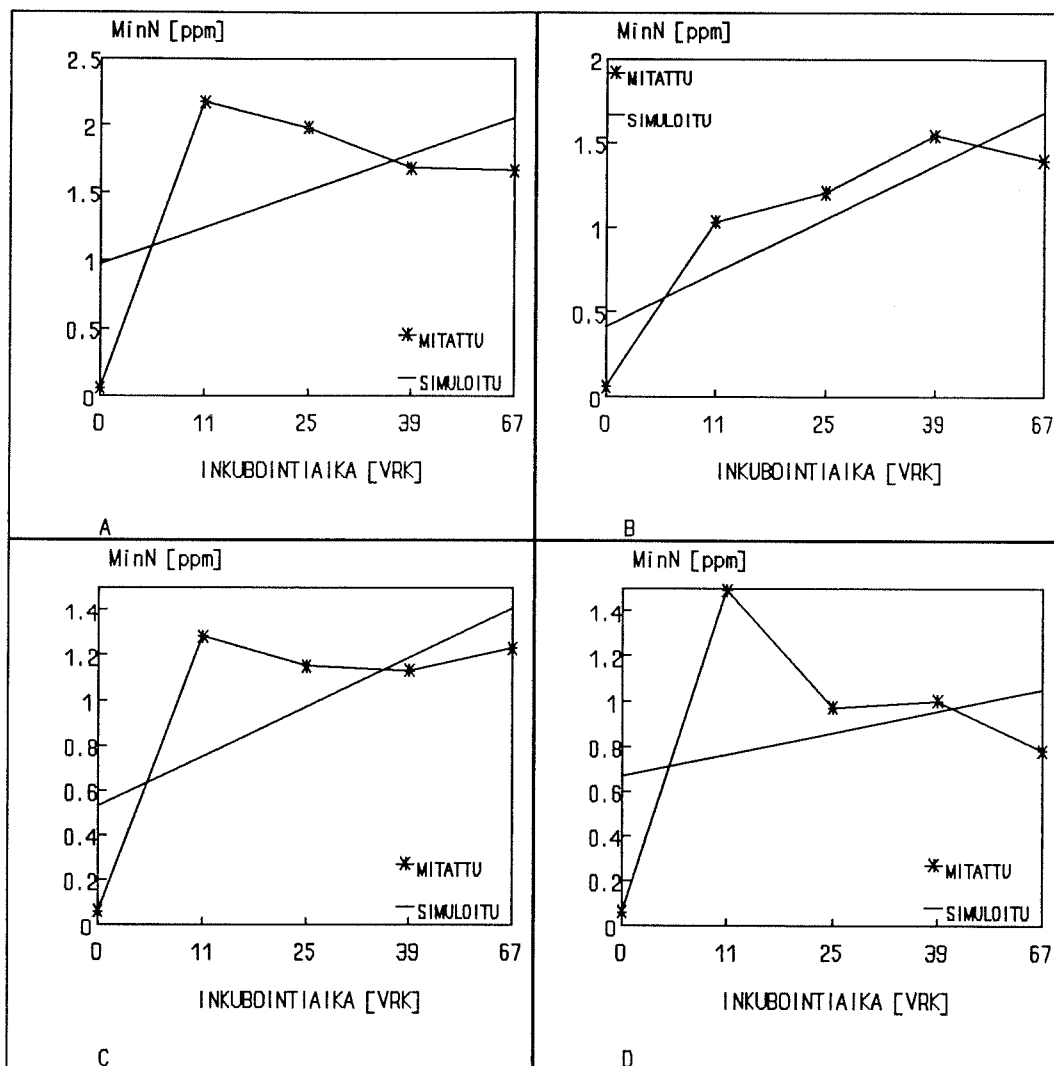
esitetty simuloidut ja mitatut ammoniumtyypen pitoisuudet ajan suhteen lysimetrin 9 pintamaassa. Kuvassa 3.10 on esitetty vastaavasti saman maalajin mineraalityypen (NH_4 ja NO_3) pitoisuudet. Liitteessä 5 on lisäksi esitetty kuvaajat mitatuista ja simuloiduista mineraalisen tyypen määristä kaikissa eri maalajeissa ja lämpötiloissa, kun prosessien oletetaan noudattavan lineaarista mallia.

Taulukko 3.10 Mineralisaatiokertoimet ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle, kun prosessit ovat lineaarisia ajan suhteen.

Näyte	Lämpötila [°C]	Kerroin [$\mu\text{g g}^{-1}\text{vrk}^{-1}$]		
		Ammonifikaatio	Nitrifikaatio	Kok.min.
L2 pinta	2,0	0,2534	0,0496	0,3030
	4,5	0,2782	0,0586	0,3368
	8,0	0,2469	0,1019	0,3488
	15,0	0,2066	0,1534	0,3600
L2 pohja	2,0	0,0112	0,0119	0,0231
	4,5	0,0059	0,0127	0,0186
	8,0	-0,0068	0,0363	0,0296
	15,0	-0,0324	0,0741	0,0417
L9 pinta	2,0	0,0133	0,0519	0,0652
	4,5	0,0172	0,0926	0,1098
	8,0	0,0127	0,0809	0,0936
	15,0	0,0054	0,1434	0,1472
L9 pohja	2,0	0,0043	0,0970	0,1014
	4,5	0,0104	0,0999	0,1104
	8,0	0,0081	0,1135	0,1218
	15,0	0,0081	0,2177	0,2257

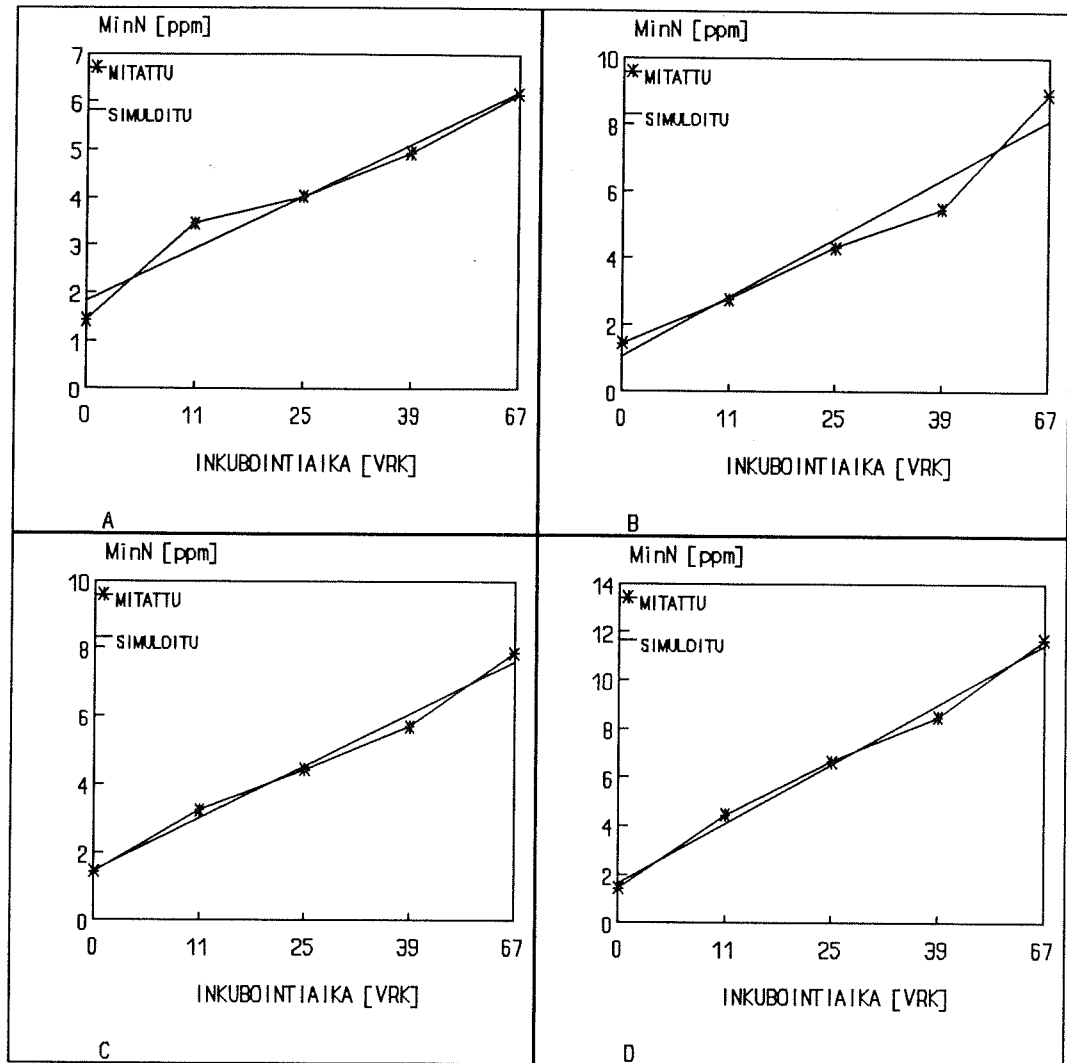
Nollannen kertaluokan kinetiikka soveltui kuvaajien perusteella erityisen hyvin kokonaismineralisaation mallintamiseen. Ammonium- ja nitraattityypen pitoisuuksien kehittymistä ajan suhteen eivät lineaariset yhtälöt pystyneet kuvaamaan kuin tyydyttävästi (liite 5). Nitrifikaatiolle nämä mallit soveltuivat kuitenkin selvästi paremmin kuin ammonifikaatiolle. Lisäksi lineaarisen mallin soveltuvuus nitrifikaati-

tion kuvaamiseen parani lämpötilan kasvaessa. Ammonifikaation kuvaaminen lineaarisella mallilla onnistui parhaiten maalajista riippumatta 4.5 °C lämpötilassa, mutta tällöinkin mallin yleinen soveltuvuus oli huono (liite 5, kuva 3.9).



Kuva 3.9. Mitatut ja simuloidut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrin 9 pintamassa (lineaarinen riippuvuus). Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.

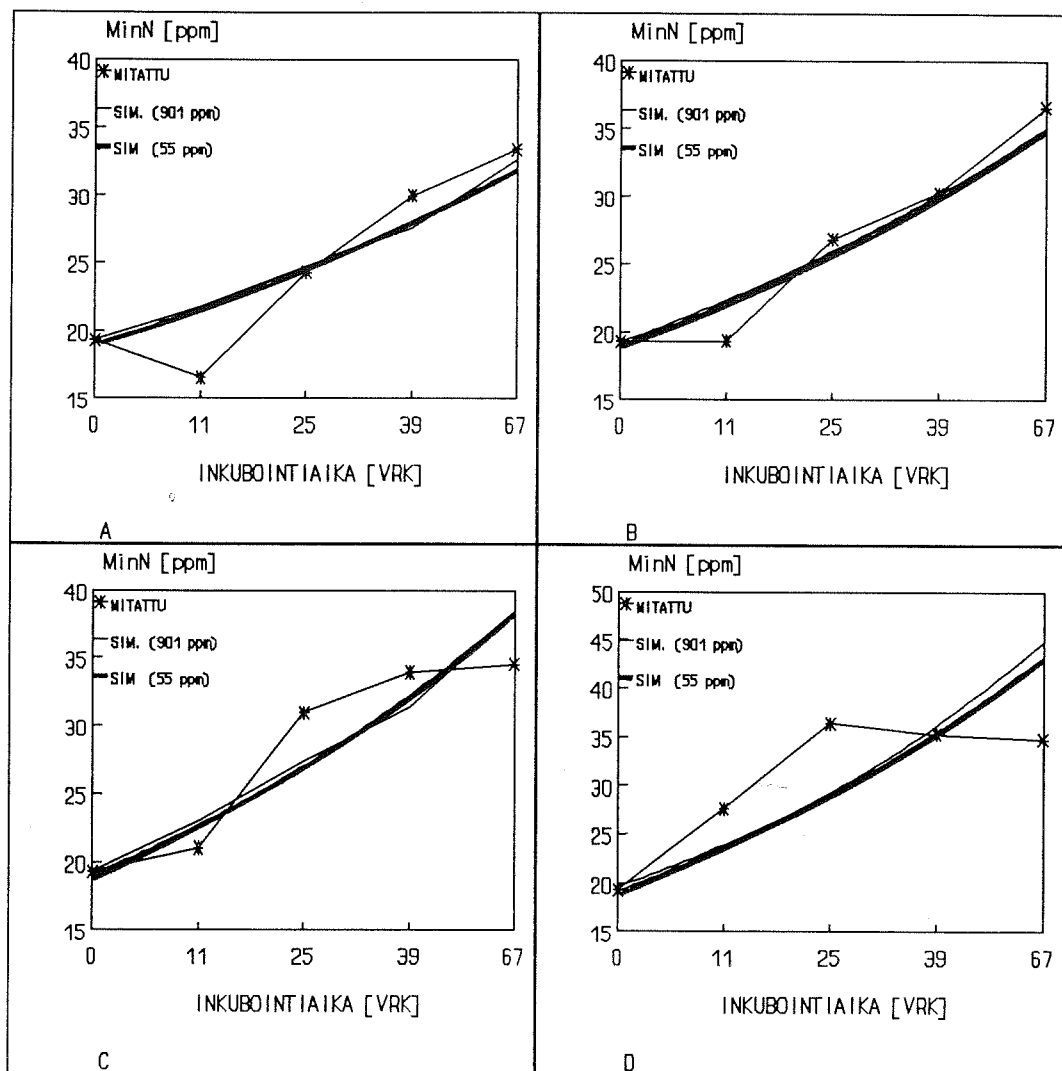
Ammonium- ja nitraattityypen yhteismäärässä tapahtuneita muutoksia ajan suhteen kuvaavat lineaariset riippuvuudet hyvin lysimetrin 9 pintamassa ja melko hyvin muissakin maalajeissa (liite 5, kuva 3.10). Mallin soveltuvuudessa ei voitu havaita eroja eri lämpötilojen välillä.



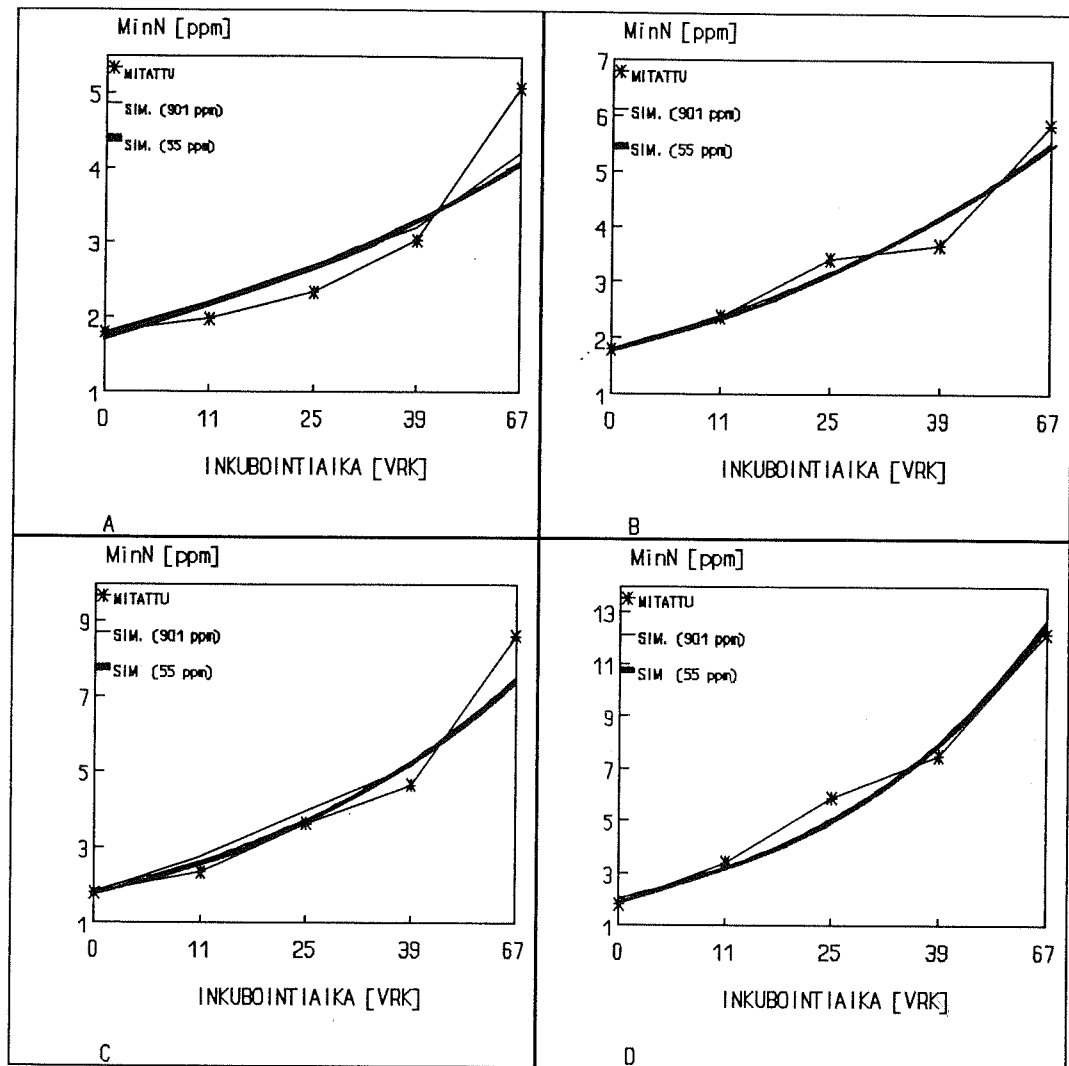
Kuva 3.10. Mitatut ja simuloitut mineraalityypen (NH_4 ja NO_3) pitoisuudet lysimetrin 9 pintamaassa (lineaarinen riippuvuus). Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.

Ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa sovellettaessa oletettiin sekä koko orgaanisen typen varaston että vain osan siitä olevan potentiaalisesti mineralisoituvaa tyyppiä. Erisuuruisiin potentiaalisesti mineralisoituvan typen varastoihin perustuvissa simulointituloksissa ei havaittu juuri lankaan eroja. Molemmat lähestymistavat vastasivat hyvin kokonaismineralisaatiolle mitattuja arvoja. Erityisen hyvin eksponenttiyhtälö kuvasi nitrifikaatiota 15.0 °C lämpötilassa (liite 6). Ammonium-typen pitoisuuden muutoksia ei ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa noudattava malli kuvannut hyvin yhdessäkään maalajissa tai lämpötilassa.

Kuvassa 3.11 on esitetty simuloitua ja mitattua ammoniumtyyppien pitoisuuksia ajan suhteen lysimetrin 2 pintamaassa. Kuvassa 3.12 on esitetty vastaavasti saman maalajin nitraattityyppien pitoisuuksia. Liitteessä 6 on lisäksi esitetty ajan suhteen piirretyt kuvaajat mitatuista ja simuloituista mineraalisen tyypin määristä kaikissa eri maalajeissa ja lämpötiloissa, kun prosessien oletetaan noudattavan ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa.



Kuva 3.11. Mitatut ja simuloitut ammoniumtyyppien pitoisuudet lysimetrin 2 pintamaassa (eksponentiaalinen riippuvuus). Suluissa on ilmoitettu mallissa käytetty potentiaalisesti mineralisoituvan tyypin määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8 °C (C) ja 15 °C (D) lämpötiloissa.



Kuva 3.12. Mitatut ja simuloidut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 2 pinta-
maassa (eksponenentiaalinen riippuvuus). Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti
mineralisoituvan typen määrä, jota laskuissa on käytetty. Kuvassa on esitetty
tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.

Taulukossa 3.11 on esitetty kertoimien k arvot ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle, kun prosessien oletettiin noudattavan ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa (kaava 2.2). Kokonaismineralisaatiolle laskettiin mineralisaatiokertoimien arvot myös käyttämällä koko orgaanisen typen määrää pienempää potentiaalisesti mineralisoituvan typen varastoa. Tällöin lysimetrin 2 pinta-
maassa arvoitiin olevan $55 \mu\text{g g}^{-1}$ ja pohjamaalla $30 \mu\text{g g}^{-1}$ sekä lysimetrin 9 pinta-
maassa ja pohjamaassa molemmissa $15 \mu\text{g g}^{-1}$ orgaanista tyypeä, joka on potentiaa-
lisesti mineralisoituvaa.

Taulukko 3.11 Mineralisaatiokertoimet ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle, kun prosessit noudattavat ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa. Taulukossa oletetaan sekä koko orgaanisen typen varaston että vain osan siitä olevan potentiaalisesti mineralisoituvaa.

Näyte	Lämpötila [°C]	Mineralisaatiokerroin [vrk ⁻¹]			
		Ammonif.	Nitrif.	Kok.min ⁽¹⁾	Kok.min ⁽²⁾
L2 pinta	2,0	0,000228	0,000040	0,000269	0,005056
	4,5	0,000282	0,000063	0,000347	0,006689
	8,0	0,000340	0,000094	0,000436	0,008574
	15,0	0,000448	0,000171	0,000622	0,012820
L2 pohja	2,0	0,000203	0,000099	0,000304	0,000541
	4,5	0,000204	0,000121	0,000326	0,000579
	8,0	0,000021	0,000391	0,000408	0,000729
	15,0	-0,000243	0,001052	0,000782	0,001402
L9 pinta	2,0	0,000117	0,000092	0,000209	0,006948
	4,5	0,000079	0,000174	0,000254	0,009196
	8,0	0,000073	0,000177	0,000251	0,008778
	15,0	0,000065	0,000350	0,000415	0,017173
L9 pohja	2,0	0,000056	0,000286	0,000342	0,008628
	4,5	0,000051	0,000283	0,000334	0,008595
	8,0	0,000047	0,000301	0,000349	0,009208
	15,0	0,000058	0,000477	0,000536	0,016017

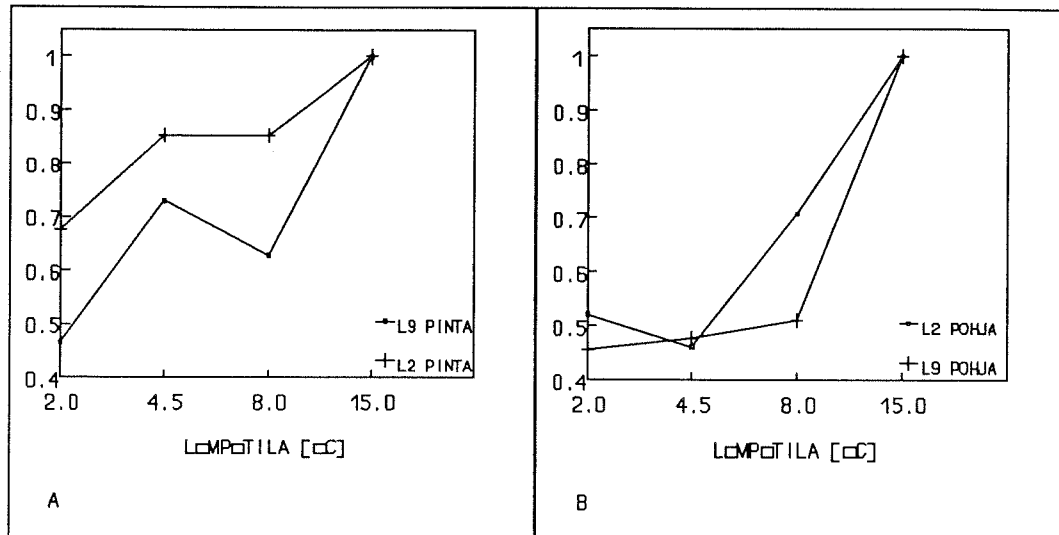
⁽¹⁾ koko orgaanisen typen varasto on potentiaalisesti mineralisoituvaa

⁽²⁾ vain osa orgaanisen typen varastosta on potentiaalisesti mineralisoituvaa;
 $N_0 = 55 \mu\text{gg}^{-1}$ (L2 pinta), $30 \mu\text{gg}^{-1}$ (L2 pohja), $15 \mu\text{gg}^{-1}$ (L9 pinta- ja pohjamaa)

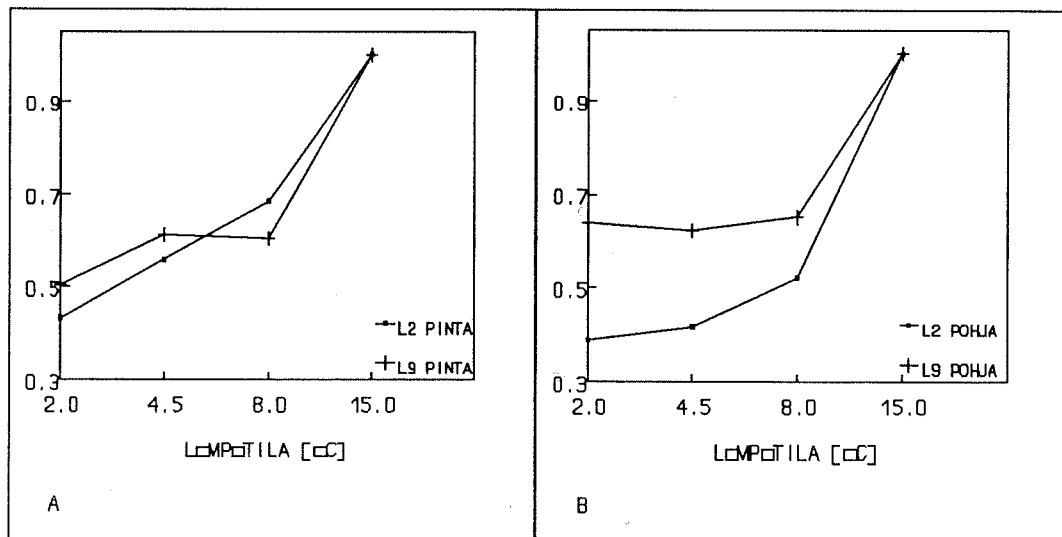
Keskimääräiset lämpötilakertoimet (Q_{10}) laskettiin sijoittamalla 2.0 ja 15.0 °C lämpötiloissa saadut nettomineralisaatioiden arvot kaavaan 2.3. Lämpötilakertoimille lasketut arvot vaihtelivat eri maalajeissa välillä 1.35-1.80. Kerroin oli suurin lysimetrin 9 pintamaassa ja pienin lysimetrin 2 pintamaassa.

