



**Inverkan av vattenmättnad på kvävemineralisering,  
nitratbildning och utlakningsrisker i en odlad mulljord  
från Närke**

*Effect of water saturation on nitrogen mineralisation,  
nitrate formation and risks of leaching in an organic soil  
from central Sweden*

**Börje Lindén**



**Omslagsbilden** visar Täljeåns grävda fåra vid det undersökta mulljordsfältet vid Geråsen i Viby socken, Närke. Fram till 1860-talet fanns en slättsjö med omgivande strandängar här och i bildens förlängning bortåt. För att vinna åkermark genomfördes 1862-64 en sjösänkning, som sedan forsatt i olika etapper. Detta fick till följd att sjön torrlades.





<b>Innehåll</b>	
<b>Förord</b>	6
<b>Sammanfattning</b>	7
<b>Summary</b>	9
<b>Inledning</b>	11
<b>Bakgrund: Undersökningar av kväveutlakning på fältet vid Geråsen</b>	13
<b>Material och metoder</b>	14
Markfysikaliska och -kemiska analyser	14
Inkubationsstudier	15
Bestämning av ammonium- och nitratkväve i jordproverna	18
<b>Resultat och diskussion</b>	18
Jordförhållanden	18
Mineralkväve i marken	20
Förändringar av mängderna ammonium- och nitratkväve under inkubationsperioden	23
Utvärdering av metodiken för inkubation av mulljord i ostörd lagring i stålcyllindrar	28
<b>Övergripande diskussion och slutsatser</b>	35
Kväveminerialisering och nitratbildning i de tre markskikten	35
Inverkan av de olika vattenhaltsregimerna på grödornas kväveförsörjning och på kväveutlakningsrisken	37
Förklaringar till det utlakade vattnets sammansättning	38
Möjligheter att minska kväveminerialisering, nitratbildning och kväveutlakning genom höjt grundvattenstånd upp till matjorden	39
Utvärdering av inkubationstekniken med jord i ostörd lagring i stålcyllindrar	42
<b>Referenser</b>	44

## **Förord**

Denna rapport avser den sista i en serie med tre undersökningar av kväveminerisering, mineralkväve, grödornas kvävetillgång och kväveutlakningsrisker i odlade mulljordar. Den första gällde kväve under olika årstider i en kärrtorvjord på lergyttja i nordvästra Uppland (Lindén, 2013). Den andra studien belyste kvävemineriseringen årscykel och stråsådesgrödors gödselkvävebehov på mulljordar i Kvismardalen i Närke (Lindén, 2015).

I föreliggande rapport redovisas inkubationsstudier med undersökning av kväveminerisering och nitratbildning i matjord och alv dels vid vattenmättnad och dels vid förhållanden motsvarande god dränering i en odlad mulljord, som hämtats från Viby socken i sydvästra Närke. Där togs ostörda jordprover ut med hjälp av nedslagningscylindrar av stål (10 cm höga) för dessa undersökningar. Sådana prover användes även för bestämning av olika markfysikaliska förhållanden i jorden, bl.a. vattenhalter vid önskade vattenavförande tryck som behövdes för reglering av vattenhaltsregimerna under inkubationen. Detta laboratoriearbete utfördes av agronom Lave Persson, Avdelningen för lantbrukets hydroteknik vid den dåvarande Institutionen för markvetenskap, SLU, Uppsala.

I rapporten används uttrycket ”jordkväve” med samma innebörd som ”markkväve”. Begreppet ”utnyttjbart jordkväve” under växtsäsongen avser kväve som grödorna kunnat ta upp under växtperioden och som härstammar från markens organiska kväveförråd. Uttrycket ”jordkväve” ha valts framför ”markkväve” för att underlätta den nordiska språkförståelsen, eftersom ”mark” har andra betydelser i danska och norska. Likaledes används uttrycken ”nedvaskning” (da. ”nedvaskning”; no. ”nedvasking”) och ”vaska ned” i betydelsen ”nedtvättning” eller ”nedtransport” (av t.ex. kväve i markprofilen) för att bidra till enhetligare terminologi inom nordisk jordbruksforskning.

Skara i januari 2015

Författaren

## Sammanfattning

Anhopningen av mineraliserat kväve i åkerjord under hösten och vintern är en viktig orsak till kväveutlakning. Vidare är kvävemineraliseringen i odlade organogena jordar större än i fastmarksjordar. Därför är det särskilt angeläget att inför vintern reducera mängderna utlakningsbart kväve i mulljordar. Undersökningar tyder på att vattenmättnad hämmar kvävemineralisering och nitratbildning i organogen jord. Detta bör minska kväveutlakningsrisken.

Vattenmättnadsgrad, luftväxling och pH-värden kan påverka kvävemineralisering och nitratbildning olika på skilda djup i marken. För att studera sådana effekter togs jordprover i ostörd lagring ut 1991 med 10 cm höga stålcylindrar på 10-20, 40-50 och 70-80 cm djup i en kärrtorvmulljord vid Geråsen i Närke. Cylindrarna försågs med plastlock med ett litet hål för luftväxling. Vattenhalterna i jordcylindrarna reglerades genom att påföra olika vattenavförande tryck: 0,0 meter vattenpelare (mvp), dvs. vattenmättnad, samt 1,0 mvp och 6,0 mvp. Jordcylindrarna med dessa behandlingar (tabell 1) inkuberades fr.o.m. den 24/9 vid temperaturer som efterliknade förhållandena under höst, vinter och vår i trakten av Geråsen (figur 1). Cylindrar togs ledvis ut för bestämning av ammonium- och nitratkväve 24.9.1991, 4.12.1991, 19.3.1992 och 4.5.1992. I en förundersökning togs kväveprofilprover ut på 0-30, 30-60 och 60-90 cm djup i mulljorden den 22 maj 1991 för ammonium- och nitratkvävebestämning.

I jorden från 10-20 cm djup vid Geråsen ökade nitratkvävemängderna kraftigt under hela inkubationsperioden (24/9-4/5), med ett tillskott på drygt 40 kg N/ha vid god ”dränering” (1,0 och 6,0 mvp), medan ammoniumkvävevärdena förblev mycket låga vid alla tre vattenhaltsregimerna (i medeltal 1,8 kg N/ha), figur 3. Samma gäller torvjorden på 40-50 cm djup (i medeltal 0,5 kg N/ha). Här ökade nitratkvävet med 16-17 kg N/ha vid alla tre vattenhaltsregimerna under tiden 24/9-4/5. Däremot förblev nitratkvävemängderna mycket små i torvjorden från 70-80 cm djup (figur 3), uppenbarligen p.g.a. gyttejnehåll och lågt pH-värde (4,0), som också hämmade kvävemineraliseringen. Detta bekräftas av kväveprofilstudien den 22 maj 1991, som visade ytterst små nitratkväve-

mängder på 60-90 cm djup (figur 2). I detta skikt fastställdes dock tydligt större mängder ammoniumkväve än högre upp i marken. Att mycket lågt pH-värde kan medföra anhopning av ammoniumkväve visades även av Lindén (2013) i en uppländsk mulljord med sur lergyttja i alven (pH 3,9). Vattenmättnad (0,0 mvp) under inkubationen medförde minskande nitratkvävemängder i jorden från 10-20 cm djup under perioderna 24/-4/12 och 19/3-4/5, troligen beroende denitrifikation i anaeroba ”fickor” i jorden. Samtidigt kan viss mineralisering och nitratbildning ha försiggått men troligen i minskad grad. Däremot tycktes denitrifikation inte uppkomma i alvjorden från 40-50 och 70-80 m djup, sannolikt p.g.a. substratbrist.

Resultaten tyder på god kväve mineralisering och nitratbildning ned till minst 50 cm djup vid adekvat dränering av fältet. Alven ned till detta djup i mulljorden bör därför bidra till grödornas kväveförsörjning. Vidare tyder resultaten på att höjt grundvattenstånd till 1-2 dm under markytan skulle minska mängden nitratkväve, genom att vattenmättnad i matjorden bör ge upphov till denitrifikation samt troligen också nedsatt mineralisering och nitratbildning. Grundvattenståndet i mulljordar kunde därför höjas från september-oktober och åter sänkas framåt våren, vilket kan ske där marken är invallad. Resultatet vid vattenmättnad i jorden från 40-50 cm djup (figur 3b) strider mot förslaget men kan vara en artefakt orsakad av inkubationstekniken. Eftersom kväve mineraliseringen och nitratbildningen hämmades på omkring 70-80 cm djup p.g.a. av lågt pH-värde, torde ett sådant markskikt inte bidra till vare sig kväveförsörjning eller nitratutlakning.

En statistisk studie utfördes på basis av de sex provtagna cylindrarna per led vid varje provtagningsstillfälle. Med hjälp av ledvisa standardavvikelser för nitratkväve visades, att detta antal cylindrar ( $n = 6$ ) begränsar medelfelet till högst 5 kg nitratkväve per ha och 10-cm-skikt. För ett medelfel på högst 2 eller 3 kg N/ha skulle antalet erforderliga cylindrar bli orimligt stort.



## Summary

The accumulation of mineralised nitrogen in cultivated soils during autumn and winter largely affects nitrogen leaching in Sweden. Moreover, nitrogen mineralisation in cultivated organic soils is higher than in mineral soils. Therefore it is important to reduce leachable nitrogen in organic soils before the winter. Investigations have indicated that water saturation may lead to reduced nitrogen mineralisation and nitrate formation in organic soils. This should also decrease nitrate leaching.

The degree of water saturation, air exchange and soil pH conditions may affect nitrogen mineralisation and nitrate formation differently in top- and subsoils. In order to study such influences, undisturbed soil samples were taken in 1991 with steel cylinders (height: 10 cm) from the 10-20, 40-50 and 70-80 cm soil layers of a fen peat soil at Geråsen in central Sweden. The cylinders had plastic lids with a small hole for ventilation. The soil water in the cylinders was regulated differently by applying three water tensions: 0.0 metre water column (mwc), 1.0 mwc or 6.0 mwc. Soil cylinders with these treatments (Table 1) were incubated from 24/9/1991 at temperatures simulating autumn, winter and spring conditions in the region in question (Figure 1). Six cylinders were taken out in each treatment for determination of ammonium and nitrate nitrogen in each cylinder on 24/9/1991, 4/12/1991, 19/3/1992 and 4/5/1992.

In the soil from the 1-20 cm layer, nitrate nitrogen increased considerably during the total incubation period (24/9–4/5), with an addition of more than 40 kg N/ha under good “drainage” conditions (1.0 and 6.0 mwc), whereas the amounts of ammonium nitrogen remained small, on average 1.8 kg N/ha (Figure 3). This was also valid for the peat soil from the 40-50 cm layer (ca. 0.5 kg N/ha). Here nitrate nitrogen increased by 16-17 kg N/ha at all three soil water tensions during the whole incubation period. On the contrary, the amounts of nitrate nitrogen remained very small in the subsoil from the 70-80 cm layer (Figure 3), obviously due to presence of gyttja with therefore a low pH value (4.0), also impeding nitrogen mineralisation. This is confirmed by a study of the amounts of ammonium and nitrate nitrogen in the 0-30, 30-60 and 60-90 cm lay-

ers in this soil on 22/5/1991, showing extremely small amounts of nitrate nitrogen within the 60-90 cm soil depth (Figure 2). Moreover, the amounts of ammonium nitrogen were clearly larger than in the soil layers above. This agrees with results from another fen peat soil, with a pH value of 3.9 in subsoil layers containing gyttja (Lindén, 2013). Water saturation (0.0 mwc) during incubation led to decreased amounts of nitrate nitrogen in the soil from the 10-20 cm layer during the periods 24/9-4/12 and 19/3-4/5, probably due to denitrification in anaerobic spots. Simultaneously, nitrogen mineralisation and nitrate formation may have taken place but to a decreased extent. In the soil from the 40-50 and 70-80 cm layers, denitrification did not seem to occur.

The results indicate that significant nitrogen mineralisation and nitrate formation would occur in the soil down to at least 50 cm under adequate drainage conditions in the field. The subsoil within this depth should therefore contribute to the nitrogen supply of the crops. The results indicate that rising the groundwater table up to 10-20 cm below the soil surface would reduce the amounts of nitrate nitrogen as water saturation should cause denitrification and probably also reduced mineralisation and nitrate formation. However, results achieved at water saturation in the soil from the 40-50 cm layer (Figure 3b) contradict this suggestion but may be considered an artefact due to the incubation technique. As nitrogen mineralisation and nitrate formation were impeded at about 70-80 cm soil depth due to the low pH value, this soil layer should not contribute to plant supply of nitrogen and nitrate leaching.

A statistical study was carried out based on the six cylinders in each treatment and at each sampling time. By means of the standard deviations, it was demonstrated that 6 cylinders were enough for reducing the standard error to at most 5 kg nitrate nitrogen per ha in a 10-cm soil layer. For restricting the standard error to at most 2 or 3 kg N/ha, the number of cylinders required became too large from a practical point of view.

## Inledning

Grödornas tillgång till utnyttjbart jordkväve i mulljordar brukar vara i storleksordningen 100-250 kg N/ha (Lindén, 2013 och 2015), vilket är betydligt mer än i fastmarksjordar (Lindén, 1987; Lindén et al., 1992a; Delin, 2005; Engström, 2010). I odlade organogena jordar brukar det på våren finnas det stora mängder övervintrande mineralkväve (ammonium- och nitratkväve), i storleksordningen 100-300 kg N/ha inom 0-90 cm djup (Anderson, 1981; Lindén, 2013 och 2015), jämfört med vanligen 40-50 kg N/ha, ofta ännu mindre, i svenska fastmarksjordar efter stråsåd (Mattsson & Anderson, 1984; Lindén, 1987; Lindén et al., 1992b). Vid odling av vårsåd på mulljordar återstår det vid avslutad kväveupptagning på sensommaren eller förhösten i de flesta fall ganska små mängder outnyttjat mineralkväve tack vare grödornas kväveupptagning under växtsäsongen (Lindén, 2013 och 2015). Sådana förhållanden minskar utlakningsrisken. Sedan medför emellertid höst- och vintermineraliseringen betydande tillskott av mineralkväve i mulljordar, så att det på senhösten kan finnas mängder motsvarande 60-160 kg N/ha inom 90 cm djup eller rentav mer.

