



Nitrifikation av ammonium i nött-flytgödsel efter tillförsel till jord tidigt och sent på hösten

- betydelse för utlakningsrisken

Nitrification of ammonium in dairy slurry applied to soil in early and late autumn
- implications for the risk of nitrate leaching



Börje Lindén, Lena Engström och Lars Ericson

Institutionen för jordbruksvetenskap Skara
Department of Agricultural Research Skara

Serie B Mark och växter
Series B Crops and soils
Rapport 10
Report 10
Skara 2003
ISSN 1402-9561
ISBN 91-576-6613-X.

FÖRORD

Efter spridning av stallgödsel på hösten är omvandlingen av dess ammoniumkväveinnehåll till nitratkväve av avgörande betydelse för kväveutlakningsrisken under det efterföljande vinterhalvåret. Då nitrifikationsaktiviteten är temperaturberoende, bör i princip tidig höstspridning medföra snabb nitratbildning, medan processen bara fortgår långsamt vid temperaturer nära fryspunkten. I syfte att undersöka, hur nitrifikationen av flytgödselammoniumkväve påverkas av temperatur på hösten, vattenhalt i marken, geografiskt läge i landet samt tidig eller sen höstspridning, utfördes s.k. inkubationsstudier med tillsats av nötflytgödsel till jord. Inkubationsburkar med gödsel inblandad i jord placerades dels på fyra åkerfält i olika landsdelar (vid Lilla Böslid i Halland, Lanna i Västergötland, Hamre i södra Dalarna och Röbbäcksdalen nära Umeå i södra Västerbotten) och dels i klimatskåp eller -kammare under laboratorieförhållanden. Laboratorieundersökningarna utfördes vid Institutionen för jordbruksvetenskap Skara och vid Institutionen för norrländsk jordbruksvetenskap, Röbbäcksdalen, båda vid Sveriges lantbruksuniversitet. Dessa båda institutioner ansvarade gemensamt för projektet.

Hushållningssällskapen i Dalarna och Halland medverkade med utsättning av burkar i fält samt skötsel och provtagning på respektive platser. Försökstekniker Paul Sjöberg, Institutionen för norrländsk jordbruksvetenskap, ansvarade för motsvarande arbete i fält- och klimat-kammarstudierna vid Röbbäcksdalen. Författarna tackar de medverkande för deras insatser.

Undersökningarna genomfördes med anslag från Statens Jordbruksverk.

Skara och Umeå i december 2003

Författarna

Författarna har följande adresser:

Börje Lindén
Institutionen för jordbruks-
vetenskap Skara
Sveriges lantbruksuniversitet
Box 234
532 23 Skara
Tel. 0511-67112
E-post:
borje.linden@mv.slu.se

Lena Engström
Institutionen för jordbruks-
vetenskap Skara
Sveriges lantbruksuniversitet
Box 234
532 23 Skara
Tel. 0511-67141
E-post:
lena.engstrom@mv.slu.se

Lars Ericson
Institutionen för norrländsk
jordbruksvetenskap
Sveriges lantbruksuniversitet
Box 4097
904 03 Umeå
Tel. 090-7869418
E-post:
lars.ericson@njv.slu.se

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	1
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	4
ABSTRACT	5
INLEDNING	7
LITTERATURÖVERSIKT	8
NITRIFIKATIONENS TEMPERATURBEROENDE.....	8
INVERKAN AV BAKTERIEPOPULATIONER.....	9
JORDENS PH-VÄRDE.....	9
VATTENHALT.....	9
KVÄVEMINERALISERING VID LÅGA TEMPERATURER.....	10
MATERIAL OCH METODER	10
INKUBATIONSMETOD.....	10
STUDIER AV NITRIFIKATION AV AMMONIUMKVÄVE I NÖTFLYTGÖDSEL EFTER TILLFÖRSEL UNDER HÖSTEN OCH I OLIKA GEOGRAFISKA LÄGEN.....	12
STUDIER AV INVERKAN AV TEMPERATUREN PÅ NITRIFIKATIONENS HASTIGHET.....	14
STUDIER AV INVERKAN AV JORDENS VATTENHALT PÅ NITRIFIKATIONEN.....	15
RESULTAT	16
INKUBATIONSSSTUDIER UNDER FÄLTFÖRHÅLLANDEN 2000-2001.....	16
<i>Lilla Böslid 2000/2001</i>	16
<i>Lanna 2000/2001</i>	19
<i>Hamre 2000/2001</i>	21
<i>Röbäcksdalen 2000/2001</i>	25
INKUBATIONSSSTUDIER UNDER FÄLTFÖRHÅLLANDEN 2001-2002.....	27
<i>Lilla Böslid 2001/2002</i>	27
<i>Lanna 2001/2002</i>	30
<i>Hamre 2001/2002</i>	32
<i>Röbäcksdalen 2001/2002</i>	35
STUDIER I KLIMATSKÅP AV INVERKAN AV LÅGA TEMPERATURER PÅ NITRIFIKATIONENS HASTIGHET.....	37
<i>Inkubationsmetodik</i>	37
<i>Nitrifikationsförlopp</i>	37
STUDIER I KLIMATSKÅP AV INVERKAN AV JORDENS VATTENHALT PÅ NITRIFIKATIONEN.....	39
<i>Inkubationsmetodik</i>	39
<i>Nitrifikationsförlopp</i>	39
ÖVERGRIPANDE RESULTATREDOVISNING OCH DISKUSSION	40
TEMPERATUFÖRHÅLLANDEN I FÄLTSTUDIerna.....	40
NITRATBILDNING VID INKUBATION UNDER FÄLTFÖRHÅLLANDEN.....	40
NEDRE GRÄNS FÖR AMMONIUMKVÄVEHALTER VID NITRIFIKATION.....	41
NITRIFIKATIONENS TEMPERATURBEROENDE.....	42
KVÄVEMINERALISERING (AMMONIFIKATION) VID LÅGA TEMPERATURER.....	45
NITRATBILDNINGENS INVERKAN PÅ KVÄVEUTLAKNINGSRISKERNA.....	47
SLUTSATSER	48
SAMMANFATTNING	49
LITTERATUR	52

ABSTRACT

Following application of slurry to soil in the autumn, nitrification of the ammonium in the slurry is influenced by falling temperatures, which vary with the geographical position, as well as by generally high soil moisture contents and by time of spreading, e.g. early or late in the autumn. The formation of nitrate in soil during the autumn in turn largely affects nitrogen leaching. In order to study these relationships and to consider the implications for nitrogen leaching, incubation studies on the addition of dairy slurry to soil were carried out with loamy sand soils from Götala in western Sweden. Dairy slurry generally in amounts corresponding to 70 kg $\text{NH}_4\text{-N}$ per ha, incorporated into a 10-cm soil layer, was mixed into soil with a regulated moisture content. Soil with the same moisture percentage but without slurry was used as a control treatment. In the incubation studies, 300 g soil were added to plastic bottles equipped with a 33 cm high plastic pipe for ventilation. For the individual investigations, incubation bottles containing soil, with and without dairy slurry, were placed in the topsoil of four fields in different parts of the country, as well as in climate chambers under laboratory conditions.

In the field incubation studies, bottles were placed with their bases at 20 cm soil depth and were then covered with soil so that only the ventilation pipe was visible. Such experiments were started in the autumns of 2000 and 2001 at Lilla Böslid (56°36'N, 12°56'E) in the province of Halland and at Lanna (58°21'N, 13°8'E) in Västergötland, both in south-western Sweden, at Hamre (60°18'N, 16°1'E) in Dalarna, central Sweden, and at Röbbäcksdalen in Västerbotten (63°49'N, 20°17'E) in northern Sweden. The investigations were started on three occasions per year: in 2000 in mid-September, early October and early November, and in 2001 in early October, early November and mid- or late November. Samplings for determination of ammonium and nitrate nitrogen contents in the soil were made on 4-9 occasions from the start to the finish of the experiments in the following early spring. In the laboratory experiments, incubation bottles were placed in climate chambers at four different temperatures (-2.4, -0.6, +1.4 or +4.5°C) for 90 days and at a constant moisture content (60 % of WHC), as well as at three different soil moisture contents (50, 60 or 70 % of WHC) for 70 days at a constant temperature (+4°C). In these studies too, repeated samplings were made for ammonium and nitrate nitrogen determination.

Air temperatures during the autumn of 2000, and partly also during the following winter, were roughly 3°C higher than normal at the four field sites. However, the topsoil was frozen during the major part of the winter at Röbbäcksdalen and Hamre. In 2001, October was almost as mild as in 2000, but later the weather became colder, with almost normal temperatures in late autumn and the beginning of the winter. However, the following part of the winter was milder than normal. At Lilla Böslid and Lanna the average monthly temperatures in January, February and March were about +2 to +4°C. Mean temperatures at Röbbäcksdalen and Hamre were below freezing point during these months. At these sites the topsoil was permanently frozen also during the winter of 2001/2002, which started about a month earlier than in 2000.

Following addition of dairy slurry to the soil in the incubation bottles in mid-September and in early October, complete nitrification of the slurry ammonium nitrogen occurred within two and two-four weeks, respectively. Following slurry application to soil in early November in 2000, the ammonium nitrogen was also nitrified more or less completely before the arrival of the winter, even as far north as Röbbäcksdalen and Hamre. In the autumn of 2001, however, nitrification proceeded more slowly due to the colder autumn weather and the earlier begin-

ning of the winter. When the incubation studies were started in mid-November or late November in 2001, only part of the ammonium nitrogen added with the slurry was nitrified before the onset of frost in the soil. However, the remaining ammonium nitrogen was nitrified during the course of the winter, in spite of the fact that the topsoil layer was frozen during the entire winter at Röbbäcksdalen and Hamre, and periodically at both sites in south-western Sweden. The explanation is that the snow cover at the northern sites protected the topsoil against low temperatures. Consequently the temperature at 20-cm soil depth, corresponding to the base of the incubation bottles, was only about -1 to -2°C, allowing the nitrification process to proceed at a slow rate.

In the climate chamber experiments it was found that slurry ammonium nitrogen was completely nitrified within about 50 days at +4.5°C. At +1.4°C, nitrification was completed within approx. 70 days and at -0.6°C within 90 days. At -2.4°C, nitrate formation proceeded very slowly, but nevertheless a significant nitrification activity was recorded.

Climate chamber studies (at +3.7°C) showed that soil moisture content within a broad range (50, 60 or 70 % of WHC) did not affect nitrification, thus allowing nitrate formation to proceed similarly and without any retardation under the different moisture conditions. Under practical field conditions, the soil water content at 50% of WHC should have made it possible to harrow the soil. At 60% of WHC the soil was too sticky for this and at 70% of WHC it was very wet, with a slightly flowing consistency.

Simultaneously with nitrification, nitrogen mineralisation took place down to 0°C and even slightly below freezing point. As an average for the period from 1 November to the disappearance of soil frost in early spring, mineralisation of soil organic nitrogen in the field incubation studies corresponded to 13 kg N/ha, on average, within a 10-cm soil layer. Obviously organic nitrogen originating from the slurry was also mineralised during this period, on average corresponding to 8 kg N/ha within a 10-cm soil layer. The nitrogen released was apparently transformed to nitrate, as no ammonium nitrogen accumulated in the soil.

As the same soil was used in the field incubation studies at the four sites, the results do not show the mineralisation and nitrification ability of different soils, but rather how the processes in question were influenced by the temperature conditions at the different sites. The results indicate that nitrification of ammonium nitrogen and mineralisation of organic nitrogen originating from slurry applied in the autumn would increase the risk of nitrate leaching during the subsequent winter period. The incubation experiments revealed that complete nitrification would occur during the autumn following application of slurry in September and early October under Swedish conditions, even as far to the north as Röbbäcksdalen. In contrast, the results from Hamre and Röbbäcksdalen in 2001/2002 indicated that application in early November or later led to incomplete nitrification before the onset of soil frost. Moreover, the nitrate amounts formed before the winter would not lead to significantly increased nitrate leaching following such late applications, since soil frost also stops water percolation through the soil, thus preventing or reducing nitrate transport through the soil profile under the climate conditions at these sites. Instead, soil surface runoff increases. In the southern parts of Sweden, however, application as late as the end of November or early December would not substantially reduce the risk of nitrate leaching. The winter is characterised by alternating mild and cold periods. Such alternating weather conditions would allow continued nitrification of the remaining slurry ammonium nitrogen at least during the milder intervals, with subsequent nitrate leaching losses due to water runoff when the soil thaws during these periods.

INLEDNING

Fältförsök i Sydsverige har visat, att spridning av flytgödsel på hösten leder till ökad nitratutlakning (Torstensson et al. 1992; Lindén et al., 1998). Författarna fann att detta bl.a. berodde på att ammoniumkvävet i gödseln hann omvandlas till nitratkväve under hösten. Efter flytgödselspridning i slutet av september i utlakningsstudier vid Mellby i Halland (Torstensson et al. 1992) fastställdes sålunda ökad nitratkväveanhopning i marken i månadsskiftet november-december, samtidigt med ett fullständigt försvinnande av flytgödselammoniumkvävet fram till denna tid, men även efter spridning ca 10-15 november uppkom tydligt större nitratkväveförråd än annars.