Kuvassa 3.13 on esitetty graafisesti lysimetrien 2 ja 9 pinta- ja pohjamaissa havaittujen nettomineralisaatioiden ja kuvassa 3.14 kokonaismineralisaatiokertoimien riippuvuus lämpötilasta. Vertailussa käytetyt mineralisaatiokertoimet edustivat

ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa ja koko orgaanisen typen varasto oletettiin potentiaalisesti mineralisoituvaksi. Eri lämpötilossa saadut arvot suhteutettiin suurimpaan arvoon, jota on kuvissa merkitty ykkösellä. Suurin nettomineralisaatio ja mineralisaatiokerroin saatiin kaikissa maalajeissa 15.0 °C lämpötilassa.



Kuva 3.13. Nettomineralisaation (NH_4^+ ja NO_3^-) riippuvuus lämpötilasta lysimetrien 2 ja 9 pintamaissa (A) ja pohjamaissa (B).



Kuva 3.14. Kokonaismineralisaatiokerrointen (eksponentiaalinen riippuvuus) riippuvuus lämpötilasta lysimetrien 2 ja 9 pintamaissa (A) ja pohjamaissa (B).

4 TULOSTEN TARKASTELO

4.1 Mittaustulosten tarkastelu

Lysimetrin 2 maalajeissa ammoniumtyypen määrä oli koko koejakson inkubointilämpötilasta riippumatta suurempi kuin nitraattityypen pitoisuus (kuvat 3.4 ja 3.6). Syynä lienevät nitrifioiville bakteereille epäedulliset olosuhteet. Ammonifikaatiossa syntyvä ammoniumtyppi pääsi siis kertymään näytteisiin ilman, että sitä olisi hapetettu edelleen nitraatiksi (Poovarodom ja Tate 1988, Stevenson 1982). Myös maalajin kosteuspitoisuus saattoi olla optimia pienempi nitrifikaation kannalta (kohta 2.2, taulukko 2.3). Ensimmäisellä inkubointijaksolla lysimetrin 9 pinta- ja pohjamaassa 2.0 °C lämpötilassa havaitut ammoniumtyypen pitoisuudet selittyvät uuton yhteydessä kationinvaihtopaikoista vapautuneella ammoniumilla, nopeasti käynnistyneellä ammonifikaatiolla sekä sillä, että nitrifikaatio oli samanaikaisesti hyvin hidasta. Ylemmissä lämpötiloissa nitrifikaatio toimi tehokkaammin ja kulutti siten ammoniumvarastoa nopeammin (liite 1).

Nitraattityypen pitoisuuden kehittyminen lämpötilan suhteen oli ammonifikaatioon verrattuna käänteinen, sillä lämpötilan noustessa nitrifikaatio voimistui melko tasaisesti kaikissa maalajeissa. Tässä tutkimuksessa ei nitrifikaation havaittu erityisesti suosivan alhaisia lämpötiloja pintamaissa, joissa on runsaasti orgaanista ainesta ja suuri mikrobiologinen aktiivisuus (Schmidt 1982). Toisaalta orgaanisen aineksen hajoamisen aiheuttama hapen puute ei todennäköisesti ole rajoittanut nitrifikaatiota, sillä inkubointiolosuhteet olivat aerobit (Paul ja Clark 1989, Rankinen 1992). Nitrifikaation lähtöaineistakaan ei ollut puutetta, sillä tutkimuksessa käytetyt alhaiset lämpötilat eivät merkittävästi lisää vapaan ammoniakkin haihtumista (Stevenson 1982). Sitä vastoin vapaan ammoniakkin esiintyminen on saattanut vaikeuttaa nitrifikaatioreaktioiden toimintaa lysimetrin 2 pintamaassa. Nitrifikaatioprosessi oli kuitenkin käynnissä kaikissa maalajeissa ja lämpötiloissa, joten viileinäkin vuodenaikoina mineralisaatiota tapahtuu (Tyler et al. 1959). Nitraatin alkupitoisuudet olivat melko korkeat johtuen pitkästä säilytyksestä ennen varsinaisen inkuboinnin alkua (luku 2.6). Tämä kasvatti näytteistä mitattuja nitraattityypen bruttopitoisuuksia koko inkuboinnin ajan. Lisäksi maanäytteiden kuivaaminen ja

uudelleen kostutus sekä häiriintyminen lisää mineralisaatiota (Rankinen 1992, Senevirantre ja Wild 1985, Craswell ja Waring 1972).

Negatiivinen nettomineralisaatio lysimetrin 2 maalajeissa ensimmäisen inkubointijakson aikana selittyy joko kasvien assimilaatiolla (luku 4.1.1) tai denitrifikaatiolla. Muutoin ajan ja lämpötilan kasvaessa myös ammonium- ja nitraattitypen summa kasvoi. Lisäksi kokonaismineralisaatio eli ammonium- ja nitraattitypen kertyminen voimistui huomattavasti maalajista riippumatta, kun inkubointilämpötilana käytettiin 2.0, 4.5 tai 8.0 °C:een sijasta 15.0 °C:ta (kuva 3.3).

Tutkimusten mukaan lämpötilan vaikutus typen mineralisaatioon ja ammoniumsuolojen hapettumiseen on erilaista alhaisissa, vaihtelevissa lämpötiloissa, kuin tasaisessa lämpötilassa (Campbell ja Biederbeck 1972, Sabey et al. 1954, Campbell et al. 1971). Eri tutkimusten tuottamat tulokset ovat kuitenkin hyvin ristiriitaisia. Esimerkiksi Stanfordin et al:n (1973b) tutkimuksissa erilaisilla lämpötilan muutosarjoilla ei havaittu olleen vaikutusta mineralisoituneen typen määrään 52 päivän inkuboinnin aikana, kun lämpötila vaihteli välillä +5-35 °C. Tämän perusteella voidaan olettaa, etteivät vuorokautiset lämpötilan vaihtelut aiheuta suurtakaan poikkeamaan mineralisaation määrään verrattuna vakiolämpötilassa saatuihin tuloksiin. Laboratoriomittauksissa saatuja tuloksia voidaan siis rajoitukset huomioon ottaen soveltaa, kun arvioidaan typen eri muotojen määrää ja mineralisaatiota kenttämittakaavassa. Sovelluksissa täytyy esimerkiksi ottaa huomioon maaperän todellinen kosteus sekä käyttää yksikkömuunnoksissa kuivatilavuuspainojen sijasta maalajin märkätilavuuspainoa.

Maalajien ominaisuuksista ratkaisevimpia mineralisaation kannalta ovat orgaanisen aineksen määrä, ja erityisesti orgaanisen typen ja hiilen pitoisuudet. Maaperässä tapahtuva mineralisaatio tavallisesti voimistuu sen sisältämän orgaanisen typen ja hiilen määrän lisääntyessä. Tämä piti paikkansa nyt tutkituilla maalajeilla melko hyvin. Poikkeus oli lysimetrin 9 pintamaa, jonka kokonaismineralisaatio 67 vuorokauden jälkeen jäi hieman pienemmäksi, kuin mitä orgaanisen typen ja hiilen pitoisuuksien perusteella olisi voitu odottaa (kuva 3.2). Lysimetrin 9 pohjamaassa mineraalisen typen määrä oli puolestaan suurempi kuin mitä edellä mainituin perustein tehty arvio edellytti. Lysimetrin 9 poikkeava käyttäytyminen saattaa

johtua siihen 1989 lisäystä lannoitteesta. Lannoitteen sisältämää ammoniumia on voinut sitoutua pohjamaan kationinvaihtopaikkoihin, joista se nyt poistui uuton seurauksena. Kyseessä ei siis olisikaan inkuboinnin aikana tapahtunut ammonifikaatio vaan aiemmin sitoutuneena olleen ammoniumin vapautuminen. Toisaalta ammoniumin alkupitoisuus oli mittaustarkkuuden alapuolella, joten ammoniumin vapautuminen olisi pitänyt vapautua vasta näytteiden kostutuksen jälkeen.

Hiili-typin -suhdetta (C/N) on käytetty kuvaamaan maaperän mineralisaatio-ominaisuuksia. Tavallisille peltomaille on kirjallisuudessa ilmoitettu suhteeksi noin 25 (Jansson ja Persson 1982). Tässä käytetyillä maalajeilla kaikilla C/N -suhde oli suurempi kuin mainittu 25, joten maalajien pitäisi olla voimakkaasti immobilisaatiota suosivia. Nettomineralisaatiota kuitenkin havaittiin, ja onkin mahdollista, että näytteiden sisältämät orgaaniset yhdisteet olivat vaikeasti hajoavia tai vain vähän typpeä sisältäviä. Tällöin ne olivat heikkoja energianlähteitä heterotrofeille mikro-organismeille ja niiden sisältämän potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrään perustuva C/N -suhde paljonkin nyt laskettua pienempi. Näytteenottoalue ei myöskään ole viljelykäytössä, mikä edelleen vaikeuttaa C/N -suhteiden vertailua.

Ammonifikaatioreaktiot toimivat parhaiten pH-arvojen ollessa lähellä neutraalia eli välillä 6-7 (Stevenson 1982), joten molempien lysimetrien pintamaiden pH-arvot olivat inkuboinnin jälkeen hieman optimin alapuolella. Pohjamaiden pH-lukemat pysyivät ihannealueella koko koejakson. pH ei ollut tässä tutkimuksessa missään vaiheessa nitrifikaatiota tai ammonifikaatiota rajoittava tekijä. Nitrifikaation päättymisen alhaisen pH:n seurauksena (Schmidt 1982, Paul ja Clark 1989) ei ollut todennäköistä, sillä vesisuspensiosta mitatut arvot säilyivät optimialueen (pH-arvot 6-8) alarajalla tai hieman sen alapuolella. pH-arvojen kohoaminen lysimetrin 2 maalajeilla ensimmäisen inkubointijakson aikana johtuu vapaan ammoniakkin reaktiosta veden kanssa, jolloin vapautuu hydroksidi-ioneja (kaavat 1.1-1.3; kuva 3.8). Toisaalta myös denitrifikaatio nostaa maan pH-arvoa. Muiden inkubointijaksojen aikana havaittu pH-arvojen pienentyminen puolestaan kertoo nitrifikaation olevan käynnissä, sillä ammoniumin hapettua nitriitiksi ja nitraatiksi vapautuu vety-ioneja, jotka alentavat pH-arvoja. Lysimetrin 9 pohjamaassa 39 vuorokauden inkuboinnin jälkeen havaittu pH:n nousu ei ole merkittävä, sillä tulosten hajonta oli 67 vuorokauden jälkeen tehdyissä pH-mittauksissa suuri. Inkuboinnin päätteeksi

mitatuissa kokonaistypen pitoisuuksissa havaittu nousu pintamaalajeissa verrattuna alkupitoisuuksiin johtuu mittaustekniikasta.

4.1.1 Aineiston ja tulosten luotettavuuden arviointi

Näytteitä säilytettiin näytteenottokosteudessaan 4.5 °C lämpötilassa kuukauden ajan ennen kuivatusta ja seulontaa. Varastoinnin alussa ei koemaista tehty mittauksia, vaikka niissä saattoi tapahtua mineralisaatiota jo ennen varsinaista inkubointia. Lisäksi hietänäytteitä jouduttiin säilyttämään kostutuksen jälkeen noin viikon ajan tilassa, jonka lämpötila oli 4.5 °C. Nyt käytetyistä lämpötiloista pystyttiin säilyttämään suhteellisen vakioina kaikki muut paitsi 2.0 °C. Tässä lämpötilassa muutamat näytteistä pääsivät osittain jäätymään ensimmäisen inkubointijakson aikana, mikä aiheutti kosteuden epätasaista jakautumista ao. näytteissä. Myös näyteastioiden suulla ollut kalvo oli eräissä tapauksissa repeytynyt, joten näytteiden vesipitoisuus oli saattanut muuttua. Repeytyneitä kalvoja tavattiin hajanaisesti kaikissa inkubointilämpötiloissa. Joissakin näytteissä havaittiin lisäksi itäviä siemeniä ja hometta varsinkin ylimmissä lämpötiloissa ja pitkien inkubointiaikojen jälkeen. Ne poistettiin ennen näytteiden analysointia ja siten niihin assimiloituneen typen määrä jäi selvittämättä. Tislattua vettä käytettiin varmistamaan kylmäkaappien ilman puhtaus erilaisista typpiyhdisteistä, joita olisi voinut siirtyä inkuboinnin aikana näytteisiin. Tarkistusnäytteissä ei kuitenkaan havaittu ammonium- tai nitraattityypen pitoisuuksien nousua, joten kylmäkaappien ilmasta ei liene siirtynyt näytteisiin yhdisteitä, jotka olisivat voineet vääristää saatuja tuloksia. Yleisiä arvioita tutkimuksessa käytetystä koejärjestelystä on esittänyt Rankinen (1992). Hänen työssään on pohdittu varsinkin näytteiden kuivattamisen ja uudelleen kostutuksen vaikutuksia mineralisaatioon.

Näytteiden analysoinnissa ja mittauksissa ei esiintynyt häiriöitä, joten saadut mittaustulokset ovat varsin luotettavia. Tosin 39 vuorokauden inkuboinnin jälkeen tehdyissä nitriitti- ja nitraattityypen pitoisuuksien mittauksessa käytettiin analysaattorissa väärän kokoista reagenssin syöttöletkua, josta aiheutui normaalia enemmän ilmakuplia näytteisiin ja siten tavallista suurempaa hajontaa mittaustuloksiin.

Kasvukaudella tapahtuvan mineralisaation arvioinnissa käytettiin ilman lämpötilahavaintoja, jotka eivät täysin vastaa maaperän lämpötiloja varsinkaan kylminä kuukausina. Lisäksi laskennassa on yksikkömuunnoksissa käytetty kuivatilavuuspainoja märkätilavuuspainojen sijasta, joten kenttäolosuhteissa tulokset ovat hieman esitettyä pienempiä. Lisäksi monet muut kentällä vaikuttavat tekijät aiheuttavat sen, etteivät nyt esitetyt tulokset ole suoraan siirrettävissä kenttäolosuhteisiin.

4.2 Mittaustulosten vertailu

Otaniemen lysimetrikentän maalajeilla on mineralisaatiota arvioitu aiempien tutkimusten yhteydessä eri menetelmillä ja erilaisten mineralisaatioon vaikuttavien tekijöiden kannalta (Bärlund 1992a, Rankinen 1992). Rankisen (1992) laboratoriomittauksissa havaitut maksimimineralisaatiot 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen olivat lysimetrin 9 pintamaassa $14 \mu\text{gg}^{-1}$ ja pohjamaassa $15 \mu\text{gg}^{-1}$. Nyt saadut tulokset olivat vastaavasti $10 \mu\text{gg}^{-1}$ pintamaassa ja $15 \mu\text{gg}^{-1}$ pohjamaassa. Rankisen (1992) tutkimuksia varten maanäytteet oli kerätty keväällä ja alkukesällä, jolloin hajoamassa olevan orgaanisen aineen määrä on maassa pienempi kuin loppusyksystä.

Rankisen (1992) käyttämät lysimetrin 6 pohja- ja pintamaat vastaavat ominaisuuksiltaan melko hyvin tässä tutkimuksessa käytetyn lysimetrin 2 maalajeja. Lysimetrin 6 pintamaassa mineralisaatio oli $33 \mu\text{gg}^{-1}$ ja pohjamaan $8 \mu\text{gg}^{-1}$. Vastaavasti nyt mitattiin lysimetrin 2 pintamaassa mineraalista tyypeä $25 \mu\text{gg}^{-1}$ ja pohjamaassa $2.7 \mu\text{gg}^{-1}$. Erot johtuvat inkubointilämpötilojen välisestä erosta. Lisäksi lysimetriä 6 on lannoitettu ja sen orgaanisen hiilen pitoisuus on pintamaassa suurempi sekä sen pohjamaassa on lähes yhtä suuri kuin lysimetrissä 2.

Tutkimuksessa saatuja nettomineralisaatiomääriä voidaan karkeasti soveltaa kenttämittakaavassa arvioimalla kunkin lämpötila-alueen (2.0-4.5, 4.5-8.0 ja 8.0-15.0 °C) sisälle jäävän aikajakson pituutta kuukausittaisten ilman keskilämpötilatietojen perusteella. Jaksoilla tapahtuva mineralisaatio lasketaan jakson pituuden ja sen lämpötilaa vastaavan keskimääräisen vuorokausimineralisaation tulona. Laskennassa on kerrospaksuutena käytetty yhtä metriä ja kuivatilavuuspainoja

muunnettaessa massoja tilavuuksiksi. Näin saadut teoreettiset nettomineralisaatiot on esitetty taulukossa 4.1. Siinä on käytetty vuoden 1988 säähavaintoja Helsinki-Vantaan lentokentän havaintopisteessä. Yleensä esimerkiksi kasvukauden pituutena pidetään Etelä-Suomessa 170 vuorokautta ja sulan maan jakson pituutena 230 vuorokautta (Rankinen 1992, Bärlund 1992b).

Taulukko 4.1 Nettomineralisaatio kg ha^{-1} metrin paksuisessa maakerroksessa sulan maan aikana eri maalajeissa. Jaksojen pituudet on laskettu vuoden 1988 kuukausien ilman keskilämpötilojen perusteella.

Lämpötila [°C]	Jakson pituus [vrk]	Näyte			
		L2 pinta	L2 pohja	L9 pinta	L9 pohja
2,0-4,5	30	67	9	25	45
4,5-8,0	31	85	8	40	49
8,0-15,0	61	172	40	68	103
> 15,0	92	305	54	164	305
summa	214	628	111	297	502

Bärlund (1992a) on arvioinut mineraalisen typen määrää orgaanisen typen määrän perusteella. Tutkimuksessa saadut tulokset on esitetty taulukossa 4.2. Perusteena on käytetty tietoa, jonka mukaan 1-2 % orgaanisesta tyydestä mineralisoituu kasvukauden aikana.

Bärlundin (1992a) tulokset vastaavat pintamaiden osalta nyt havaittuja mineralisaatiomääriä suhteellisen hyvin, kun käytetään vertailukohteena 1 % orgaanisen typen määrästä. Pohjamailla arvio 2 % orgaanisen typen määrästä ei ole riittävä kattamaan kaikkea inkubointikokeissa nyt havaittua mineralisaatiota, vaan suuruudeksi saatiin 3.6 %. Tämän perusteella voidaan arvioida, että laboratorio-olosuhteissa saadut mineralisaatioarvot ovat jopa 40 % suurempia kuin kentällä tapahtuva mineralisaatio olosuhteista riippuen. Tuloksia verrattaessa tulee lisäksi huomioida erilaiset arviot maalajin sisältämän orgaanisen typen määrästä. Tämän huomioiminen pienentää entisestään kentällä tapahtuvaa mineralisaatiota suhteessa laborato-

riossa saatuihin tuloksiin. Kenttäolosuhteet ovat myös useiden tekijöiden, kuten pH:n, happitilanteen ja kosteuspitoisuuden osalta mineralisaatioprosesseille epäedullisemmat kuin laboratorio-olosuhteet.

Taulukko 4.2 Mineralisoituvan typen määrän arvio orgaanisen typen määrän perusteella (Bärlund 1992a).

lysimetri	org. N [kg]		1 %			2%		
	pinta	pohja	pinta ¹⁾	pohja ¹⁾	summa ¹⁾	pinta ¹⁾	pohja ¹⁾	summa ¹⁾
L2	2300	110	23	1.2	24.2	47	2.2	49.2
L9	750	620	7.5	6.2	13.7	15	12	27

¹⁾ gN/m⁻³

4.3 Tilastollisten riippuvuuksien tarkastelu

Mineralisaatio oli riippuvainen lämpötilasta ja ajasta lämpötilavälillä 2-15 °C. Näillä tekijöillä oli yhteisvaikutus sekä ammonifikaatioon että nitrifikaatioon jokaisessa tutkitussa maalajissa (taulukko 3.5). Lämpötilalla oli merkittävä vaikutus ammonifikaatioon 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen ainoastaan lysimetrin 2 pohjamaassa. Lämpötila vaikutti ammonifikaatioon inkuboinnin alussa, mutta vaikutus heikkeni ajan kuluessa. Vaikutuksen väheneminen nopeutui lämpötilan kohotessa. Nitrifikaatio käynnistyi matalissa lämpötiloissa hitaammin kuin korkeissa ja siksi ammoniumvarasto pysyi kylmässä maassa suurena pitempään. Ainoastaan lysimetrin 9 pohjamaassa mineralisaatio saavutti tasapainotilan, muiden maalajien osalta 67 vuorokauden inkubointiaika oli liian lyhyt suhteessa käytettyihin alhaisiin lämpötiloihin. Tämä näkyy siinä, että lämpötila säilyi mineralisaatioon vaikuttavana tekijänä koko inkuboinnin ajan (taulukot 3.5a ja 3.5b).

Ajan vaikutus ammonifikaatioon riippui suuresti maalajista ja sen ominaisuuksista (taulukot 3.6a ja 3.6b). Lysimetrin 2 pintamaassa ajan vaikutus päättyi sitä nopeammin mitä korkeammassa lämpötilassa näytteitä inkuboitiin. Pohjamaan am-

monifikaatio oli ajasta riippumaton alle 4.5 °C lämpötiloja lukuunottamatta. Lysimetrin 9 pintamaassa inkubointiaika ei ollut riittävä luotettavien tulosten saamiseksi. Pohjamaassa ajan vaikutus ammonifikaatioon riippui voimakkaasti lämpötilasta. Merkitys väheni nopeasti lämpötilan kasvaessa. Typen kokonaismineralisaatioon ajalla oli samanlainen vaikutus lysimetreissä 2 ja 9.

Polynomianalyysin tulosten mukaan ammonifikaatiota, nitrifikaatiota ja kokonaismineralisaatiota (taulukko 3.9) voitiin kuvata ajan suhteen nollannen kertaluokan kinetiikalla eli lineaarisilla malleilla maalajista ja inkuboilämpötilasta riippumatta. Toisen asteen yhtälöitä voitiin soveltaa lysimetrin 9 pintamaassa ammonifikaation osalta kaikissa lämpötiloissa (taulukko 3.7). Lysimetrin 9 pohjamaata lukuun ottamatta myös nitrifikaatiossa sopivat toisen asteen yhtälöt kaikissa maalajeissa (taulukko 3.8).

4.4 Simulaatiotulosten tarkastelu ja vertailu

Mallien soveltuvuus mineralisaatioprosessien kuvaamiseen riippui voimakkaasti maalajista ja lämpötilasta. Nollannen kertaluokan kinetiikka soveltuu lähinnä kokonaismineralisaation kuvaamiseen. Nitrifikaation riippuvuus ajasta oli sitä lineaarisempi mitä korkeampi inkubointilämpötila oli kyseessä. Toisaalta nyt käytetyt lämpötilat olivat niin alhaiset, ettei mallin soveltuvuudesta ole varmuutta nitrifikaation kannalta optimaalisella lämpötila-alueella 30-35 °C. Myös ensimmäisen kertaluokan kinetiikalla voitiin kokonaismineralisaatiota kuvata melko hyvin. Tällöin potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrällä ei ollut vaikutusta mallin kuvauskykyyn. Nitrifikaation mallinnuksessa eksponenttiyhtälöt toimivat hyvin kaikissa lämpötiloissa ja mallin kuvauskyky parani lämpötilan kohotessa. Ammonifikaatioon ei sopinut kumpikaan nyt käytetty mallikuvaus, sillä ammoniumtypen pitoisuudet alkoivat tietyssä inkuboinnin vaiheessa laskea. Oletettavasti jokin tekijän tuli ammonifikaatiota rajoittavaksi tai nitrifikaatio kulutti ammoniumia nopeammin kuin sitä ehti muodostua. Myöskään Rankisen (1992) tutkimuksessa ei ammonifikaatiota kyetty kuvaamaan ensimmäisen kertaluokan kinetiikalla, kun inkubointi tapahtui 20 °C lämpötilassa. Simuloitujen ja mitattujen tulosten perus-

teella piirrettyjä käyriä arvioitiin ainoastaan silmämääräisesti, eikä mallien kuvauskyvyä ole tarkasteltu yksikäsitteisesti.