Dessa stora förråd av mineraliserat kväve i organogena jordar bör medföra större kväveutlakning under vinterhalvåret än i fastmarksjordar. Det gäller då att motverka anhopningen av mineralkväve i mulljordar under hösten och vintern. Odling av vall och fånggrödor, som växer under hösten och därmed tar upp kväve under denna tid, bör i viss mån bidra till detta.

En annan åtgärd vore höjning av grundvattennivån under vinterhalvåret, till i höjd med matjorden, för att minska nedbrytningen av det organiska materialet i marken och därmed hämma markandning och kvävemineralisering. Ökande vattenhalter i en mulljord i Finland (från ca 50 till drygt 90 volymsprocent) visade sig minska markandningen, mätt som alstrad koldioxid (Koizumi et al., 1999). Om kol och kväve antas frigöras vid nedbrytning av det organiska jordmaterialet i relation till kol-kväveknoten, innebär nedsatt markandning också minskad kvävemineralisering i samma utsträckning. Vid vattenhalter i viktsprocent motsvarande 100-120 % av den maximala vattenhållande förmågan (*maximale Wasserkapazität* –

metod ej närmare beskriven) fann Scheffer (1977) i inkubationsförsök med två organogena jordar, att den biologiska aktiviteten hämmades betydligt, med nedsatt koldioxidbildning, jämfört med vattenhalter motsvarande 60 och 80 % av den maximala vattenhållande förmågan. Kväveminaliseringen minskade likaså, nitrifikationen stoppades och nitratkvävehalterna blev låga, till vilket denitrifikation ansågs kunna vara en bidragande orsak. Ett ”grundvattenstånd” på 20 cm under ”markytan” i 80 cm djupa lysimetrar med en mulljord medförde enligt Scheffer & Tóth (1979) obetydliga nitratmängder på olika djup jämfört med en ”grundvattennivå” på 70 cm djup eller växlande vattennivåer (mellan 30 och 70 cm).

Höjning av grundvattennivån i en mulljord för att motverka nedbrytningen av det organiska materialet (och åtföljande koldioxidavgång) ger emellertid inte alltid en sådan effekt. Berglund (2011) fann i lysimeterförsök med två mulljordar, att en relativt hög grundvattennivå (på 40 cm djup), jämfört med en lägre (80 cm), istället ökade koldioxidavgången under sommarhalvåret genom gynnsammare vattenhalt i jordens översta delar. Grundvattennivån skulle då istället kunna höjas under vinterhalvåret upp till matjordens centrala delar för att åstadkomma vattenmättnad där. Då borde nedbrytningen av organiskt material, kväveminaliseringen och nitratbildningen även hämmas ytligt i markprofilen. Där åkermark med organogen jord är invallad såsom i delar av Kvismardalen (jmf. von Horn, 1982; Lennqvist, 2008), skulle man i detta syfte kunna låta grundvattenståndet stiga under hösten, hålla det högt under hela vinterhalvåret och sedan pumpa ut vattnet, när tiden för vårbruket närmar sig.

I den undersökning som här redovisas var syftet att i inkubationsstudier efterlikna olika grundvattennivåers inverkan på kväveminalisering och nitratbildning under vinterhalvåret på skilda djup i en organogen jord. För detta togs jordprover 1991 från en odlad mulljord vid Geråsen, Viby socken i västra Närke. Inkubationen genomfördes med olika vattenhalter i de uttagna mulljordsproverna. Dessa placerades i en klimatkammare, där temperaturförhållanden som kan råda i Mellansverige från slutet av september och fram till månadsskiftet april-maj efterliknades.

## **Bakgrund: Undersökningar av kväveutlakning på fältet vid Geråsen**

Det åkerfält (11 ha) vid Geråsen i Närke, där jordprov togs ut 1991 för den nämnda inkubationsundersökningen, utnyttjades 1982-97 som observationsfält för utlakningsstudier. Dessa utfördes av Avdelningen för vattenvårdslära vid den tidigare Institutionen för markvetenskap, SLU (Wall Ellström, 1990; Kyllmar et al., 1995; Johansson et al., 1999; Ulén et al., 2001). Fältet är beläget invid Täljeåns övre lopp (se omslagsbilden). Fältet saknade naturlig avrinning på grund av lågt läge i förhållande till ån. Invallning och täckdikning hade gjorts för att kunna odla marken. Vatten från invallningen pumpades ut av brukaren vid behov, företrädesvis på hösten och på våren. Grödorna åren 1982-97 utgjordes nästan enbart av vall. En mindre del låg periodvis obrukad som obearbetad vallträda. Vattenprov för utlakningsmätningarna togs ut i en pumpstation vid invallningen, dit dräneringsledningarna på fältet hade letts. Genom mätningar i det utpumpade dräneringsvattnet fastställdes som medeltal för åren 1982-97 en utlakning motsvarande 21 kg totalkväve per ha och år, varav 5 kg ammonium- och 7 kg nitratkväve. Andelen nitratkväve var således förhållandevis ringa.

Den totala mängden utlakat kväve (21 kg/ha) förefaller liten för att vara en odlad mulljord med hänsyn till sådana jordars normalt stora kvävemineriseringsförmåga jämfört med fastmarksjordar (Lindén, 2013 och 2015). En orsak torde vara att vall odlades. En annan förklaring tycks vara, att fältet utgör ett utströmningsområde för grundvatten från annan mark, så att dräneringsvattnet från fältet späddes ut (Johansson et al., 1999).

Den jämförelsevis ringa uttransporten av kväve med dräneringsvattnet vid Geråsen kan jämföras med mätningar 1994-2001 i Husåns avrinningsområde sydost om Örebro. Området omfattade totalt 720 ha med två tredjedelar åkermark, varav ca 70 % odlad mulljord (Nätterlund, 2003). I åvattnet uppmättes förluster motsvarande en kväveutlakning från marken på i medeltal 31 kg N/ha. Av detta kväve beräknades 90 % härstamma från åkerjord. Eftersom kväveutlakningen på odlade fastmarksjordar i Mellansverige brukar vara i storleksordningen 5-20 kg N/ha och år (Kyllmar et al., 1995),

kan man anta att förlusterna från själva mulljordarna inom Husåns avrinningsområde var större än den uppmätta genomsnittsmängden 31 kg N/ha.

### **Material och metoder**

För att bl.a. undersöka kvävemineraliseringens (ammonifikationens) och nitratbildningens (nitrifikationens) omfattning på olika djup i mulljorden vid Geråsen, bl.a. beroende på vattenmättnadsgrad, togs jordprover ut skiktvis på 10-20, 40-50 och 70-80 cm djup. Provtagningsplatsens läge hade följande koordinater (enligt systemet WGS 84): 59° 3' 31,5<sup>11</sup> N, 14° 54' 18,4<sup>11</sup> E. Marken utgjordes av en kärrtorvjord.

#### **Markfysikaliska och -kemiska analyser**

Jordproverna togs ut i ostörd lagring med 10,0 cm höga nedslagningscylindrar av stål (Andersson, 1955) den 22 maj 1991. Cylindrarna hade en diameter på 7,2 cm och en volym på 407 cm<sup>3</sup>. Proverna användes dels för markfysikaliska och -kemiska analyser samt dels för inkubationsstudierna.

Sex sådana delprover per 10-cm-skikt valdes slumpmässigt ut för markfysikaliska undersökningar: porvolym, volymvikt och vattenhalter vid olika vattenavförande tryck motsvarande 0,0, 1,0 och 6,0 meter vattenpelare (mvp) (tabell 1) eller följande pF-värden: ca 0 (full vattenmättnad), 2 respektive ca 2,8. Dessa bestämningar gjordes vid dåvarande Avdelningen för hydroteknik vid Institutionen för markvetenskap, SLU. Efter vätning underifrån till full vattenmättnad placerades cylindrarna på en sandbädd. Med hjälp av hängande vattenpelare dränerades sedan jorden vid de nämnda vattenavförande trycken. När inget mer vatten dränerades bort, vägdes proverna. Vikten bestämdes dessutom initialt och efter slutlig torkning i vacuumugn. De markfysikaliska undersökningarna i laboratoriet ifråga följer standarden ISO11274.

Skiktvisa jordprover av detta slag användes även för bestämning av glödgningsförlust, pH(H<sub>2</sub>O), totalkol och totalkväve. Mullhalterna beräknades med hjälp av totalkolet i jorden, med det traditionella

Tabell 1. Behandlingar av jorden under inkubationen, med olika vattenhaltsförhållanden motsvarande valda vattenavförande tryck angivna i meter vattenpelare (mvp).

*Table 1. Soil treatments during the incubation study, with different moisture contents corresponding to chosen soil water tensions, expressed in metre water column (mwc). Vattenmättnad = complete water saturation, Vattenhalt motsvarande = soil moisture content corresponding to, mvp = mwc.*

Behandling <i>Treatment</i>	Markskikt <i>Soil layer</i> (cm)	Vattenhalter i jorden vid inkubationsstarten <i>Soil moisture contents at the start of the incubation</i>	Antal cylinderprover <i>Number of cylinder samples</i>
Aa	10-20	Vattenmättnad (0,0 mvp)	24
Ab	10-20	Vattenhalt motsvarande (1,0 mvp)	24
Ac	10-20	Vattenhalt motsvarande (6,0 mvp)	24
Ba	40-50	Vattenmättnad (0,0 mvp)	24
Bb	40-50	Vattenhalt motsvarande (1,0 mvp)	24
Bc	40-50	Vattenhalt motsvarande (6,0 mvp)	24
Ca	70-80	Vattenmättnad (0,0 mvp)	24
Cb	70-80	Vattenhalt motsvarande (1,0 mvp)	24
Cc	70-80	Vattenhalt motsvarande (6,0 mvp)	24

antagandet att kolhalten utgjorde 58 % av markens organiska substans (mullhalt = C \*1,724). I samband med den nämnda jordprovtagningen i maj 1991 gjordes visuella bedömningar av jordartsammansättningen och andra egenskaper hos markprofilen ned till 90 cm djup (se nedan). Vidare bestämdes den organogena jordens humifieringsgrad på 10-20, 40-50 och 70-80 cm djup enligt von Post (von Post, 1922; Osvald, 1937). Dessa analyser utfördes vid dåvarande Statens Lantbrukskemiska Laboratorium i Umeå.

### Inkubationsstudier

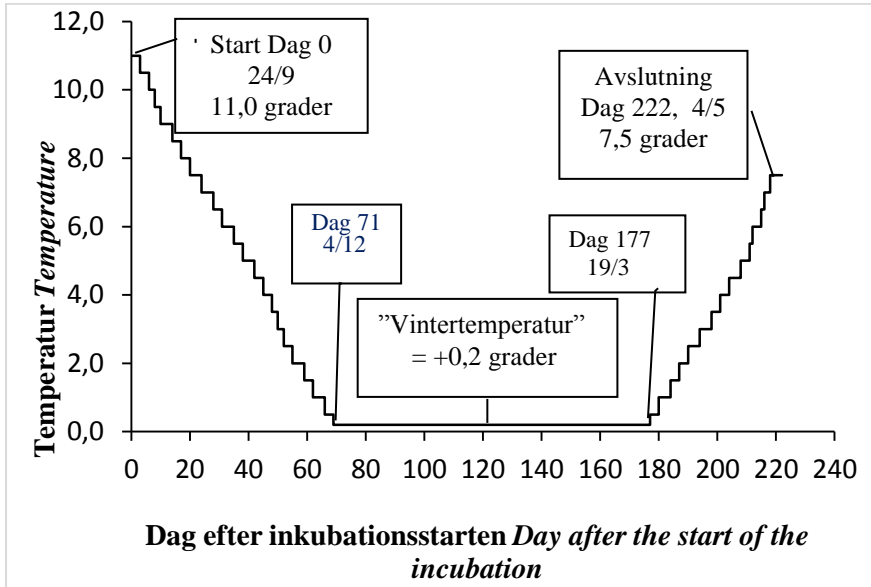
Ytterligare 72 ostörda jordprover togs ut på vart och ett av de tre djupen (10-20, 40-50 och 70-80 cm) i juni 1991 för inkubationsstudier. Som nämnts var avsikten främst att studera hur kväve mineraliseringen, med bildning av ammonium- och nitratkväve, påverkades av olika vattenregimer i jorden och med tilltagande djup i marken (tabell 1). Proverna förvarades vid ca +4°C fram till dess att vattenhalterna skulle justeras enligt följande. Efter

fullständig mätning med vatten reglerades vattenhalten i jordproverna från varje skikt så, att mätnadsgrader motsvarande vattenavförande tryck på 0,0 mvp (24 prover per skikt), 1,0 mvp (24 prover) och 6,0 mvp (24 prover) erhöles såsom ovan med avseende på de markfysikaliska studierna. Vattenhalter vid omkring 1,0 mvp ( $pF = 2$ ) betraktas ofta som jordens vattenhållande förmåga vid dränering till fältkapacitet, med grundvattenyta en meter djupare ned i marken. Vid vattenavsugning motsvarande 6,0 mvp ( $pF = 2,8$ ) erhålls en vattenhalt inom området med ej dränerbart men växttillgängligt vatten. Arbetet med att justera vattenhalterna, som började med vätning av proverna och avslutades med avsugning till 6,0 mvp, tog ca 1,5 månader och ägde rum vid 20°C. Efter provtagningen i fält var stålcyldrarna försedda med plastlock i den nedre och den övre änden. I det övre plastlocket hade små hål gjorts för ett begränsat lufttillträde i syfte att motverka oavsiktliga anaeroba förhållanden under inkubationen.