Försök med vårsäd m.fl. grödor i Sverige liksom i andra nordiska länder visar, att höstspridning av flytgödsel också medför sämre skördar eller i vart fall ger osäkrare skördeutslag än vårspridning (Larsen, 1987: samnordiska försök; Steineck et al., 1991; Torstensson et al., 1992), medan höstspridd fastgödsel kan hävda sig bättre (Steineck et al., 1991) och i norra Götaland och Svealand ge samma eller nästan samma skördeeffekter som vårspridning (Jakobsson & Lindén, 1992; Försök i Väst, 1997). Danska undersökningar under åren 1999/2000 och 2000/2001, med vintrar med högre temperaturer än normalvärdena (1961-90), visade emellertid att fastgödsel utnyttjades bättre efter vår- än efter höst- och vinterspridning (Hansen et al., 2003), vilket även bör kunna ha tillämpning i södra Sverige. I landets norra delar visar däremot studier på vall, att tidig höstspridning kan hävda sig bra i jämförelse med vårspridning (Dryler & Ericson, 1994; Ericson & Alskog, 2000; Ericson, 2002). Detta torde huvudsakligen bero på att vallen i försöken i fråga tagit upp kväve efter spridningen på hösten. Det bättre stallgödselutnyttjande norrut i landet bör dock även kunna bero på generellt mindre kväveutlakning genom att tjäle motverkar vattenströmningen genom marken vintertid (Gustafson & Torstensson, 1983 och 1984). Frågan är emellertid också, om nitratbildningen efter stallgödseltillförsel på hösten i norra Sverige, och kanske även i de mellersta delarna av landet, förblir mer eller mindre ofullbordad fram till vinterns ankomst på grund av kallare förhållanden, så att mer kväve finns kvar i ammoniumform under vintern och då inte förloras. Medan nitrat lätt utlakas, är ammoniumutlakningen obetydlig (Wiklander, 1977; Frimodt Pedersen, 1983), eftersom ammoniumkväve adsorberas av markpartiklarna, och då särskilt kraftigt i kolloidrika jordar (Krantz et al., 1943; Linser et al., 1959).

I Statens Jordbruksverks föreskrifter (SJVFS 2003:66) anges, att inom områden i landet som är känsliga för utlakning får stallgödsel och andra organiska gödselmedel inte spridas under tiden den 1 januari–15 februari. Hit räknas områden så långt norrut som delar av Närke, Västmanlands och Uppland samt norra Västergötland. Husdjursgödsel som sprids under tiden den 1 december–28 februari måste brukas ned inom 4 timmar i Blekinge, Skåne och Hallands län samt samma dag i övriga delar av landet. I Blekinge, Skåne, Hallands och Gotlands län samt Öland och inom kustnära områden upp till norra Uppland gäller, att spridning under tiden den 1 augusti–30 november bara får ske i växande gröda eller inför höstsädd. För fasta gödselslag finns dock vissa undantag från restriktionerna. I övriga delar av landet är tillförsel av stallgödsel tillåten under denna tid på hösten, fränsett lokala inskränkningar.

Sprids stallgödsel före sädd av höstsäd, kan visserligen en mindre del av de t tillförda gödselkvävet tas upp av grödan och undgå utlakning, men i allmänhet är höstsädens N-upptag på hösten alltför litet för att tydligt kunna minska N-utlakningen efter sådan spridning (Torstensson et al., 1995; Lindén et al., 1998). Efter sädd under den senare delen av september understiger höstsädens kväveupptag fram till vintern i allmänhet 10 kg N/ha (Lindén et al., 2000).

Däremot har höstraps visat sig ha god förmåga att utnyttja kväve på hösten och kan vid bra etablering ta upp långt mer än 100 kg N/ha, innan vintern kommer (Engström et al., 2000). Höstraps synes därför vara den höstgröda, till vilken spridning av stallgödsel inför höstsådden kan ske mest riskfritt.

Det kan som framgått vara problematiskt med spridning av flytgödsel liksom annan stallgödsel till höstsäd även vid tillåtna tidpunkter på hösten. Ett tänkbart sätt att generellt undgå de ökade utlakningsförlusterna efter höstspridning vore tillförsel (följd av plöjning) så sent på hösten, att det är för kallt för att ammoniumkvävet i stallgödseln nämnvärt skall nitrifieras innan vintern kommer, eftersom nitrifikationen av ammoniumkväve avtar med sjunkande temperaturer (se litteraturöversikt nedan). Kunde påta glig nitratbildning härigenom undvikas, borde stallgödseln egentligen inte orsaka ökade N-förluster till yt- och grundvatten efter sen höstspridning med efterföljande plöjning. I södra Sverige finns emellertid risk att temperaturen är så hög även under stora delar av vintern, att nitrifikationen av gödsel-NH₄-N också fortgår under denna årstid, åtminstone periodvis. Härtill kommer tendensen till allt mildare vintrar.

För att studera möjligheterna att genom spridning av stallgödsel sent på hösten motverka nitratanhopning och ökad kväveutlakning i jämförelse med tillförsel tidigare genomfördes s.k. inkubationsförsök under vinterhalvåren 2000/2001 och 2001/2002 med undersökning av hur snabbt nitrifikationen av ammoniumkväve i flytgödsel sker efter tillförsel till jord. Dessa studier gjordes under naturliga temperaturförhållanden på hösten.

De av Jordbruksverket utfärdade föreskrifterna för stallgödelspridning innehåller inte restriktioner för Norrland, de norra delarna av Svealand och i det inre av Götaland. Det vore emellertid önskvärt att undersöka, vilka risker för nitratbildning i marken och därmed ökad kväveutlakning som finns på hösten i dessa delvis kallare landsdelar efter stallgödelspridning under denna årstid. Detta har inte bara betydelse för dricksvattenbrunnar och -täkter utan även för växtodlingen, i det att förluster av kväve från jorden under vinterhalvåret måste kompenseras genom annan gödsling till efterföljande grödor. För att belysa inverkan av klimatet genomfördes därför inkubationsundersökningarna inte bara inom s.k. känsliga områden utan även inom andra landsdelar. De förra representerades av försöksplatser vid Lilla Böslid i södra Halland och Lanna försöksstation i Västergötland. Inom de regioner som inte berörs av restriktioner i stallgödelspridning på hösten enligt Jordbruksverkets föreskrifter (SJVFS 2003:66) valdes en plats vid Hamre i Hedemora kommun i södra Dalarna och en vid Röbäcksdalen nära Umeå i södra Västerbotten för försöken. Som ett komplement till detta genomfördes laboratorieundersökningar i klimatskåp och -kammare av inverkan av varierande temperaturer och vattenhalter i jorden på gödselammoniumkvävet nitrifikation.

LITTERATURÖVERSIKT

Nitrifikationens temperaturberoende

När temperaturen stiger över nollpunkten, ökar nitrifikationshastigheten först långsamt för att med tilltagande värme ske allt snabbare tills ett optimum nås, över vilket hastigheten åter avtar (Russel et al., 1925; Frederick, 1956; Alexander, 1965; Beck, 1979; Stark, 1996). Nämnade författare anger att nitrifikationens maximum ligger vid 22–35°C men med vissa geografiska skillnader.

Det har ansetts att kväve mineralisering (ammonifikation) och nitrifikation praktiskt taget helt stannar av vid nollpunkten. Enligt Tyler et al. (1959) och Campbell et al. (1971) verkar här till låga temperaturer mer hämmande på nitrifikationen än på kväve mineraliseringen. Vid 0-3 plusgrader kan emellertid uppenbarligen en starkt reducerad men mätbar nitratbildning äga rum, se t.ex. Gerretsen (1942), Frederick (1956) och Tyler et al. (1959), som undersökte nitratbildning i jord vid konstanta temperaturer efter tillförsel av ammoniuminnehållande salter. Gerretsen (1942) fann en viss mindre aktivitet vid nollpunkten. Hastigheten fördubblades från 0 till +5°C, varefter en accelererande nitrifikationshastighet konstaterades till 15°. Addiscott fastställde en skarp stegring i nitrifikationen mellan 2,5 och 5°C. Anderson (1960) fann att nitrifikationshastigheten vid 3, 6, och 8°C i en jord, som kalkats till pH 6,7 och som tillförts ammoniumnitrat, uppgick till 8, 51 resp. 93% av hastigheten vid 11°C. Dygnsvisa växeltemperaturer under 15°C gav enligt Frederick (1956) större nitratbildning än konstant temperatur.

Spridning av stallgödsel inför höstsådd eller senare under året sker vid dygnsmedeltemperaturer från omkring 15°C i augusti-september till i allmänhet några få plusgrader på senhösten. Det är således vid dessa temperaturer och ned till nollpunkten som gödsel ammoniumkvävet nitrifikation äger rum under denna årstid. Det är dock uppenbarligen så, att studier knappast alls utförts vid lägre temperaturer än 2-5°C (se t.ex. Addiscott, 1983; Stark, 1996; Andersen & Jensen, 2001). Frågan är då hur fort – eller långsamt – nitrifikationen sker under naturliga markförhållanden inom temperaturintervallet 0-15°C och även när marken fryser till och temperaturen når under nollpunkten. Spörsmålet är också, vilken betydelse denna nitratbildning kan ha för N-utlakningens storlek under svenska förhållanden.

Inverkan av bakteriepopulationer

Frederick (1956) fann skillnader mellan jordar i nitrifikationsförmåga vid lägre temperaturer. För jordar med god sådan kapacitet drog han slutsatsen, att efter tillförsel av ammoniumnitrat i en mängd motsvarande 50 kg NH₄-N per ha kunde detta nitrifieras inom ca två månader vid temperaturer på 0-2°C. I vissa fall förekom en fördröjning i början av inkubationen innan nitrat började bildas, vilket var mest markant vid lägre temperaturer. Skillnaderna tycktes bero på varierande egenskaper hos populationerna av de nitrifierande bakterierna. Även Anderson et al. (1971) i Georgia, USA, fann att det vid låg temperatur (6°C) rådde skillnader i nitrifikationsförmåga mellan olika jordar. De fastställde i jämförande inkubationsstudier större nitratbildning i jordar tagna från nordligare, högläntare lägen och minst från mark i sydliga områden i Georgia. Detta tyder enligt författarna på att de nitrifierande bakterierna anpassats till temperaturförhållandena i sina ursprungsområden.

Jordens pH-värde

Nitrifikationsaktiviteten varierar dessutom mellan olika jordar beroende på pH, med mindre nitratbildning under surare förhållanden (Frederick, 1956). Även om nitrifikationen gynnas av högre pH-värden, med optimum inom det neutrala eller det svagt alkaliska området, tycks emellertid nitratbildning ske inom ett brett pH-intervall beroende på bakterieisolatens egenskaper (Alexander, 1965). Även i jordar med pH-värden mellan 6,0 och 4,5 kan nitrifikation förekomma, fast långsammare (Beck, 1979).

Vattenhalt

Inverkan på nitrifikationen av jordens fuktighetstillstånd beskrevs tidigt bl.a. av Russel et al. (1925), som angav att de gynnsammaste förhållandena för nitratbildning rådde vid vattenhalter motsvarande 60 % av den maximala vattenhållande förmågan. Liknande resultat redovisas av Flowers & O'Callaghan (1983), som fann att nitrifikationen av ammoniumkväve i svinflytgödsel hade ett optimum omkring 60 % av den vattenhållande förmågan (*water holding capaci-*

city, WHC). Alexander (1965) anger dock, att den största nitrifikationsaktiviteten registrerats inom ett brett intervall, från omkring hälften till två tredjedelar av jordens vattenhållande för-måga. Allison (1973) satte optimum för jordar med intermediär textur till 50–60 % av WHC. Sabey (1969) fann den största nitrifikationshastigheten vid ett vattenavförande tryck om 1 m vattenpelare (v.p.), medan aktiviteten avtog vid lägre och högre värden. Vid inkubation vid 30°C av en jord med mycket liten andel luftfyllda porer fastställde Miller & Johnson (1964) däremot, att nitrifikationen hade ett maximum vid 5 m v.p., medan tre andra jordar gav störst nitratbildning vid 1–2 m v.p., beroende på större andel luftfyllda porer vid ett och samma vattenavförande tryck.