Nollannen kertaluokan kinetiikkaa soveltamalla saadut mineralisaatiokertoimet olivat lysimetrin 9 pinta- ja pohjamaassa likimain samansuuruiset niiden erilaisista kemiallisista ominaisuuksista huolimatta. Tämä on sopusoinnussa hyvin Poovarodomin ja Taten (1988) tutkimuksen tuloksiin. Lysimetrin 2 kohdalla pintamaan mineralisaatiokertoimet olivat noin kymmenkertaiset verrattuna pohjakerroksen kertoimiin eri lämpötiloissa (taulukko 3.10), mikä johtuu pintamaan suuresta orgaanisen aineksen määrästä.

Ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa sovellettaessa saatuja tuloksia verrattiin Rankisen (1992) esittämiin kertoimien arvoihin. Niistä nyt saadut kertoimet poikkesivat jonkin verran. Lysimetrin 9 maalajeissa arvot vastasivat hyvin toisiaan, sillä Rankinen (1992) on saanut sen pohjamaan mineralisaatiokertoimelle arvon 0.017, kun potentiaalisesti mineralisoituvan typen määräksi on arvioitu $20 \mu\text{gg}^{-1}$. Nyt käytettiin N_0 -arvona $15 \mu\text{gg}^{-1}$ ja kertoimen arvoksi saatiin 0.016 ($15.0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa). Sen pintamaalle Rankinen (1992) on saanut arvon 0.00047 vrk^{-1} , kun koko orgaanisen typen varasto oletetaan olevan potentiaalisesti mineralisoituvaa. Nyt saatiin vastaavassa kosteudessa ja $15.0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa mineralisaatiokertoimen arvoksi 0.00042 vrk^{-1} . Myös ammonifikaatiokertoimet vastasivat toisiaan hyvin lysimetrin 9 pintamaassa. Rankinen (1992) arvioi ammonifikaatiokertoimen arvoksi 0.00052 vrk^{-1} ja tässä tutkimuksessa päädyttiin lukemaan 0.00058 vrk^{-1} . Molemmissa töissä kertoimet määritettiin vertaamalla laskettuja ja havaittuja tuloksia graafisesti, joten niiden vertailuun on suhtauduttava varauksellisesti. Ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa noudattavien mallien kertoimet olivat eri maalajeissa hyvin lähellä toisiaan, jos arvoja verrataan jokaisessa lämpötilassa erikseen. Se sopii hyvin esimerkiksi Stanford et al:n (1973a) tutkimuksen tuloksiin, sillä he eivät havainneet suuria eroja mineralisaatiokertoimien arvoissa 11 maalajilla, kun mineralisaatio tapahtui suotuisissa kosteusoloissa lämpötilavälillä $5\text{-}35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Mittaustuloksista laskettiin keskimääräiset mineralisaationopeudet eri lämpötiloissa inkuboiduille maalajeille (liite 4). Näitä tuloksia verrattiin lähinnä kirjallisuusarvoihin. Poovarodomin ja Taten (1988) tutkimuksessa havaittiin hiekkamaalajissa +5

°C inkubointilämpötilaa käytettäessä mineralisaationopeus $0.05 \mu\text{gg}^{-1}\text{vrk}^{-1}$ 10 viikon inkubointijaksolla. Yhtä suuri mineralisaationopeus havaittiin nyt lysimetrin 2 pohjamaassa, joka oli karkea hietaa. Muissa maalajeissa mineralisaationopeus oli noin kaksinkertainen johtuen niiden sisältämästä suuresta orgaanisen aineksen määrästä ja mahdollisesta lannoituksesta (liite 4). Samassa Poovarodomin ja Taten (1988) tutkimuksessa mineralisaationopeus nousi nelinkertaiseksi lämpötilan noustessa $+5 \text{ }^\circ\text{C}$:sta $+20 \text{ }^\circ\text{C}$:een. Kussakin käytetyssä lämpötilassa sitä vastoin mineralisaationopeus pysyi koko inkubointiajan suhteellisen vakiona. Yli $0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa mineralisaatio oli nopeinta ensimmäisten kahden viikon aikana, jonka jälkeen se hidastui jonkin maaperän tekijän tullessa mikrobitoimintaa rajoittavaksi. Nyt vasta $15.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ja sitä alempien lämpötilojen (2.0 , 4.5 ja $8.0 \text{ }^\circ\text{C}$) välillä voitiin havaita eroja mineralisaatiokertoimien arvoissa. 4.5 ja $8.0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa mineralisaatiokertoimet olivat lähes identtisiä kunkin maalajin osalta, joskin $2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa mineralisoituminen oli vähäisempää kuin sitä ylemmissä lämpötiloissa. Myös nyt mineralisaatio oli useimmissa tapauksissa nopeinta ensimmäisen ja toisen inkubointijakson aikana (taulukko 3.10, liite 4), mutta mineralisaationopeus myös vaihteli melko paljon. Stanfordin et al:n (1973a) tutkimuksessa keskimääräiseksi lämpötilakertoimeksi (Q_{10}) saatiin 2.1 tai 1.8 maalajista riippuen, kun lämpötila vaihteli välillä $25\text{-}35 \text{ }^\circ\text{C}$. Nyt eri maalajeissa keskimääräisten lämpötilakertoimien (Q_{10}) arvot vaihtelivat välillä 1.3-1.8 siten, että pohjamaissa ne olivat hiukan suurempia kuin pintamaissa. Tämä sopii hyvin sekä Stanfordin et al:n (1973a) että Poovarodomin ja Taten (1988) saamiin tuloksiin ja toisaalta Welchin (1980) esittämään tietoon, jonka mukaan keskimääräisten lämpötilakertoimien arvot saattavat olla kahta pienempiä alle $15 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa. Poovarodom ja Tate (1988) totesivat lisäksi mineralisaation olevan riippuvainen ainoastaan lämpötilasta suotuisten kosteusolosuhteiden vallitessa, kun lämpötila on välillä $5\text{-}35 \text{ }^\circ\text{C}$. Nyt mineralisaatio oli selvästi riippuvainen lämpötilasta vasta sen ollessa suurempi kuin $8.0 \text{ }^\circ\text{C}$.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET JATKOTUTKIMUKSIKSI

Tutkimuksessa kävi ilmi, että alhaiset lämpötilat vaikuttavat epäedullisesti nitrifioivien bakteerien toimintaan. Tällöin vapaata ammoniakkia sekä ammoniumioneja pääsee kertymään maahan. Varsinkin syys- ja talvikuukausien aikana ammonifikaatio on mineralisaatiota hallitseva prosessi nitrifikaatioon verrattuna ja maaperän mineraalisesta tyypestä suurin osa on ammoniumtyyppien muodossa. Koska vapaan ammoniakkin poistuminen maaperästä haihtumalla on matalissa lämpötiloissa vähäistä, estää se osaltaan nitrifikaatiota. Maan kationinvaihtopaikkoihin varastoituneena oleva ammoniumtyyppi ei huuhtoudu valumavesien mukana yhtä helposti kuin maaveteen liuenneet vapaat ionit. Syys- ja talvikaudella maaperä voi siis olla normaalia kosteampi ilman, että typen hävikki huuhtoutumalla lisääntyisi. Lisäksi kohonneen kosteuden myötä alentunut maaperän happipitoisuus siirtää typen prosesseja denitrifikaation suuntaan. Tällöin herkästi huuhtoutuva nitraattityppi pelkistyy molekylaariseksi tyyppi, joka puolestaan poistuu ilmakehään. Keväällä maaperän lämmitessä nitrifikaatioreaktiot voimistuvat ja suuri ammoniumvarasto mahdollistaa jo varhain nopean ja tehokkaan nitrifikaation. Maaperän kosteustaso pystytään palauttamaan edellä kuvatun vuodenaikaisrytmin mukaiseksi säätoimituksen avulla. Tällöin maaperä pidetään kylmänä vuodenaikana kosteana patoamalla ojasto. Keväällä maa kuivatetaan muokkausta ja kylvöä varten avaamalla padot. Ojasto padotaan jälleen kesäkaudeksi ja avataan ainoastaan tarvittaessa, jotta mahdollisimman suuri osa mineralisaatioprosessien tuottamista ravinteista jää kasvien käyttöön eikä huuhtoudu pois pellolta. Maa kuivatetaan syystöitä varten avaamalla ojasto, joka padotaan uudelleen talvea varten.

Alle 5 °C lämpötiloissa tapahtuu nettomineralisaatiota. Tutkimuksen tulosten perusteella arvioituna runsasmultaisessa hiedassa saavutetaan kahden kuukauden aikana jopa 150 kg ha⁻¹ teorettinen nettomineralisaatio 1 metrin maakerroksessa, joka on noin neljäsosa koko 230 vuorokauden pituisen roudattoman kauden aikana tapahtuvasta mineralisaatiosta. Todellisuudessa kenttäolosuhteissa jäädytään alle 100 kg ha⁻¹ m⁻¹ nettomineralisaatioon johtuen muista mineralisaatioon vaikuttavista ympäristötekijöistä. Tutkimuksessa havaittiin lannoitetussa hiesussa lähes yhtä suuri nettomineralisaatio kuin runsasmultaisessa hiedassa. Karkeassa hiedassa mineralisaatio oli nyt heikkoa pienen orgaanisen typen määrän ja mineralisaation

kannalta epäihanteellisen kosteustason vuoksi. Tässä maalajissa mineraalisen typen varasto ei kasvanut $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ suuremmaksi lämpötilan ollessa $2.0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Koejärjestelyissä 2.0 , 4.5 ja $8.0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa ajan tilastollinen vaikutus mineralisaatiotuloksiin säilyi lämpötilasta riippuen jopa koko koejakson. Mineralisaatio saavutti tilastollisen riippumattomuuden ajasta sitä hitaammin mitä matalammasta lämpötilasta oli kysymys. Toisaalta lämpötilan vaikutus mineralisaatioon riippui inkubointiajasta, siten että eri lämpötilojen väliset erot kasvoivat merkittäviksi nopeammin korkeissa kuin matalissa lämpötiloissa. Mineralisaatiokokeiden järjestelyissä tulisikin ottaa huomioon ajan ja lämpötilan välinen yhteys, jolloin vältyttäisiin liian lyhytaikaisilta koejärjestelyiltä. Esimerkiksi tässä tutkimuksessa 67 vuorokauden inkubointi oli ilmeisesti liian lyhyt, jotta mineralisaatiossa olisi havaittu eroja myös alimpien käytettyjen lämpötilojen kohdalla.

Sekä nollannen että ensimmäisen kertaluokan kinetiikka soveltui mineralisaatioprosessien kuvaamiseen. Mineralisaatioprosessit olivat maalajista riippumatta lineaarisesti riippuvaisia ajasta, jolloin niiden oletettiin noudattavan nollannen kertaluokan kinetiikkaa. Lisäksi voitiin kokonaismineralisaatiolle ja nitrifikaatiolle soveltaa ensimmäisen kertaluokan kinetiikkaa siten, että sen kuvauskyky parani maalajista riippumatta lämpötilan kohotessa. Sitä vastoin ammonifikaatiota ei pystytty riittävän hyvin kuvaamaan kummallakaan käytetyistä malleista. Kokonaismineralisaatio voimistui lämpötilan kohotessa maalajista riippumatta, mutta alle $8.0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa mineralisaatio riippui muistakin tekijöistä kuin lämpötilasta. Nyt keskimääräisen lämpötilakertoimen arvot (Q_{10}) eri maalajeissa tulivat keskimäärin 1.3 - 1.8 kertaiseksi jokaista lämpötilassa tapahtuvaa $10 \text{ }^\circ\text{C}$ nousua kohden käytettäessä alle $15 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloja.

Tutkimuksen mukaan hiili-typin -suhde (C/N -suhde) ei ole täysin luotettava tunnusluku kuvaamaan maalajin mineralisaatio-ominaisuuksia. Sitä vastoin pH(vesi) kuvastaa oivallisesti mineralisaation kehittymistä pitkän ajan kuluessa. Toisaalta maaperässä monet kemiallisten ja biokemiallisten reaktioiden tuotteet vaikuttavat pH-arvoon, eikä pH:n maaperämittauksia voida pitää hyvänä osoittimena typen prosessien vallitsevuudesta. Laboratorio-olosuhteissa liian lyhyillä havainnointijaksoilla ja erityisesti matalissa lämpötiloissa vapaan ammoniumin esiintyminen ja

denitrifikaatio aiheuttavat pH:n kohoamista. Yleisesti pH(vesi) laskee mineraalisen typen määrän kasvaessa, kun nitrifikaation on vallitseva reaktio.

Nyt suoritettujen tutkimusten lisäksi tarvittaisiin laboratorio- ja kenttätutkimuksia kosteuden ja lämpötilan yhteisvaikutuksista. Näiden tutkimusten tulisi olla ajallista kestoltaan riittävän pitkiä ja lämpötila-alueeltaan kattavia, jotta eri vuodenaikoina vallitsevat olosuhteet tulisi testattua. Lisäksi tarvitaan tietoja niistä lannoituksen maaperäolosuhteita muuttavista tekijöistä, jotka saattavat vaikuttaa mineralisaatioon. Myös talvikuukausien aikana ja erityisesti roudan muodostuksen yhteydessä typen kiertoon vaikuttavia tekijöitä olisi tutkittava.

6 YHTEENVETO

Tutkimus lämpötilan vaikutuksesta typen mineralisaatioon on osa Teknillisen korkeakoulun (TKK) vesitalouden laboratorion tutkimusprojektia, jossa selvitetään typen eri muotojen määriä ja prosesseja maaperässä sekä niihin vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi pyritään arvioimaan typen huuhtoumaa. Tietojen avulla pyritään pienentämään maataloudesta aiheutuvan ravinnekuormituksen määrää esimerkiksi ohjaamalla mineralisaatioon vaikuttavia tekijöitä säätöojituksen avulla.

Tutkimuksessa käytettiin neljää eri maalajia, jotka kerättiin vesitalouden laboratorion Otaniemen lysimetrikentältä joulukuussa 1991. Lysimetreistä 2 ja 9 otettiin molemmista sekä pinta- että pohjamaata, jotka olivat luokitukseltaan runsasmultaista hienoa hietaa (L2 ja L9 pintamaat), karkeaa hietaa (L2 pohjamaa) sekä hiesua (L9 pohjamaa). Koejärjestelyn mukaisesti maalajeja inkuboitiin neljässä eri vakiolämpötilassa (2.0, 4.5, 8.0, 15.0 °C), kun niiden kosteuspitoisuudet oli säädetty mahdollisimman ihanteellisiksi typen mineralisaation kannalta. Näytteitä inkuboitiin aerobeissa oloissa 11, 25, 39 ja 67 vuorokautta, siten että jokaisen inkubointijakson jälkeen kustakin lämpötilasta ja maalajista valittiin satunnaisesti kolme näytettä laboratorioanalyysjä varten. Kerrannaisista mitattiin ammoniumtypen pitoisuus sekä nitriitti- ja nitraattitypen summa. Lisäksi mitattiin pH-arvot vesi- ja kalsiumkloridispersiosta sekä tarkistettiin näytteen kosteuspitoisuus. Tilastollisessa testauksessa käytettiin monimuuttujavarianssianalyysiä, yksisuuntaista varianssianalyysiä sekä polynomianalyysiä. Mineralisaatioprosesseja ajan suhteen kuvattiin sekä lineaarisilla että eksponentiaalisilla riippuvuuksilla. Suurimmat häiriöt aineiston luotettavuuteen aiheutuivat muutamien näytteiden jäätymisestä ensimmäisen inkubointijakson aikana koejärjestelyn alimmassa 2.0 °C lämpötilassa.

Mineraalista typpeä kerääntyi eniten maalajista riippumatta niihin näytteisiin, joita pidettiin 15.0 °C lämpötilassa. Vastaavasti vähiten sitä muodostui maalajista riippuen 2.0 tai 4.5 °C lämpötiloissa inkuboiduissa näytteissä. Nettomineralisaatio oli voimakkainta eniten orgaanista ainesta sisältäneessä maalajissa, lysimetrin 2 pintamaassa. Siinä nettomineralisaatio oli 67 vuorokauden jälkeen 25.8 $\mu\text{g g}^{-1}$. Muissa maalajeissa suurimmat nettomineralisaatiot olivat 15.4 $\mu\text{g g}^{-1}$ (L9 pohjamaa), 10.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ (L9 pintamaa) sekä 2.7 $\mu\text{g g}^{-1}$ (L2 pohjamaa). Nettomineralisaatio vaihteli

siis eri maalajeissa 15.0 °C lämpötilassa välillä 222 kg $ha^{-1}m^{-1}$ (L2 pintamaa) -40 kg $ha^{-1}m^{-1}$ (L2 pohjamaa). Mineraalisen typen määrä oli lähes aina suoraan verrannollinen maalajista mitattujen orgaanisen hiilen ja typen määriin.

Ammoniumtypen kerääntyminen oli suurempaa alhaisissa lämpötiloissa pidetyissä näytteissä kuin 8.0 ja 15.0 °C inkuboiduissa näytteissä. Tämä havaittiin kaikissa maalajeissa. Ammoniumtypen pitoisuuden muutos verrattuna sen alkupitoisuuteen oli 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen suurin lysimetrin 2 pintamaassa, jossa se oli 17.3 $\mu g g^{-1}$. Samassa näytteessä havaittiin ainoastaan 4.0 $\mu g g^{-1}$ nettonitrifikaatio. Nitraattitypen pitoisuuden kehittyminen oli ammoniumin pitoisuuden kasvua voimakkaampaa korkeissa lämpötiloissa. Lysimetrin 9 pintamaassa oli nitraattipitoisuuden muutos 9.5 $\mu g g^{-1}$ ja ammoniumpitoisuuden 0.74 $\mu g g^{-1}$, kun maata oli inkuboitu 67 vuorokautta 15.0 °C lämpötilassa. Yleisesti ammonifikaatioreaktiot hallitsivat mineralisaatiota 2.0, 4.5 ja 8.0 °C lämpötiloissa nitrifikaation ollessa vallitseva prosessi 15.0 °C lämpötilassa.

Sekä vesi- että kalsiumsuspensioista mitatut pH-arvot seurasivat hyvin mineraalisen typen pitoisuuden kehittymistä näytteissä. Nyt tarkastelussa käytettiin pH(vesi) -arvoja, jotka alenivat mineraalisen typen määrän kasvaessa. Tämä osoitti nitrifikaation olevan mineralisaatiota vallitseva reaktio lämpötilasta ja maalajista riippuen lähes koko inkuboinnin ajan. Alin näytteistä mitattu pH(vesi) -arvo oli lysimetrin 2 pintamaassa, missä se oli 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen 5.31. pH ei siis ollut mineralisaatiota rajoittava tekijä missään maalajissa koko inkuboinnin aikana.

Ajalla ja lämpötilalla oli merkittävä tilastollinen yhteisvaikutus ammonifikaatioon, nitrifikaatioon sekä kokonaismineralisaatioon kaikissa maalajeissa. Tutkittaessa lämpötilan tilastollista vaikutusta ammonifikaatioon havaittiin, että sillä oli merkittävä vaikutus 67 vuorokauden jälkeen ainoastaan lysimetrin 2 pohjamaassa. Nitrifikaatioon lämpötilalla oli merkittävä vaikutus 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen kaikissa muissa maalajeissa, paitsi lysimetrin 9 pohjamaassa (hiesu). Kokonaismineralisaatioon lämpötila vaikutti kuten nitrifikaatioon. Karkeassa hiedassa (L2 pohjamaa) ja runsasmultaisessa hienossa hiedassa (L2 ja L9 pintamaa) lämpötilan vaikutus mineralisaatioon kasvoi inkubointiajan pidentyessä. Ajan vaikutus ammonifikaatioon 67 vuorokauden inkuboinnin jälkeen oli vaihtelevaa.

Ajan tilastollinen vaikutus oli kuitenkin päättynyt hiesussa (L9 pohjamaa) ja karkeassa hiedassa (L2 pohjamaa) sitä myöhemmin mitä korkeammassa lämpötilassa näytteitä oli pidetty. Nitrifikaatioon ajalla oli merkittävä vaikutus kaikissa maalajeissa ja jokaisella lämpötilalla kokeiden päättyessä. Myös typen kokonaismineralisaatioon lämpötilalla oli merkittävä vaikutus. Ajan vaikutus lyheni inkubointilämpötilan kasvaessa lysimetrin 2 pintamaassa. Muissa maalajeissa vaikutus oli merkittävä lähes koko ajan lämpötilasta riippumatta.

Nitrifikaatiota ja kokonaismineralisaatiota voitiin kuvata sekä nollannen että ensimmäisen kertaluokan kinetiikalla. Lineaariset yhtälöt, jotka vastaavat nollannen kertaluokan kinetiikkaa soveltavia malleja, sopivat hyvin kokonaismineralisaation kuvaamiseen. Nitrifikaation mallinnukseen ne sopivat sitä paremmin mitä korkeammasta lämpötilasta oli kysymys. Myös ensimmäisen kertaluokan kinetiikka kuvasi hyvin nitrifikaatiota ja kokonaismineralisaatiota. Ensimmäisen kertaluokan soveltuvuudessa ei havaittu eroja sen suhteen, että käytettiinkö potentiaalisesti mineralisoituvan typen varastona koko orgaanisen typen varastoa vai vain osaa siitä. Kumpikaan käytetyistä mallityypeistä ei kuvannut kuin välttävästi ammonifikaatiota. Lineaarisissa malleissa kokonaismineralisaatiota kuvaavat kertoimet vaihtelivat arvosta $0.36 \mu\text{gg}^{-1}\text{vrk}^{-1}$ (L2 pintamaa $15.0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa) arvoon $0.019 \mu\text{gg}^{-1}\text{vrk}^{-1}$ (L2 pohjamaa $4.5 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa). Ensimmäisen kertaluokan kinetiikassa kertoimien vaihteluväli oli kokonaismineralisaatiossa $0.000209 \text{ vrk}^{-1}$ (L9 pintamaa $2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa) - $0.000782 \text{ vrk}^{-1}$ (L2 pohjamaa $15.0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa), kun koko orgaaniset typen varasto oletetaan potentiaalisesti mineralisoituvaksi. Mineralisaationopeuksien ja malleissa käytettyjen kertoimien osalta tulokset olivat yhtenevät vastaavan tyyppisiin tutkimuksiin verrattuna. Mineralisaatio oli selvästi riippuvainen lämpötilasta vasta yli $8.0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa, mikä poikkeaa hieman aikaisempien tutkimuksien tuloksista. Keskimääräisen lämpötilankertoimen arvo (Q_{10}) vaihteli maalajeittain välillä 1.3-1.8.

Tutkimuksen keskeisiä tuloksia olivat ammonifikaation vallitsevuus mineralisaatiossa kylmässä maassa sekä varsin suuri kokonaismineralisaatio jo matalissa lämpötiloissa. Nitrifikaation ei tässä tutkimuksessa havaittu suosivan alhaisia lämpötiloja, vaikka hapetusprosessit olivatkin selvästi käynnissä. Tulosten perusteella voidaan säätöojitusta hyödyntää typen huuhtoumien pienentämisessä, kun

voidaan pitää hyvin kosteana, jolloin kylmään maahan keräytyy ammoniumtyypeä ja toisaalta denitrifikaatio pelkistää helposti huuhtoutuvan nitraatin molekylaariseksi typeksi. Kasvukauden alussa suuri ammoniumtypen varasto edistää nitrifikaation nopeaa käynnistymistä, jota kuivatus ja muokkaus tehostavat lisääntyneen happipitoisuuden muodossa.

Nyt suoritettujen tutkimusten lisäksi tarvittaisiin laboratorio- ja kenttätutkimuksia kosteuden ja lämpötilan yhteisvaikutuksista mineralisaatiossa. Näiden tutkimusten tulisi olla ajalliselta kestoaltaan riittävän pitkiä ja lämpötila-alueeltaan kattavia, jotta eri vuodenaikoina vallitsevat olosuhteet tulisi testattua. Lisäksi tarvitaan tietoja niistä lannoituksen maaperäolosuhteita muuttavista tekijöistä, jotka saattavat vaikuttaa mineralisaatioon. Myös talvikuukausien aikana ja erityisesti roudan muodostuksen yhteydessä typen kiertoon vaikuttavia tekijöitä olisi tutkittava.

LÄHDELUETTELO

- Addiscott, T. M. 1983. Kinetics and Temperature Relationships of Mineralization and Nitrification in Rothamsted Soils with Differing Histories. *Journal of Soil Science*, vol. 34, pp. 343-353.
- Ahonen, J. 1991. Säätoojituksen ja pohjavesikastelun käyttö ja soveltuvuus Suomessa. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, vesitalouden laboratorio. 63 s. Diplomityö.
- Anderson, O. E. 1960. The Effect of Low Temperatures on Nitrification of Ammonia in Cecil Sandy Loam. *Soil Science Society of America Proceedings*, No. 24, pp. 286-289.
- ANON. 1983-1987. Tecator 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. GLO-85, Geotekniset laboratorio-ohjeet, I luokituskokeet. Helsinki, Suomen geoteknillinen Yhdistys ry and Rakentajain Kustannus Oy.
- ANON. 1985. Talousveden terveydellisen laadun valvonta. Lääkintöhallituksen yleiskirje no. 1862. Helsinki, Lääkintöhallitus. 17 s.
- Black, E. A. 1982. *Methods of Soil Analysis, Part 1*. Madison, American Society of Agronomy Inc., USA. 770 p. Agronomy No. 9.
- Bärlund, I. 1992a. Typen fraktiot ja huuhtoutuminen maaperässä. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, vesitalouden laboratorio. Diplomityö. 89 s.
- Bärlund, I. 1992b. Typpitutkimuksen koejärjestelyt ja havaintoaineisto TKK:n lysimetrikentällä toukokuu 1990-toukokuu 1991. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, vesitalouden laboratorio. Erikoistyö. 25 s.