Den 24 september 1991 påbörjades inkubationen, då samtliga cylindrar (216 st) med jordprover ställdes in i en klimatkammare. Härvid uppdelades cylindrarna på behandlingsled med avseende på vattenhaltsregimer och olika markdjup enligt tabell 1.

Avsikten var att i klimatkammaren efterlikna temperaturförhållandena i trakten av Geråsen under hösten, vintern och våren (från slutet av september till början av maj) och deras inverkan på marktemperaturen. Som utgångspunkt användes därför normaltemperaturer från SMHI:s meteorologiska station Örebro-Ekeby. Stationen var belägen omkring 30 km nordost om Geråsen. Månadsmedeltemperaturer, som fanns tillgängliga för 1964-1991, låg till grund för temperaturstyrningen i klimatkammaren: september 11,0°C, oktober 6,5°C, november 1,4°C, december -1,8°C, januari -4,0°C, februari -4,6°C, mars -0,5°C, april 4,2°C och maj 10,3°C. Inkubationsperioden startade med en temperatur på 11,0°C den 24 september, varefter den sänktes med 0,5°C med 2-4 dagars mellanrum enligt figur 1. Den 2 december hade temperaturen nått ned till +0,2°C, varefter den hölls på denna nivå till den 19 mars. Syftet var att efterlikna vinterförhållanden utan tjäle i marken genom ett isolerande snötäcke och/eller genom en mildvinter. Efter den 19 mars





Figur 1. Styrning av temperaturen ( $^{\circ}\text{C}$ ) under inkubationstiden den 24 september – 4 maj (222 dygn).

*Figure 1. Regulation of the temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) during the incubation period (24 September – 4 May, 222 days). Dag = day, Vintertemperatur = winter temperature, grader = degrees, Avslutning = end.*

höjdes inkubationstemperaturen med  $0,5^{\circ}\text{C}$  var 3:e eller 4:e dag. Den nådde  $7,5^{\circ}\text{C}$  den 4 maj, då inkubationen avslutades. Det beaktades inte, att förändringarna av marktemperaturen normalt sker med tilltagande fördröjning med ökat markdjup och att temperaturskillnaderna mellan årstiderna jämnas ut med djupet.

Den 24 september togs sex cylindrar i varje behandling slumpmässigt ut för analyser. Först användes en del av jorden i varje cylinder ut för bestämning av ammonium- och nitratkväve (se nedan). Därefter utnyttjades återstoden för att fastställa volymvikt och aktuell vattenhalt. Sådana provtagningar och analyser återkom därefter vid följande tidpunkter: 04.12.1991, 19.03.1992 och 04.05.1992.

## Bestämning av ammonium- och nitratkväve i jordproverna

För bestämning av mängderna mineralkväve (ammonium- och nitratkväve) i jorden efter varje avslutad inkubationsperiod tömdes cylindrarna helt, varefter jordinnehållet blandades väl. Därefter vägdes 40 g jord in, varvid större förekommande träbitar, som härstammade från torvjorden (se nedan), togs bort. Den invägda jorden tillsattes 100 mL 2 M KCL, dvs. i jord-vätskeförhållandet 1:2,5 (jmf. Bremner & Keeney, 1966) och extraherades i två timmar. Extrakten förvarades vid ca 0°C i två-tre dagar fram till analys. Därvid bestämdes ammonium- och nitratkväve kolorimetriskt med en TRAACS 800. Analysvärdena räknades om till kilogram per ha skiktvis i marken (10-cm-skikt) med beaktande av fastställda volymvikter och vattenhalter i proverna ifråga. Vattenhalterna bestämdes genom torkning vid 105°C av omkring 75 g jord från varje cylinder.

På liknande sätt bestämdes mineralkväve i marken efter provtagning den 22 maj 1991 ned till 90 cm djup. Jordprov togs då ut med uppdelning av marken i skikten 0-30 cm (24 borrstick), 30-60 cm (12 stick) och 60-90 cm (12 stick). Jordproverna förvarades svalt under fältarbetet, lagrades sedan i kylskåp och homogeniserades i färskt tillstånd dagen därpå. Därefter vägdes 100 g fältfuktig jord in och extraherades med 250 mL 2 M KCl i två timmar. Analysvärdena räknades även här om till kilogram per ha i varje 30-cm-skikt i marken med beaktande av fastställda volymvikter och aktuella vattenhalter i proverna.

## Resultat och diskussion

### Jordförhållanden

Matjorden och alven ned till ca 65 cm djup på provtagningsplatsen inom det invallade fältet vid Geråsen utgjordes av väl förmulnad kärrtorvmull (tabell 2 och 3). I det provtagna skiktet på 10-20 cm djup fastställdes en mullhalt på 49 % (tabell 3) och en humifieringsgrad motsvarande H9-10 (tabell 2) samt på 40-50 cm djup 59 % mull och en humifieringsgrad lika med H9. Enligt von Post (1922) avser H9 ”så gott som fullständigt humifierad eller nästan helt dyartad torv, i vilken ingen växtstruktur framträder”. H10 be-

Tabell 2. Jordart, humifieringsgrad (von Post, 1922) och markfysikaliska egenskaper i mulljorden vid Geråsen. Medeltal och standardavvikelser. Vattenavförande tryck uttrycks i meter vattenpelare (mvp).

*Table 2. Soil type, degree of soil decomposition (humification; von Post, 1922) and soil physical properties in the organic soil at Geråsen. Averages and standard deviations. Soil water tensions are expressed as mwc (metre water column). Markdjup = soil layer, Jordartsbeteckning = Swedish designation of soil types, Humifieringsgrad = degree of soil decomposition, Porvolym = porosity, Vattenhalt i volymsprocent = soil moisture content, % by volume, Vattenmättnad = complete water saturation, Vattenavförande tryck (mvp) = soil water tension (mwc), Volymvikt = weight by volume. Vid = at.*

Markdjup, cm	Jordartsbeteckning	Humifieringsgrad	Porvolym, %	Vattenhalt i volymsprocent			Volymvikt, kg/dm <sup>3</sup>
				Vid vattenmättnad 0,0 mvp	Vid 1,0 mvp	Vid 6,0 mvp	
10-20	kt M	H 9-10	73,2 ±0,9	70,5 ±0,7	58,1 ±1,6	51,3 ±1,3	0,49 ±0,02
40-50	kt M	H 9	86,7 ±0,7	79,6 ±1,8	70,1 ±3,0	55,1 ±2,5	0,24 ±0,01
70-80	g kt M	H 8	90,0 ±0,9	83,7 ±1,0	68,4 ±2,1	44,2 ±1,3	0,18 ±0,02

Tabell 3. Glödningsförlust och markkemiska egenskaper i de undersökta markskikten i mulljorden vid Geråsen.

*Table 3. Loss on ignition and soil chemical properties in the investigated layers of the organic soil at Geråsen. Markdjup = soil layer, Glödningsförlust = loss on ignition, Totalkol = total carbon, % av ts = % of DM, Mullhalt = soil organic matter content (SOM), Totalkväve = total nitrogen, Ton/ha = tonnes/ha.*

Markdjup, cm	Glödningsförlust, %	Totalkol, % av ts	Mullhalt* (C*1,724) % av ts	Totalkväve		Kolkvävekvot (C/N)	pH (H <sub>2</sub> O)
				% av ts	Ton/ha		
10-20	50,2	28,6	49,4	1,92	9,4	14,9	4,8
40-50	63,7	34,0	58,7	1,91	4,6	17,8	5,0
70-80	54,5	38,1	65,7	2,06	3,7	18,4	4,0

\*) Beräkning under sedvanligt antagande att kol ingår till 58 % i den organiska substansen. *Calculation based on the usual assumption that carbon constitutes 58 % of SOM.*

beskrivs som ”fullständigt humifierad eller helt dyartad torv, i vilken ingen växtstruktur framträder”. Trots den enligt analysen långt gångna nedbrytningen av torven i 40-50-cm-skiktet fanns det på 25-65 cm djup pinnar, träbitar och bark inblandade i jorden.

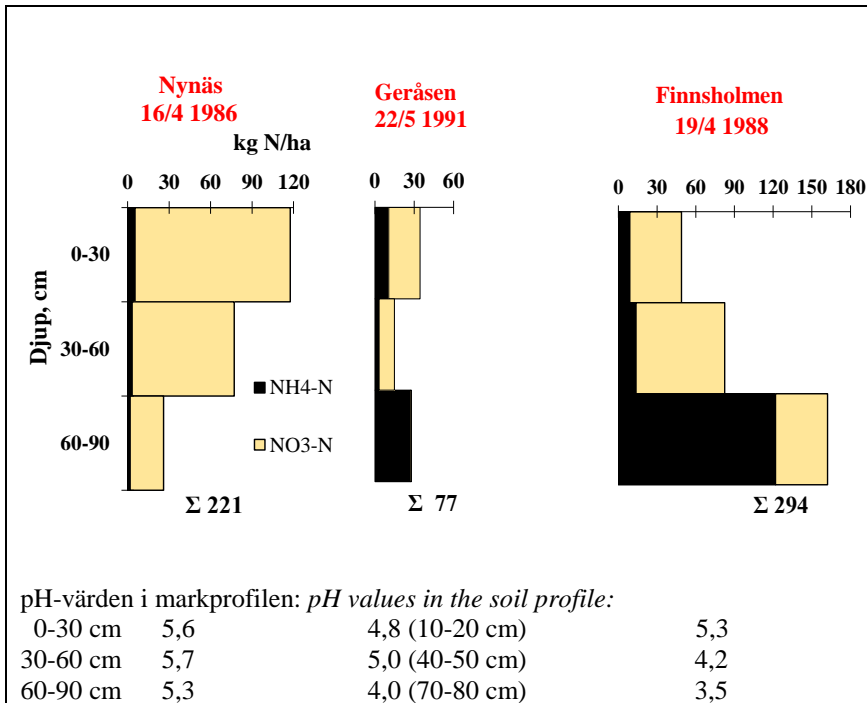
Under 65 cm och ned till det största undersökta djupet 90 cm fastställdes småfibrig torv, dock överst med enstaka rester efter träd. I det organogena materialet här tycktes det ingå vass och gyttja. På 70-80 cm djup fastställdes en humifieringsgrad motsvarande H8 (avseende ”väl humifierad eller starkt dyhaltig torv med mycket otydligt synbar växtstruktur” enligt von Post 1922), tabell 2. Mullhalten uppgick till 66 % (tabell 3).

På 30-40 cm djup återfanns ett gammalt täckdike. Eftersom sådana diken enligt äldre rekommendationer skulle anläggas på omkring en meters djup i mulljordar (Osvald, 1937), tyder de återfunna täckdiketrören på en omfattande bortodling. Man kan enligt Berglund (1989, 1996a) och Berglund (2011) räkna med en marksjunkning med 1-2 cm per år vid odling av vall och stråsäd.

Volymvikterna var låga, särskilt i alven, med värden på i medeltal 0,24 och 0,18 kg/dm<sup>3</sup> på 40-50 cm respektive 70-80 cm djup (tabell 2). På 10-20 och 40-50 cm djup var pH-värdet 4,8 respektive 5,0, men i skiktet 70-80 cm så lågt som 4,0. Liknande låga eller rentav ännu lägre pH-värden i jordar med gyttjematerial i alven har fastställts av Berglund (1996b) och Lindén (2013). Trots det låga pH-värdet på 70-80 cm (och troligen i närmast angränsande skikt ovanför) återfanns rötter ända till 70-80 cm djup. Detta rotdjup tyder på att växtnäring och vatten kunde utnyttjas ned till ungefär denna nivå i marken

#### Mineralkväve i marken

Som nämnts togs jordprover ut på 0-30, 30-60 och 60-90 cm djup inom provtagningsplatsen vid Geråsen den 22 maj 1991 för bestämning av ammonium- och nitratkväve (figur 2). Grödan var en flerårig vall, som dittills hunnit växa till omkring 2 dm höjd under våren. Inom 0-90 cm djup fastställdes 77 kg mineralkväve per ha,



Figur 2. Mineralkväve (ammonium- och nitratkväve) inom 0-30, 30-60 och 60-90 cm markdjup i tre odlade organogena mulljordar: vid Nynäs i Kvismardalen i Närke (Lindén, 2015), Geråsen, Viby socken i sydvästra Närke och Finnsholmen i nordvästra Uppland (Lindén, 2013).  $\Sigma$ -tecknet avser summa ammonium- och nitratkväve (kg/ha) inom 90 cm djup.