Kvävemineralisering vid låga temperaturer

I många simuleringsmodeller antas kvävemineraliseringen starkt avta med sjunkande temperaturer och bli noll vid 0°C (se t.ex. Hansen & Aslyng, 1984; Bergström & Johnsson, 1988). Inkubationsstudier publicerade av Hanschmann (1983), innefattande sex jordar, tyder emellertid på en påtaglig N-frigörelse vid 1°C, och Stadelmann et al. (1983) visar, att kvävemineralisering och nitratbildning även fortgår vid 0°C. Detta framgår också av inkubationsförsök utförda av Lindén & Nouno (1983) med tre jordar från Västergötland, där kvävemineraliseringstillskott motsvarande 8–20 kg N/ha inom ett 30-cm-skikt under loppet av 60 dagar fastställdes vid nollpunkten. Lochmann et al. (1989) konstaterade under sex veckors tid ett N-mineraliseringstillskott på 10 kg N/ha vid 0°C. Van Schöll et al. (1997) fastställde, att vid +1°C hade 20 % av totalkvävet i en nedbrukad fånggröda (råg i tidigt utvecklingsstadium) mineraliserats efter 10 veckor, med nitratbildning som följd. Andersen & Jensen (2001) fann vid 3°C en påtaglig kvävefrigörelse dels från jord och dels från en rajgräsfånggröda, åtföljd av nitratbildning med en potentiell nitrifikationshastighet på ca 0,5–1 mg N per kg jord och dag jämfört med omkring 2–4 mg N vid 15°C.

På basis av dessa temperatursamband kan det antas, att även organiskt kväve i stallgödsel, som spritts på hösten, till viss del mineraliseras under denna årstid tills marken fryser, och delvis också under blidvädersperioder vintertid. Frågan är då, i vilken utsträckning detta sker och om det härvid bildade ammoniumkvävet nitrifieras under denna tid. Höstspredning av stallgödsel med tillräckligt lågt kvävek-vot (i själva den organiska substansen) för netto-mineralisering skulle då kunna medföra vissa kväveförluster under hösten och vintern till följd av kvävefrigörelse, förutom genom nitrifikation av det ursprungliga gödselammoniumkvävet.

MATERIAL OCH METODER

I syfte att främst undersöka, hur fort nitrat bildas i marken efter tillförsel av nötflytgödsel under hösten, genomfördes undersökningar med inkubation av flytgödsel i jord, som placerades i slutna plastburkar med en ventilationsanordning. Tre sådana studier genomfördes: 1) nitrifikation av flytgödselammoniumkväve efter tillförsel vid tre tidpunkter under hösten och i olika geografiska lägen, 2) inverkan av temperaturen respektive 3) inverkan av jordens vattenhalt på nitrifikationens hastighet

Inkubationsmetod

Någon dag före starten av inkubationsundersökningarna blandades nötflytgödsel in i jord i en mängd motsvarande i de flesta fall 70 kg gödsel-NH₄-N per ha inbrukad inom ett 10 cm djupt jordskikt och vid en antagen volymvikt om 1,25 kg/dm³ torr jord. Blandning gjordes i en plastbalja i omgångar avseende ett större antal inkubationsburkar. Vidare tillsattes avjoniserat

vatten för att uppnå de vattenhalter i jorden som eftersträvades i de enskilda delundersökningarna (se nedan). I kontroll-led med studier av nitratbildning i jord utan tillförsel av flytgödsel blandades enbart avjoniserat vatten in i jorden på samma vis, i mängder motsvarande summan av vattnet i gödseln och vatten tillsatsen därutöver i flytgödselleden.

Därefter hölls blandningarna vid kylskåpstemperatur fram till invägning i inkubationsburkarna en kort stund senare. Härvid vägdes 300 g av varje blandning in i burkarna, varefter dessa vägdes med sitt innehåll, förslöts med skruvlock och placerades i kylskåp. Vid utplaceringen av burkarna på den avsedda platsen för själva inkubationen byttes locket ut mot ett lock försett med ett 33 cm långt ventilationsrör (figur 1). Det senare hade nedböjd pip, så att nederbördsvatten vid placering utomhus inte skulle tränga in och förändra vattenhalten. Rörets uppgift var främst att åstadkomma aeroba förhållanden vid inkubationen, så att nitrifikationsprocessen inte skulle hämmas av syrebrist eller övergå till denitrifikation.



Figur 1. Inkubationsburk med ventilationsrör.

Burkarna med jordblandningarna placerades i matjorden ute på åkerfält och täcktes med jord eller ställdes in i klimatskåp (se nedan), varefter inkubationsperioden började. Burkar togs sedan ut med vissa tidsmellanrum för provtagning och bestämning av förändringarna i innehållet av ammonium- och nitratkväve genom nitrifikation av gödsel-NH₄-N. Härvid vägdes burkarna på nytt för att fastställa eventuella förändringar av vattenhalten. Denna höll sig dock mycket konstant från starten till den sista provtagningen. Därefter tömdes jorden ut ur burkarna och djupfrysades omedelbart. Proverna frysförvarades fram till analys. De homogeniserades genom "frysmalning" (utan upptining), och extraherades med 2M KCl i jord-vätskeförhållandet 1:2,5 (jfr Bremner & Keeney, 1966). NH₄-N och NO₃-N bestämdes kolorimetriskt med en autoanalysator (TRAACS 800, metod nr. ST9002-NH₄D och ST9002-NO₃D). För att göra analysvärdena mer jämförbara med praktikförhållanden räknades de om till kg N/ha inom ett 10 cm tjockt matjordslager med beaktande av vattenhalten och under antagande att volymvikten var 1,25 kg/dm³.

De jordar som användes för inkubationsstudierna utgjordes av måttligt mullhaltiga, leriga eller sandjordar, som hämtades från olika fält (se nedan) på Hushållningssällskapet Skaraborgs försöksgård Götala nära Skara i Västergötland. Jordblandningarnas vattenhalt anpassades efter bestämda mål (se nedan), uttryckta i % av den maximala vattenhållande förmågan (*waterholding capacity*, WHC). Denna bestämdes enligt Jansson (1958). Härvid placerades naturfuktig jord (50 g) i glastrattar med en glasullstuss som vattengenomsläpplig propp i hålet i övergången till utloppsroret, varefter 100 ml vatten tillsattes. Rörets nedre öppning hade dessförinnan förseglats. Efter vattentillsatsen täcktes tratten med en plastfolie. Efter ca 12 timmar togs förseglingen i röränden bort, så att överskottsvattnet kunde avdräneras. När inget ytterligare vatten rann bort, bestämdes vattenhalten genom torkning vid 105°C. WHC beräknades sedan som vattenhalten i % av jordens torrsustans.

Efter sådan avdränering kan vattenhalten hos jorden i trattens nederdel anses motsvara ett vattenavförande tryck lika med noll. Detta är ju också ett tillstånd som råder alldeles ovanför en grundvattenyta i marken. En vattenhalt motsvarande 100 % av WHC i matjorden skulle därför innebära att det vore så vått som om det funnes en grundvattenyta så högt upp i marken. I inkubationsstudierna eftersträvades i normalfallet att åstadkomma vattenhalter motsvarande betingelser som kan råda i marken på hösten. Sådana fuktighetstillstånd prövades ut

genom varierande vattentillsatser. Resultaten motsvarade 50–70% av WHC i de använda jordarna (se nedan), dvs. till övervägande del inom det optimala vattenhaltsområdet för nitrifikation (se lite raturöversikten ovan).

Studier av nitrifikation av ammoniumkväve i nötflytgödsel efter tillförsel under hösten och i olika geografiska lägen

Dessa inkubationsstudier genomfördes under fältförhållanden, varvid burkarna placerades i matjorden på plöjda och harvade åkerfält utan växtlighet eller växtrester på markytan (se exempel i figur 2). Öppna, fria ytor på fälten valdes, så att t.ex. inte skugga i skogsbryn eller snödrivor i läga lägen skulle inverka på temperaturförhållandena i jorden. Avsikten var att i möjligaste mån efterlikna förhållanden som råder där flytgödsel sprits och sedan plöjts ned. Burkarna ställdes därför med botten på 20 cm djup och med huvuddelen av jordblandningen i dem inom 15–20 cm djup. De täcktes med jord upp till ca 3 cm ovanför locket, så att bara ventilationsröret var synligt. Detta stack upp ca 30 cm över marken. Följande led ingick:

- A. Jord utan inblandning av flytgödsel (kontroll-led)
- B. Jord med inblandning av flytgödsel motsvarande 70 kg NH₄-N per ha inom ett 10 cm djupt jordskikt

Inkubationsstudier av detta slag genomfördes under höstarna och vintrarna 2000/2001 och 2001/2002. Undersökningarna genomfördes på fyra platser (tabell 1).

Tabell 1. Platser för inkubation under fältförhållanden 2000/2001 och 2001/2002.

Plats	Kommun	Län	Position
Lilla Böslid	Halmstad	Hålland	56°36'N, 12°56'O
Lanna	Lidköping	Västra Götaland	58°21'N, 13°8'O
Hamre	Hedemora	Dalarna	60°18'N, 16°1'O
Röbäcksdalen	Umeå	Västerbotten	63°49'N, 20°17'O



Figur 1. Placering av inkubationsburkar på en av undersökningsplatserna (Lilla Böslid 2000/2001), med botten på 20 cm djup och jordtäckning till ca 3 cm ovanför markytan. Ventilationsröret stack upp ca 30 cm ovanför marken.

Inkubationsburkar med jord, med och utan flytgödsel, sattes på varje plats ut vid tre tidpunkter ("tidigt", "medeltidigt/medelsent" och "sent") under hösten. Samma jord användes på alla fyra platserna för att renodlat studera temperatureffekter, utan inverkan av

variationer i jordarnas och de lokala bakteriestammarnas egenskaper (se litteraturoversikten ovan). Prov togs ut till analys vid 4–9 tidpunkter från och med utsättningen på hösten till tidigt på våren nästa år (tabell 2 och 3). Provtagning skedde således även vid starten, så att fördelningen mellan ammonium- och nitratkväve i jorden kunde bestämmas i utgångsläget. Ju senare utsättningar ägde rum, desto färre provtagningstidpunkter ingick. Undersökningarna genomfördes som randomiserade blockförsök med tre upprepningar av alla led och tidpunkter. Utsättnings- och provtagningsdatum under de båda åren framgår av tabell 2 och 3.

Tabell 2. Inkubation under fältförhållanden 2000/2001: Tidpunkter för start av tre inkubationsomgångar i olika landsdelar samt provtagningsdatum.

Plats och starttidpunkt	Provtagningsstidpunkter								
<i>Lilla Böslid, södra Halland</i>									
Omgång 1 den 15/9	15/9*	2/10	16/10	2/11	16/11	30/11	31/1	15/3	
Omgång 2 2/11	2/11*	16/11	30/11	31/1	15/3				
Omgång 3 30/11	30/11*	15/12	15/1	15/2	15/3				
<i>Lanna, Västergötland</i>									
Omgång 1 den 13/9	13/9*	1/10	16/10	31/10	15/11	1/12	10/4	2/5	
Omgång 2 10/10	10/10*	16/10	31/10	15/11	1/12	10/4	2/5		
Omgång 3 3/11	3/11*	15/11	1/12	10/4	2/5				
<i>Hamre, södra Dalarna</i>									
Omgång 1 den 14/9	14/9*	2/10	6/10	16/10	1/11	16/11	1/12	25/4	
Omgång 2 6/10	6/10*	16/10	1/11	16/11	1/12	25/4			
Omgång 3 3/11	3/11*	16/11	1/12	25/4					
<i>Röbäcksdalen, södra Västerbotten</i>									
Omgång 1 den 13/9	13/9*	2/10	16/10	1/11	15/11	1/12	2/5		
Omgång 2 4/10	4/10*	16/10	1/11	15/11	1/12	2/5			
Omgång 3 1/11	1/11*	15/11	1/12	2/5					

*) Provtagning vid inkubationsstarten för bestämning av utgångsläget.

Tabell 3. Inkubation under fältförhållanden 2001/2002: Tidpunkter för start av tre inkubationsomgångar i olika landsdelar samt provtagningsdatum.

Plats och starttidpunkt	Provtagningsstidpunkter								
<i>Lilla Böslid, södra Halland</i>									
Omgång 1 den 4/10	4/10*	15/10	1/11	15/11	29/11	13/12	15/1	15/3	
Omgång 2 1/11	1/11*	15/11	29/11	13/12	15/1	15/3			
Omgång 3 29/11	29/11*	13/12	15/1	15/2	15/3				
<i>Lanna, Västergötland</i>									
Omgång 1 den 2/10	2/10*	16/10	1/11	6/11	15/11	30/11	14/12	22/1	19/3
Omgång 2 30/10	30/10*	6/11	15/11	30/11	14/12	22/1	19/3		
Omgång 3 27/11	27/11*	14/12	22/1	19/3					
<i>Hamre, södra Dalarna</i>									
Omgång 1 den 5/10	5/10*	15/10	1/11	16/11	3/12	17/12	3/4		
Omgång 2 1/11	1/11*	16/11	3/12	17/12	3/4				
Omgång 3 16/11	16/11*	3/12	17/12	3/4					
<i>Röbäcksdalen, södra Västerbotten</i>									
Omgång 1 den 3/10	3/10*	15/10	31/10	13/11	29/11	12/12	29/4		
Omgång 2 31/10	31/10*	13/11	29/11	12/12	29/4				
Omgång 3 13/11	13/11*	29/11	12/12	29/4					

*) Provtagning vid inkubationsstarten för bestämning av utgångsläget.