- Cabrera, M. L., Kiessel, D. E. 1988. Potentially Mineralizable Nitrogen in Disturbed and Undisturbed Soil Samples. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 52, pp. 1010-1015.
- Campbell, C. A., Biederbeck, V. O., Warder, F. G. 1971. Influence of Simulated Fall and Spring Conditions on the Soil System: Effect on Soil Nitrogen. *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol. 35, pp. 480-483.
- Campbell, C. A., Biederbeck, V. O. 1972. Influence of Fluctuating Temperatures and Constant soil Moistures on Nitrogen Changes in Amended and Unamended Loam. *Canadian Journal of Soil Science*, Vol. 52, pp. 323-326.
- Chapman, H. D. 1965. Cation-exchange Capacity. *Soil Analysis, Part 1*. Ed. by E. A. Black. Madison, American Society of Agronomy Inc., USA. 770 p. Agronomy No. 9.
- Chen, Y., Avnimelech, Y. 1986. *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*. Dordrecht, Martinus Nijhoff Publishers. ISBN 90-247-3360-x
- Craswell, E., T., Waring, S., A. 1972. Effect of Grinding on the Decomposition of Soil Organic Matter. I. The Mineralization of Organic Nitrogen in Relation of Soil Type. *Soil Biology Biochemistry*, No. 4, pp. 427-433.
- Emteryd, O. 1989. *Chemical and Physical Analysis of Inorganic Nutrients in Plant, Soil, Water and Air*. Umeå, Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för Skoglig Ståndorts-lära. Stencil No. 10. 181 p.
- Firestone, M., K. 1982. Biological Denitrification. *Nitrogen in Agricultural Soils*. Ed. by F. I. Stevenson. Madison, American Society of Agronomy. 937 p. Agronomy No. 22
- Hesse, P. R. 1971. *Textbook of Soil Chemical Analysis*. London, John Murray Publishers Ltd. 520 p.

- Ilmatieteenlaitos 1989. Suomen meteorologinen vuosikirja, osa 1 - 1988. Helsinki, Valtion painatuskeskus. ISBN 951-697-303-5.
- Andnsson, S. L., Persson, J. 1982. Mineralization and Immobilization of Soil Nitrogen. Julk: Stevenson, F. I. (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Madison, American Society of Agronomy. 937 p. Agronomy no. 22
- Karvonen, T., Paasonen-Kivekäs, M., Vakkilainen, P. 1989. Nitrogen movement, transformation and uptake by plant roots. Helsinki, University of Technology, laboratory of hydrology and water resources engineering. 21 p. Exercise.
- McLean, E. O. 1982. Soil pH and Lime Requirement. Page, A. L. (ed.). Methods of Soil Analysis, Part 2. Madison, American Society of Agronomy. pp. 199-224. Agronomy No. 9. 2nd edition.
- Paul, E. A., Clark, F. E. 1989. Soil Microbiology and Biochemistry. San Diego, Academic Press Inc.. ISBN 0-12-546805-9
- Poovarodom, S., Tate, R. L. III 1988. Nitrogen Mineralization Rates of the Acidic, Xeric Soils of the New Jersey Pinelands: Laboratory Studies. Soil Science, Vol. 145, No. 5, pp. 337-344.
- Ränkinen, K. 1992. Kosteuden vaikutus typen mineralisaatioon maaperässä. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, vesitalouden laboratorio. Diplomityö.
- Sabey, B. R., Bartholomew, W. V., Shaw, R., Pesek, J. 1954. Influence of Temperature on Nitrification in Soils. Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 20, pp. 357-360.
- Schmidt, E., L. 1982. Nitrification in Soil. Julk: Stevenson, F. I. (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Madison, American Society of Agronomy. 937 p. Agronomy No. 22
- Seneviratne, R., Wild, A. 1985. Effect of Mild Drying on the Mineralization of Soil Nitrogen. Plant Soil, Vol. 84. pp. 175-179.

- Stanford, G., Smith, J. J. 1972. Nitrogen Mineralization Potentials of Soils. Soil Science Society American Journal, Vol. 36. pp. 103-107.
- Stanford, G., Frere, M. H., Schwaninger, D. H. 1973a. Temperature Coefficient of Soil Nitrogen Mineralization. Soil Science, Vol. 115, pp. 321-323.
- Stanford, G., Frere, M. H., Pol van der, R. A. 1973b. Effect of Fluctuating Temperatures on Soil Nitrogen Mineralization. Soil Science, Vol. 119, No. 3, pp. 222-226.
- Stanford, G., Carter, J. N., Smith, J. J. 1974. Estimates of Potentially Mineralizable Soil Nitrogen Based on Short-term Incubations. Soil Science Society of America Journal, Vol. 38, pp. 99-102.
- Stevenson, F., J. 1982. Origin and Distribution of Nitrogen in Soil. Julk: Stevenson, F. I. (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Madison, American Society of Agronomy. 937 p. Agronomy No. 22.
- Vakkilainen, P. 1982. Maa-alueilta tapahtuvan haihdunnan arvioinnista. Acta Universitatis Ouluensis, Series C, Technica No. 20, Oulun yliopisto, Vesirakennustekniikan laitos. Väitöskirja.
- Welch, E. B. 1980. Ecological effects of waste water. Westford, Cambridge University Press. 337 p. ISBN 0521-29525-4.
- Tyler, K. B., Broadbent, F. E., Hill, G. N. 1959. Low Temperature Effects on Nitrification in Four Californian Soils. Soil Science, No. 78, pp. 123-129.
- Young, J. L., Aldag, R. W. 1982. Inorganic Forms of Nitrogen in Soil. Julk: Stevenson, F. I. (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Madison, American Society of Agronomy. 937 p. Agronomy No. 22.

LIITE		Sivu
1/1	Taulukko 1a. Ammonium- ja nitraattipitoisuus sekä niiden summa lysimetrin 2 pintamaassa. Aika on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuus mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.	73
1/2	Taulukko 1b. Ammonium- ja nitraattipitoisuus sekä niiden summa lysimetrin 2 pohjamaassa. Aika on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuus mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.	74
1/3	Taulukko 1c. Ammonium- ja nitraattipitoisuus sekä niiden summa lysimetrin 9 pintamaassa. Aika on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuus mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.	75
1/4	Taulukko 1a. Ammonium- ja nitraattipitoisuus sekä niiden summa lysimetrin 9 pohjamaassa. Aika on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuus mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.	76
2/1	Kuva 1. Mineralisaation profiilit lämpötilan suhteen eri inkubointijaksoilla ja maalajeissa. Kuvassa on esitetty profiilit lysimetrin 2 pohjamaassa (A) ja pintamaassa (B) sekä lysimetrin 9 pohjamaassa (C) ja pintamaassa (D).	77
3/1	Kuva 2a. pH(vesi)- arvot eri maalajeissa. Kuvassa on esitetty arvojen kehittyminen lysimetrin 2 pintamaassa (A) ja pohjamaassa (B) sekä lysimetrin 9 pintamaassa (C) ja pohjamaassa (D).	78
3/2	Kuva 2b. pH(CaCl ₂)- arvot eri maalajeissa. Kuvassa on esitetty arvojen kehittyminen lysimetrin 2 pintamaassa (A) ja pohjamaassa (B) sekä lysimetrin 9 pintamaassa (C) ja pohjamaassa (D).	79
4/1	Taulukko 2a. Mittaustulosten perusteella lasketut nopeudet ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle lysimetrin 2 pintamaassa. Aikaväli on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuusmuutos mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.	80

- 4/2 **Taulukko 2a.** Mittaustulosten perusteella lasketut nopeudet ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle lysimetrin 2 pohjamaassa. Aikaväli on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuusmuutos mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa. 81
- 4/3 **Taulukko 2c.** Mittaustulosten perusteella lasketut nopeudet ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle lysimetrin 9 pintamaassa. Aikaväli on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuusmuutos mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa. 82
- 4/4 **Taulukko 2d.** Mittaustulosten perusteella lasketut nopeudet ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle lysimetrin 9 pohjamaassa. Aikaväli on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuusmuutos mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa. 83
- 5/1 **Kuva 3a.** Mitatut ja simuloidut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrin 2 pintamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 84
- 5/2 **Kuva 3b.** Mitatut ja simuloidut nitraattityypen pitoisuudet lysimetrin 2 pintamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 85
- 5/3 **Kuva 3c.** Mitatut ja simuloidut mineraalityypen pitoisuudet lysimetrin 2 pintamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 86
- 5/4 **Kuva 3d.** Mitatut ja simuloidut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrin 2 pohjamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 87
- 5/5 **Kuva 3e.** Mitatut ja simuloidut nitraattityypen pitoisuudet lysimetrin 2 pohjamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 88
- 5/6 **Kuva 3f.** Mitatut ja simuloidut mineraalityypen pitoisuudet lysimetrin 2 pohjamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 89

- 5/7 **Kuva 3g.** Mitatut ja simuloidut ammoniumtypen pitoisuudet lysimetrin 9 pintamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 90
- 5/8 **Kuva 3h.** Mitatut ja simuloidut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pintamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 91
- 5/9 **Kuva 3i.** Mitatut ja simuloidut mineraalitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pintamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 92
- 5/10 **Kuva 3j.** Mitatut ja simuloidut ammoniumtypen pitoisuudet lysimetrin 9 pohjamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 93
- 5/11 **Kuva 3k.** Mitatut ja simuloidut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pohjamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 94
- 5/12 **Kuva 3l.** Mitatut ja simuloidut mineraalitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pohjamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 95
- 6/1 **Kuva 4a.** Mitatut ja simuloidut ammoniumtypen pitoisuudet lysimetrin 2 pintamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 96
- 6/2 **Kuva 4b.** Mitatut ja simuloidut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 2 pintamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 97
- 6/3 **Kuva 4c.** Mitatut ja simuloidut mineraalitypen pitoisuudet lysimetrin 2 pintamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 98

- 6/4 **Kuva 4d.** Mitatut ja simuloidut ammoniumtypen pitoisuudet lysimetrin 2 pohjamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 99
- 6/5 **Kuva 4e.** Mitatut ja simuloidut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 2 pohjamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 100
- 6/6 **Kuva 4f.** Mitatut ja simuloidut mineraalitypen pitoisuudet lysimetrin 2 pohjamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 101
- 6/7 **Kuva 4g.** Mitatut ja simuloidut ammoniumtypen pitoisuudet lysimetrin 9 pintamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 102
- 6/8 **Kuva 4h.** Mitatut ja simuloidut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pintamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 103
- 6/9 **Kuva 4i.** Mitatut ja simuloidut mineraalitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pintamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 104
- 6/10 **Kuva 4j.** Mitatut ja simuloidut ammoniumtypen pitoisuudet lysimetrin 9 pohjamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 105
- 6/11 **Kuva 4k.** Mitatut ja simuloidut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pohjamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa. 106

6/12

Kuva 4l. Mitatut ja simuloidut mineraalitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pohjamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.

107

Taulukko 1a. Ammonium- ja nitraattipitoisuus sekä niiden summa lysimetrin 2 pintamaassa. Aika on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuus mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.

Lämpötila [°C]	Aika [d]	Ammonium [μgg ⁻¹]	Nitraatti [μgg ⁻¹]	Summa [μgg ⁻¹]
2.0	0	19,27	1,79	21,06
	11	16,50	1,97	18,47
	25	24,24	2,33	26,57
	39	29,96	3,03	32,99
	67	33,40	5,08	38,48
4.5	0	19,27	1,79	21,06
	11	19,31	2,37	21,68
	25	26,81	3,40	31,21
	39	30,26	3,65	33,91
	67	34,48	8,60	43,08
8.0	0	19,27	1,79	21,06
	11	21,00	2,33	23,33
	25	30,93	3,62	34,55
	39	33,90	4,64	38,54
	67	34,48	8,60	43,08
15.0	0	19,27	1,79	21,06
	11	27,61	3,41	31,02
	25	36,39	5,87	42,26
	39	35,23	7,48	42,71
	67	34,73	12,14	46,87

Taulukko 1b. Ammonium- ja nitraattipitoisuus sekä niiden summa lysimetrin 2 pohjamaassa. Aika on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuus mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.

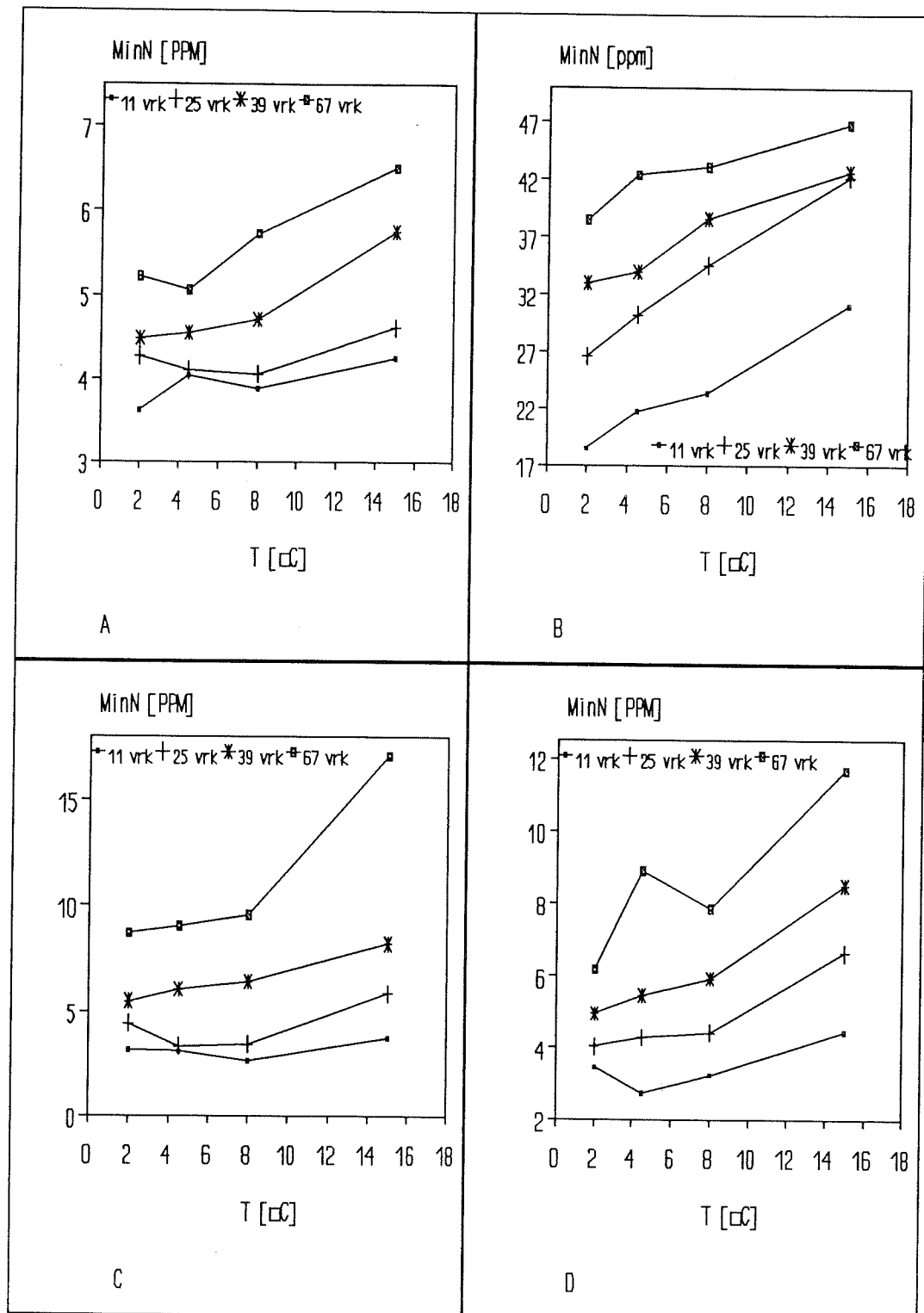
Lämpötila [°C]	Aika [d]	Ammonium [μgg ⁻¹]	Nitraatti [μgg ⁻¹]	Summa [μgg ⁻¹]
2.0	0	2,92	0,91	3,83
	11	2,82	0,79	3,61
	25	3,26	1,01	4,27
	39	3,62	0,86	4,48
	67	3,50	1,72	5,22
4.5	0	2,92	0,91	3,83
	11	3,21	0,83	4,04
	25	3,14	0,96	4,10
	39	3,55	1,00	4,55
	67	3,31	1,75	5,06
8.0	0	2,92	0,91	3,83
	11	3,02	1,04	4,05
	25	3,01	1,04	4,05
	39	3,45	1,25	4,70
	67	2,35	3,37	5,72
15.0	0	2,92	0,91	3,83
	11	3,19	1,05	4,24
	25	3,03	1,58	4,61
	39	2,79	2,95	5,74
	67	0,80	5,70	6,50

Taulukko 1c. Ammonium- ja nitraattipitoisuus sekä niiden summa lysimetrin 9 pintamaassa. Aika on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuus mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.

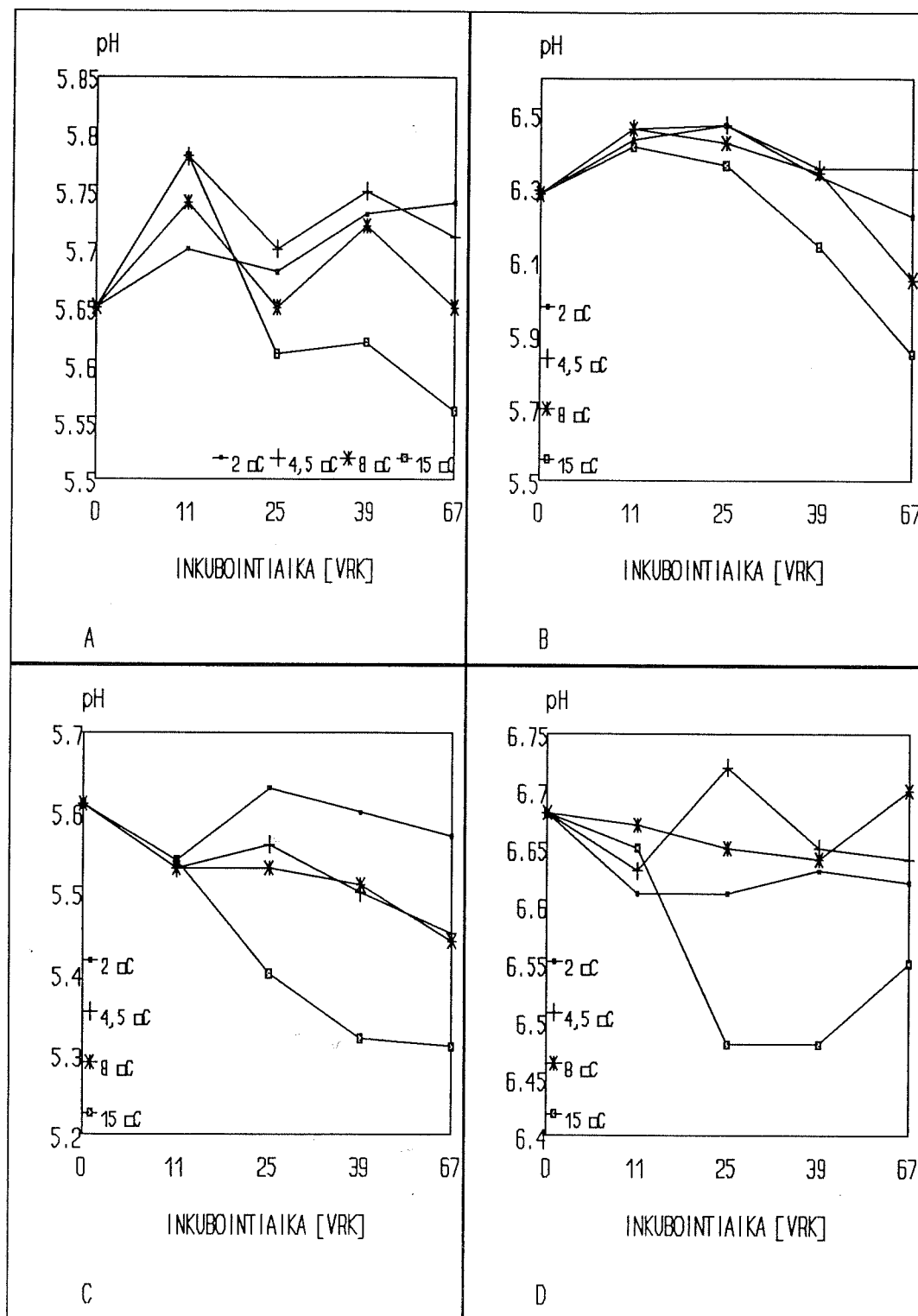
Lämpötila [°C]	Aika [d]	Ammonium [μgg ⁻¹]	Nitraatti [μgg ⁻¹]	Summa [μgg ⁻¹]
2.0	0	0,04	1,36	1,40
	11	2,17	1,28	3,45
	25	1,98	2,05	4,03
	39	1,68	3,27	4,95
	67	1,66	4,52	6,18
4.5	0	0,04	1,36	1,40
	11	1,03	1,70	2,73
	25	1,20	3,09	4,29
	39	1,54	3,91	5,45
	67	1,39	7,50	8,89
8.0	0	0,04	1,36	1,40
	11	1,28	1,95	3,23
	25	1,15	3,27	4,42
	39	1,37	4,56	5,93
	67	1,23	6,62	7,85
15.0	0	0,04	1,36	1,40
	11	1,49	2,95	4,44
	25	0,97	5,67	6,64
	39	1,00	7,48	8,48
	67	0,78	10,89	11,67

Taulukko 1d. Ammonium- ja nitraattipitoisuus sekä niiden summa lysimetrin 9 pohjamaassa. Aika on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuus mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.

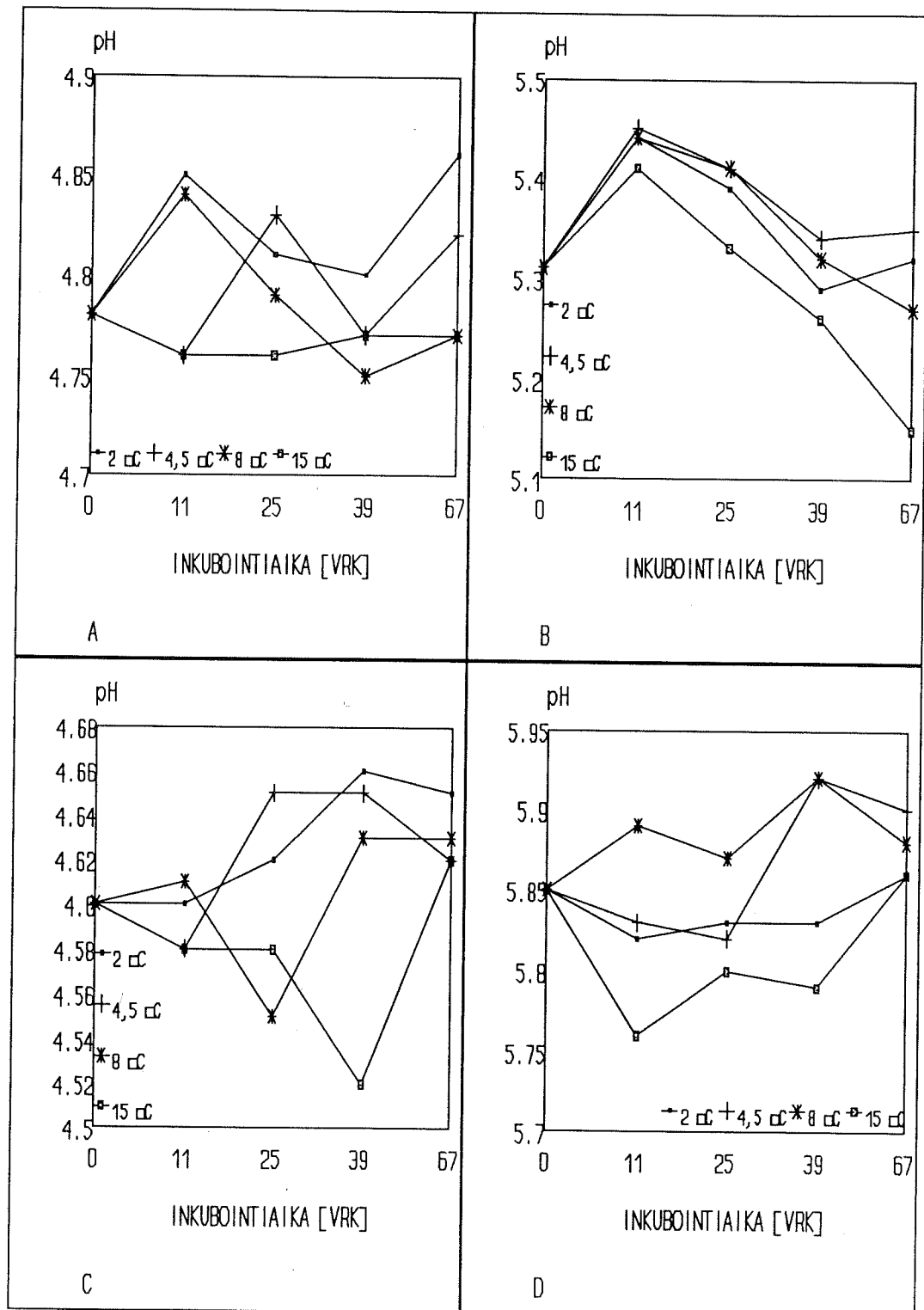
Lämpötila [°C]	Aika [d]	Ammonium [µgg ⁻¹]	Nitraatti [µgg ⁻¹]	Summa [µgg ⁻¹]
2.0	0	0,00	1,68	1,68
	11	0,69	2,45	3,14
	25	0,63	3,79	4,42
	39	0,63	4,84	5,47
	67	0,50	8,19	8,69
4.5	0	0,00	1,68	1,68
	11	0,37	2,69	3,06
	25	0,48	5,27	6,02
	39	0,75	5,27	6,02
	67	0,74	8,30	9,04
8.0	0	0,00	1,68	1,68
	11	0,27	2,34	2,61
	25	0,52	2,90	3,42
	39	0,77	5,63	6,40
	67	0,53	9,01	9,54
15.0	0	0,00	1,68	1,68
	11	0,72	3,00	3,72
	25	0,32	5,53	5,85
	39	0,81	7,40	8,21
	67	0,70	16,40	17,10



Kuva 1. Mineralisaation profiilit lämpötilan suhteen eri inkubointijaksoilla ja maalajeissa. Kuvassa on esitetty profiilit lysimetrin 2 pohjamaassa (A) ja pintamaassa (B) sekä lysimetrin 9 pohjamaassa (C) ja pintamaassa (D).