Figure 2. Soil mineral nitrogen (ammonium and nitrate nitrogen) within the 0-30, 30-60 and 60-90 cm soil layers in three cultivated organic soils: at Nynäs in the Kvismar Valley in the province of Närke (Lindén, 2015), Geråsen in south-west Närke and Finnsholmen in the province of Uppland /Lindén, 2013). The sign  $\Sigma$  refers to the sum of ammonium and nitrate nitrogen (kg/ha) within 90 cm soil depth. Djup = soil depth.

varav 41 kg  $\text{NH}_4\text{-N}$  och 37 kg  $\text{NO}_3\text{-N}$  per ha (figur 2). Mineralkvävemängden var visserligen större än på våren i fastmarksjordar, där man efter förfrukt stråsäd brukar finna i storleksordningen 40-50 kg N/ha inom 90 cm djup (Lindén, 1987; Lindén et al., 1992b; Delin, 2005; Engström, 2010). Men mineralkväveförrådet var litet jämfört med det vanliga på våren efter stråsäd i odlade organogena jordar. Exempel på detta är de kväveprofiler från mulljordar vid Finnsholmen i Uppland (Lindén, 2013) och Nynäs i Närke (Lindén,

2015), som också tagits med i figur 2. I undersökningar på mulljordar i Kvismardalen i Närke fann Lindén (2015) i medeltal 144 kg mineralkväve per inom 0-90 cm djup (variationsbredd: 35-300; n = 16). Dessa refererade fall avser dock mineralkväve före vårbruket på höstplöjd mark och efter stråsäd. På fältet vid Geråsen kan det mindre mineralkväveförrådet delvis förklaras av att vallen måste ha tagit upp kväve från jorden under våren fram till provtagningen den 22 maj. Frånvaron av jordbearbetning är en annan förklaring, eftersom denna stimulerar mineraliseringen (Stenberg et al., 1999).

Inom 0-90 cm djup fanns det i markprofilerna vid Nynäs, Geråsen och Finnsholmen ammoniumkväve i mängder motsvarande 10, 41 respektive 144 kg N/ha (figur 2). Vid Geråsen och Finnsholmen fastställdes det mesta av detta ammoniumkväve i skiktet 60-90 cm: 27 respektive 122 kg N/ha jämfört med 2 kg vid Nynäs (figur 2). På detta djup uppgick pH-värdena till 3,5 vid Finnsholmen (Lindén, 2013), 4,0 vid Geråsen (tabell 3) och 5,3 vid Nynäs (Lindén, 2015), se även figur 2. Det förefaller således som om pH-värden omkring 4,0 och lägre i alven kan medföra anhopning av ammoniumkväve, i vart fall under 60 cm djup som här. Förklaringen torde vara, att så låga pH-värden hämmar nitrifikationen av det ammoniumkväve som uppkommit genom mineralisering på denna nivå.

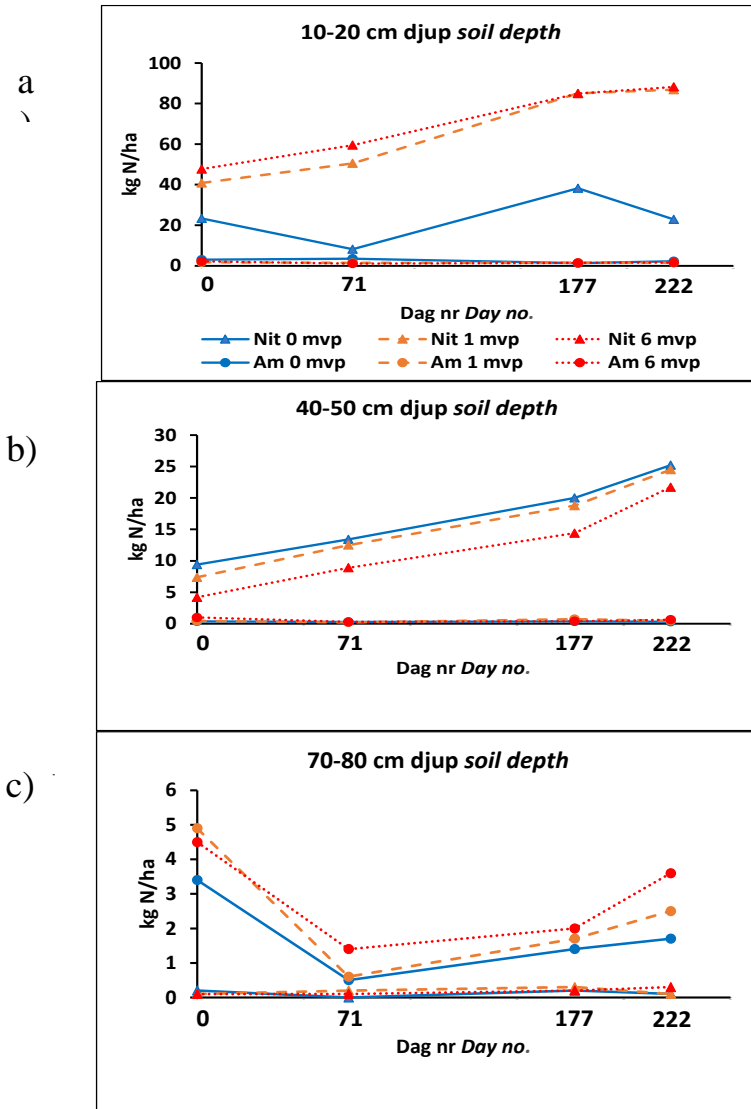
I marken vid Finnsholmen fanns mycket nitratkväve på 60-90 cm djup (Lindén, 2013). Nitratkväve, som återfinns i alvskikt med låga pH-värden såsom i denna mark, kan ha vaskats ned dit från högre liggande jordlager, där nitratbildning har kunnat ske tack vare bättre pH-värden. Detta föreföll vara fallet vid Finnsholmen. Däremot fanns ytterst lite nitratkväve på 60-90 cm djup i marken vid Geråsen: 1 kg N/ha (ej synligt i figur 2 med den använda skalan). Nitratkväve borde även där ha vaskats ned med sjunkvattnet från högre markskikt. Ytterligare en möjlig förklaring till frånvaron av nämnvärda mängder nitratkväve kan därför vara, att fältet som nämnts utgör ett utströmningsområde för grundvatten från annan mark (Johansson et al., 1999). Det dittransporterade vattnet kan genom upptrycket på platsen tänkas ha spätt ut det ursprungliga markvattnet på 60-90 cm djup och dessutom sänkt nitrathalten i det dräneringsvatten som rann till pumpstationen i invallningen.

Förändringar av mängderna ammonium- och nitratkväve under inkubationsperioden

Inför starten av inkubationen (24/9) justerades som nämnts vattenhalten i jorden i stålcyldrarna så, att tre vattenhaltsregimer uppkom med följande vattenavförande tryck: 0,0 mvp ("vattenmättnad"), 1,0 mvp och 6,0 mvp (tabell 1). För att beskriva förändringarna av mängderna ammonium- och nitratkväve i jorden under inverkan av vattenhaltsregimer och markdjup (10-20, 40-50 och 70-80 cm djup) togs sex stålcyldrar ledvis ut vid vart och ett av fyra provtagningstillfällen (den 24/9, 4/12, 19/3 och 4/5) för analys. De erhållna värdena räknades som nämnts om till kg N/ha inom ett 10 cm djupt jordlager med beaktande av aktuella volymvikter och vattenhalter.

Av figur 3a-c framgår att ammonium- och nitratkvävemängderna redan i samband med starten av inkubationen den 24/9 var olika vid de tre vattenhaltsregimerna. Orsaken torde främst vara, att det uppkommit viss kvävemineralsering och nitratbildning, samt vid vattenmättnad troligen även denitrifikation, under arbetet med att justera vatteninnehållet i jorden till de önskade vattenhaltsregimerna. Detta tog lång tid och skedde vid 20°C enligt de förutsättningar som rådde i laboratoriet ifråga. Vidare måste avsguningen av vatten vid de vattenavförande trycken på 1,0 och 6,0 mvp ha medfört att nitratkväve avlägsnades ur jorden. Genom ammoniumkvävet adsorption till markkolloider torde dock förlusterna av sådant kväve ha varit små eller obetydliga. Allt detta innebär att tolkningen av resultaten skall begränsas till förändringarna av ammonium- och nitratkvävet efter starten den 24/9.

I *jorden från 10-20 cm djup*, en väl förmultnad kärrtorvmulljord (tabell 2), visade sig ammoniumkvävemängderna vara mycket små (i medeltal 1,8 kg N/ha) och utan tydliga skillnader mellan vattenhaltsregimerna under hela inkubationsperioden (figur 3a). Det är troligt att ammoniumkväve, som bildats vid kvävemineralsering, snabbt omvandlats till nitratkväve. Nitrifikation pågick uppenbarligen även under "vinterperioden" (4/12-19/3), då temperaturen hölls vid +0,2°C.



Figur 3. Ammonium- och nitratkväve (beteckning: Am respektive Nit), kg N/ha, ledvis i jorden i stålcyldrarna (n = 6). Medeltal för varje marksskikt (10-20, 40-50 och 70-80 cm djup) under inkubationsperioden (24 sept. = dag 0, 4 dec. = dag 71, 19 mars = dag 177 och 4 maj = dag 222) samt vid tre vattenhaltsregimer (vattenavförande tryck): 0,0 mvp, 1,0 mvp och 6,0 mvp.

Figure 3. Ammonium (Am) and nitrate (Nit) nitrogen in each treatment with soil in the steel cylinders (n = 6). Averages for each soil layer (10-20, 40-50 and 70-80 cm depth) during the incubation period (24 Sept. = day 0, 4 Dec. = day 71, 19 March = day 177 and 4 May = day 222), and at three soil moisture tensions: 0.0 mwc (= 0 mvp), 1.0 mwc (= 1 mvp) and 6.0 mwc (= 6 mvp).



Kvävemineralisering och nitratbildning ledde till betydande ökningar av mängderna nitratkväve i skiktet 10-20 cm från starten den 24/9 till avslutningen av inkubationen den 4/5 (figur 3a). I ledet med ett vattenavförande tryck på 1,0 mvp ökade nitratkvävet med 46 kg/ha och vid 6,0 mvp med 41 kg N/ha. Mullhalten i detta markskikt uppgick till ca 50 %, kolkvävekvoten var 15 och pH-värdet 4,8 (tabell 3). Detta tillsammans med vattenhalterna vid de vattenavförande trycken på 1,0 och 6,0 mvp möjliggjorde uppenbarligen kraftig kvävemineralisering, och pH-värdet tillät tydligen fullständig nitrifikation. Mängderna nitratkväve tilltog kraftigt även under perioden med +0,2°C. Däremot minskade nitratkvävet i ledet med vattenmättnad (0,0 mvp) under ”höst”- och ”vårperioderna” (24/9–4/12 respektive 19/3–4/5). Det är troligt att vattenmättnaden ledde till denitrifikation under dessa båda skeden, samtidigt som kvävemineraliseringen hämmades. Scheffer & Tóth (1979) fann i lysimeterförsök med en organogen jord (*Niedermoorboden*) i Tyskland, att nitratkvävemängderna i markvattnet blev mycket små vid en ”grundvattennivå” på 20 cm djup jämfört med 70 cm djup. De angav dels nedsatt kvävemineralisering och dels denitrifikation som processer som minskade nitrathalten i jorden vid grundvattennivån på 20 cm djup.

I inkubationsförsök konstaterade Scheffer (1977) i Tyskland nedsatt koldioxidbildning och mindre kvävemineralisering i vattenmättad organogen jord (likaså en *Niedermoorboden*), med jordprov från 0-20 cm djup. De mindre nitratmängderna vid vattenmättnad (0,0 mvp) än vid 1,0 och 6,0 mvp i jorden från Geråsen kan således delvis bero på nedsatt nedbrytning av organiskt material och därmed minskad kvävemineralisering i den vattenmättade jorden.

Denitrifikation förutsätter tillgång till lämpligt substrat (kolkälla) för de verksamma bakterierna, vilket bör ha funnits i matjorden från fältet vid Geråsen (i form av döda rötter från vallen och annat lättnedbrytbart organiskt material). Under inkubationen uppkom som nyss nämnts uppenbarligen denitrifikation under ”höst-” och ”vårperioderna”. Det är anmärkningsvärt att nitratmängden istället ökade under ”vinterperioden”, trots vattenmättnad. Liksom under ”höst-” och ”vårperioderna” kan kvävemineralisering, nitrifikation

och denitrifikation ha pågått samtidigt (jmf. Kowalenko, 1978) i den vattenmättade jorden under ”vinterperioden”. De små hålen i locket på stålcyldrarna kan hela tiden ha släppt in lite luft, som möjliggjort detta. Under naturbetingelser bör atmosfärens luft likaså påverka marken ytligt vid vattenmättnad. Denitrifikation kan ha ägt rum i anaeroba ”fickor” i jorden (jmf. Owens, 1960). Under ”vinterperioden” kunde förklaringen till ökningen av nitratkvävmängderna vara, att denitrifikationen vid den låga temperaturen (+0,2°C) pågick långsammare än nitrifikationen. En sådan temperaturavhängig skillnad har dock inte kunnat beläggas i litteraturen.

Även i *jorden från 40-50 cm djup*, väl humifierad kärrtorvmulljord (tabell 2), visade sig ammoniumkväveinnehållet vara litet, bara 0,5 kg N/ha som medeltal för de olika provtagningstidpunkterna och vattenhaltsregimerna (figur 3b). En nästan linjär och likartad ökning av nitratkvävmängderna ägde rum vid alla tre vattenhaltsregimerna, med 16-17 kg N/ha, från starten den 24/9 till avslutningen den 4/5. Anhopningen av mineraliserat kväve i jorden från 40-50 cm djup blev dock mindre än från 10-20 cm djup i matjordslagret. Vid tolkningen av resultaten kan man bortse från att det vid 6 mvp fanns mindre nitratkväve vid inkubationsstarten (figur 3b). Detta torde som nämnts bero på kväveomsättningar under arbetet med att justera vattenhalten med avseende på de önskade vattenavförande trycken (se ovan).