Den nötflytgödsel som användes 2000/2001 innehöll 6,1 % ts samt 3,8 kg totalkväve och 1,9 kg ammoniumkväve per ton. För år 2001/2002 visade analyserna 6,1 % ts samt 4,4 kg totalkväve och 2,5 kg ammoniumkväve per ton. Mängden tillförd flytgödsel till jorden motsvarande båda åren och vid alla tillföreltidpunkter en giva om 70 kg NH₄-N per ha inblandad i ett matjordskikt med 10 cm djup. Kol-kvävekvoten i flytgödselns torrsbstans år 2000/2001 och 2001/2002 uppgick till 13 resp. 12, beräknat på innehållet av totalkol och organiskt kväve (total-N minus ammonium-N).

Temperaturen mättes kontinuerligt var femte timma med en logger, som placerades i en vattentät behållare på 20 cm djup, med mätning inom 15–20 cm. I studierna vid Röbäcksdalen användes tre loggar placerade i de olika blocken.

Jordarna för inkubationsstudierna under de båda åren hämtades från matjorden (0-20 cm) på två olika fält på Götala. Markegenskaperna på platserna framgår av tabell 4. Volymvikten, som fastställdes på oplöjd mark (stubbåker) på fälten i fråga under hösten 2000 och 2001 med hjälp av nedslagningscylindrar, uppgick till 1,33 kg/dm³ inom 0-20 cm djup för jorden i studierna 2000/2001 och till 1,44 kg/dm³ år 2001/2002.

Tabell 4. Texturell sammansättning, mullhalt och markkemiska egenskaper inom 0-20 cm djup hos de jordar som användes för inkubationsstudier under fältförhållanden

År	Texturell sammansättning, %				Markkemiska egenskaper					
	Ler	Mjäla	Mo	Sand	Total-C % av ts	Total-N % av ts	pH (H ₂ O)	P-AL mg/100 g lufttorr jord		K-AL
2000/2001	15,2	12,0	47,4	25,5	2,47*	0,213	6,3	4,6		6,0
2001/2002	12,1	9,7	23,6	54,6	1,79**	0,146	6,2	19,5		11,5

*) Motsvarar 4,3 % mullhalt. **) Motsvarar 3,1 % mullhalt.

För inkubationen under fältförhållanden 2000/2001 valdes en fuktighetsgrad motsvarande 50 % av WHC, här lika med vattenhalten vid ett vattenavförande tryck om 1,0 m v.p. I praktiken skulle det ha varit möjligt att harva jorden vid denna vattenhalt. Detta är ett vanligt förhållande i början av hösten men förekommer vissa år även senare. I inkubationsundersökningen 2001/2002 valdes däremot 65 % av WHC, här motsvarande vattenhalten vid ett vattenavförande tryck om 0,2 m v.p. I detta tillstånd skulle jorden i praktiken ha varit alldeles för våt för att kunna harvas. Sådana markförhållanden kan ju ofta råda under hösten fr.o.m. oktober.

Studier av inverkan av temperaturen på nitrifikationens hastighet

För att studera hur hastigheten vid nitrifikationen av gödse $\text{NH}_4\text{-N}$ påverkas av temperaturer nära 0°C och vid vilket gradtal processen helt upphör genomfördes inkubationsförsök i klimatskåp med fyra konstanta temperaturer som mål (-2, 0, +2 och +5°C) under en period av 90 dagar. De faktiska temperaturerna blev emellertid -2,4, -0,6, +1,4 och +4,5°C som medeltal för hela perioden (tabell 5). Undersökningarna utfördes med och utan inblandning av nötflytgödsel i jord (samma jord som i fältinkubationsstudierna 2001/2002, se tabell 4). Vid varje temperatur ingick inkubationsburkar med de behandlingar och provtagningstidpunkter som anges i tabell 5 samt med tre upprepningar.

Den nötflytgödsel som användes innehöll 5,9 % ts samt 4,4 kg totalkväve och 2,5 kg ammoniumkväve per ton. Den tillförda mängden motsvarade 70 kg $\text{NH}_4\text{-N}$ per ha inom ett 10 cm djupt jordskikt. Vattenhalten i jorden reglerades så att den uppgick till 60 % av WHC, här motsvarande ett vattenavförande tryck om 0,4 m v.p.

Då det inte fanns klimatskåp eller -kammare lediga samtidigt för de fyra temperaturomgångarna, djupfrystes alla burkar med jordblandningarna vid omkring -20°C genast efter iordningställandet. Omedelbart före starten av varje inkubationsomgång ställdes burkarna fram för standardiserad uppvärmning till avsedd inkubationstemperatur, dock utan att jorden råkade bli varmare än så. Varje klimatskåp/kammare försågs med två temperaturloggar. Burkarna vägdes före inkubationsstarten och sedan veckovis eller vid behov för att upptäcka och korrigera eventuella förändringar i vattenhalten genom försiktig vattning. Inkubationsburkarna placerades slumpmässigt fördelat i varje klimatskåp/kammare och flyttades veckovis om för att eliminera eventuella temperaturskillnader.

Tabell 5. Studier av jordtemperaturens inverkan på flytgödselammoniumkvävet nitrifikation. Faktiska temperaturer samt tidpunkter (x) för sex provtagningstillfällen under loppet av totalt 90 inkubationsdagar. S = standardavvikelse.

Medeltal	Temperatur, °C			Flytgödsel	Provtagningstidpunkt, antal dagar efter starten					
	S	Min.	Max.		0	15	30	50	70	90
-2,4	0,3*	-3,1	-0,6	Med	x	x	x	x	x	x
				Utan	x			x		x
-0,6	0,1*	-0,7	+0,2	Med	x	x	x	x	x	x
				Utan	x			x		x
+1,4	0,0*	+1,4	+1,6	Med	x	x	x	x	x	x
				Utan	x			x		x
+4,5	0,6*	+1,8	+7,2	Med	x	x	x	x	x	x
				Utan	x			x		x

*) Temperaturer som avvek från medeltalet med minst storleken av en standardavvikelse förekom under 32 % av inkubationstiden.

Studier av inverkan av jordens vattenhalt på nitrifikationen

Eftersom nitrifikationsprocessen fordrar tillgång till syre, kan markens fuktighetsgrad ha betydelse för nitratbildningens hastighet genom långsammare diffusion av syre i jordens porer vid tilltagande vattenhalter. För att undersöka inverkan av vattenhalten på flytgödselammoniumkvävet nitrifikation utfördes en inkubationsstudie under totalt 70 dagar med tre fuktighetstillstånd (50, 60 eller 70 % av WHC), med och utan nötflytgödsel samt med tre upprepningar (tabell 6). Nötflytgödseln innehöll 6,2 % ts samt 3,9 kg totalkväve och 2,0 kg ammoniumkväve per ton. Mängden motsvarande en giva innehållande 30 kg NH₄-N per ha inblandad i ett matjordskikt med 10 cm djup.

Tabell 6. Försöksplan för studier av vattenhaltens inverkan på flytgödselammoniumkvävet nitrifikation med provtagning (x) vid sex tidpunkter under loppet av totalt 70 dagar.

Led	Flytgödsel	Vattenhalt, % av WHC	Provtagningstidpunkt, antal dagar efter starten					
			0	14	28	42	56	70
M50	Med	50	x	x	x	x	x	x
M60	Med	60	x	x	x	x	x	x
M70	Med	70	x	x	x	x	x	x
U50	Utan	50	x					x
U60	Utan	60	x					x
U70	Utan	70	x					x

Inkubationsjorden hade en textuell sammansättning med 12,5 % ler, 9,5 % mjåla, 22,1 % mo och 56,0 % sand samt följande kemiska egenskaper: pH (H₂O) 5,7, P-AL 1,3 och K-AL 2,5 mg per 100 g luft torr jord, 2,11 % totalkol (av ts) motsvarande 3,6 % mull och 0,18 % totalkväve (av ts).

Inkubationen genomfördes i ett klimatskåp (med slumpvis placering och återkommande slumpvisa omflyttningar av burkarna) vid ca 4°C i syfte att efterlikna temperaturförhållanden på senhösten, då marken dessutom oftast är blöt och kladdig. Temperaturen mättes fortlöpande med två loggrar. Den faktiska temperaturen under perioden (70 dagar) blev i medeltal 3,7°C (standardavvikelse 0,8°C, minimivärde 2,2°C och maximivärde 6,2°C). Valet av vattenhalterna 50, 60 och 70 % av WHC grundades på en prövning inom ett brett intervall av lämpligt fuktighetstillstånd med hänsyn till vanliga förhållanden under hösten. Vattenmättnadsgraderna 50, 60 och 70 % av WHC motsvarade vattenhalterna vid vattenavförande tryck om 1,7, 0,4 resp. 0,1 m v.p. Vid 50 % av WHC bedömdes fuktigheten likna situationer då det vore fullt möjligt att larva jorden. Vid 60 % syntes den vara något för våt och kladdig för harvning. Vid 70 % av WHC var den mycket kletig och tenderade att flyta ut något, vilket kan

motsvara mycket våta senhöstförhållanden efter större nederbördsmängder. Under inkubationens gång "satte sig" jorden i burkarna och blev alltmer kompakt vid ökad vattenhalt. Den förblev dock ganska lös vid 50 % av WHC.

RESULTAT

Inkubationsstudier under fältförhållanden 2000-2001

Lilla Böslid 2000/2001

Luft- och jordtemperaturer. Lufttemperaturen var högre än normalt under försöksperioden 2000/2001 (15 september–15 mars), särskilt i oktober–januari, då ett temperaturöverskott på 2–3°C fastställdes (tabell 7). Jordtemperaturen på 20 cm djup sjönk inte under 10°C förrän i slutet av oktober (figur 3). Maximitemperaturen (16,3°C) i jorden under hela inkubationsperioden registrerades den 29/9 under den jämförelsevis varma tid som rådde från starten i september till den senare delen av oktober. Jordtemperaturen höll sig omkring 7°C från slutet av oktober till ca 10/12. Från mitten av december till början av mars växlade temperaturen på 20 cm djup omkring 0°C, med återkommande perioder med 2–3 plusgrader alternerande med några minusgrader. Minimitemperaturen under vintern var -5,4°C. Medeltemperaturen i jorden under vintermånaderna var över eller nära 0°C under alla tidsintervall mellan två provtagningstillfällen, förutom under perioden den 15 januari till 16 februari, som hade den lägsta medeltemperaturen (-0,7°C) och perioden 31 januari–15 mars som hade -0,1°C (tabell 8). Det var endast i februari som månadsmedeltemperaturen i marken understeg 0°C (tabell 7).

Nitrifikation av flytgödsel-NH₄-N. Inkubationsburkar med jord, med och utan inblandning av flytgödsel, sattes ut i tre omgångar: 15/9, 2/11 och 30/11 (tabell 2 och 8). Vid dessa starttidpunkter innehöll jorden efter flytgödseltillsatsen ammoniummängder motsvarande 54–57 kg NH₄-N per ha, inkl. jordeget ammoniumkväve och beräknat för ett 10 cm djupt jordskikt (tabell 8). Efter utplaceringen den 15 september skedde fullständig nitrifikation av ammoniumkvävet inom omkring två veckor, varefter bara 3 kg NH₄-N per ha återfanns. Efter tillförsel av flytgödsel den 2 november var det tillförda ammoniumkvävet helt omvandlat till nitratkväve inom ca fyra veckor. Efter den sista utplaceringstidpunkten (den 30 november) var allt nitrifierat efter ungefär sex veckor, trots temperaturer nära 0°C från ca 20/12.

De återstående NH₄-N-mängderna när flytgödselammoniumkvävet försvunnit i de tre inkubationsomgångarna motsvarade 2–5 kg N/ha (tabell 8). Medeltemperaturen i jorden på 20 cm djup från inkuberingens början till dess att allt ammoniumkväve kan anses ha nitrifierats var 12, 7 och 2,5°C för respektive omgång med start 15/9, 2/11 och 30/11. Endast i den sista inkubationsomgången fanns det något ammonium kvar den 15 december (drygt 25 %), då temperaturen nådde nollpunkten, men detta var försvunnet vid nästa provtagning (15/1). Vid den sista provtagningen (den 15 mars), då 4 kg NH₄-N per ha återfanns i alla tre omgångarna, återstod således inget flytgödselammoniumkväve efter något av tillförseltillfällena.