Kuva 2a. pH(vesi)- arvot eri maalajeissa. Kuvassa on esitetty arvojen kehittymisen lysimetrien 2 pintamaassa (A) ja pohjamaassa (B) sekä lysimetrien 9 pintamaassa (C) ja pohjamaassa (D).



Kuva 2b. pH(CaCl₂)- arvot eri maalajeissa. Kuvassa on esitetty arvojen kehittymisen lysimetrien 2 pintamaassa (A) ja pohjamaassa (B) sekä lysimetrien 9 pintamaassa (C) ja pohjamaassa (D).

Taulukko 2a. Mittaustulosten perusteella lasketut nopeudet ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle lysimetrin 2 pintamaassa. Aikaväli on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuusmuutos mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.

Lämpötila [°C]	Aikaväli [d]	Ammonifikaatio [μgg ⁻¹ vrk ⁻¹]	Nitrifikaatio [μgg ⁻¹ vrk ⁻¹]	Kok.mineralisaatio [μgg ⁻¹ vrk ⁻¹]
2.0	0-11	-0,252	0,016	-0,235
	11-25	0,553	0,026	0,579
	25-39	0,409	0,050	0,459
	39-67	0,123	0,073	0,196
4.5	0-11	0,004	0,053	0,056
	11-25	0,534	0,074	0,609
	25-39	0,246	0,018	0,264
	39-67	0,225	0,078	0,303
8.0	0-11	0,157	0,049	0,206
	11-25	0,709	0,092	0,801
	25-39	0,212	0,073	0,285
	39-67	0,021	0,141	0,162
15.0	0-11	0,758	0,147	0,905
	11-25	0,627	0,176	0,803
	25-39	-0,083	0,115	0,032
	39-67	-0,018	0,166	0,149

Taulukko 2b. Mittaustulosten perusteella lasketut nopeudet ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle lysimetrin 2 pohjamaassa. Aikaväli on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuusmuutos mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.

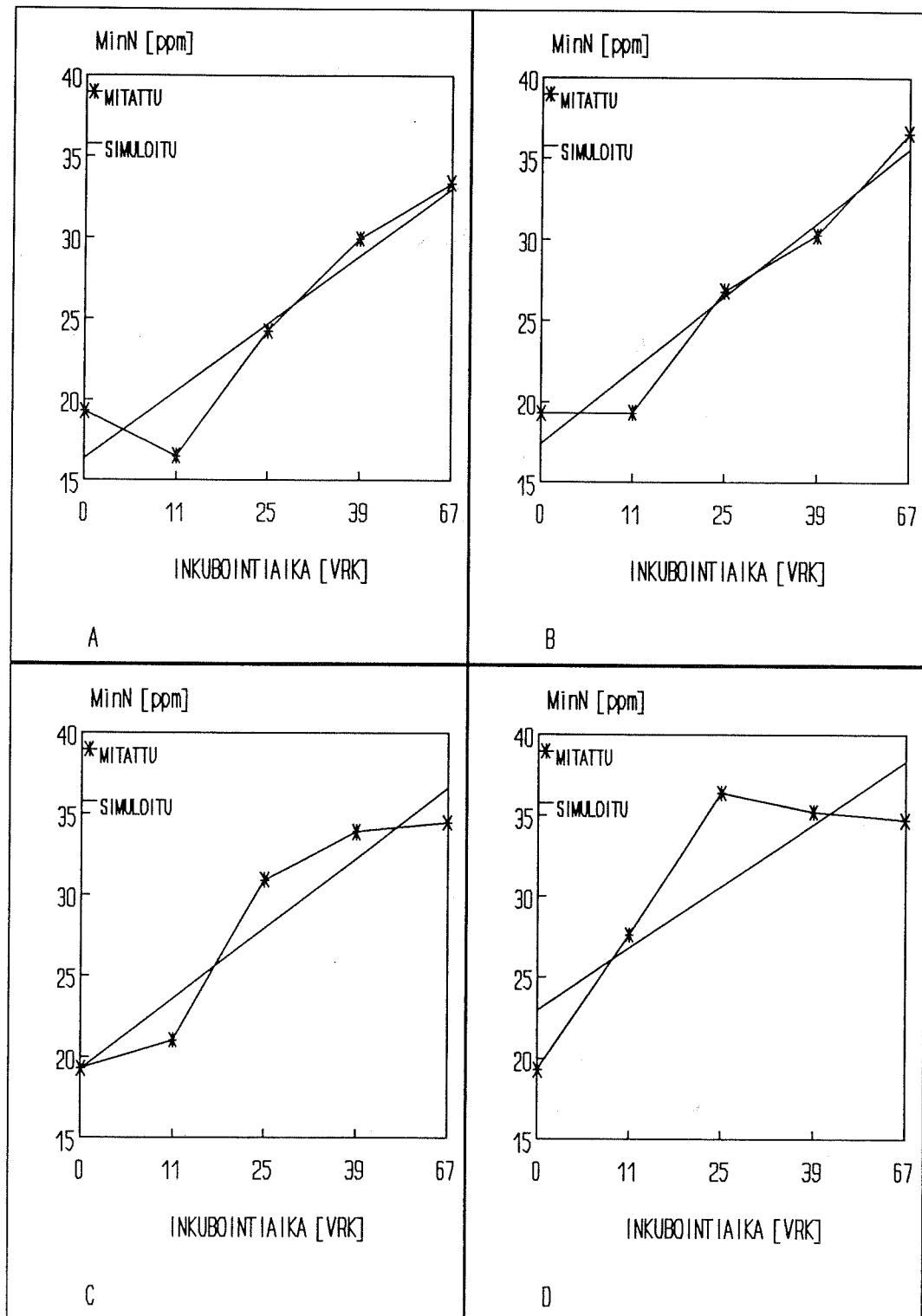
Lämpötila [°C]	Aikaväli [d]	Ammonifikaatio [µgg ⁻¹ vrk ⁻¹]	Nitrifikaatio [µgg ⁻¹ vrk ⁻¹]	Kok.mineralisaatio [µgg ⁻¹ vrk ⁻¹]
2.0	0-11	-0,009	-0,011	-0,020
	11-25	0,031	0,016	0,047
	25-39	0,026	-0,011	0,015
	39-67	-0,004	0,031	0,026
4.5	0-11	0,026	-0,007	0,019
	11-25	-0,005	0,009	0,004
	25-39	0,029	0,003	0,032
	39-67	-0,009	0,027	0,018
8.0	0-11	0,009	-0,005	0,005
	11-25	-0,001	0,013	0,012
	25-39	0,031	0,015	0,046
	39-67	-0,039	0,076	0,036
15.0	0-11	0,025	0,013	0,037
	11-25	-0,011	0,038	0,026
	25-39	-0,017	0,098	0,081
	39-67	-0,071	0,098	0,027

Taulukko 2c. Mittaustulosten perusteella lasketut nopeudet ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle lysimetrin 9 pintamaassa. Aikaväli on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuusmuutos mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.

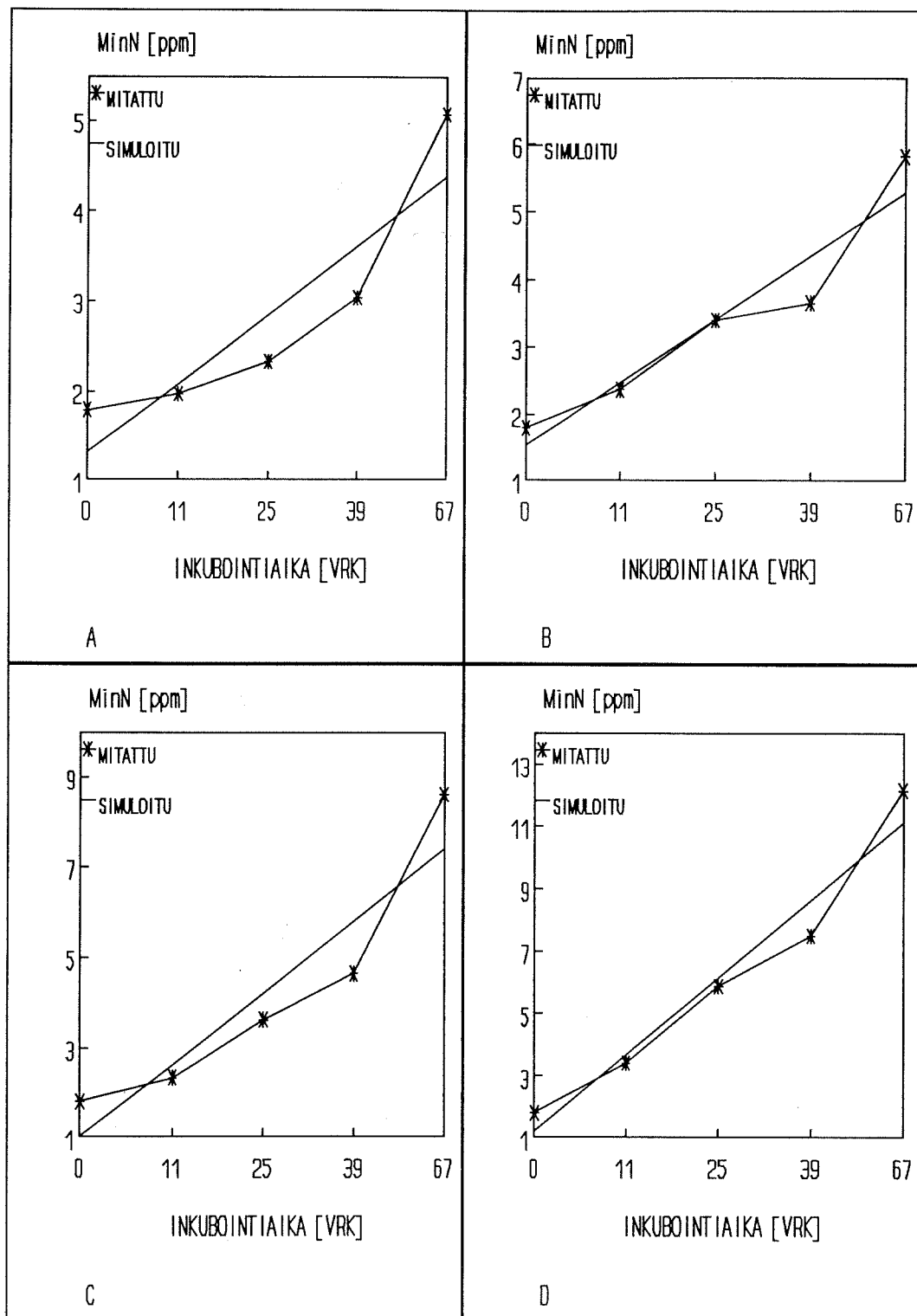
Lämpötila [°C]	Aikaväli [d]	Ammonifikaatio [μgg ⁻¹ vrk ⁻¹]	Nitrifikaatio [μgg ⁻¹ vrk ⁻¹]	Kok.mineralisaatio [μgg ⁻¹ vrk ⁻¹]
2.0	0-11	0,192	-0,007	0,185
	11-25	-0,014	0,055	0,041
	25-39	-0,021	0,087	0,066
	39-67	-0,001	0,045	0,044
4.5	0-11	0,088	0,031	0,119
	11-25	0,012	0,099	0,111
	25-39	0,024	0,059	0,083
	39-67	-0,005	0,128	0,123
8.0	0-11	0,111	0,054	0,165
	11-25	-0,009	0,094	0,085
	25-39	-0,001	0,092	0,091
	39-67	0,004	0,074	0,077
15.0	0-11	0,130	0,145	0,275
	11-25	-0,037	0,194	0,157
	25-39	0,002	0,129	0,131
	39-67	-0,008	0,123	0,114

Taulukko 2d. Mittaustulosten perusteella lasketut nopeudet ammonifikaatiolle, nitrifikaatiolle ja kokonaismineralisaatiolle lysimetrin 9 pohjamaassa. Aikaväli on ilmoitettu vuorokausina inkuboinnin aloittamisesta ja pitoisuusmuutos mikrogrammoina kuivassa maa-aineksessa.

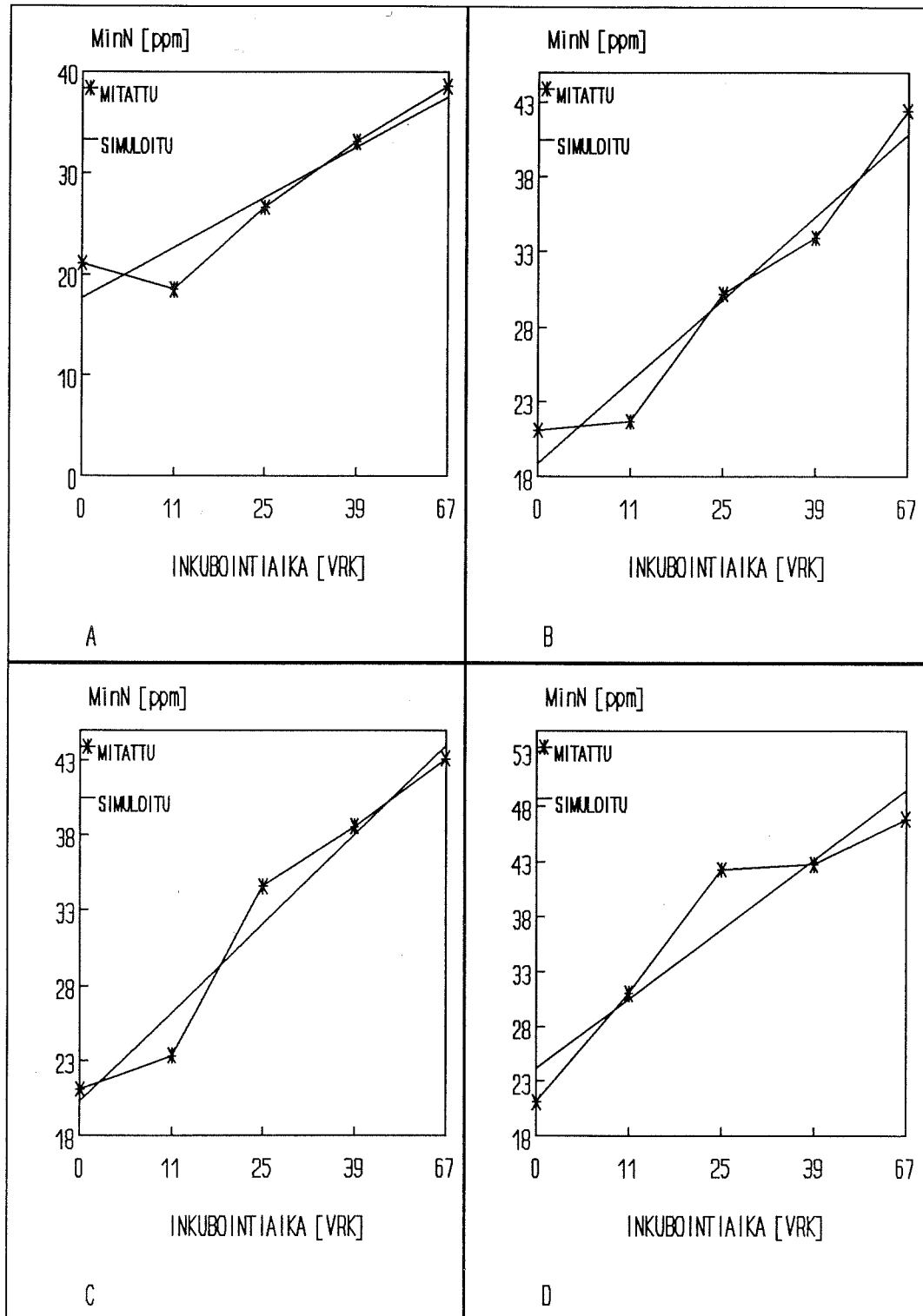
Lämpötila [°C]	Aikaväli [d]	Ammonifikaatio [μgg ⁻¹ vrk ⁻¹]	Nitrifikaatio [μgg ⁻¹ vrk ⁻¹]	Kok.mineralisaatio [μgg ⁻¹ vrk ⁻¹]
2.0	0-11	0,063	0,070	0,133
	11-25	-0,004	0,096	0,091
	25-39	0,000	0,075	0,075
	39-67	-0,005	0,120	0,155
4.5	0-11	0,024	0,092	0,115
	11-25	0,016	0,011	0,026
	25-39	0,019	0,174	0,193
	39-67	0,000	0,108	0,108
8.0	0-11	0,025	0,060	0,085
	11-25	0,018	0,040	0,058
	25-39	0,018	0,195	0,213
	39-67	-0,009	0,121	0,112
15.0	0-11	0,065	0,120	0,185
	11-25	-0,029	0,181	0,152
	25-39	0,035	0,134	0,169
	39-67	-0,004	0,150	0,146



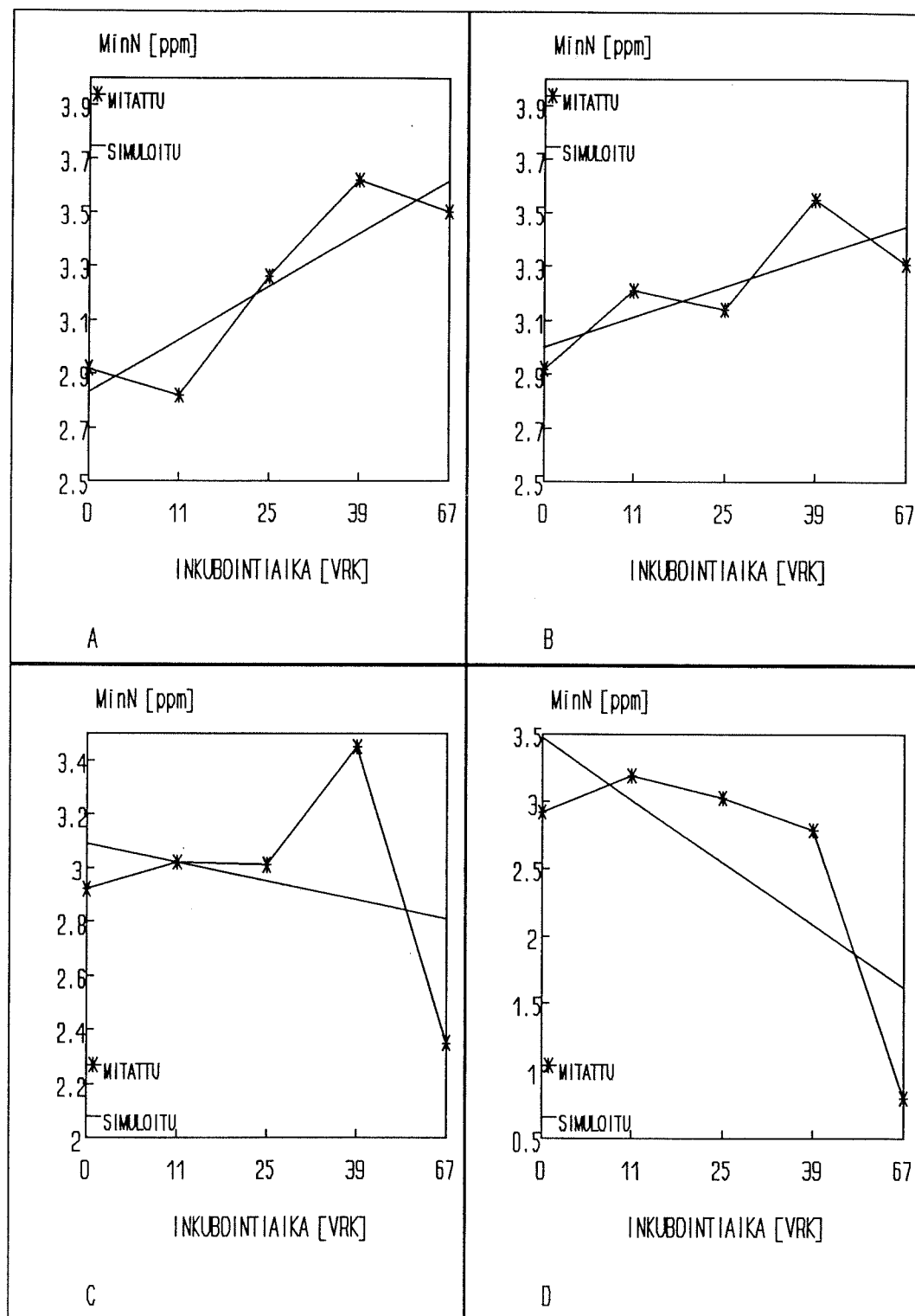
Kuva 3a. Mitatut ja simuloitut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrin 2 pinta-
maassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C
(B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



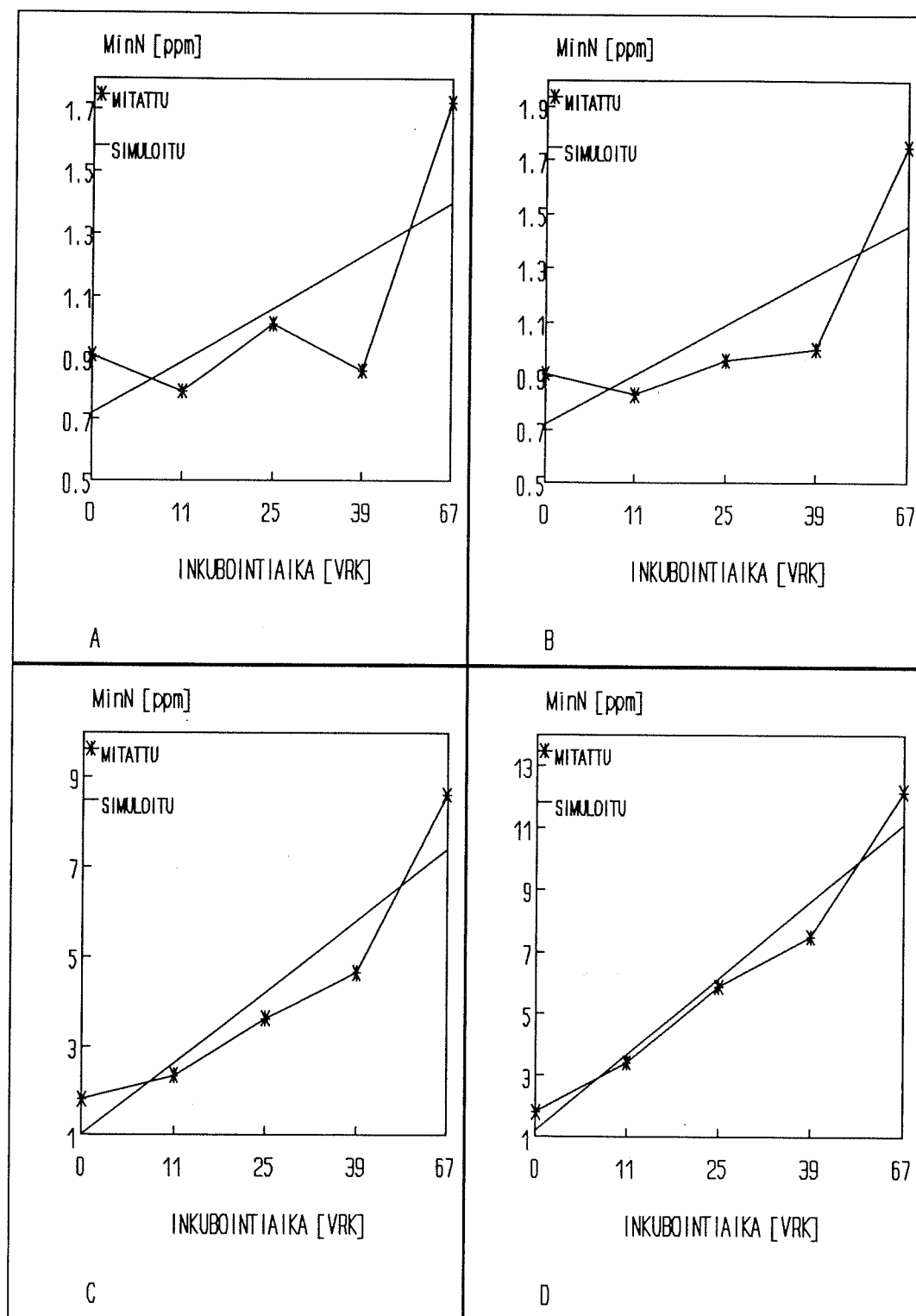
Kuva 3b. Mitatut ja simuloidut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 2 pinta-
maassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C
(B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