Mullhalten på 40-50 cm djup uppgick till 59 %, kolkväveknoten var 18 och pH-värdet 5,0 (tabell 3). Dessa förhållanden möjliggjorde som framgått en ganska kraftig kvävemineralisering. pH-värdet hindrade inte fullständig nitrifikation, vilket de obetydliga ammoniumkvävmängderna under hela inkubationstiden tyder på. Även på detta djup syntes kvävemineraliseringen således snabbt följas av nitratbildning.

Att nitratkvävmängderna på 40-50 cm djup (figur 3b) även ökade vid vattenmättnad (0,0 mvp) tyder på liten eller obetydlig denitrifikation. Orsaken kan tänkas vara att lämpligt substrat (lättillgänglig kolkälla) i hög grad saknades för denitrifikationsbakterierna på

detta djup. Mängden döda rötter och annat lättnedbrytbart, nyare organiskt material bör ha varit ringa.

Det kan synas märkligt att nitratbildningen fortgick med praktiskt taget samma hastighet vid alla tre vattenhaltsregimerna (figur 3b). Detta tyder på lufttillträde genom hålet i locket på cylindrarna och tillräcklig syretillgång i jorden även vid vattenmättnad. Nitratbildningen vid vattenmättnad i markskiktet från 40-50 cm djup skulle kunna vara en artefakt orsakad av inkubationstekniken genom ett visst lufttillträde. Resultatet kan tänkas bli annorlunda i jord, som i verkligheten befinner sig på djupet ifråga, och om detta och ovanliggande skikt är vattenmättade. Om jorden däremot är väl dränerad, bör under fältförhållanden ett visst luftutbyte med atmosfären vara möjligt via makroporer, så att både kvävemineralisering och nitratbildning kan ske på detta djup.

I *jorden från 70-80 cm djup*, gyttjehaltig kärrtorvmulljord (tabell 2), uppgick mullhalten till 66 % och kolkväveknoten var 18, men pH-värdet visade sig vara så lågt som 4,0 (tabell 3). Detta sura förhållande synes bero på gyttjeinslaget i jorden. Det påverkade uppenbarligen både ammonium- och nitratkväveinnehållet i detta markskikt (figur 3c). Nitratkvävmängden blev högst obetydlig: 0,2 kg N/ha som medeltal för de fyra provtagningstidpunkterna och de tre vattenhaltsregimerna. Bildat ammoniumkväve kunde troligen inte nitrifieras. Scheffer (1977) fastställde likaså mycket låga nitratkvävehalter vid inkubation av en sur organogen jord, med  $\text{pH}(\text{CaCl}_2) = 4,2$ . Nitrifikationsbakterier kan mer eller mindre ha saknats på 70-80 cm djup i jorden från Geråsen eller åtminstone ha varit inaktiva (jmf. Scheffer, 1977).

Det fastställdes 2,2 kg ammoniumkväve per ha i genomsnitt för alla led med jord från 70-80 cm djup, vilket var något mer än i jorden från 10-20 och 40-50 m djup. Ammoniumkvävmängderna blev något större vid minskande vattenhalter och var störst vid 6 mvp (figur 3c). Detta tyder på att ökat lufttillträde genom lägre vattenhalt gynnade kvävemineraliseringen, om än i liten utsträckning.

Vid inkubationsstarten den 24/9 fanns i medeltal 4,3 kg ammoniumkväve per ha, varefter halterna blev lägre (figur 3c). Dessa förhållanden är svårförklarade. Minskningen under ”höstperioden” kan dock tyda på en tids kväveimmobilisering (jmf. Scheffer, 1977). Det organiska materialet tycktes vara mindre nedbrutet på 70-80 cm djup än i ytligare markskikt. Detta kan ha gett upphov till immobilisering under den tidigare delen av inkubationen. De svagt ökande ammoniumkvävemängderna under ”vinter-” och ”vårperioderna” torde bero på att en efterföljande, långsam nettomineralisering av kväve då pågick men utan åtföljande nitratbildning. Generellt sett förefaller den biologiska aktiviteten emellertid ha varit liten i jorden från 70-80 cm djup, vilket den obetydliga kväve-mineraliseringen och den obefintliga nitratbildningen tyder på.

Utvärdering av metodiken för inkubation av mulljord i ostörd lagring i stålcyllindrar

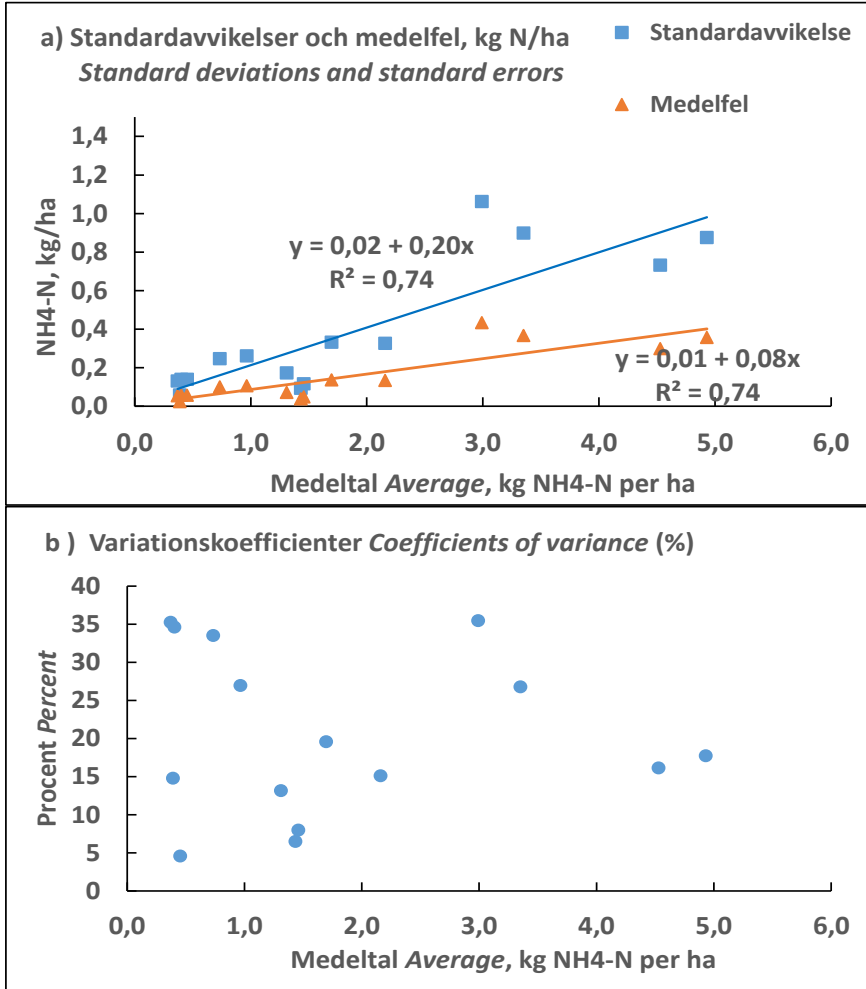
Vid inkubation av jord för växtnäringstudier (t.ex. kvävemineralisering) använder man normalt ett väl homogeniserat jordmaterial fritt från synliga växtrester, sten m.m. för att minimera störningar, som kan påverka resultatet av behandlingarna. I den inkubationsundersökning som här redovisas, med organogen jord uttagen i ostörd lagring med hjälp av stålcyllindrar (Andersson, 1955), var avsikten att bevara jordens naturliga lagring med dess porsystem och vattenbindande förmåga. Syftet med detta var, att så verklig-hetstroget som möjligt kunna belysa, hur kvävemineralisering och nitratbildning påverkades av olika vattenhaltsregimer. Varje jords porsystem fylls ju med vatten på ett specifikt sätt vid ökande vattenhalter, vilket inverkar på den luftfyllda porvolymens storlek. Dessa förhållanden styr i sin tur syreberoende mikrobiella processer såsom nedbrytning av organiskt material och nitrifikation. Vidare stimulerar jordbearbetning kvävemineraliseringen i marken (Stenberg et al., 1999). Homogenisering av inkubationsjord måste medföra en liknande påverkan. Man kan bl.a. inte bortse från att sådan omrörning av jorden skulle försvåra tolkningen av kväveprocesserna vid jämförelse av de olika markskikten (10-20, 40-50 och 70-80 cm djup), eftersom jordbearbetning i egentlig mening bara sker i matjordslagret. De bevarade strukturförhållandena i jorden

innebar dock att ojämnheter orsakade av små träbitar i torvjorden, växtrötter, eventuella maskar m.m. inte kunde motverkas.

Jord som inkuberats i ostörd lagring i stålcyllindrar kan således tänkas medföra större variation i resultaten vid bestämning av ammonium- och nitratkväve än homogeniserad jord. Därför ingick sex cyllindrar med jord i varje försöksled, och kväveanalyser gjordes i jorden från varje cylinder (se ovan).

Till skillnad från bestämningar av markfysikaliska egenskaper i marken saknades det dock erfarenhet av försöksfelens storlek vid bestämning av ammonium- och nitratkväve i jord uttagen med nedslagningscyllindrar. Därför genomfördes en statistisk utvärdering av analysresultaten försöksledsvis (markdjup, vattenregimer och provtagningstidpunkter) för dels ammonium- och dels nitratkväve med avseende på medeltal ( $\bar{x}$ ), standardavvikelse ( $s$ ), variationskoefficienter ( $100*s/\bar{x}$ ) och medelfel ( $m = s/\sqrt{n}$ , där  $\sqrt{n}$  avser roten ur antalet observationer). Beräkningen av dessa statistiska mått baserades på kvävevärden för var och en av de sex cyllindrarna per led (dvs.  $n = 6$ ). I denna statistiska studie ingick 18 ”försöksled” innefattande två av provtagningstillfällena (16/9 och 4/12), alla tre markskikten (10-20, 40-50 och 70-80 cm djup) samt de tre vattenhaltsregimerna (0,1, 1,0 mvp och 6,0 mvp). Mängderna ammonium- och nitratkväve beräknades i kg N/ha i ett 10 cm djupt markskikt med beaktande av aktuella vattenhalter och volymvikter.

**Ammoniumkvävemängderna** i de led som ingick i denna statistiska undersökning varierade ledvis från 0,4 till 5 kg N/ha (figur 4a) och var således generellt sett små (jmf. Lindén, 1981 och 2015). Som framgår av figur 4a ökade de ledvisa standardavvikelserna för ammoniumkväve ( $n = 6$  per led) med stigande medelvärde ( $R^2 = 0,74$ ). För värden på 3-5 kg N/ha erhöles standardavvikelse på ca 0,4-1,1 kg N/ha. Ett medelvärde på 1 kg N/ha gav en standardavvikelse på ca 0,2 kg. Eftersom antalet observationer var 6 och roten därur ( $\sqrt{n}$ ) är 2,45, blev medelfelen knappt hälften så stora som standardavvikelserna (figur 4a). Av figur 4b framgår att variationskoefficienterna varierade mellan 5 och 35 % men utan tydligt samband med medelvärdenas storlek.



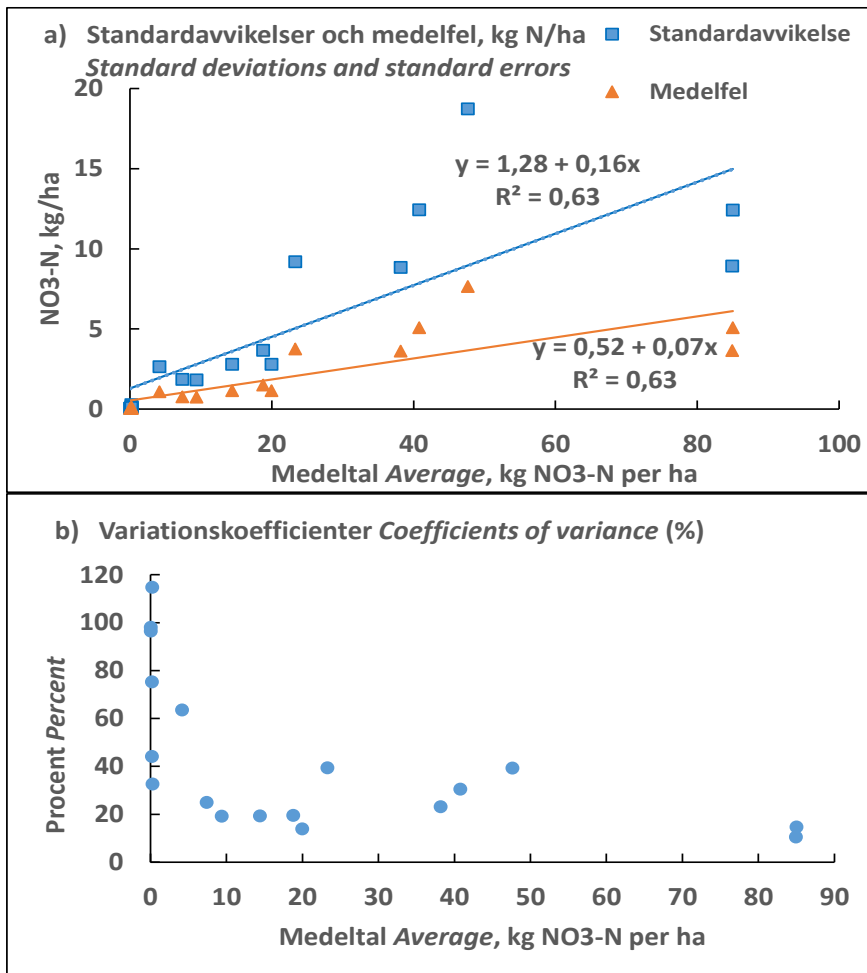
Figur 4. Medeltal (n = 6), standardavvikelser, medelfel och variationskoefficienter för ammoniumkväve (beräknat i kg N/ha i 10 cm djupa jordskikt) i vart och ett av 18 försöksled med mulljord, som inkuberats i stålcyllindrar. I var och ett av leden ingick sex cyllindrar.