Mineralisering av jordkväve. I kontrollburkarna med enbart jord motsvarade ammoniuminnehållet under hela inkubationsperioden 15/9–15/3 i allmänhet 2–3 kg N/ha (räknat för ett 10 cm djupt jordskikt) i alla tre inkubationsomgångarna (tabell 8). Efter utplaceringen av burkarna ökade NO₃-N-mängderna i jorden under de tre inkubationsperioderna från starten 15/9, 2/11 och 30/11 fram till den 15 mars med 32, 17 respektive 13 kg/ha, uppenbarligen genom N-mineraliseringstillskott. Nitratkväveanhopningen var kraftigast i september och oktober,

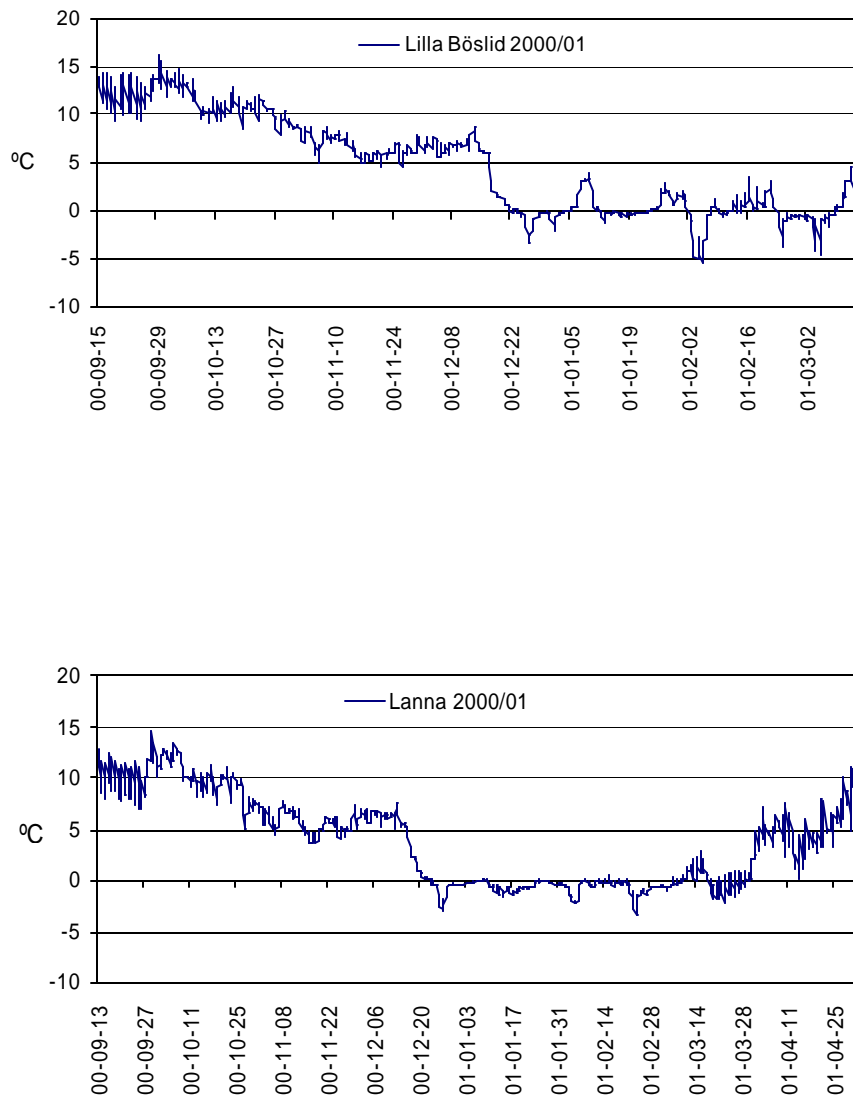
dvs. under den tid då högst jordtemperatur rådde (figur 3). Även under vinterperioden december-mars erhöles emellertid smärre kväve mineraliseringsstillskott, med några kg N/ha.

Tabell 7. Jordtemperatur (°C) på 20 cm djup på försöksplatsen vid Lilla Böslid under inkubationsperioden 2000/2001 samt lufttemperatur (°C) vid SMHI:s meteorologiska station Genevad, ca 6 km från Lilla Böslid.

Månad	sept.	okt.	nov.	dec.	jan.	febr.	mars
Jordtemperatur, månadsmedeltal, Lilla Böslid							
2000/2001	12,3	11,0	6,7	3,5	0,5	-0,4	0,6
Lufttemperatur, månadsmedeltal, Genevad							
2000/2001	12,6	11,5	7,5	3,2	1,2	-0,6	1,0
1961-90	12,5	8,7	4,0	0,3	-1,2	-1,3	1,5

Tabell 8. Förändringar av mängderna ammonium- och nitratkväve vid inkubation av jord och flytgödsel samt enbart jord på ett åkerfält vid Lilla Böslid, Halland under hösten och vintern 2000/2001. Medeltemperatur (på 20 cm djup) avser tidsintervallet mellan två provtagningsstillfällen, det aktuella och det föregående.

Provtagningsdatum	Jord och flytgödsel		Enbart jord		Medeltemp. (°C) mellan provtagningsdatum
	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	
<i>Flytgödseltillförelse 15 sept</i>					
15 sep	57	17	3	18	
2 okt	3	79	2	26	12,5
16 okt	3	86	2	29	11,0
2 nov	3	89	2	36	10,0
16 nov	3	92	2	38	7,2
30 nov	3	97	2	38	6,1
31 jan	4	98	3	46	2,0
15 mar	4	110	3	50	-0,2
<i>Flytgödseltillförelse 2 november</i>					
2 nov	57	24	2	24	
16 nov	13	72	2	27	7,2
30 nov	2	82	2	30	6,1
31 jan	4	92	3	37	2,0
15 mar	4	101	3	40	-0,2
<i>Flytgödseltillförelse 30 november</i>					
30 nov	54	31	1	30	
15 dec	15	73	2	35	6,8
15 jan	5	88	4	38	0,4
16 feb	4	96	3	42	-0,7
15 mar	4	96	3	43	0,1



Figur 3. Temperatur (°C) på 20 cm djup på platserna med inkubationsundersökningar under fältförhållanden vid Lilla Böslid, Halland och Lanna, Västergötland år 2000/2001.

Lanna 2000/2001

Luft- och jordtemperaturer. Lufttemperaturen var liksom på Lilla Böslid högre än normalt under hela försöksperioden 2000/2001 (13 september–2 maj), särskilt i oktober–januari då ett temperaturöverskott på 3–4°C fastställdes (tabell 9). Jordtemperaturen på 20 cm djup sjönk inte under 10°C förrän i slutet av oktober (figur 3). Maximitemperaturen (14,6°C) i jorden under hela inkubationsperioden registrerades den 29/9 under den ganska varma tiden från starten i september till den senare delen av oktober. Jordtemperaturen höll sig vid 5–7°C från slutet av oktober till mitten av december. Från ca 20/12 till början av mars var den på 20 cm djup nära eller något under 0°C (figur 3), med en minimitemperatur på -3,5°C. Medeltemperaturen i jorden var dock över 0°C under tidsintervallen mellan provtagningstillfällena på vintern (tabell 10) och var då tidvis högre på 20 cm djup i jorden än i luften (tabell 9). I månads-skiftet mars-april steg marktemperaturen till omkring 5°C och fortsatte sedan att öka till omkring 10°C i slutet av april.

Nitrifikation av flytgödsel-NH₄-N. Inkubationsburkar med jord, med och utan flytgödselinblandning, sattes ut vid tre tillfällen: 13/9, 10/10 och 3/11 (tabell 2 och 10). Efter flytgödseltillsatsen vid dessa tidpunkter fastställdes ammoniummängder i jorden motsvarande 60–66 kg NH₄-N per ha, inkl. jordeget ammoniumkväve och beräknat för ett 10 cm djupt jordskikt (tabell 10). Efter utplaceringen den 13 september ombildades allt ammoniumkväve iflytgödseln till nitratkväve inom omkring två veckor, varefter bara 3 kg NH₄-N per ha återfanns. Efter tillförsel av flytgödsel den 10 oktober var det tillförda ammoniumkvävet helt omvandlat till nitratkväve inom ca tre veckor, och efter den sista utplaceringstidpunkten (den 3 november) återstod inget tillfört NH₄-N efter ungefär fyra veckor. Medeltemperaturen i jorden på 20 cm djup från inkuberingens start 13/9, 10/10 och 3/11 till dess att allt tillfört ammoniumkväve kan anses ha nitrifierats var 10, 9 resp. 6°C.

De återstående NH₄-N-mängderna i de tre inkubationsomgångarna när flytgödselammoniumkvävet försvunnit motsvarade 3 kg N/ha (tabell 10), vilket var samma nivå som i jord utan flytgödseltillsats. Endast i den sista omgången med start 3/11 fanns gödselammoniumkväve kvar den 15 november (omkring hälften av ursprungsmängden). Men även detta var alltså försvunnet den 1/12, då inget flytgödselammoniumkväve återstod i någon av de tre inkubationsomgångarna och bara 2–3 kg NH₄-N per ha kunde fastställas inom ett 10 cm djupt jordskikt. Fram till provtagningarna den 10 april och 2 maj steg emellertid NH₄-N-mängderna något till ca 7 kg.

Mineralisering av jordkväve. Vid inkubationen av enbart jord i alla tre omgångarna motsvarade ammoniuminnehållet under hela perioden 13 september–2 maj 2–6 kg N/ha (tabell 10). Efter utplaceringen av inkubationsburkarna den 13/9, 10/10 och 3/11 ökade nitratkvävemängden i jorden under de tre perioderna med 34, 23 respektive 20 kg/ha fram till den 2 maj, således mest i den första omgången. Ökningarna måste bero på mineralisering av jordkväve. Tillskotten av nitratkväve i intervallen mellan de olika provtagningstidpunkterna på hösten var ganska jämnstora men avtog i november, då temperaturer omkring 5°C rådde på 20 cm djup (figur 3). Vid vårprovtagningen den 10 april fastställdes kraftigt ökade NO₃-N-mängder, som motsvarade kvävemineraliseringstillskott i storleksordningen 10–20 kg N/ha sedan den 1 december.

Tabell 9. Jordtemperatur (°C) på 20 cm djup på försöksplatsen vid Lanna under inkubationsperioden 2000/2001 samt lufttemperatur (°C) vid SMHI:s meteorologiska station på Lanna.

Månad	sept	okt	nov	dec	jan	febr	mars	april
Jordtemperatur, månadsmedeltal								
2000/2001	10,2	9,8	5,7	3,2	-0,5	-0,7	-0,1	4,7
Medeltal 1961-90	11,1	7,5	3,3	0,8	-0,2	-0,7	-0,3	3,0
Lufttemperatur, månadsmedeltal								
2000/2001	10,2	9,8	5,9	2,6	-0,5	-3,1	saknas	3,7
1961-90	11,0	7,0	2,1	-1,3	-3,1	-3,4	-0,2	4,7

Tabell 10. Förändringar av mängderna ammonium- och nitratkväve vid inkubation av jord och flytgödsel samt enbart jord på ett åkerfält vid Lanna under hösten och vintern 2000/2001. Medeltemperatur (på 20 cm djup) avser tidsintervallet mellan två provtagningstillfällena, det aktuella och det föregående.

Provtagningsdatum	Jord och flytgödsel		Enbart jord		Medeltemp. (°C) mellan provtagningsdatum
	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	
<i>Flytgödsetillförelse 13 sept</i>					
13 sep	60	16	3	18	
1 okt	3	79	2	23	10,0
16 okt	3	81	2	26	10,8
31 okt	3	91	2	32	8,7
15 nov	3	94	2	36	6,2
1 dec	3	91	2	37	5,2
10 apr	7	122	5	48	0,8
2 maj	6	115	5	52	5,1
<i>Flytgödsetillförelse 10 oktober</i>					
10 okt	66	21	2	25	
16 okt	41	39	2	25	9,6
31 okt	3	79	2	28	8,7
15 nov	3	86	2	31	6,2
1 dec	2	83	2	33	5,2
10 apr	7	112	5	47	0,8
2 maj	7	115	5	48	5,1
<i>Flytgödsetillförelse 3 november</i>					
3 nov	65	28	3	29	
15 nov	32	52	2	30	6,2
1 dec	3	78	2	28	5,2
10 apr	7	112	6	47	0,8
2 maj	7	119	5	49	5,1

Hamre 2000/2001

Luft- och jordtemperaturer. Lufttemperaturen i södra Dalarna var liksom i södra Halland och på Lanna högre än normalt under i stort hela försöksperioden 2000/2001 (14 september–25 april) utom i februari och mars (tabell 11). Månaderna oktober–december hade ett temperaturöverskott på 3–5°C.

Jordtemperaturen på 20 cm djup höll sig omkring 10°C eller strax därunder till ca 20 oktober (figur 4). Maximitemperaturen (15,5°C) i jorden under hela inkubationsperioden uppmättes den 7/10. Jordtemperaturen höll sig vid omkring 5°C från slutet av oktober till mitten av december. Från ca 20 december till början av april rådde dock en eller ett par minusgrader på 20 cm djup (figur 4 och tabell 11). Under kortare perioder var det ännu nå got kallare, dock med temperaturer omkring -5°C i marken bara vid enstaka tillfällen. Minimitemperaturen under vintern var -6,0°C. De förhållandevis få köldgraderna på 20 cm markdjup förklaras av skyddande snötäcke och av att lufttemperaturen t.o.m. januari var högre än normalt. Februari och mars var dock som nämnts kallare än vanligt. Från omkring den 10 april steg temperaturen på 20 cm djup över nollpunkten och nådde drygt 5°C vid inkubationsperiodens slut den 25 april.