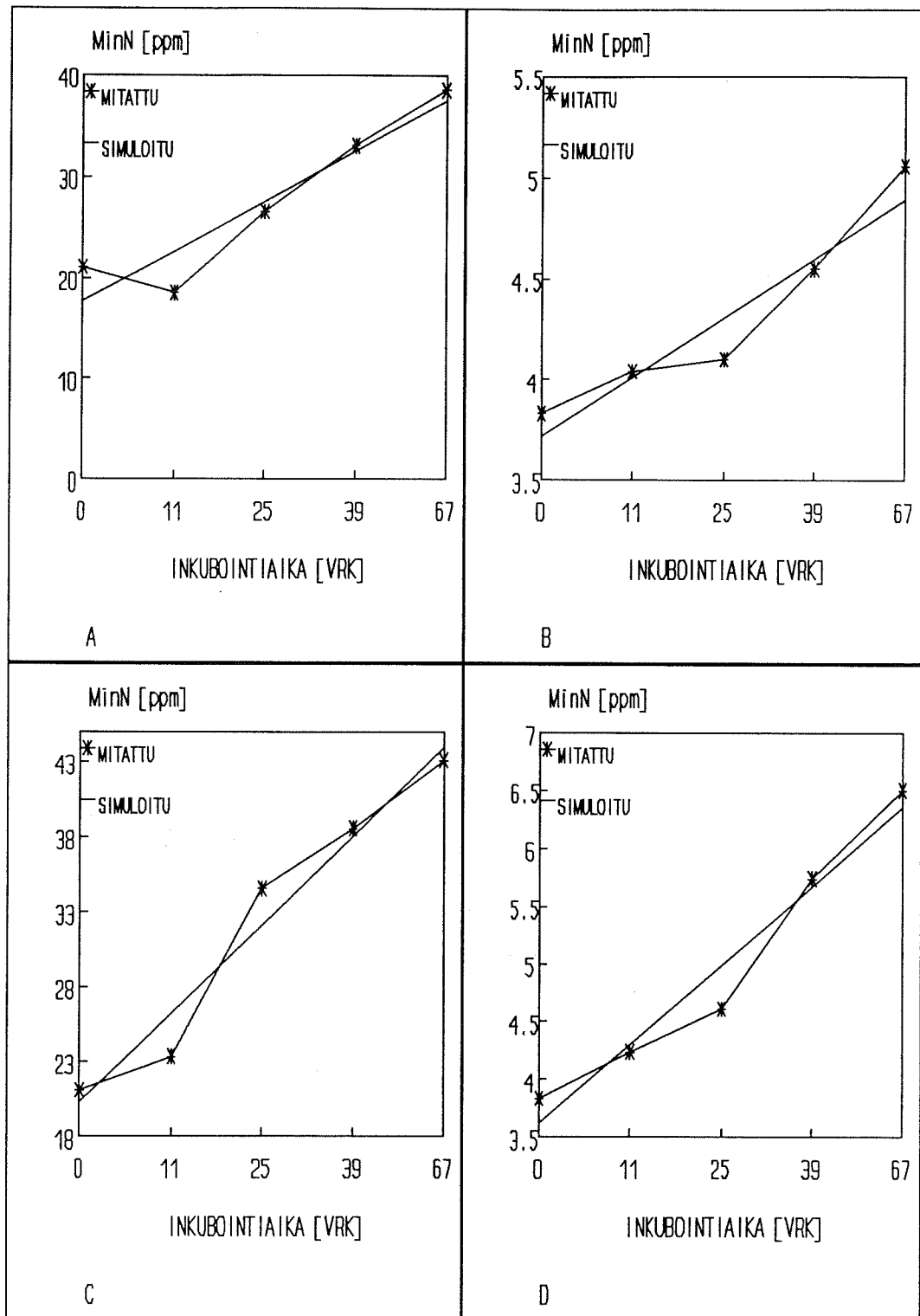
Kuva 3c. Mitatut ja simuloidut mineraalityypen pitoisuudet lysimetrin 2 pinta-
maassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C
(B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



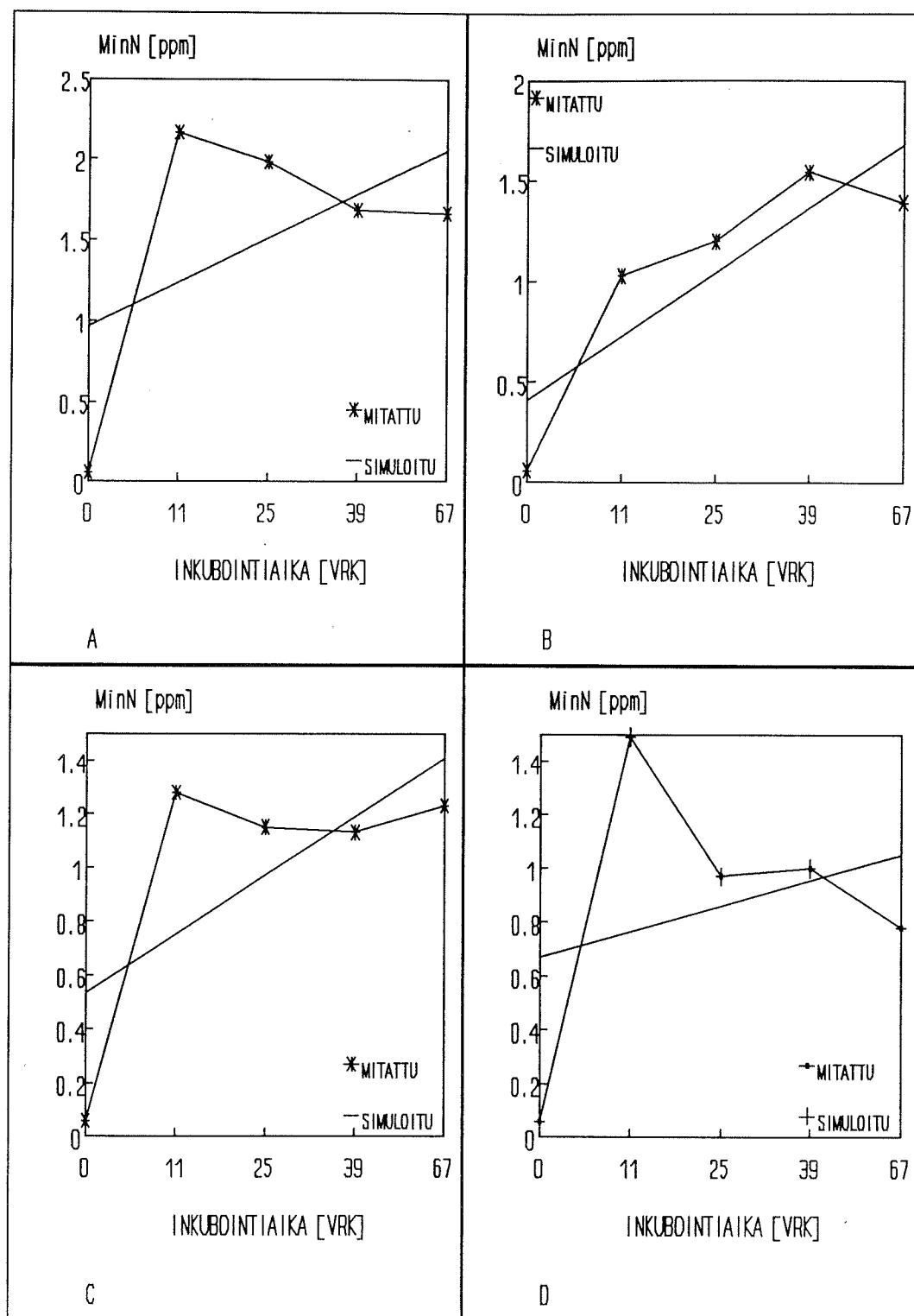
Kuva 3d. Mitatut ja simuloitut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrin 2 pohja-
maassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C
(B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



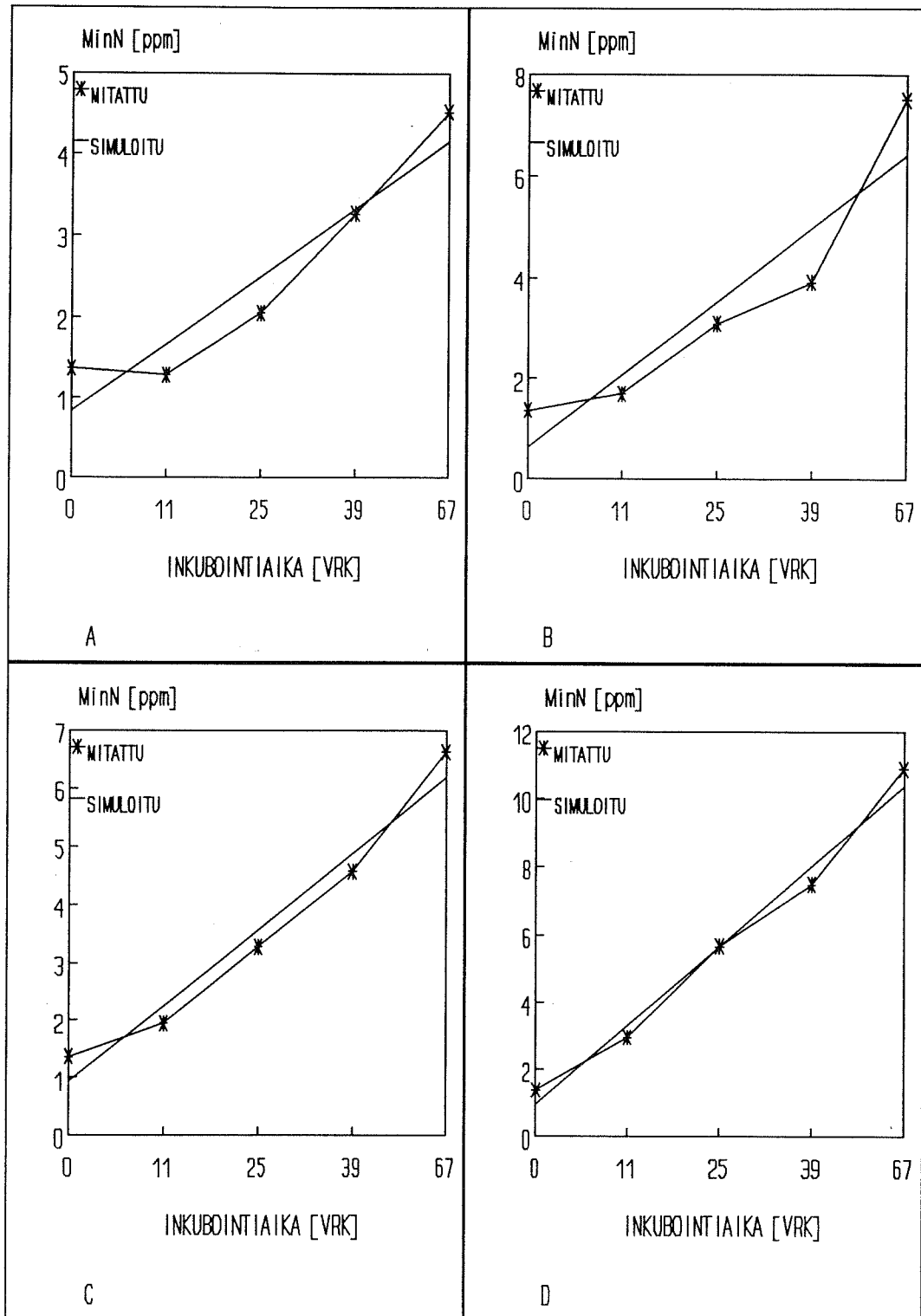
Kuva 3e. Mitatut ja simuloitut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 2 pohjamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



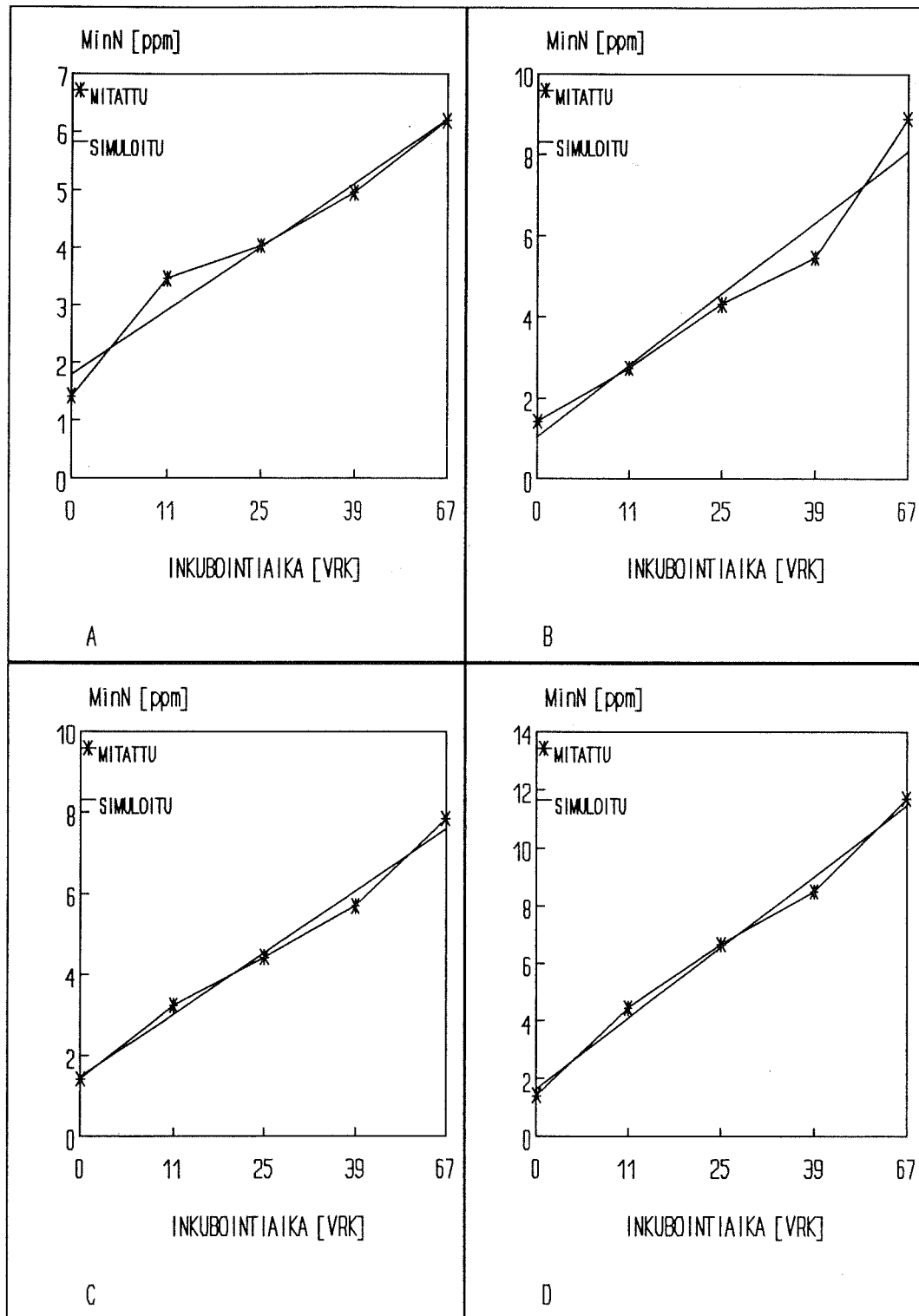
Kuva 3f. Mitatut ja simuloidut mineraalityypen pitoisuudet lysimetrin 2 pohjamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



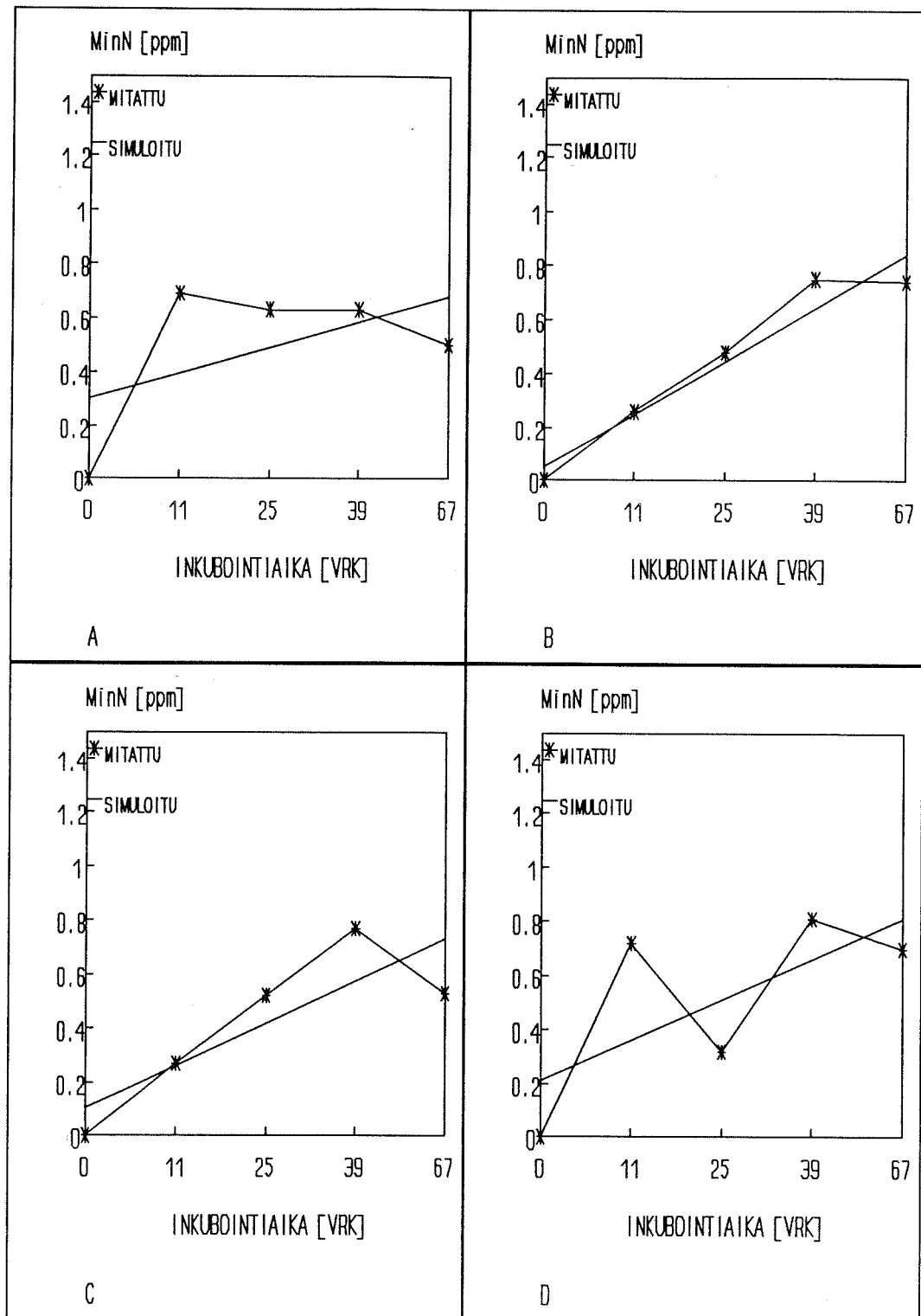
Kuva 3g. Mitatut ja simuloitut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrin 9 pinta-
maassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C
(B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



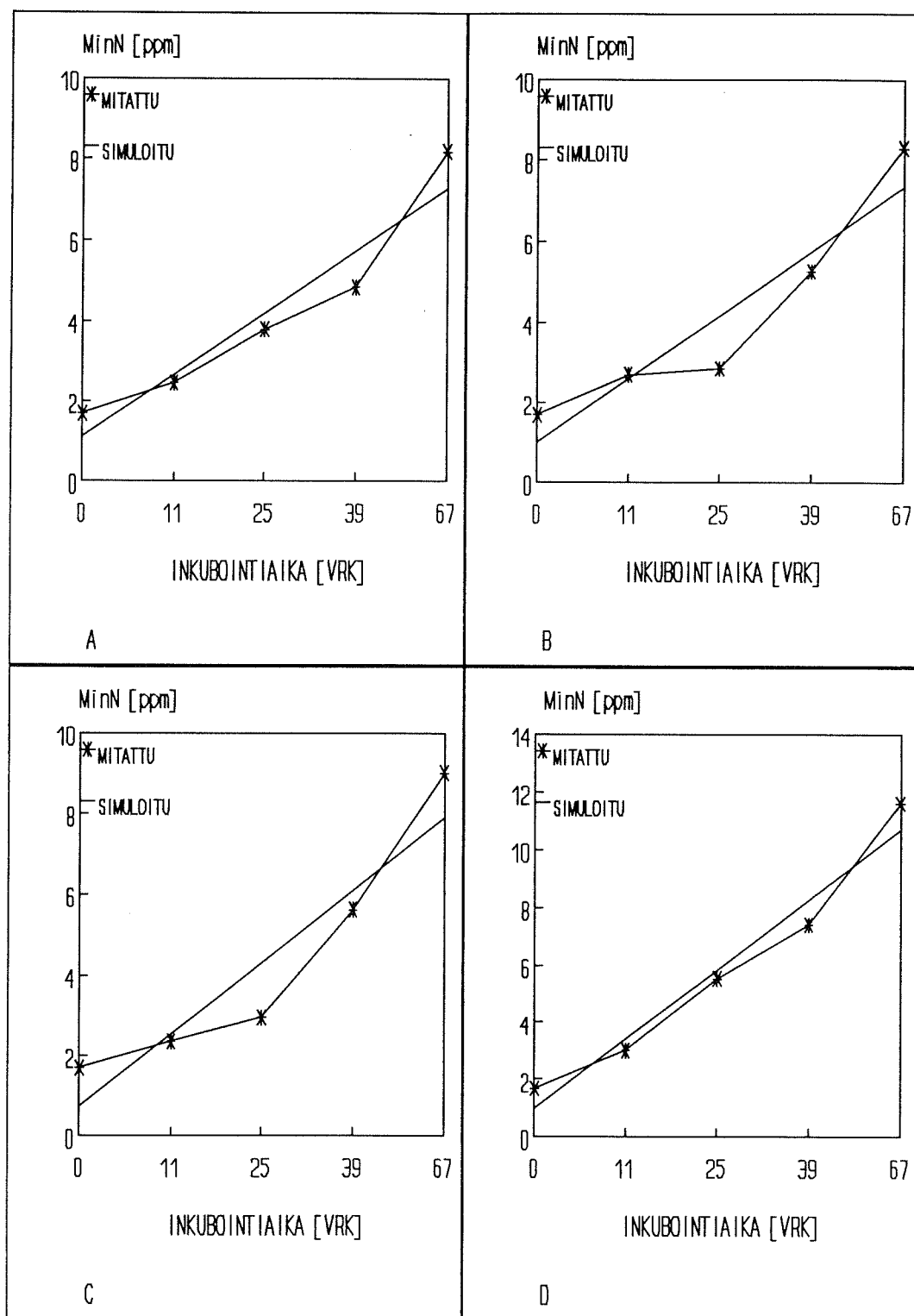
Kuva 3h. Mitatut ja simuloitut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pinta-
maassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C
(B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