*Figure 4. Averages (n = 6), standard deviations, standard errors and coefficients of variance for ammonium nitrogen (kg N/ha within 10-cm soil layers) in different treatments with organic soil incubated in steel cylinders. Each one of 18 treatment included six cylinders. Standardavvikelse = standard deviation, Medelfel = standard error.*

Eftersom ammoniumkvävemängderna genomgående var små i jämförelse med nitratkvävet (liksom vanligen under fältförhållanden, se ovan), påverkar medelfelens storlek inte nämnvärt tolkningen av analysresultaten i sammanhang där mineralkväveinnehållet (summa ammonium- och nitratkväve) i jorden exempelvis relateras till grödornas kväveupptag eller kvävegödslingsbehov. Medelfelen för ammoniumkväve (figur 4a) försvårade av samma skäl ej heller tolkningen av inkubationsresultaten i denna undersökning med jord från Geråsen, utom möjligen i proverna från 70-80 cm djup där ammoniumkvävemängder upp till 5 kg N/ha erhöles (figur 3c).

**Nitratkvävemängderna** i de "led" som ingick i den statistiska undersökningen varierade från 0,1 till 85 kg N/ha i ett 10 cm tjockt jordlager. Liksom för ammoniumkvävet ökade de ledvisa standardavvikelserna med tilltagande medelvärden ( $R^2 = 0,63$ ), figur 5a. För ledvisa medeltal ( $n = 6$  per led) avseende nitratkvävemängder på 40-80 kg N/ha erhöles standardavvikelser på 8-14 kg N/ha, vilket gav medelfel på 3-6 kg N/ha. Ett medelvärde på 10 kg N/ha motsvarades generellt av en standardavvikelse och ett medelfel på omkring 3 kg respektive 1 kg N/ha. Räknat i kg N/ha inom ett 10 cm tjockt jordlager blev medelfelen sammantaget små och översteg tydligt 5 kg N/ha bara i ett fall (med ett medelfel = 8 kg N/ha, figur 4a). Variationskoefficienterna uppgick till omkring 10-40 % för ledvisa medelvärden på 10-85 kg N/ha (figur 5b). Mycket små nitratkvävemängder (0,1-0,3 kg N/ha) var förenade med anmärkningsvärt stora variationskoefficienter (delvis mer än 100 %). Detta torde bl.a. ha att göra med analysosäkerhet vid mycket små mängder.

På basis av de erhållna resultaten gjordes en bedömning av det antal nedslagningscylindrar med jord som måste tas ut för att få ett godtagbart lågt medelfel. Kravet på medelfelens storlek kan variera beroende på försökssituationen. För mineralkväve i jord under fältförhållanden bör ett medelfel på 10 kg N/ha för hela markprofilen vid provtagning till 90 m djup vara godtagbart i jämförelse med en grödas kväveupptag (upp till 200 kg N/ha eller mer). För att kunna studera effekten av olika jordbehandlingar (såsom jordbearbetning och förfrukter) under fältförhållanden (t.ex. Lindén et al., 1993 och



Figur 5. Medeltal (n = 6), standardavvikelser, medelfel och variationskoefficienter för nitratkväve (beräknat i kg N/ha i 10 cm djupa jordskikt) i vart och ett av 18 försöksled med mulljord, som inkuberats i stålcyllindrar. I var och ett av leden ingick sex cylindrar.

*Figure 5. Averages (n = 6), standard deviations, standard errors and coefficients of variance for nitrate nitrogen (kg N/ha within 10-cm soil layers) in different treatments with organic soil incubated in steel cylinders. Each one of 18 treatment included six cylinders. Standardavvikelse = standard deviation, Medelfel = standard error.*

1999, Engström 2010) kan det däremot krävas att medelfelet begränsas till högst 3-5 kg N/ha för en markprofil ned till 90 cm djup.



Spörsmålet i den gjorda inkubtionsundersökningen är, hur många nedslagningscylindrar med provtagen jord som skulle fordras för att begränsa medelfelet för främst nitratkväve på önskat vis. I denna statistiska studie valdes att bestämma, hur många cylindrar ( $n$ ) det behövs för ett medelfel ( $m$ ) för nitratkväve motsvarande 2, 3 eller 5 kg N/ha (i ett 10 cm djupt jordskikt) vid givna standardavvikelser ( $s$ ) av olika storlek, som kan fås vid bestämning av nitratkväve i jorden.

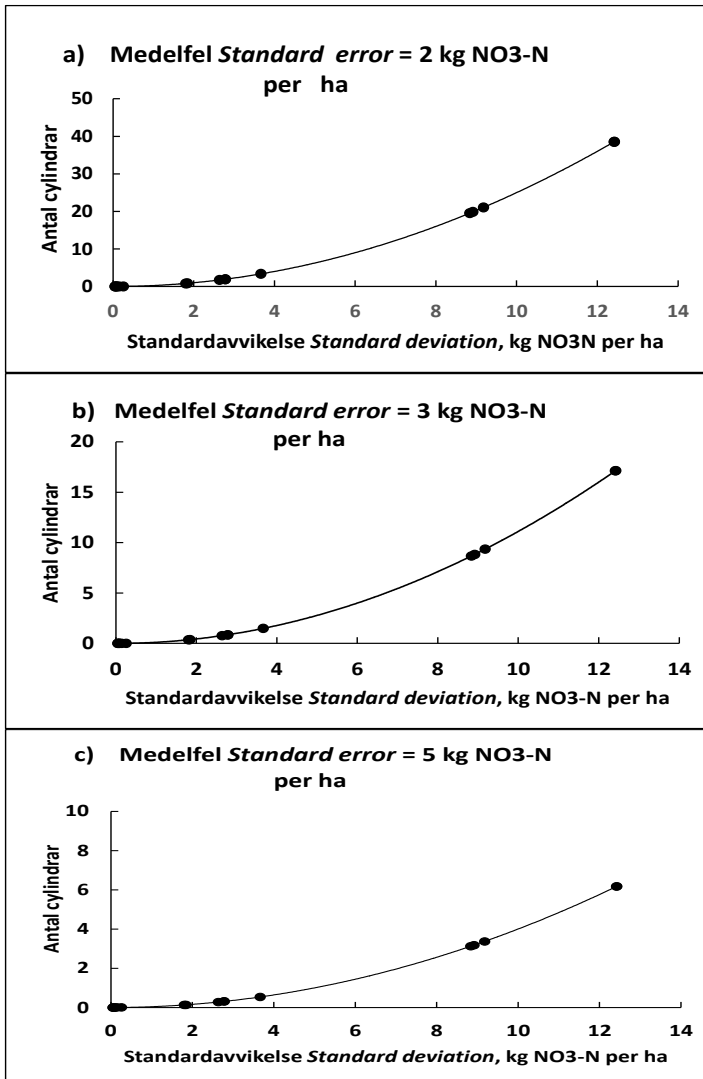
Det erforderliga antalet ”stickprov” ( $n$ , dvs. antal stål cylindrar) kan beräknas med formeln för medelfel:

$$m = s/\sqrt{n} \text{ eller } n = (s/m)^2$$

där  $\sqrt{n}$  = roten ur antalet observationer eller stickprov

I denna statistiska beräkning utnyttjades de standardavvikelser som fastställts för nitratkväve i vart och ett av de olika 18 ”leden”, baserat på de sex cylindrarna per led (figur 5a). Dessa standardavvikelser betraktas fortsättningsvis som generella och ej längre bundna till de aktuella situationerna. Med detta betraktelsesätt kan allmänna bedömningar av antalet erforderliga observationer göras vid bestämning av nitratkväve i cylindrar med jord. Bedömningen innefattar inte ammoniumkväve, då mängderna därav kan anses ha varit så små, att de inte påverkade resultattolkningen nämnvärt (se ovan). Resultaten framgår av figur 6.

Ett krav på ett medelfel på högst 2 kg nitratkväve per ha inom ett 10 cm tjockt jordlager (figur 6a) medförde, att det vid en standardavvikelse på 9 eller drygt 12 kg N/ha (bland de största i figur 5a) skulle fordras omkring 20 respektive närmare 40 nedslagningscylindrar. Detta skulle medföra ett orimligt stort arbete. Om medelfelet begränsas till 3 kg N/ha (figur 5b), medför en standardavvikelse på ca 9 eller 12 kg N/ha krav på ca 9 respektive 15 cylindrar. Med standardavvikelser på mindre än 4 kg N/ha skulle några få cylindrar dock räcka. Sätts medelfelet till högst 5 kg N/ha (figur 5c), borde det vara tillräckligt med 6 cylindrar vid standardavvikelser på ca 12 kg N/ha och mindre.



Figur 6. Erforderligt antal cylindrar (y) i relation till nitratkvävet standardavvikelse (x) vid bestämning av nitratkväve i 10 cm djupa stålcylindrar. Det erforderliga antalet gäller för begränsning av medelfelet till högst a) 2 kg, b) 3 kg och c) 5 kg nitratkväve per ha beräknat för ett 10 cm djupt jordskikt.

Figure 6. Number of steel cylinders required (y) in relation to standard deviations for nitrate nitrogen (x) occurring during determinations of nitrate nitrogen in 10 cm deep steel cylinders. The number of cylinders required refers to the restriction of the standard error to at most a) 2 kg, b) 3 kg and c) 5 kg nitrate nitrogen per ha as calculated for a 10-cm soil layer. Antal cylindrar = number of cylinders required.

Man kan givetvis inte veta på förhand, hur stora standardavvikelserna blir i enskilda studier såsom i det inkubationsförsök som här redovisats. Bara erfarenheten av resultaten från en viss typ av undersökningar kan utvisa detta. Studien visar emellertid i efterskott, att med de erhållna standardavvikelserna bör sex cylindrar per försöksled ( $n = 6$ ) ha varit tillräckligt för att med något undantag begränsa medelfelet till högst 5 kg nitratkväve per ha inom ett 10 cm djupt markskikt. Att minska medelfelet till som mest 2 eller 3 kg N/ha skulle i praktiken ofta kräva ett orimligt stort antal upprepningar.

### **Övergripande diskussion och slutsatser**

Kväveminalisering och nitratbildning i de tre markskikten

I mulljorden från *10-20 cm djup* vid Geråsen var den biologiska aktiviteten i form av kväveminalisering (ammonifikation), nitrifikation och denitrifikation mycket påtaglig under inkubationen, jämfört med jorden från 70-80 cm djup. Att döma av de låga ammoniumkvävehalterna och de starkt tilltagande nitratkvävemängderna vid vattenförhållanden motsvarande god dränering (1,0 och 6,0 mvp) nitrifierades bildat ammoniumkväve snabbt. Vid vattenmättnad (0,0 mvp) tycktes denitrifikation vara orsaken till minskande nitratkvävemängder vid temperaturer motsvarande höst- och vårförhållanden. Även om denitrifikation dominerade vid vattenmättnad, kan nedsatt kväveminalisering och nitratbildning samtidigt ha ägt rum genom ett visst lufttillträde – både under inkubationen och i matjorden under motsvarande fältförhållanden. Däremot föreföll kväveminaliseringen och nitratbildningen pågå fortare än denitrifikationen vid en temperatur nära nollpunkten ( $+0,2^{\circ}\text{C}$ ), eftersom nitratmängderna då ökade.

Det lilla hålet i det övre plastlocket på stålcyldrarna tillät uppenbarligen ett visst lufttillträde för kväveminalisering och nitrifikation i jorden från 10-20 cm djup, även vid vattenmättnad. Även vid vattenmättnad under fältförhållanden borde den yttre luften påverka syreförhållandena i matjorden i viss mån. Under inkubationen uppkom dock troligen ”fickor” i jorden med anaeroba betingelser, i vilka denitrifikation kunde uppstå, med följd att nitralthalterna

minskade. I detta jordlager var tillgången på nedbrytbart organiskt material för denitrifikationsbakterierna troligen bättre än i alven.

Torvjorden från **40-50 cm djup** (figur 3b) liknade mycket matjorden på 10-20 cm djup vad gäller kvävemineralisering och nitratbildning. Genom mineralisering bildat ammoniumkväve nitrifierades uppenbarligen fort vid det rådande pH-värdet (5,0). Detta gällde alla tre vattenhaltsregimerna, således även vid vattenmättnad (0,0 mvp). Den oväntat kraftiga kvävemineraliseringen och nitrifikationen vid 0,0 mvp kan dock som nämnts ha varit en artefakt orsakad av lufttillträde under inkubationen genom locket på stål-cylindrarna. Vid goda dräneringsbetingelser under fältförhållanden borde emellertid luftutbyte med atmosfären kunna äga rum på 40-50 cm djup i mulljorden och då tillåta påtaglig mineralisering och nitratbildning. I väl-dränerade fastmarksjordar synes kvävemineralisering pågå i alvens övre delar men i mindre utsträckning än i matjorden (Lindén et al., 1992a). Vid vattenmättnad i markprofilen upp till 40-50 cm djup och i ovanliggande jordlager genom högt grundvattenstånd borde däremot syrebrist hämma båda kvävemineralisering och nitratbildning.

Förutsättningen för denitrifikation i jorden från 40-50 cm djup föreföll vara liten, eftersom nitratkvävemängderna även ökade vid vattenmättnad. Orsaken torde vara, att tillgången på lättillgängligt substrat var starkt begränsad på detta djup, då förekomsten av döda växtrester och annat lättnedbrytbart organiskt material måste ha varit ganska ringa.