Nitrifikation av flytgödsel-NH₄-N. Inkubationsburkar med enbart jord eller med flytgödsel inblandad i jord sattes ut vid tre tillfällen: 14/9, 6/10 och 3/11 (tabell 2 och 12). Ammoniummängderna i jorden med flytgödsel vid dessa starttidpunkter motsvarande 51–62 kg NH₄-N per ha, inkl. jordeget ammoniumkväve, inom ett jordskikt med 10 cm djup (tabell 12). Efter utplaceringen den 14 september nitrifierades allt ammoniumkväve i flytgödseln inom loppet av drygt två veckor, varefter bara 3 kg NH₄-N per ha återfanns. Efter tillsats av flytgödsel den 6 oktober var det tillförda ammoniumkvävet helt omvandlat till nitratkväve inom ca tre veckor. Efter den sista utplaceringstidpunkten (den 3 november) återstod inget tillfört NH₄-N knappt en månad senare. Medeltemperaturen i jorden på 20 cm djup från inkuberingens start den 14/9, 6/10 och 3/11 till dess att allt ammoniumkväve kan anses ha nitrifierats var 9, 8 resp. 5°C.

De återstående NH₄-N-mängderna i de tre inkubationsomgångarna när flytgödselammoniumkvävet försvunnit motsvarade 3 kg N/ha, vilket var 1 kg N/ha mer än i jord utan flytgödseltillsats (tabell 12). Istället hade nitratkväve bildats. Endast i den sista omgången med start 3/11 fanns gödselammoniumkväve kvar den 16 november (drygt hälften av ursprungsmängden). Detta hade emellertid nitrifierats till den 1/12. Inget flytgödselammoniumkväve återstod således i någon av de tre inkubationsomgångarna efter den 1 december, då bara 2 kg NH₄-N per ha fastställdes inom ett 10 cm djupt jordskikt. Vid slutprovtagningen den 25 april återfanns också bara 2 kg NH₄-N per ha inom ett 10-cm-skikt.

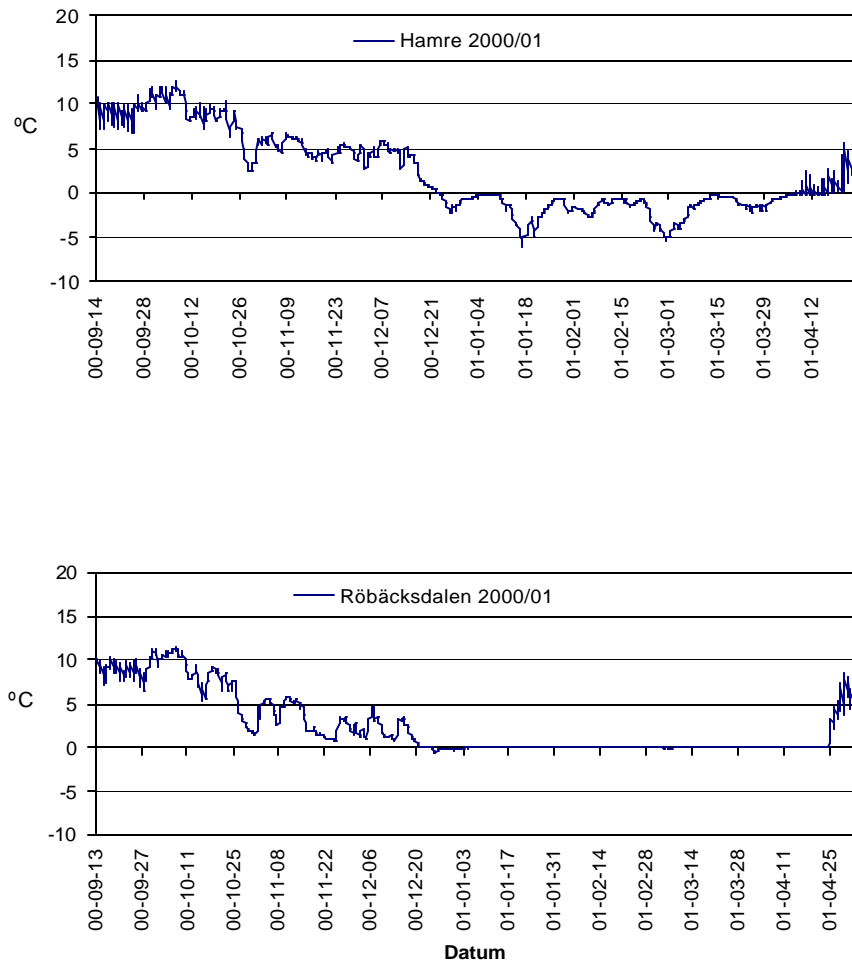
Mineralisering av jordkväve. I alla tre inkubationsomgångarna med enbart jord motsvarade ammoniuminnehållet under tiden 14 september–25 april 2–3 kg N/ha (tabell 12). Efter utplaceringen av inkubationsburkarna den 14/9, 6/10 och 3/11 ökade nitratkvävemängderna under de tre perioderna med 26, 26 resp. 17 kg/ha fram till den 25 april. Ökningarna, som måste bero på mineralisering av jordkväve, var störst i september och avtog därefter. I november, då temperaturer omkring 5°C ännu rådde på 20 cm djup (figur 4), frigjordes 4–5 kg N/ha. Från den sista höstprovtagningen den 1 december till slutprovtagningen den 25 april fastställdes kvävemineraliseringstillskott på 9–14 kg N/ha, trots att marktemperaturen under den största delen av denna period var under nollpunkten.

Tabell 11. Jordtemperatur (°C) på 20 cm djup på försöksplatsen vid Hamre, södra Dalarna under inkubationsperioden 2000/2001 samt medeltal för lufttemperaturerna (°C) vid SMHI:s meteorologiska stationer i Avesta och Borlänge, ca 20 resp. 40 km från Hamre.

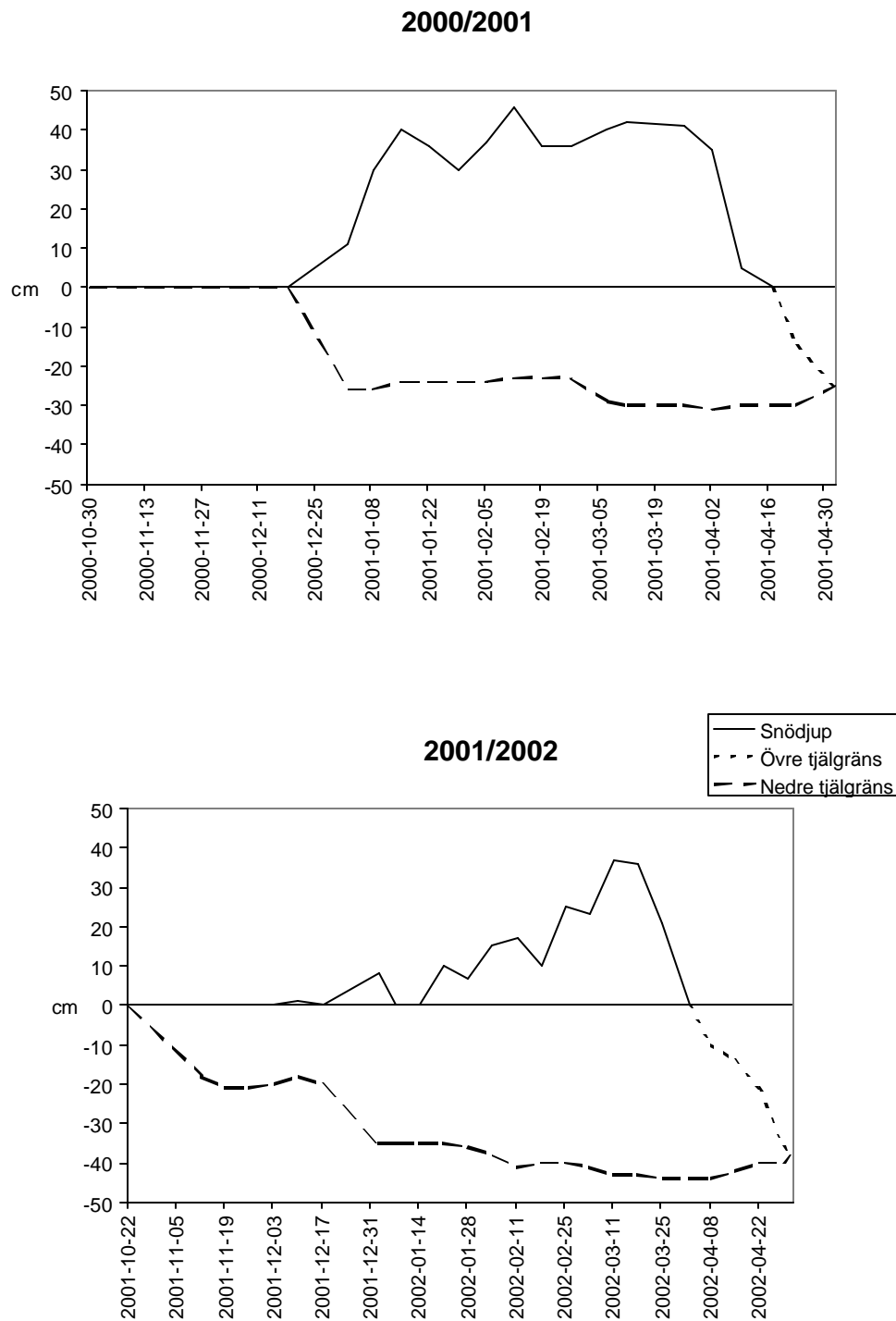
Månad	sept	okt	nov	dec	jan	febr	mars	april
Jordtemperatur, månadsmedeltal, Hamre								
2000/2001	9,3	8,6	5,1	2,2	-1,7	-1,9	-1,6	0,8
Lufttemperatur, månadsmedeltal för Avesta och Borlänge								
2000/2001	9,6	8,7	5,1	0,7	-3,1	-6,2	-2,8	4,2
1961-90	10,1	5,5	-0,2	-4,2	-5,6	-5,1	-1,4	3,7

Tabell 12. Förändringar av mängderna ammonium- och nitratkväve vid inkubation av jord och flytgödsel samt enbart jord på ett åkerfält vid Hamre, södra Dalarna under hösten och vintern 2000/2001. Medeltemperatur (på 20 cm djup) avser tidsintervallet mellan två provtagningstillfällen, det aktuella och det föregående.

Provtagningsdatum	Jord och flytgödsel		Jord		Medeltemp. (°C) mellan provtagningsdatum
	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	
<i>Flytgödseltillförsel 14 sept</i>					
14 sep	62	19	3	20	
2 okt	3	84	3	26	9,0
16 okt	3	93	2	29	10,0
1 nov	3	100	2	33	6,9
16 nov	3	103	2	35	6,0
1 dec	3	103	2	37	4,4
25 apr	2	110	2	46	-0,5
<i>Flytgödseltillförsel 6 oktober</i>					
6 okt	51	23	2	24	
16 okt	14	69	2	28	9,4
1 nov	3	89	2	31	6,9
16 nov	3	97	2	34	6,0
1 dec	3	101	2	36	4,4
25 apr	2	109	2	50	-0,5
<i>Flytgödseltillförsel 3 november</i>					
3 nov	55	28	3	30	
16 nov	28	57	2	33	5,5
1 dec	3	94	2	35	4,4
25 apr	2	110	2	47	-0,5



Figur 4. Temperatur (°C) på 20 cm djup på platserna med inkubationsundersökningar under fältförhållanden vid Hamre, södra Dalarna och Röbbäcksdalen, södra Västerbotten år 2000/2001.



Figur 5. Snö- och tjäldjup (cm) på höstplöjd mark vid Röbäcksdalen under vintrarna 2000/2001 och 2001/2002.

Röbäcksdalen 2000/2001

Luft- och jordtemperaturer. Försöksperioden 2000/2001 vid Röbäcksdalen omfattade tiden från den 13/9 till den 2/5. Lufttemperaturen var högre än normalt under perioden oktober–januari, med ett överskott på 3–5°C, men februari och mars var kallare än vanligt (tabell 13).