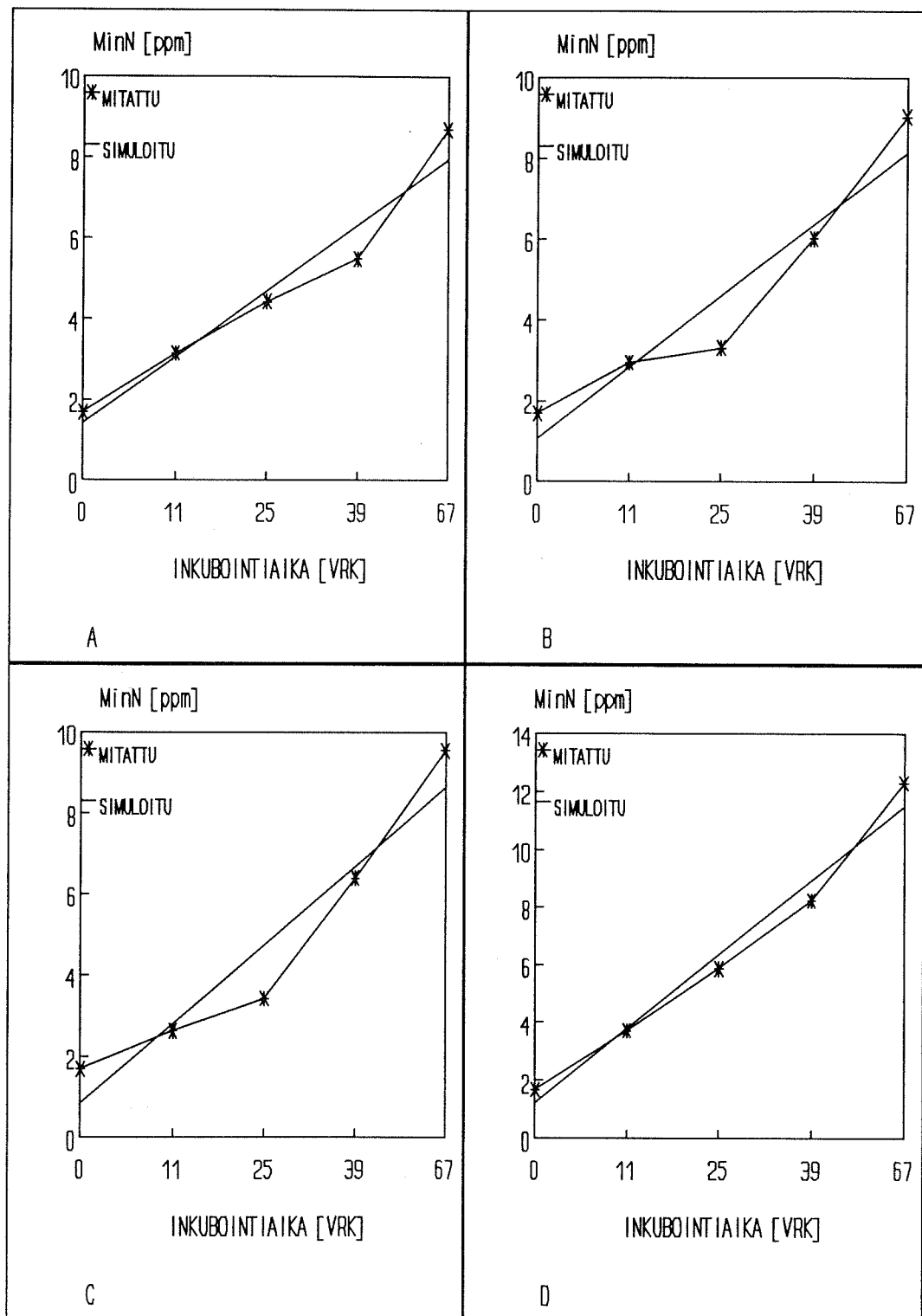
Kuva 3i. Mitatut ja simuloitut mineraalityypen pitoisuudet lysimetrin 9 pinta-
maassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C
(B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



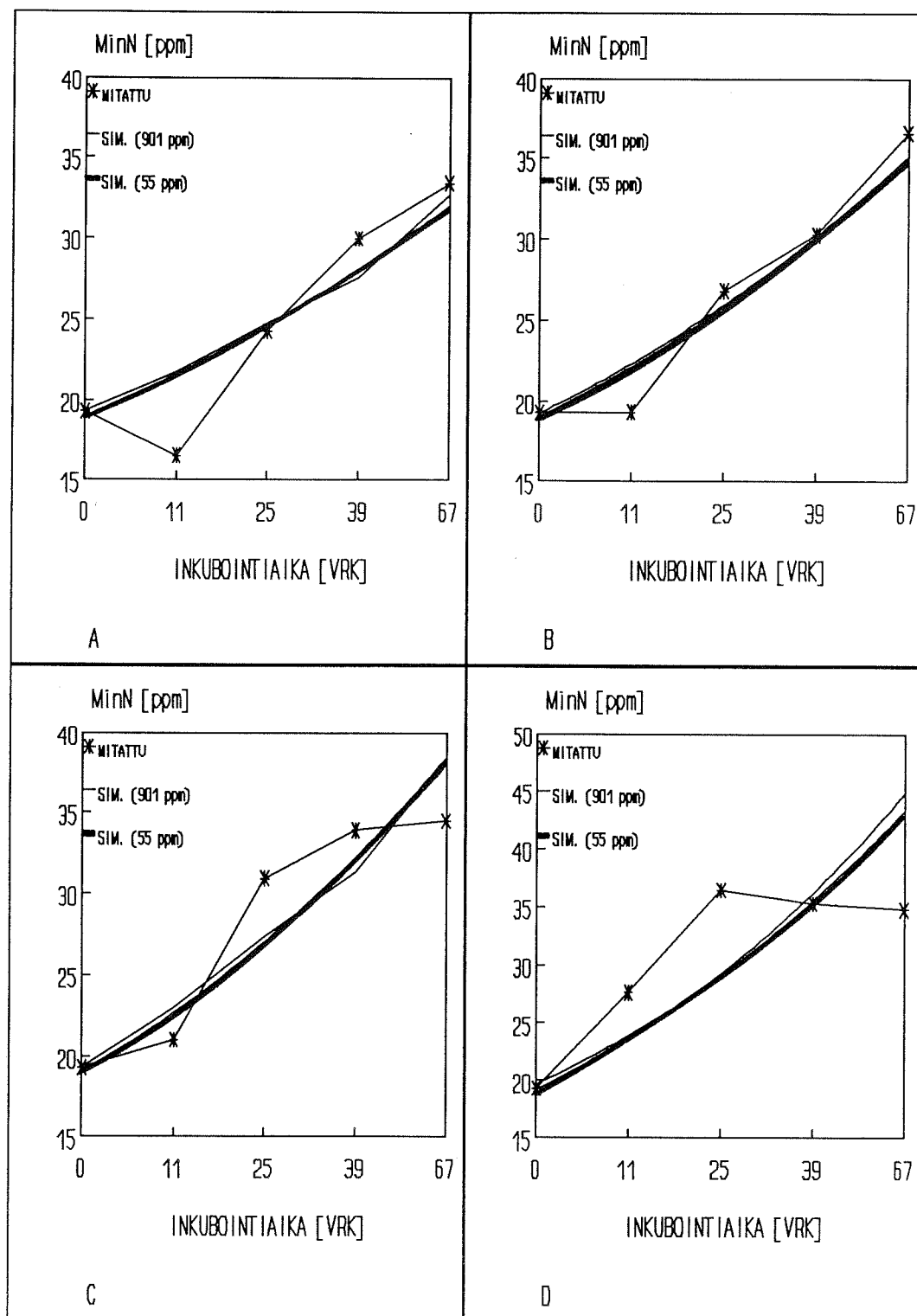
Kuva 3j. Mitatut ja simuloitut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrin 9 pohjamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



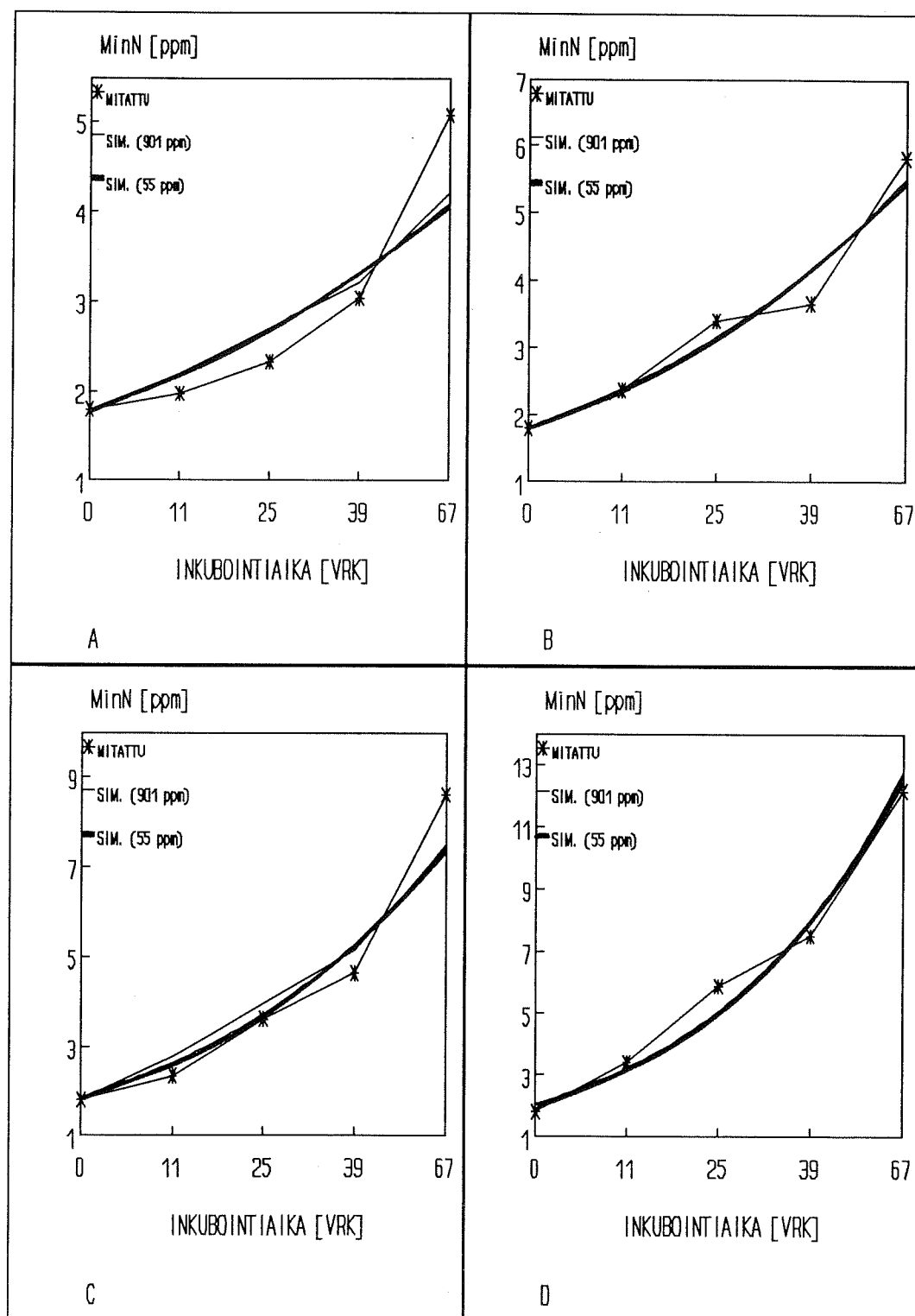
Kuva 3k. Mitatut ja simuloidut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pohjamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



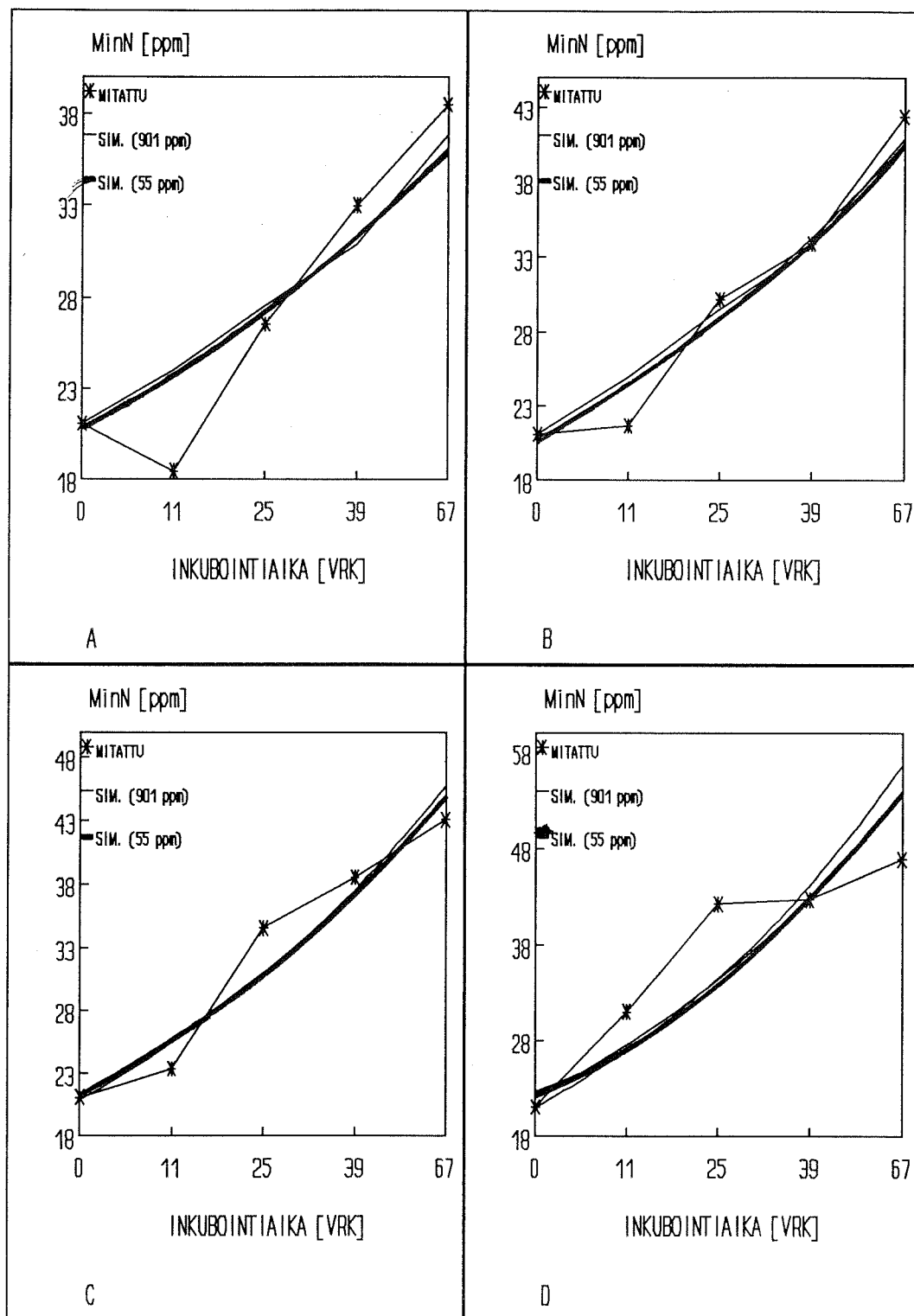
Kuva 31. Mitatut ja simuloidut mineraalitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pohjamaassa. Lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



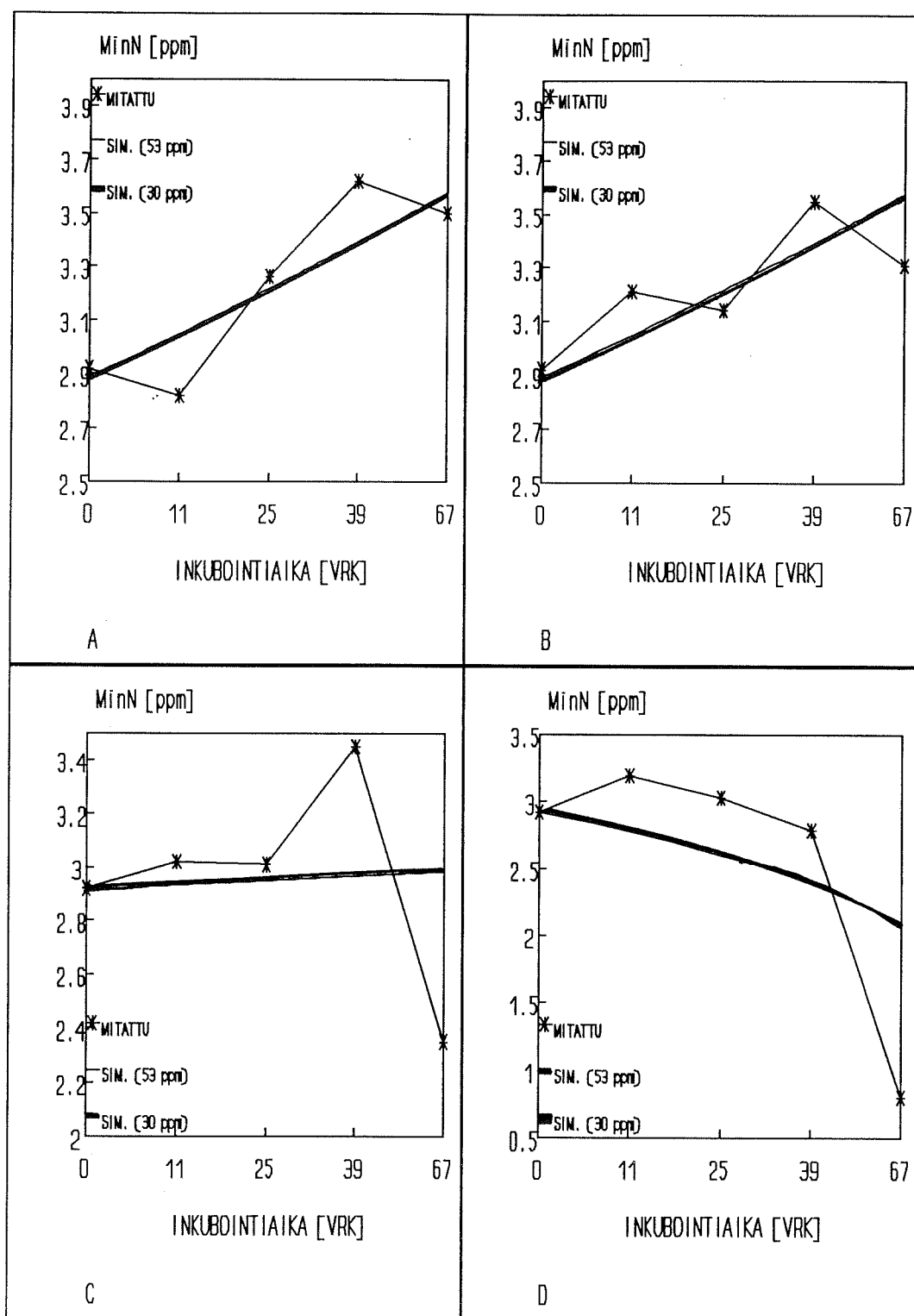
Kuva 4a. Mitatut ja simuloitut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrin 2 pinta-
maassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti
mineralisoituvan tyypin määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B),
8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



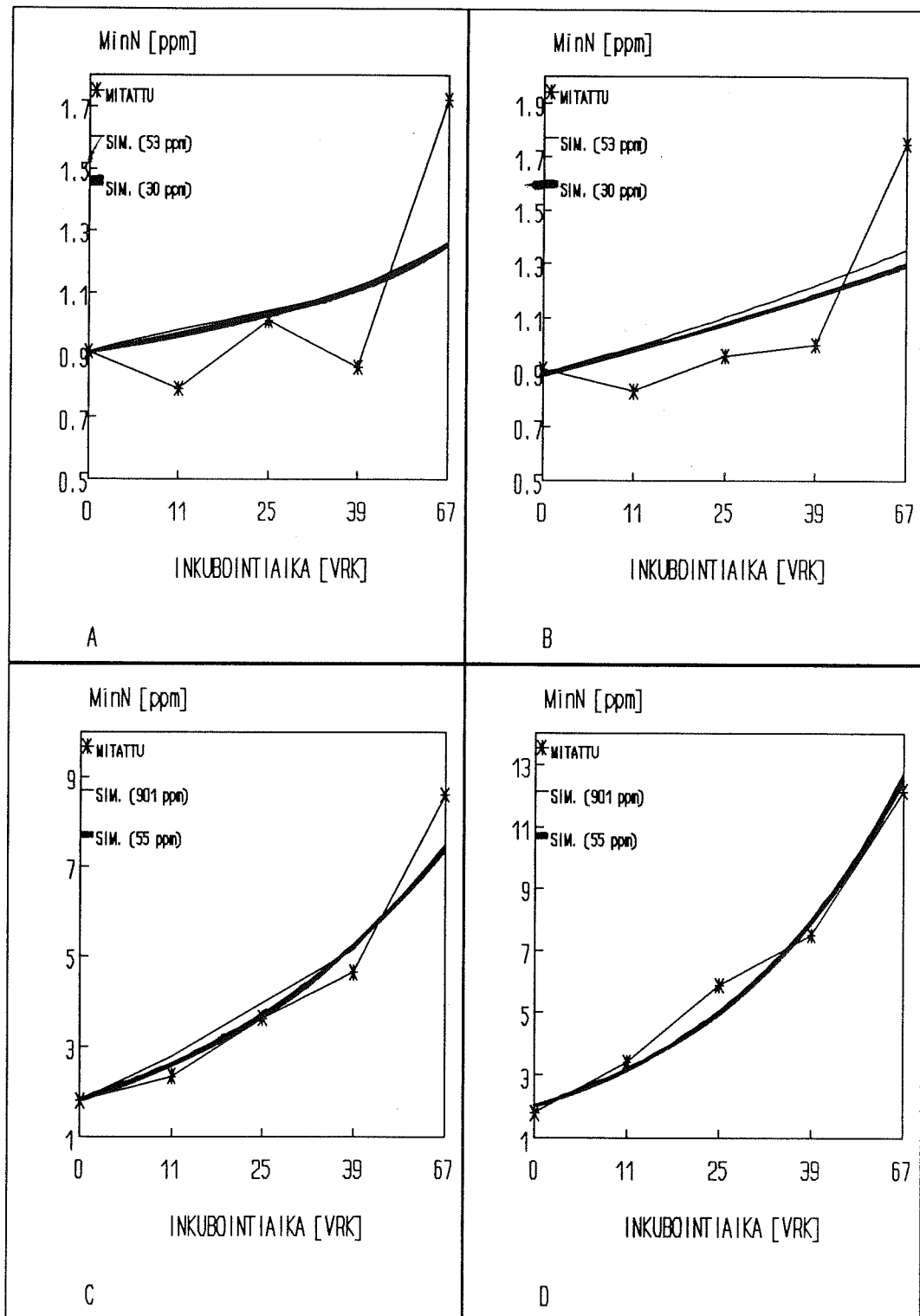
Kuva 4b. Mitatut ja simuloitunut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 2 pinta-
maassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti
mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B),
8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



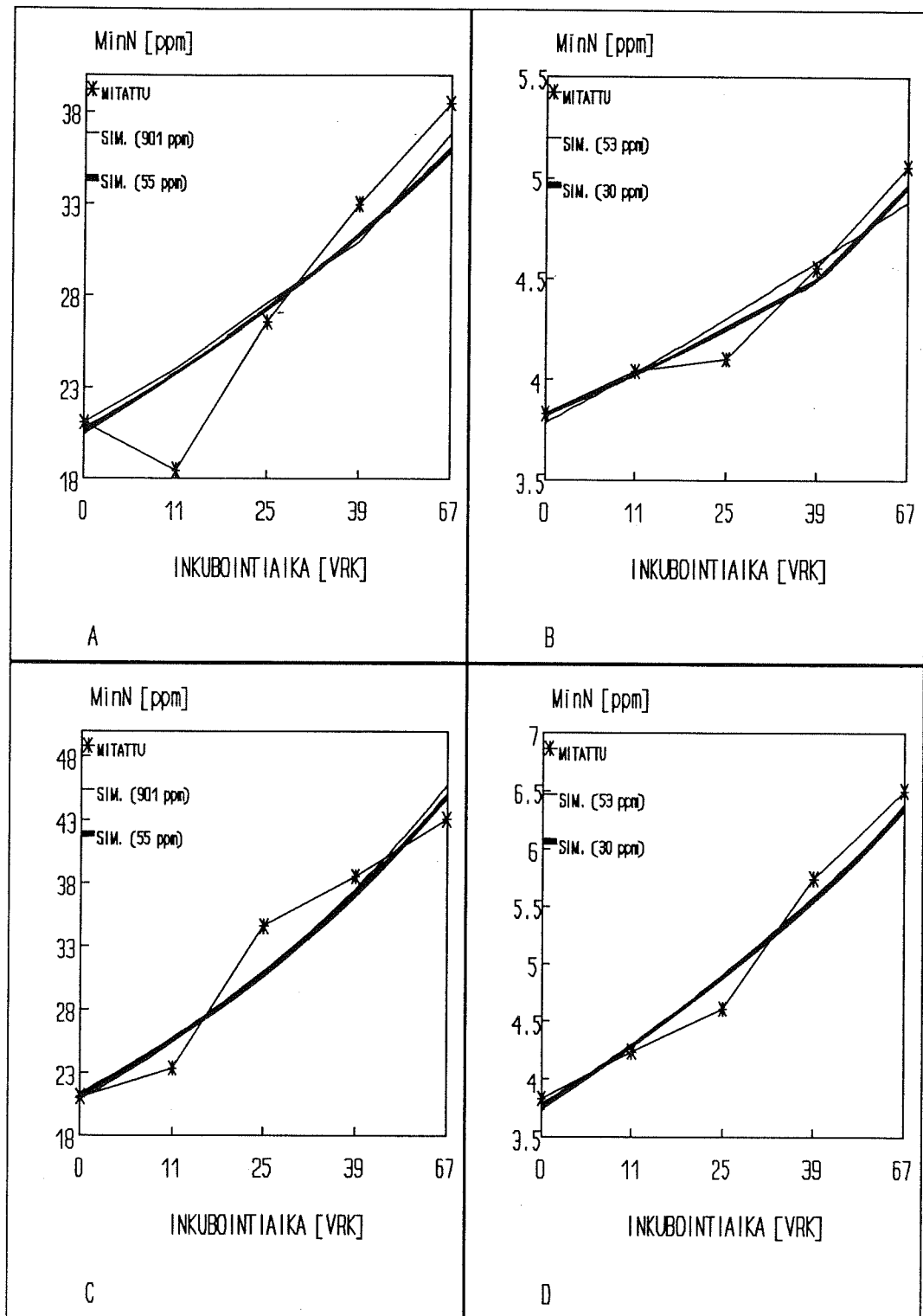
Kuva 4c. Mitatut ja simuloidut mineraalitypen pitoisuudet lysimetrin 2 pinta-
maassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti
mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B),
8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