Torvjorden på **70-80 cm djup** vid Geråsen skilde sig från de studerade högre liggande markskikten genom att den var mindre förmultnad och hade mycket lågt pH-värde (4,0). Förmodligen hämmade den sura jorden både kvävemineralisering och nitratbildning i detta skikt, eftersom anhopningen av ammoniumkväve förblev liten och inget nitratkväve tycktes ansamlas i jorden, oavsett vattenhaltsregim. Denitrifikation föreföll inte ha varit orsak till de obetydliga nitratkvävemängderna, eftersom halterna därav var lika låga vid såväl goda ”dräneringsförhållanden” (1,0 och 6,0 mvp) som vid vattenmättnad (0,0 mvp). Det var tydligen bara i skiktet på 10-20

cm (eller i matjorden) som denitrifikation tycktes förekomma vid vattnmättnad.

Inverkan av de olika vattenhaltsregimerna på grödornas kväveförsörjning och på kväveutlakningsrisken

Då kvävemineralisering och nitratbildning uppenbarligen kunde fortgå med god hastighet vid god ”dränering” (1,0 och 6,0 mvp) under inkubationen av jorden från både 10-20 cm och 40-50 cm djup, torde hela markprofilen ned till 50 cm (och eventuellt även i underliggande skikt med samma egenskaper) ha kunnat bidra till grödornas kväveförsörjning under fältbetingelser. Detta jordkväve bör ha varit utnyttjbart, eftersom rötter även fanns ännu längre ned i marken. Kvävemineraliseringshastigheten var dock större i jorden från 10-20 cm än 40-50 cm djup. Från inkubationsstarten den 24/9 till avslutningen den 4/5 ökade sålunda nitratkvävemängderna inom 10-20 cm djup med drygt 40 kg N/ha i behandlingarna med ett vattenavförande tryck på 1,0 och 6,0 mvp. Motsvarande ökning i jorden från 40-50 cm djup blev 16-17 kg N/ha. Däremot tycks jorden på 70-80 cm djup (och i över- och underliggande skikt med liknande egenskaper) knappast ha bidragit till grödornas tillgång på utnyttjbart jordkväve till följd av det mycket låga pH-värdet (4,0, tabell 3) och därmed nedsatt mineralisering och nitrifikation.

Kvävemineraliseringen och nitratbildningen i matjorden och i alven ned till åtminstone 50 cm djup bör ha gett upphov till kväveutlakning under perioder med överskottsvatten, åtminstone under den kalla årstiden, då grödorna inte tar upp något kväve. Eftersom marken på och omkring 70-80 cm djup inte bidrog till anhopningen av nitratkväve till följd av hämmad nitrifikation, bör detta markskikt bara ha fungerat som en ”transportzon”, genom vilken nitratkväve ovanifrån kunde vaskas ned till grundvattnet och dräneringsledningarna.

Denitrifikation i matjorden under perioder med överskottsvatten i marken borde motverka anhopningen av nitratkväve i detta skikt under fältförhållanden (jmf. figur 3a) och därmed minska nitratnedvaskningen till grundvattnet och efterföljande utlakning. Där-

emot torde inte denitrifikation som nämnts ha ägt rum i de centrala och djupare delarna av alven.

Av figur 2 framgår, att mycket lite nitratkväve fanns på 30-90 cm djup vid provtagning av markprofilen den 22 maj 1991, i jämförelse med två andra profiler från odlade mulljordar. Den ringa nitratkväveförekomsten i alven kan tänkas bero på periodvis denitrifikation i matjorden, vallens kväveupptag dittills under växtsäsongen, hämmad nitratbildning i lägre markskikt med lågt pH-värde och utspädning av markvattnet i den djupare delen av marken genom tillrinning av grundvatten från angränsande marker (se även nedan).

#### Förklaringar till det utlakade vattnets sammansättning

Genom mätningar i det utpumpade dräneringsvattnet vid pumpstationen invid fältet vid Geråsen fastställdes i medeltal för åren 1982-97 som nämnts en utlakning motsvarande 21 kg totalkväve per ha och år, varav 5 kg ammonium- och 7 kg nitratkväve (Wall Ellström, 1990; Kyllmar et al., 1995; Johansson et al., 1999; Ulén et al., 2001). Utöver nitratkväve utlakades således också en hel del ammoniumkväve och organiskt kväve. Som även nämnts blandades dräneringsvattnet från fältet ut med tillrinnande grundvatten från näraliggande områden. Detta förklarar delvis varför den totala, uppmätta uttransporten av kväve med dräneringssystemet blev förhållandevis liten i jämförelse med undersökningar av andra odlade mulljordar i Närke (jmf. Nätterlund, 2003). En annan orsak synes vara att vall mestadels odlades på fältet vid Geråsen.

Löst organiskt kväve och ammoniumkväve i markvattnet i mulljorden vid Geråsen bidrog förmodligen till det avdränerade vattnets sammansättning. Som framgår av figur 2, innehöll markprofilen vid Geråsen förhöjda ammoniumkvävemängder på 60-90 cm djup genom det låga pH-värdet som hämmade nitratbildningen. Den stora förekomsten av ammoniumkväve skiljer sig från fastmarksjordar (Lindén, 1981) och studerade odlade mulljordar i Kvismardalen (Lindén, 2015). Det vanliga är att ammoniumkvävemängderna är störst i matjorden och avtar med tilltagande djup i marken. Även

om ammoniumkväve, som bildats genom mineralisering, adsorberats på markpartiklarna, torde sådant kväve efter hand ha lakats ut.

I figur 2 jämförs markprofilen vid Geråsen med en mark vid Finnsholmen i Uppland redovisad av Lindén (2013). Alven på båda platserna innehöll gyttja och hade mycket lågt pH-värde (3,5 på 60-90 cm djup vid Finnsholmen). På 60-90 cm djup fanns det förhöjda ammoniumkvävehalter även vid Finnsholmen, dock betydligt mer än vid Geråsen. Surhetsförhållandena i marken på dessa båda platser kan förklara förekomsten av en ökad andel ammoniumkväve i utlakningsvattnet. Så var även fallet i en sur mojord på lerbotten vid Öjebyn i Norrbotten (Gustafson & Torstensson, 1983a), där ammoniumkvävehalterna var höga i både markprofilen och dräneringsvattnet i förhållande till nitratkvävet. Det låga pH-värdet förklaras där av oxidering av sulfid i marken. Annars brukar ammoniumkvävehalterna i dräneringsvattnet vara mycket låga under svenska förhållanden i jämförelse med nitratkväveförekomsten (Gustafson & Torstensson, 1983b, 1984a, b och c; Bergtröm & Brink, 1986) och anses generellt så obetydliga, att de inte beaktas eller nämns i utlakningssammanhang (Gustafson, 1987; Johansson et al., 1999).

Möjligheter att minska kvävemineralisering, nitratbildning och kväveutlakning genom höjt grundvattenstånd upp till matjorden  
Nedsatt kvävemineralisering och nitrifikation samt uppkomst av denitrifikation genom vattenmättnad i matjorden, och därigenom mindre mängder nitratkväve i marken, bör i princip kunna reducera utlakningen av nitratkväve i en mulljord som vid Geråsen.

Det skulle således kunna vara en fördel att höja grundvattenståndet under höst och vinter till i höjd med matjorden i en mark av detta slag. Detta vore möjligt om fältet är invallat såsom vid Geråsen. Vinsten med detta får dock vägas mot risken för ökad avgång av klimatpåverkande koldioxid och kväveoxider till atmosfären, som kan vara påtaglig från organogen jord under de varmare årstiderna (Berglund 2011, Weslien et al., 2012). Avgången av kväveoxider och koldioxid sjunker dock med temperaturen (Berglund, 2011).

Man kan därför tänka sig, att grundvattennivån höjs först när emissionen av dessa ämnen nått en lägre nivå. Förslagsvis påbörjas grundvattenhöjningen i september-oktober (efter skörd), och nivån sänks igen i god tid före vårbruket eller en tid före växtsäsongens början.

Genom höjning av grundvattennivån i början av hösten skulle anhopningen av utlakningsbart kväve motverkas genom minskad höstmineralisering. Liksom i fastmarksjordar når ju mineralkväveförrådet i odlade organogena jordar sin lägsta nivå när grödans kväveupptagning börjar upphöra under sensommaren eller förhösten (Lindén, 2013 och 2015), och därefter medför den fortsatta kvävemineraliseringen att mineralkväve ansamlas i marken. Denna process fortgår inte bara under hösten utan även i ofrusen mark under vintern (Lindén, 1981, 2013 och 2015). Sådan ansamling av mineralkväve i marken utgör en viktig orsak till kvävelakningen från åkerjord. Vidare kunde man undvika att höstplöja marken för att inte stimulera kvävemineraliseringen (Stenberg et al., 1999), innan grundvattennivån nått önskad höjd. Istället kunde plöjningen skjutas upp till våren, eftersom vårplöjning har visat sig minska risken för kväveutlakning (Lindén et al., 1999; Stenberg et al., 1999).

Inkubationsstudierna tyder på ansevärd kvävemineralisering och nitratbildning under ”vinterperioden” (4/12–19/3), då temperaturen hölls vid på +0,2°C (figur 1). Under fältförhållanden torde anhopningen av mineraliserat kväve vid motsvarande temperaturer bli mindre men långtifrån betydelselös (Lindén, 1981, 2013 och 2015). Det är uppenbart att nedbrytning av organiskt material och kväveomsättningar i jord även pågår nära nollpunkten. Detta bekräftas av att mineralkväveförråden i odlade organogena jordar i Kvismardalen ökade kraftigt under perioden december 1987 – april 1988 (Lindén, 2015). Ökningen skedde från i medeltal 136 till 217 kg N/ha inom 0-90 cm djup, även om en del av detta kvävetillskott bör ha tillkommit efter vintern. Om det råder minusgrader, kan jorden förbli ofrusen ett stycke ned i markprofilen, särskilt om det finns ett snötäcke. Kvävemineralisering bör då kunna fortgå i t.ex. matjordens centrala delar och längre ned.



Dorland & Beauchamp (1991) fann tydlig koldioxidbildning i jord vid 0°C. Denna bildning fortgick även vid -2°C. Berglund (2011) fastställde visserligen mindre koldioxidavgång under perioden december-april än under april-november från lysimetrar med mulljordsprofiler (placerade i Uppsala), men denna aktivitet syntes även pågå under de egentliga vintermånaderna. Under perioden december-april uppgick hastigheten hos koldioxidavgången till 14-18 % av hastigheten under tiden april-november. Sker kol- och kväve-mineraliseringen huvudsakligen i relation till kol-kvävekvoterna i marken (C/N = 14-18 i jorden från Geråsen), måste koldioxidavgången även under vintermånaderna åtföljas av kväve-mineralisering med bildning av ammoniumkväve. Dorland & Beauchamp (1991) konstaterade att kväve-mineralisering (ammonifikation) pågick vid 0°C och rentav vid -2°C. Inkubationsstudier, innefattade sex jordar (Hanschmann, 1983), tyder på en påtaglig kväve-mineralisering och nitratbildning vid +1°C. Vidare fastställde Lindén et al. (2003) i inkubationsförsök med en sandjord (4 % mullhalt) i 90 dygn vid +4,5, +1,4, -0,6 och -2,4°C kväve-mineraliseringstillskott motsvarande 8, 9, 7 respektive 2 kg N/ha omräknat för ett 10 cm tjockt jordlager. Liknande resultat erhöles vid inkubation av jord i plastflaskor placerade centralt i matjorden under vintermånaderna på ett fält vardera i Halland, Västergötland och södra Dalarna (Lindén et al., 2003). Nedbrytning av det organiska materialet i jord, inkl. mulljord, och åtföljande kväve-mineralisering kan således äga rum under de vinterförhållanden som råder i bl.a. Mellansverige, och även längre norrut.

Nitrifikation kan likaledes ske vid temperaturer nära 0°C. I jordar med god nitrifikationsförmåga fann Frederick (1956) efter tillförsel av ammoniumnitrat i en mängd motsvarande 50 kg NH<sub>4</sub>-N per ha, att allt tillfört ammoniumkväve nitrifierades inom ca två månader vid temperaturer på 0...+2°C. Vidare visade Lindén et al. (2003) i laboriestudier vid -0,6°C och vid -2,4°C, att en inte oväsentlig nitratbildning kan fortgå strax under nollpunkten.

Förhoppningsvis kunde en höjning av grundvattenståndet till i nivå med markytan således motverka kväve-mineraliseringen och anhop-

ningen nitratkväve i marken inte bara under hösten utan även vintertid. Grundvattennivå i höjd med matjordslagret borde hämma nedbrytningen av organiskt material i marken och tillhörande kvävemineralisering (Scheffer, 1977; Scheffer & Tóth, 1979). Vidare fann som nämnts Koizumi et al. (1999) minskande CO<sub>2</sub>-avgång från en odlad mulljord i Finland vid tilltagande vattenhalt inom intervallet 35-80 viktsprocent.

Denitrifikation borde också medverka till minskningen av nitratkväve efter höjning av grundvattenståndet upp till matjordslagret. Resultaten från inkubationsundersökningen med jord från 10-20 cm djup vid Geråsen tyder på detta. Där minskade ju mängderna nitratkväve under ”höst-” och ”vårperioderna” (26/9–4/12) respektive 19/3–4/5) vid vattenmättnad (0,1 mvp). Däremot tycktes denitrifikation som nämnts inte kunna äga rum i de undersökta alvskikten.