Jordtemperaturen på 20 cm djup höll sig omkring 10°C eller strax därunder till ca 10 oktober (figur 4). Maximitemperaturen (11,5°C) i jorden under hela inkubationsperioden registrerades den 7/10. Jordtemperaturen växlade mellan ca +5 och 0°C från slutet av oktober till omkring den 20 december. Från ca 20/12 till ca 25/4 låg temperaturen i marken nära nollpunkten trots köldgrader i luften under vintermånaderna (tabell 13), varefter den ökade till drygt 5°C vid avslutningen av inkubationsperioden den 2 maj. Snötäcke och begynnande tjälbildning registrerades från mitten av december (figur 5). Tjälen, som varade till den senare hälften av april, nådde under vintern 20–25 cm djup. På 30-cm-nivån höll sig temperaturen strax över nollpunkten (tabell 13). Snötäcket, som varade in i april, torde förklara att temperaturen låg nära 0°C på 20 cm djup, med en minimitemperatur på endast -0,6°C, trots att marken var frusen.

Nitrifikation av flytgödsel-NH₄-N. Inkubationsburkar med jord, med eller utan flytgödselinblandning, sattes ut vid tre tillfällen: 13/9, 4/10 och 1/11 (tabell 2 och 14). Ammoniummängderna i jorden med flytgödseltillsats vid dessa starttidpunkter motsvarade 49–56 kg NH₄-N per ha, inkl. jordeget ammoniumkväve, inom ett 10-cm-skikt (tabell 14). Efter utplaceringen den 13 september ombildades allt ammoniumkväve i flytgödseln till nitratkväve inom loppet av drygt två veckor, varefter bara 3 kg NH₄-N per ha återfanns. Efter tillförsel av flytgödsel den 4 oktober var det tillförda ammoniumkvävet helt omvandlat till nitratkväve inom tre–fyra veckor. Efter den sista utplaceringstidpunkten (den 1 november) återstod ca hälften efter två veckor, men inget tillfört NH₄-N kunde återfinnas en månad efter starten. Medeltemperaturen i jorden på 20 cm djup från inkubationsomgångarnas start 13/9, 4/10 och 1/11 till dess att allt ammoniumkväve kan anses ha nitrifierats var omkring 9, 7 resp. 3°C.

De återstående NH₄-N-mängderna i de tre inkubationsomgångarna när flytgödselammoniumkvävet försvunnit motsvarade 3 kg N/ha, vilket var ungefär som i jord utan flytgödseltillsats (tabell 14). Istället hade 55–60 kg nitratkväve per ha bildats i de tre inkubationsomgångarna. Från provtagningen den 1 december, då 2 kg NH₄-N per ha fastställdes inom ett 10 cm djupt jordskikt, till slutprovtagningen den 2 maj ändrades inte ammoniumkvävemängderna.

Mineralisering av jordkväve. I alla tre inkubationsomgångarna med enbart jord fastställdes under hela tidsperioden 13 september–2 maj bara 2 kg N/ha (tabell 14). Efter utplaceringen av inkubationsburkarna den 13/9, 4/10 och 1/11 ökade nitratkvävemängden i jorden under de tre perioderna med 27, 19 resp. 18 kg/ha fram till den 2 maj genom kvävemineraliseringstillskott. Från den 13/9 till 2/10 tilltog nitratkvävemängden med 6 kg N/ha (tabell 14). Därefter var ökningarna mindre, uppenbarligen genom fallande temperaturer. Från den sista höstprovtagningen den 1 december till slutprovtagningen den 2 maj fastställdes emellertid kvävemineraliserings tillskott på 8–13 kg N/ha, trots att marktemperaturen under den allra största delen av denna period höll sig nära nollpunkten. Det frigjorda kvävet ansamlades uteslutande som nitrat.

Tabell 13. Jordtemperatur (°C) på 20 cm djup på försöksplatsen vid Röbbäcksdalen, Umeå under inkubationsperioden 2000/2001 och på 30 cm djup vid klimatstationen på Röbbäcksdalen samt lufttemperatur (°C) vid Umeå flygplats.

Månad	sept	okt	nov	dec	jan	febr	mars	april
Jordtemperatur, månadsmedeltal, Röbbäcksdalen								
2000/2001, 20 cm	8,9	7,6	3,3	1,2	-0,1	0,0	-0,1	0,9
2000/2001, 30 cm	11,1	8,5	5,1	3,0	saknas	0,3	0,3	0,1
1980-89, 30 cm	9,6	5,8	2,0	1,6	0,0	-0,4	-0,3	0,0
Lufttemperatur, månadsmedeltal, Umeå flygplats								
2000/2001	8,9	7,1	2,8	-2,3	-3,8	-10,5	-7,6	1,9
1961-90	8,7	3,8	-2,4	-6,6	-9,1	-8,6	-4,3	1,2

Tabell 14. Förändringar av mängderna ammonium- och nitratkväve vid inkubation av jord och flytgödsel samt enbart jord på ett åkerfält vid Röbbäcksdalen, Umeå under hösten och vintern 2000/2001. Medeltemperatur (på 20 cm djup) avser tidsintervallet mellan två provtagningsstillfällen, det aktuella och det föregående.

Provtagningsdatum	Jord och flytgödsel		Enbart jord		Medeltemp. (°C) mellan provtagningsdatum
	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	
<i>Flytgödseltillförelse 13 sept</i>					
13 sep	56	17	2	18	
2 okt	3	78	3	24	9,0
16 okt	3	84	2	27	10,0
31 okt	3	86	2	29	6,0
15 nov	3	89	2	32	5,0
1 dec	3	94	2	32	2,0
2 maj	3	95	2	45	-0,5
<i>Flytgödseltillförelse 4 oktober</i>					
4 okt	51	21	2	22	
16 okt	9	71	2	25	10,0
1 nov	3	75	2	29	6,0
15 nov	3	85	2	32	5,0
1 dec	2	89	2	33	2,0
2 maj	3	99	2	41	-0,5
<i>Flytgödseltillförelse 1 november</i>					
1 nov	49	25	2	25	
15 nov	25	56	2	29	5,0
1 dec	3	84	2	31	2,0
2 maj	3	107	2	43	-0,5

Inkubationsstudier under fältförhållanden 2001-2002

Lilla Böslid 2001/2002

Den första inkubationsomgången 2001/2002 startade den 4 oktober, dvs. drygt en halv månad senare än hösten 2000 (tabell 3). De båda efterföljande omgångarna senarelades däremot inte. Den sista provtagningen av inkubationsburkar gjordes den 15 mars 2002.

Luft- och jordtemperaturer. Oktober 2001 var liksom samma månad 2000 varmare än normalt, medan november och december var något kallare än vanligt (tabell 15) och med ca 8 grader lägre temperaturer än 2000. Månadsmedeltemperaturerna för januari–mars 2001 var dock ca 3–5°C högre än normalt.

Jordtemperaturen på 20 cm djup höll sig omkring 12–13°C till ca 15 oktober (figur 6). Maximitemperaturen (15,0°C) i jorden under hela inkubationsperioden registrerades den 14/10. Därefter sjönk marktemperaturen till omkring 5°C i mitten av november. Jordtemperaturen höll sig sedan vid mellan ca +1 och +3°C fram till omkring 20/12. Från denna tidpunkt till ca 20 januari rådde någon eller några minusgrader i marken, varefter en mild vädersperiod följde med temperaturväxlingar mellan ca +1 och +5°C på 20 cm djup fram till den avslutande provtagningen den 15 mars. Gradtalet på 20 cm djup i marken var i genomsnitt -0,6°C under tidsintervallet mellan provtagningstillfällena den 13/12 och 15/1, vilket var den lägsta medeltemperatur som registrerades för sådana intervall (tabell 16).

Nitrifikation av flytgödsel-NH₄-N. Inkubationsburkar med flytgödsel inblandad i jord sattes ut i tre omgångar: 4/10, 1/11 och 29/11 (tabell 3 och 16). Vid dessa starttidpunkter uppgick ammoniummängderna i jord med flytgödseltillsats till 60–65 kg NH₄-N per ha, inkl. jordeget ammoniumkväve och beräknat för ett 10 cm djupt jordskikt (tabell 16). Efter utplaceringen den 4 oktober nitrifierades praktiskt taget allt ammoniumkväve i flytgödseln till den 15 oktober, dvs. inom knappt två veckor, då omkring 65 kg NO₃-N per ha hade bildats men bara 4 kg NH₄-N per ha återfanns. Efter tillförsel av flytgödsel den 1 november var gödselammoniumkvävet helt omvandlat till nitratkväve inom en fyraveckorsperiod.

Efter den sista utplaceringstidpunkten (den 29 november) återstod emellertid ca 45 % av den ursprungliga NH₄-N-mängden den 15 januari, dvs. efter ungefär sju veckor, uppenbarligen genom nedsatt nitrifikation till följd av låga temperaturer och en långvarig tjälperiod. Senare uppkom blidväder, och återstoden av ammoniumkvävet försvann sedan till i mitten av februari, vilket var 10–11 veckor efter inkubationsstarten.

De återstående NH₄-N-mängderna i tre inkubationsomgångarna då flytgödselammoniumkvävet försvunnit motsvarade 2 kg N/ha (tabell 16). Medeltemperaturen i jorden på 20 cm djup från inkuberingens start i de tre omgångarna (4/10, 1/11 och 29/11) till dess att allt ammoniumkväve kan anses ha nitrifierats var 13, 4 respektive 1,4°C. Nitratbildningen var kraftig under de första 2-3 veckorna efter flytgödseltillförseln, till viss del också efter starten av den sista omgången. Även under vintern fastställdes en påtaglig nitratbildning, trots tidvis frusen mark. Anmärkningsvärd är nitratbildningen den 13/12–15/1 (efter flytgödseltillsats 29/11), då 21 kg NH₄-N per ha nitrifierades, samtidigt som 27 kg NO₃-N per ha bildades.

Mineralisering av jordkväve. I leden med enbart jord i alla tre inkubationsomgångarna motsvarade ammoniuminnehållet under hela försöksperioden 15 september–15 mars 1–2 kg N/ha, räknat för ett 10 cm djupt jordskikt (tabell 16). Under de tre inkubationsperioderna (med start

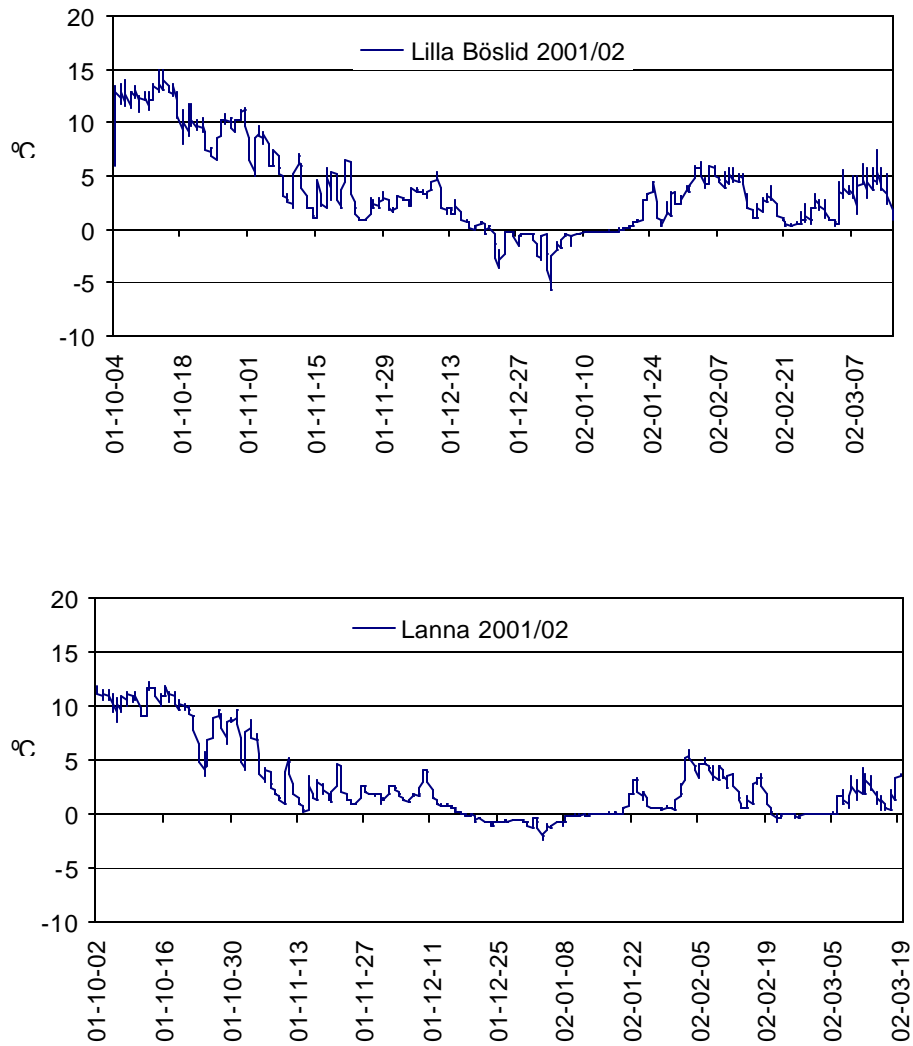
4/10, 1/11 och 29/11) uppkom nettomineralisering av jordkväve, som ökade mine ralkväve-mängden i jorden fram till den 15 mars med 20, 11 respektive 10 kg/ha. Även under vinterpe-rioden december–mars erhöles smärre kväveminaliseringstillskott, med några kg N/ha per månad. Det mineraliserade kvävet anhopades uteslutande som nitrat.