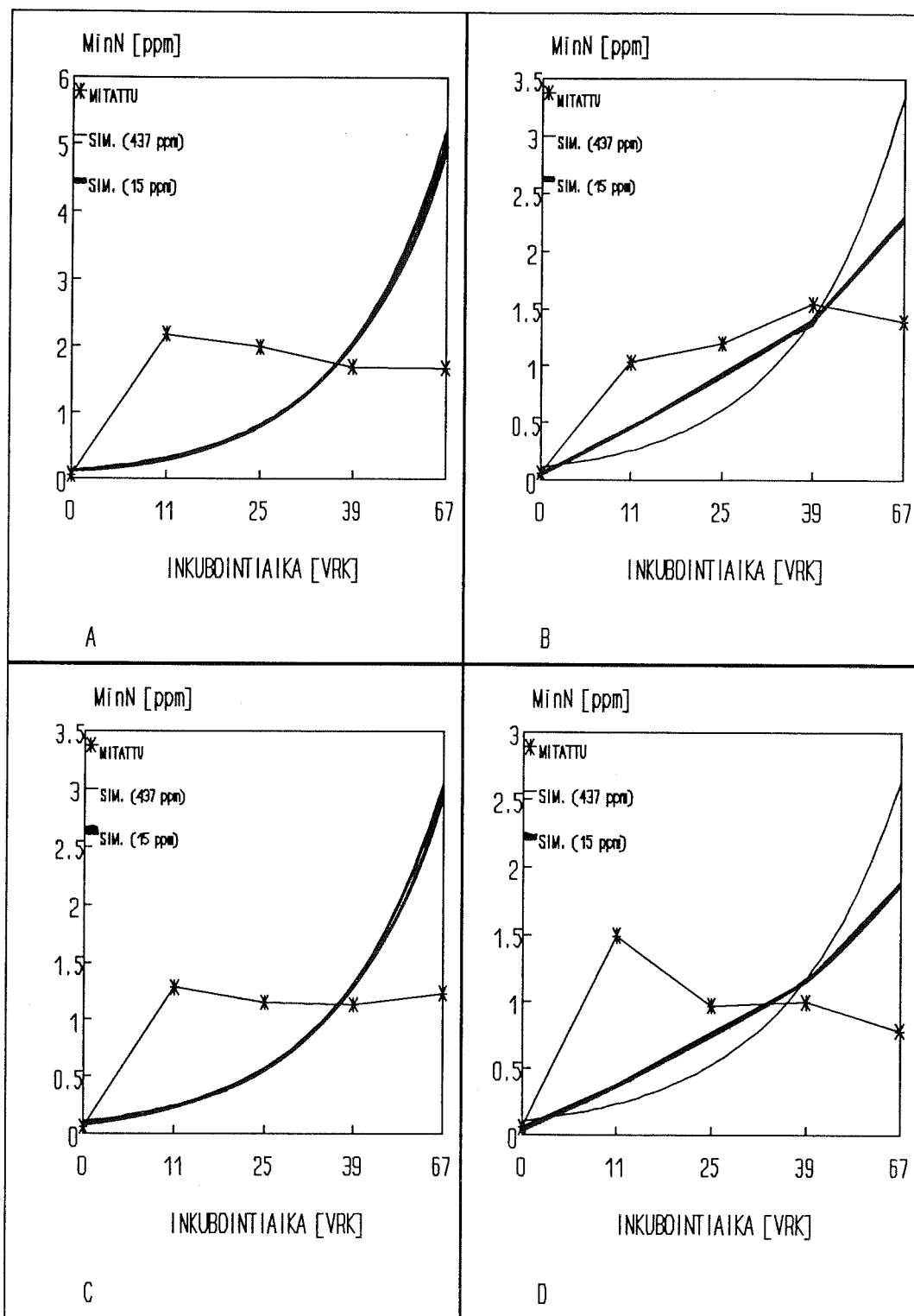
Kuva 4d. Mitatut ja simuloidut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrin 2 pohjamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan tyypin määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



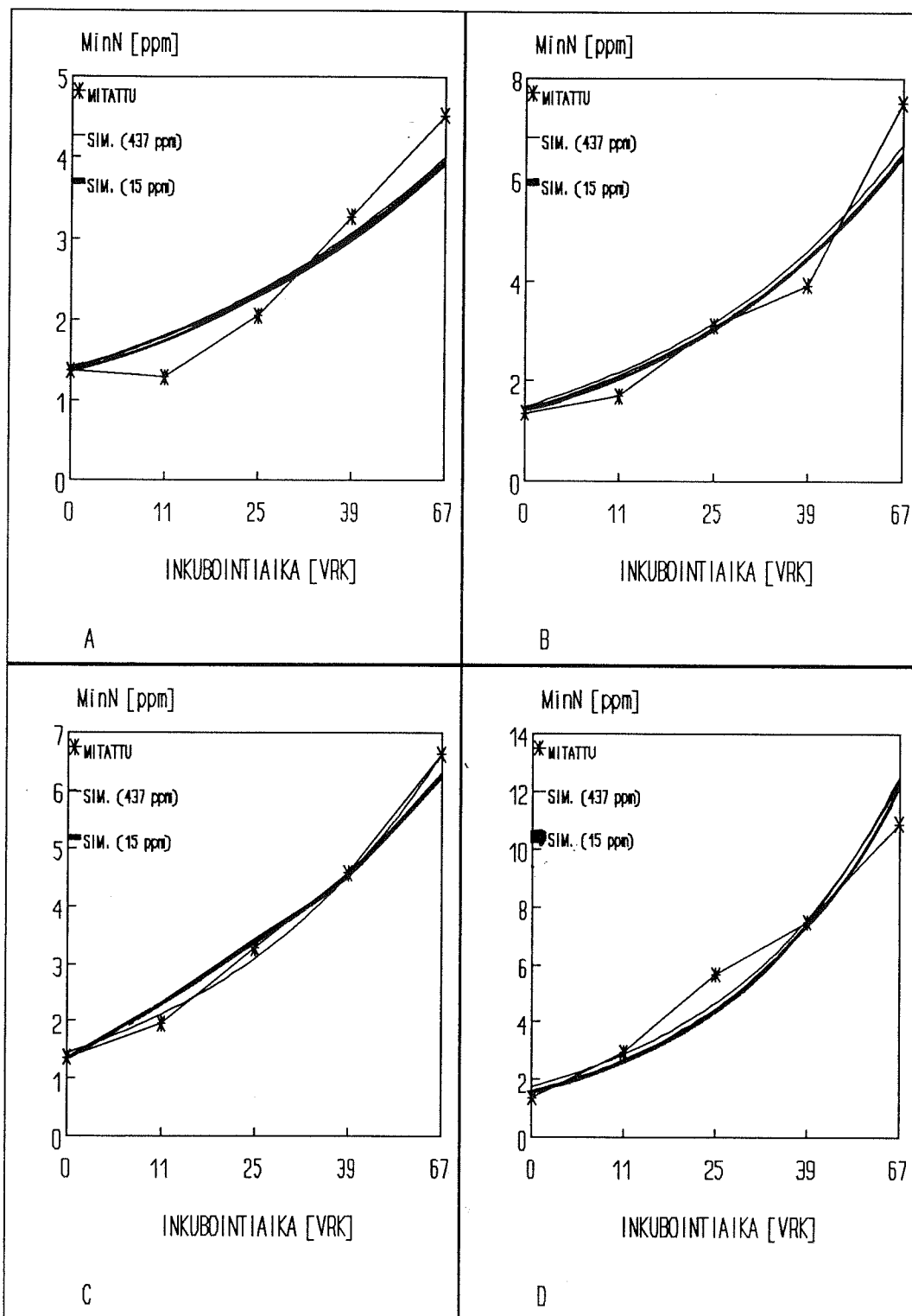
Kuva 4e. Mitatut ja simuloidut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 2 pohjamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



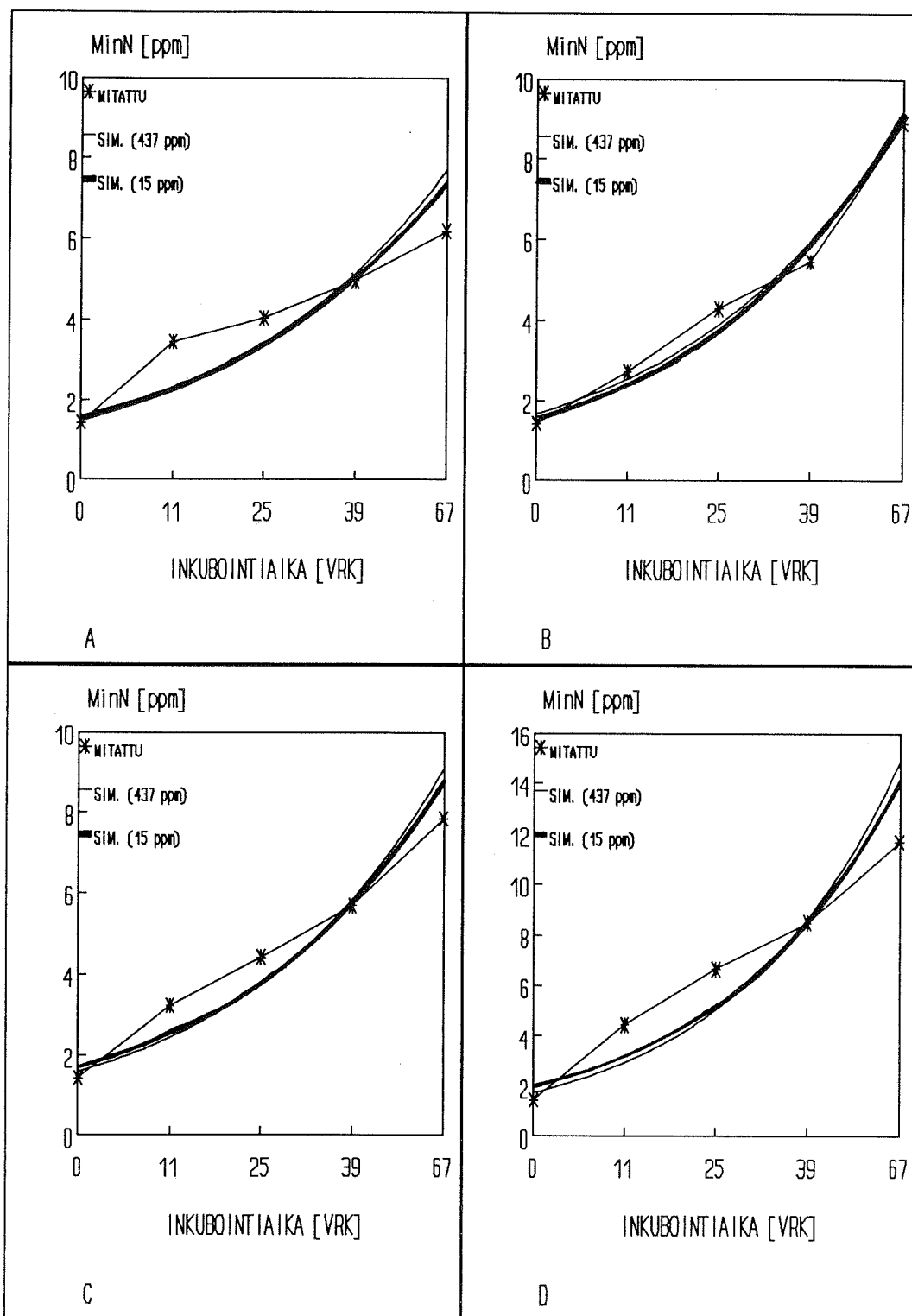
Kuva 4f. Mitatut ja simuloidut mineraalityypen pitoisuudet lysimetrin 2 pohjamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



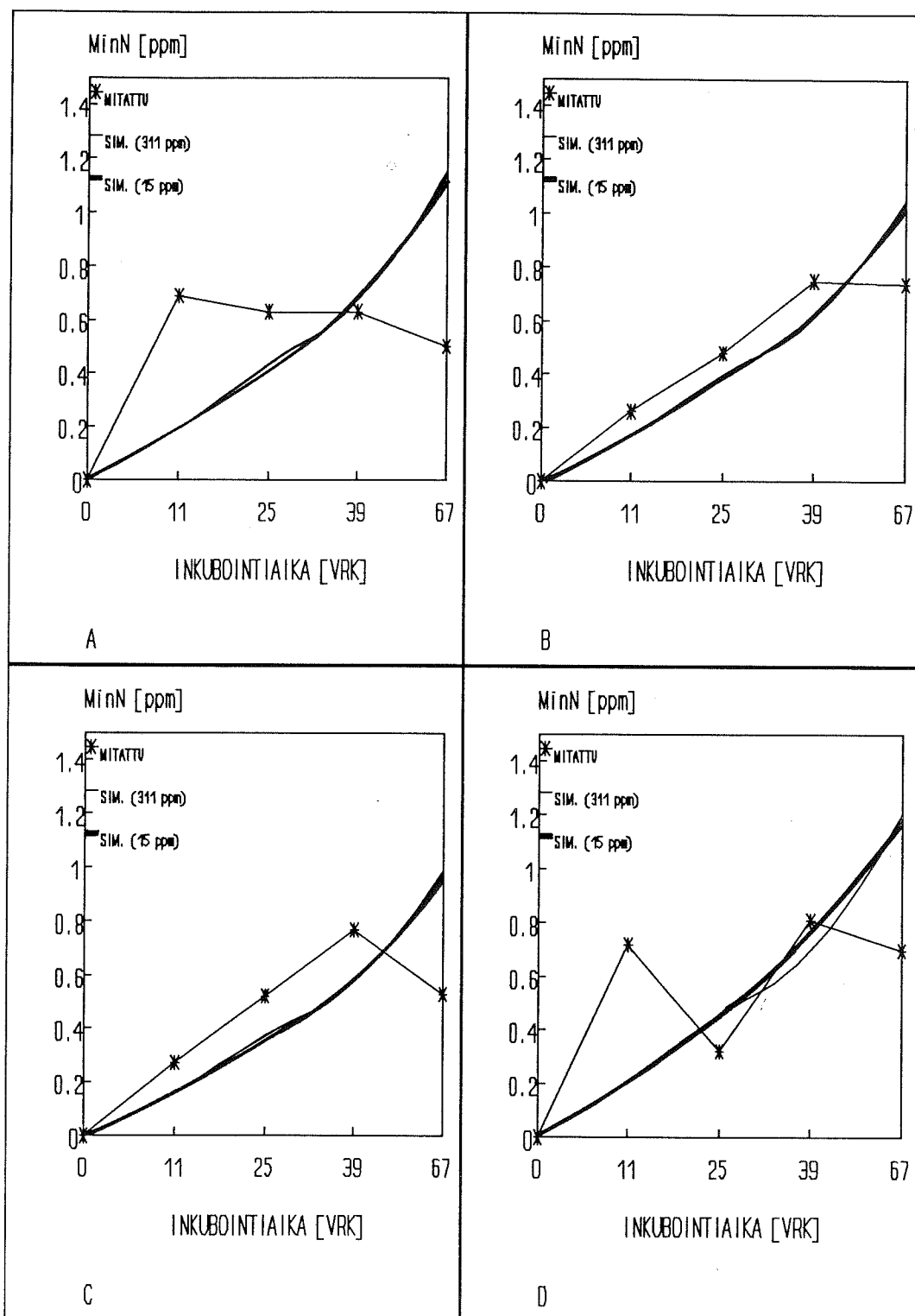
Kuva 4g. Mitatut ja simuloitut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrin 9 pinta-
maassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti
mineralisoituvan tyypen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B),
8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



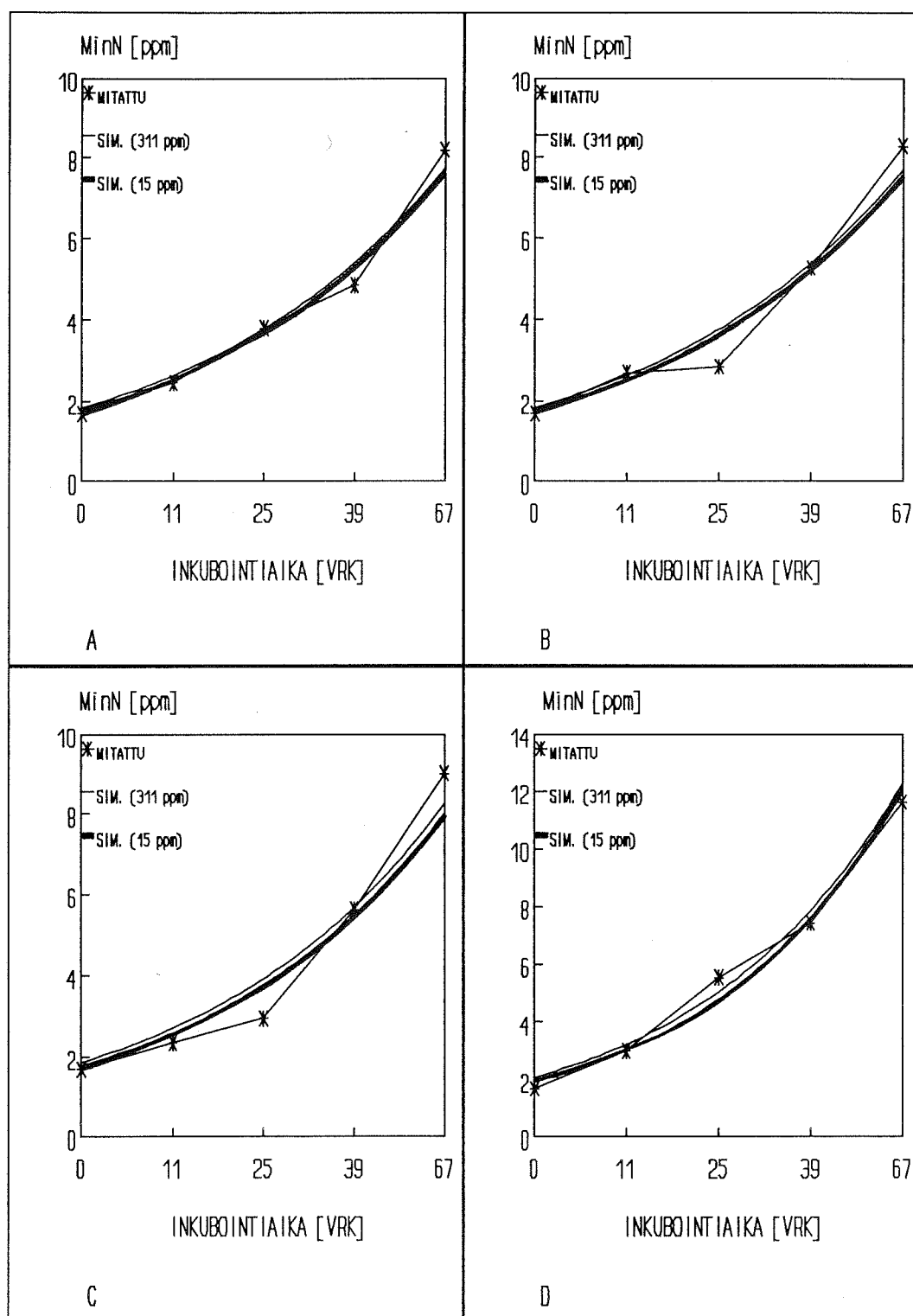
Kuva 4h. Mitatut ja simuloituvat nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pinta-
maassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti
mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B),
8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



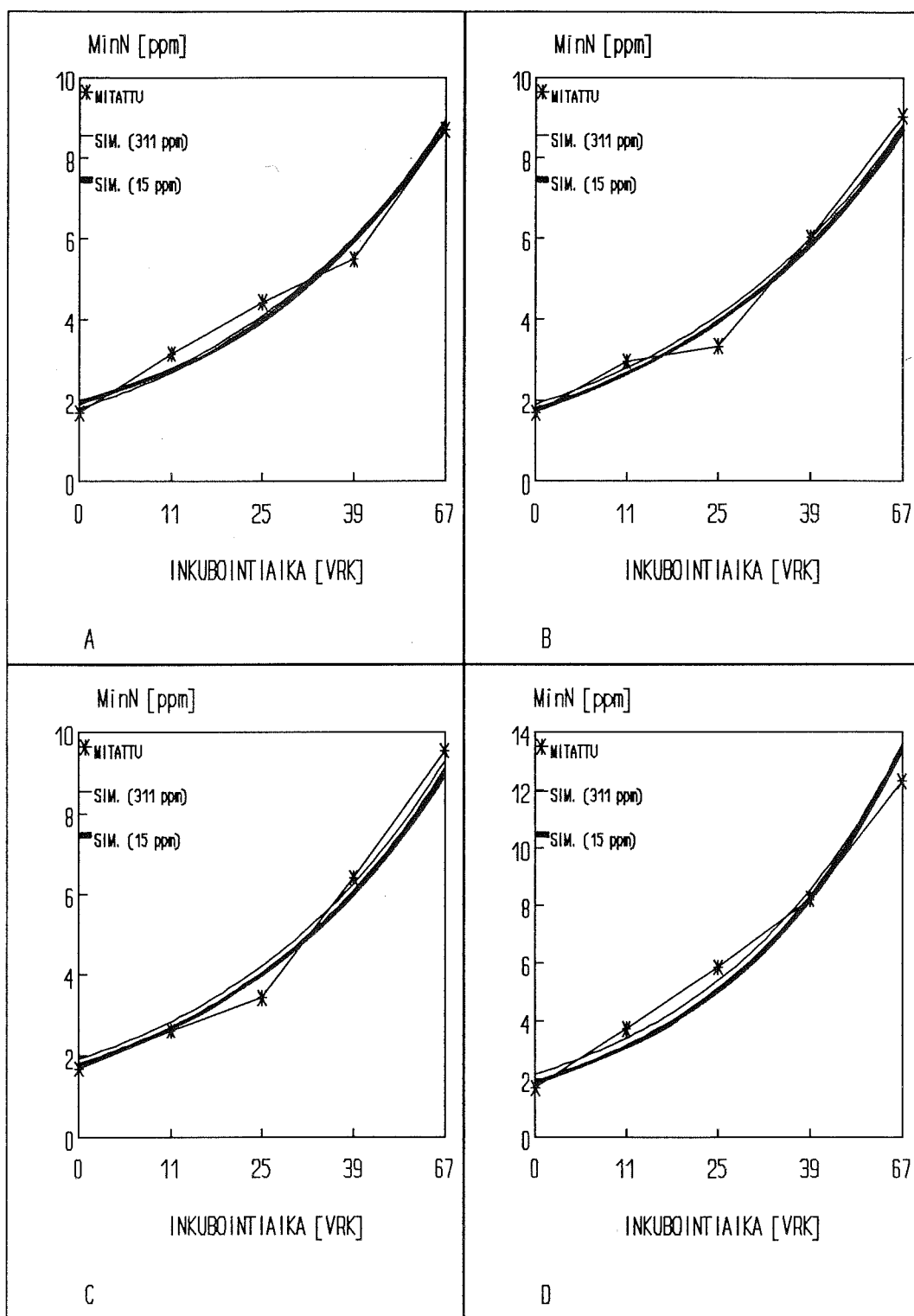
Kuva 4i. Mitatut ja simuloidut mineraalitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pinta-
maassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti
mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B),
8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



Kuva 4j. Mitatut ja simuloidut ammoniumtyypen pitoisuudet lysimetrin 9 pohja-
maassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti
mineralisoituvan tyypin määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B),
8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



Kuva 4k. Mitatut ja simuloidut nitraattitypen pitoisuudet lysimetrin 9 pohja-
maassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti
mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B),
8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.



Kuva 41. Mitatut ja simuloidut mineraalityypen pitoisuudet lysimetrin 9 pohjamaassa. Eksponentiaalinen riippuvuus. Suluissa on ilmoitettu potentiaalisesti mineralisoituvan typen määrä. Kuvassa on esitetty tulokset 2.0 °C (A), 4.5 °C (B), 8.0 °C (C) ja 15.0 °C (D) lämpötiloissa.