Nömmik (1956) observerade denitrifikation vid +3°C och Bremner & Shaw (1958) vid +2°C. I laboratoriestudier fann Holtan-Hartwig et al. (2002) tydlig produktion och reduktion av N<sub>2</sub>O vid 0°C i jordar som provtagits under vintern och våren i Nordeuropa. Dorland & Beauchamp (1991) fastställde påtaglig denitrifikation vid -2°C särskilt efter tillsats av lucernmjöl eller glykos som substrat för mikroorganismerna. Denitrifikation kan således fortgå vid temperaturer på ett par grader över nollpunkten och nära denna. Detta borde även gälla vid höjt grundvattenstånd under fältförhållanden.

Utvärdering av inkubationstekniken med jord i ostörd lagring i stål-cylindrar

För inkubationsförsök med jord brukar man ju homogenisera denna ordentligt på förhand i syfte att minska risken för försöksfel på grund av ojämnheter i jordmaterialet. Dessvärre ger sådan omblandning som nämnts en ”jordbearbetningseffekt”, med innebörden att den mikrobiella verksamheten stimuleras och därmed även t.ex. kvävemineraliseringen och nitratbildningen. I den inkubationsundersökning som här redovisats undveks sådan påverkan på kväveomsättningarna genom användning av jordproppar i ostörd lagring, vilka ju tagits ut med 10 cm höga stål-cylindrar. I varje för-

söksbehandling ingick provtagning av sex sådana cylindrar vid varje provtagningstillfälle. Risk finns dock för större spridning i resultaten, genom att icke homogeniserad jord användes. Detta kan i princip motverkas genom ett tillräckligt stort antal observationer (dvs. cylindrar).

Frågan är då om det använda antalet cylindrar (6 st. per behandling och provtagningstillfälle) var tillfredsställande för att säkert kunna bestämma mängden ammonium- och nitratkväve i varje behandling och vid varje tidpunkt. För detta beräknades medeltal, standardavvikelse och medelfel ”ledvis” ( $n = 6$ ) med aveende på nitratkvävedata från var och en av de nio försöksbehandlingarna (tabell 1) samt var och en av två provtagningstidpunkter. Ammoniumkvävet beaktades inte i denna statistiska utvärdering, då mängderna därav var så små, att de med något undantag inte påverkade tolkningen av resultaten.

Det visade sig att ett medelfel på högst 2 kg nitratkväve per ha och 10-cm-skikt kunde fordra ett orimligt stort antal cylindrar till följd av standardavvikelseernas storlek (figur 6a). För ett medelfel på högst 3 kg N/ha krävdes 10-15 cylindrar vid större förekommande standardavvikelse (figur 6b). En gardering med så pass många upprepningar skulle bli kostnadskrävande. Med ett medelfel på högst 5 kg N/ha syntes det att räkna med 6 stålcylindrar vid de förekommande standardavvikelseerna (figur 6c).

Risken för ett medelfel på högst 5 kg nitratkväve per ha i ett 10-cm-skikt i en inkubationsstudie som denna bör vara att föredra framför de tolkningssvårigheter som skulle kunna uppkomma efter ”stimulering” av kväveomsättningarna genom homogenisering. Detta gäller speciellt jämförelser mellan de olika markskikten, särskilt som jorden i alvskikten inte bearbetas under naturliga förhållanden. Homogenisering skulle påverka strukturen och förhållandet luft-vatten i markporerna och därmed kunna inverka på kväveomsättningarna i jorden på ett svårbedömt sätt.

## Referenser

- Anderson, L. E., 1981. Kvävemineralisering och kväueupptagning på mulljord i jämförelse med lerjord. Examensarbete i växt-näringslära, december 1981. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för markvetenskap, Avd. för växt-näringslära, 57 s.
- Andersson, S. 1955. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. VIII. En experimentell metod. Grundförbättring 8, specialnummer 2, 7-98.
- Berglund, K. 1989. Ytsänkning på mosstorvjord. Sammanställning av material från Lidhult, Jönköpings län. Avdelningen för lantbrukets hydroteknik, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, Avdelningsmeddelande 89:3, 18 s.
- Berglund, K. 1996a. Cultivated organic soils in Sweden: Properties and ameloration. Doktorsavhandling, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala, 48 s.
- Berglund, K. 1996b. Properties of cultivated gytty soils. International Peat Journal 6, 5-23.
- Berglund, Ö. 2011. Greenhouse gas emissions from cultivated peat soils in Sweden. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Doctoral thesis no. 2011:2, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, 107 s.
- Bergström, L. & Brink, N. 1986. Effects of differentiated applications of fertilizer nitrogen on leaching losses and distribution of inorganic N in the soil. Plant and Soil 93, 333-345.
- Bremner, J. M. & Shaw, K. 1958. Denitrification in soil. II. Factors affecting denitrification. The Journal of agricultural Science 51, 40-52.
- Bremner, J.M. & Keeney, D.R. 1966. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 3. Exchangeable ammonium, nitrate, and nitrite by extraction-distillation methods. Soil Science Society of America Proceedings 30, 577-582.
- Delin, S. 2005. Site-specific nitrogen fertilization demand in relation to plant available soil nitrogen and water. Potential for prediction based on soil characteristics. Doctoral thesis no. 2005:6, Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, 130 s.

- Dorland, S. & Beauchamp, E. G. 1991. Denitrification and ammonification at low soil temperatures. *Canadian Journal of Soil Science* 71, 293-303.
- Engström, L. 2010. Nitrogen dynamics in crop sequences with winter oilseed rape and winter wheat. Doctoral thesis no. 2010:92, *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, 109 s.
- Frederick, L. R. 1956. The formation of nitrate from ammonia nitrogen in soils: 1. Effect of temperature. *Soil Science Society of America Proceedings* 20, 496-500.
- Gustafson, A. 1987. Water discharge and leaching of nitrate. Dissertation. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet. *Ekohydrologi* 22, 71 s.
- Gustafson, A. & Torstensson, G. 1983a. Växtnäringsförluster vid Öjebyn. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet. *Ekohydrologi* 13, 21-33.
- Gustafson, A. & Torstensson, G. 1983b. Växtnäringsförluster vid Röbbäcksdalen. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet. *Ekohydrologi* 13, 35-48.
- Gustafson, A. & Torstensson, G. 1984a. Fångroda efter korn. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet. *Ekohydrologi* 15, 13-20.
- Gustafson, A. & Torstensson, G. 1984b. Växtnäringsförluster vid Vagle. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet. *Ekohydrologi* 15, 39-51.
- Gustafson, A. & Torstensson, G. 1984c. Växtnäringsförluster vid Öjebyn. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet. *Ekohydrologi* 13, 21-33.
- Hanschmann, A. 1983. Einfluß von Temperatur und Feuchtigkeit auf die Mineralisierung von Bodenstickstoff. *Arch. Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 27, Berlin, 297-305.
- Holtan-Hartwig, L., Dörsch, P. & Bakken, L.R. 2002. Low temperature control of soil denitrifying communities: kinetics of N<sub>2</sub>O production and reduction. *Soil Biology and Biochemistry* 34, 1797-1806.
- Johansson, G., Kyllmar, K. & Johnson, H. 1999. Observationsfält på åkermark. Avrinning och växtnäringsförluster för det agrohydrologiska året 1995/96 samt långtidsöversikt. *Ekohydrologi*

49. Avdelningen för växtnäringslära, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, 55 s.
- Koizumi, H., Kontturi, M., Mariko, S., Nakadai, T., Bekku, Y. & Mela, T. 1999. Soil respiration in three soil types in agricultural ecosystems in Finland. *Acta Agric. Scand., Sect., B. Soil and Plant Sci.* 49, s. 65-74.
- Kowalenko, C. G. 1978. Nitrogen transformation and transport over 17 months in field fallow microplots using  $^{15}\text{N}$ . *Canadian Journal of Soil Science* 58, 69-75.
- Kyllmar, K., Johansson, G. & Hoffmann, M. 1995. Avrinning och växtnäringsförluster från JRK:s stationsnät för agrohydrologiska året 1993/94 samt en långtidsöversikt. *Ekohydrologi* 38. Avdelningen för växtnäringslära, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, 31 s.
- Lennqvist, J. 2008. Våtmarkens brukare – omskapare av Hjälmarens och Kvismarens våtmarker under ett och ett halvt sekel. I: *Svensk mosskultur – odling, torvanvändning och landskapets förändring 1750-2000* (red. L. Runefeldt), Kungl. Skogs- och lantbruksakademien, Skogs- och lantbrukshistoriska meddelanden, nr 41, Supplement till Kungl. Skogs- och lantbruksakademiens Tidskrift, 469-482.
- Lindén, B. 1981. Sambandet mellan odlingsåtgärderna och markens mineralkväveförråd. Kungl. Skogs- och lantbruksakademien, rapport nr 5, 1981, 67-123.
- Lindén, B. 1987. Mineralkväve i markprofilen och kvävemineralisering under växtsäsongen. I: *Kvävestyrning till stråsäd - dagsläge och framtidsmöjligheter*. Kungl. Skogs- och Lantbruksakademien, rapport 24, 23-46.
- Lindén, B. 2013. Kvävetillgång och växtodling på en kärrtorvjord ovanpå gytjelera i Uppland. En fallstudie. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö, rapport nr 12, 40 s.
- Lindén, B. 2015. Kvävetillgång i odlade mulljordar i Kvismardalen i Närke. Institutionen för mark och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet, Rapport 16, 75 s.
- Lindén, B., Lyngstad, I., Sippola, J., Sjøgaard, K. & Kjellerup, V. 1992a. Nitrogen mineralization during the growing season. I. Contribution to the nitrogen supply of spring barley. *Swedish J. agric. Res.* 22: 3-12.

- Lindén, B., Lyngstad, I., Sippola, J., Søgaard, K. & Kjellerup, V. 1992b. Nitrogen mineralization during the growing season. II. Influence of soil organic matter, and effect on optimum nitrogen fertilization of spring barley. *Swedish J. agric. Res.* 22: 49-60.
- Lindén, B., Aronsson, H., Gustafson, A. & Torstensson, G. 1993. Fånggrödor, direktsådd och delad kvävegiva - studier av kväveverkan och utlakning i olika odlingssystem i ett lerjordsförsök i Västergötland. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet, *Ekohydrologi* 33, 37 s.
- Lindén, B., Engström, L., Aronsson, H., Hessel Tjell, K., Gustafson, A., Stenberg, M. & Rydberg, T. 1999. Kvävemineralisering under olika årstider och utlakning på en mojord i Västergötland. Inverkan av jordbearbetningstidpunkter, flytgödseltillförsel och insådd fånggröda. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet, *Ekohydrologi* 51, 57 s.
- Lindén, B., Engström, L. & Ericson, L. 2003. Nitrifikation av ammonium i nötflytgödsel efter tillförsel till jord tidigt och sent på hösten - betydelse för utlakningsrisken. Institutionen för jordbruksvetenskap Skara, Sveriges lantbruksuniversitet, rapport 10, serie B Mark och växter.
- Mattsson, L. & Anderson, L.E., 1984. Anpassad gödsling med kväveprognoser – teknik och tillämpning. *Aktuellt från Lantbruksuniversitetet* 336, Mark-växter, Uppsala, 18 s.
- Nätterlund, H. 2003. Resultat från inventering av jordbruksmark i Husåns avrinningsområde 2002. Utvärdering av odlingsåtgärder och resultat från mätningar av kväve och fosfor. Länsstyrelsen i Örebro län, publ. nr. 2003/2, 19 s.
- Nömmik, H. 1956. Investigations on denitrification in soil. *Acta Agriculturae Scandinavica* 6, 195-228.
- Osvald, H. 1937. Myrar och myrodling. Kooperativa Förbundets Förlag, 407 s.
- Scheffer, B. 1977. Zur Frage der Stickstoffumsetzungen in Niedermoorböden. *Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft* 33/II, Kongressband 1976, 20-28.
- Scheffer, B. & Tóth, A. 1979. Der Einfluß der Grundwasserhöhe auf die Stickstoffumsetzungen in Niedermoorböden. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 29, 635-640.

- Stenberg, M., Aronsson, H., Lindén, B., Rydberg, T. & Gustafson, A. 1999. Soil mineral nitrogen and nitrate leaching losses in soil tillage systems combined with a catch crop. *Soil & Tillage Research* 50, 115-125
- Ulén, B., Johansson, G., Gustafson, . A. & Johnson, H. 2001. Observationsfält på åkermark. Avrinning och växtnäringsförluster för de agrohydrologiska åren 1996/97, 1997/98 och 1998/99 samt långtidsöversikt. *Ekohydrologi* 60. Avdelningen för växtnäringslära, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, 44 s.
- Wall Ellström, S. 1990. Avrinning och växtnäringsförluster från JRK:s stationsnät på åkermark. *Ekohydrologi* 27. Avdelningen för växtnäringslära, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, 33-45.
- Weslien, P., Rutting, T., Kasimir-Klemedtsson, A. & Klemedtsson, L. 2012. Carrot cropping on organic soil is a hotspot of nitrous oxide emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 94, 249-253.
- von Horn, H. 1982. Inlägg vid diskussion under seminariet ”De organogena jordarna som odlingsjordar” vid Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens sammankomst den 10 december 1981. *Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift* 121, 117.
- von Post, L. 1922. Sveriges Geologiska Undersöknings torvinventering och några av dess hittills vunna resultat. *Svenska Mosskulturforeningens Tidskrift*, nr. 36, Jönköping, 1-37.



Distribution:  
SLU  
Institutionen för Mark och miljö  
Box 7014  
750 07 UPPSALA

I denna serie publiceras forsknings- och försöksresultat från Institutionen för mark och miljö vid Sveriges lantbruksuniversitet. Serien spänner över ämnesområdena markkemi, markfysik, markbiologi och vattenvård.

*In this series research results from the Department of Soil and Environment at the Swedish University of Agricultural Sciences are reported. The reports are issued within the areas biogeochemistry, biogeophysics, soil biology and water quality.*