Tabell 15. Jordtemperatur (°C) på 20 cm djup på försöksplatsen vid Lilla Böslid under inkubationsperioden 2001/2002 samt lufttemperatur (°C) vid SMHI:s meteorologiska station Genevad, ca 6 km från Lilla Böslid.

Månad	okt	nov	dec	jan	febr	mars
Jordtemperatur, månadsmedeltal, Lilla Böslid						
2001/2002	11,0	4,1	1,0	0,3	3,0	3,3
Lufttemperatur, månadsmedeltal, Genevad						
2001/2002	11,8	3,9	-0,9	1,8	3,7	4,0
1961-90	8,7	4,0	0,3	-1,2	-1,3	1,5

Tabell 16. Förändringar av mängderna ammonium- och nitratkväve vid inkubation av jord och flytgödsel samt enbart jord på ett åkerfält vid Lilla Böslid, Halland under hösten och vintern 2001/2002. Medeltemperatur (på 20 cm djup) avser tidsintervallet mellan två provtagningstillfällen, det aktuella och det föregående.

Provtag- nings- datum	Jord och flytgödsel		Enbart jord		Medeltemp. (°C) mellan provtag- ningsdatum
	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	
<i>Flytgödseltillförelse 4 oktober</i>					
4 okt	60	8	2	9	
15 okt	4	72	2	12	12,5
1 nov	2	80	2	16	10,0
15 nov	2	78	2	17	5,3
29 nov	2	84	2	18	3,0
13 dec	2	87	2	21	2,9
15 jan	2	90	1	22	-0,6
15 mar	2	97	2	29	2,6
<i>Flytgödseltillförelse 1 november</i>					
1 nov	62	13	2	15	
15 nov	26	49	2	17	5,3
29 nov	2	72	1	18	3,0
13 dec	2	83	1	19	2,9
15 jan	2	87	1	19	-0,6
15 mar	1	94	1	26	2,6
<i>Flytgödseltillförelse 29 november</i>					
29 nov	65	16	2	17	
13 dec	50	31	1	21	2,9
15 jan	29	58	1	23	-0,6
15 feb	2	90	2	25	2,8
15 mar	1	91	1	27	2,4



Figur 6. Temperatur (°C) på 20 cm djup på platserna med inkubationsundersökningar under fältförhållanden vid Lilla Böslid, Halland och Lanna, Västergötland år 2001/2002.

Lanna 2001/2002

De tre inkubationsomgångarna 2001/2002 startade den 2/10, 30/10 och 27/11 (tabell 3). Särskilt de båda första tillfällena innebär en senareläggning jämfört med hösten 2000. Den sista provtagningen av inkubationsburkar gjordes den 19 mars 2002.

Luft- och jordtemperaturer. Höstmånaderna oktober–december var kallare 2001 än 2000. I oktober 2001 blev likväl månadslufttemperaturen närmare 3°C högre än normalt, medan november och december hade ganska normala temperaturer (tabell 17). Däremot blev januari, februari och mars 2–5°C mildare än vanligt med månadsmedeltemperaturer på 2–3 plusgrader.

Jordtemperaturen på 20 cm djup uppgick till 10–11°C fram till ca 20 oktober (figur 6). Maximitemperaturen (12,2°C) i jorden under hela inkubationsperioden registrerades den 13/10. Efter ca 20/10 varierade marktemperaturen mycket kraftigt men sjönk alltmer till omkring 2°C, vilket sedan rådde under en period från mitten av november till mitten av december. Från ca 15/12 till slutet av januari höll sig temperaturen på 20 cm djup nära eller något under 0°C (figur 6). Minimitemperaturen på detta djup under vintern var -2,4°C. Under tiden 20/1 till mitten av mars växlade temperaturen mellan 0°C och 4–5 plusgrader. Medeltemperaturen i jorden var över 0°C under alla tidsintervall mellan två provtagningstillfällen under vintermånaderna utom under perioden 14 december–22 januari, som hade en genomsnittstemperaturen på -0,3°C.

Nitrifikation av flytgödsel-NH₄-N. Vid starttidpunkterna för de tre inkubationsomgångarna (2/10, 30/10 och 27/11, se tabell 3 och 18) fastställdes efter flytgödseltillsats till jorden ammoniummängder motsvarande 62–66 kg NH₄-N per ha, inkl. jordeget ammoniumkväve (tabell 18), beräknat för ett 10 cm djupt jordskikt. Efter utplaceringen den 2 oktober skedde fullständig nitrifikation av ammoniumkvävet i flytgödseln inom loppet av drygt två veckor. Efter tillförsel av flytgödsel den 30 oktober var det tillförda ammoniumkvävet helt omvandlat till nitratkväve inom ca en månad. Inget flytgödselammoniumkväve fanns kvar efter den 30 november efter flytgödseltillsatsen vid de båda tidigaste tidpunkterna.

Efter det sista utplaceringstillfället (den 27 november) återstod något gödsel-NH₄-N ännu i slutet av januari. Det innebär en total nitrifikationstid på omkring två månader, som förklaras av ganska låga temperaturer med mellan ca två plusgrader och en minusgrad på 20 cm djup. Medeltemperaturen i jorden på detta djup från inkubationsperiodernas start (2/10, 30/10 och 27/11) till dess att allt gödselammoniumkväve kan anses ha nitrifierats var 11, 3 resp. 1°C.

De kvarvarande NH₄-N-mängderna i de tre inkubationsomgångarna när flytgödselammoniumkvävet försvunnit motsvarade 2 kg N/ha. Istället hade i storleksordningen 65 kg nitratkväve per ha bildats. Vid slutprovtagningen den 19 mars återfanns också bara 2 kg NH₄-N per ha inom ett 10-cm-skikt.

Mineralisering av jordkväve. I leden med enbart jord i alla tre inkubationsomgångarna motsvarade ammoniuminnehållet under hela perioden 2 oktober–19 mars 1–2 kg N/ha (tabell 18). Från starttidpunkterna 2/10, 30/10 och 27/11 ökade nitratkvävemängden i jorden i de tre omgångarna med 12, 11 respektive 7 kg/ha fram till den 19 mars, således mest i de tidigast startade omgångarna. Även under vintermånaderna (från ca 1/12 till slutprovtagningen 19/3), med temperaturer på 20 cm djup från ett par minusgrader till 4–5 plusgrader, uppkom kväve-mineraliseringsstillskott, som uppgick till 5–7 kg N/ha inom ett 10-cm-skikt.

Tabell 17. Jordtemperatur (°C) på 20 cm djup på försöksplatsen vid Lanna under inkubationsperioden 2001/2002 samt lufttemperatur (°C) vid SMHI:s meteorologiska station på Lanna.

Månad	oktober	nov	dec	jan	febr	mars
Jordtemperatur, månadsmedeltal						
2001/2002	8,3	2,7	0,6	0,1	2,1	1,4
Medeltal 1061-90	7,3	3,3	0,8	-0,2	-0,7	-0,3
Lufttemperatur, månadsmedeltal						
2001/2002	9,7	2,7	-2,1	3,2	2,5	2,1
1961-90	7,0	2,1	-1,3	-3,1	-3,4	-0,2

Tabell 18. Förändringar av mängderna ammonium- och nitratkväve vid inkubation av jord och flytgödsel samt enbart jord på ett åkerfält vid Lanna under hösten och vintern 2001/2002. Medeltemperatur (på 20 cm djup) avser tidsintervallet mellan två provtagningstillfällen, det aktuella och det föregående.

Provtagningsdatum	Jord och flytgödsel		Enbart jord		Medeltemp. (°C) mellan provtagningsdatum
	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	
<i>Flytgödsetillförsel 2 oktober</i>					
2 okt	66	9	2	10	
16 okt	6	71	2	13	10,7
1 nov	2	78	2	16	8,5
06 nov	2	85	2	16	10,7
15 nov	2	86	2	17	2,1
30 nov	2	89	2	17	2,0
14 dec	2	91	2	20	1,8
22 jan	2	90	1	21	-0,3
19 mar	2	93	1	22	1,7
<i>Flytgödsetillförsel 30 oktober</i>					
30 okt	65	14	2	15	
06 nov	47	30	2	16	10,7
15 nov	30	49	2	18	2,1
30 nov	4	81	2	19	2,0
14 dec	2	81	2	19	1,8
22 jan	2	87	1	25	-0,3
19 mar	2	91	1	26	1,7
<i>Flytgödsetillförsel 27 november</i>					
27 nov	62	16	2	18	
14 dec	41	37	2	20	1,8
22 jan	12	74	1	21	-0,3
19 mar	2	91	1	25	1,7

Hamre 2001/2002

De tre inkubationsomgångarna 2001/2002 startade med utsättning av inkubationsburkar i fält den 5/10, 1/11 och 16/11 2001 (tabell 3). Detta innebär en senareläggning jämfört med hösten 2000. Den sista provtagningen gjordes den 3 april 2002.

Luft- och jordtemperaturer. Temperaturen på hösten 2001 i södra Dalarna var inte lika hög som året innan men ändå ca 2°C högre än vanligt i oktober och november samt normal i december (tabell 19). Under vintermånaderna december–februari rådde det i medeltal minusgrader, men januari och februari var trots detta ca 2 resp. 4°C varmare än normalt. I mars var det i medeltal närmare en plusgrad och därmed något mildare än vanligt.

Jordtemperaturen på 20 cm djup höll sig mellan 8 och 10°C fram emot den 18 oktober (figur 7). Maximitemperaturen (11,2°C) i jorden under hela inkubationsperioden registrerades den 10/10. Fram till i början av november sjönk sedan marktemperaturen ned mot nollpunkten och höll sig därefter på denna nivå till mitten av december. Under den mildare hösten 2000 nåddes däremot fryspunkten på 20 cm djup först ca 20/12. Från omkring den 15 december 2001 och ända till månadsskiftet mars–april 2002 var marken frusen, men i allmänhet höll sig temperaturen på 20 cm djup vid omkring -0,5°C. Minimitemperaturen under vintern var -2,1°C. Den förhållandevis ringa kylan på 20 cm markdjup förklaras av skyddande snötäcke och av att luftmedeltemperaturen under januari, februari och mars var högre än normalt. Tjälén gick ur jorden omkring den 1 april på detta djup.

Nitrifikation av flytgödsel-NH₄-N. Som framgått sattes inkubationsburkar ut vid tre tillfällen: 5/10, 1/11 och 16/11 (tabell 3 och 20). Vid dessa starttidpunkter innehöll jorden efter flytgöd-seltillsats 55–65 kg NH₄-N per ha beräknat för ett 10 cm djupt jordskikt, inkl. jordeget ammoniumkväve (tabell 20). Efter utplaceringen den 5/10 nitrifierades allt ammoniumkväve i flytgödseln inom loppet av högst fyra veckor, varefter bara 2 kg NH₄-N per ha fastställdes den 1/11.

Efter tillförsel av flytgödsel den 1 november återfanns ungefär hälften av ammoniumkvävet den 3 december och ca 20 % den 17 december. Därefter gjordes ingen provtagning förrän vid inkubationsperiodens avslutning den 3 april, då 3 kg NH₄-N per ha fastställdes. Man kan med hjälp av klimatkammarstudierna vid skilda temperaturer (se nedan) ändå uppskatta att gödselammomiumkvävet hade nitrifierats i det närmaste fullständigt efter ca 8 veckor.

Efter den sista utplaceringstidpunkten (den 16 november) återstod en månad senare ca 60 % av ursprungligt NH₄-N. Efter mitten av december var som nämnts marken på 20 cm djup frusen med omkring -0,5°C, men trots detta nitrifierades uppenbarligen det återstående gödselammoniumkvävet fram till slutprovtagningen den 3 april, då en NO₃-N-mängd motsvarande drygt 70 kg/ha hade anhopats sedan starten. Tidpunkten mellan provtagningarna den 17/12 och 3/4, då allt NH₄-N omvandlats till NO₃-N, är visserligen svår att bestämma men inträffade troligen i slutet av januari. Medeltemperaturen i jorden på 20 cm djup från inkuberingens start 5/10, 1/11 och 16/11 till dess att allt ammoniumkväve kan anses ha nitrifierats var 7, -0,2 respektive -0,4°C.

Mineralisering av jordkväve. I alla tre inkubationsomgångarna med enbart jord utgjorde ammoniuminnehållet under hela inkubationsperioden 5 oktober–3 april bara 2 kg N/ha (tabell 20). Efter utplaceringen av inkubationsburkarna den 5/10, 1/11 och 16/11 tilltog nitratkväve-mängderna i jorden under de tre perioderna med 10, 7 resp. 5 kg/ha fram till den 3 april, up-

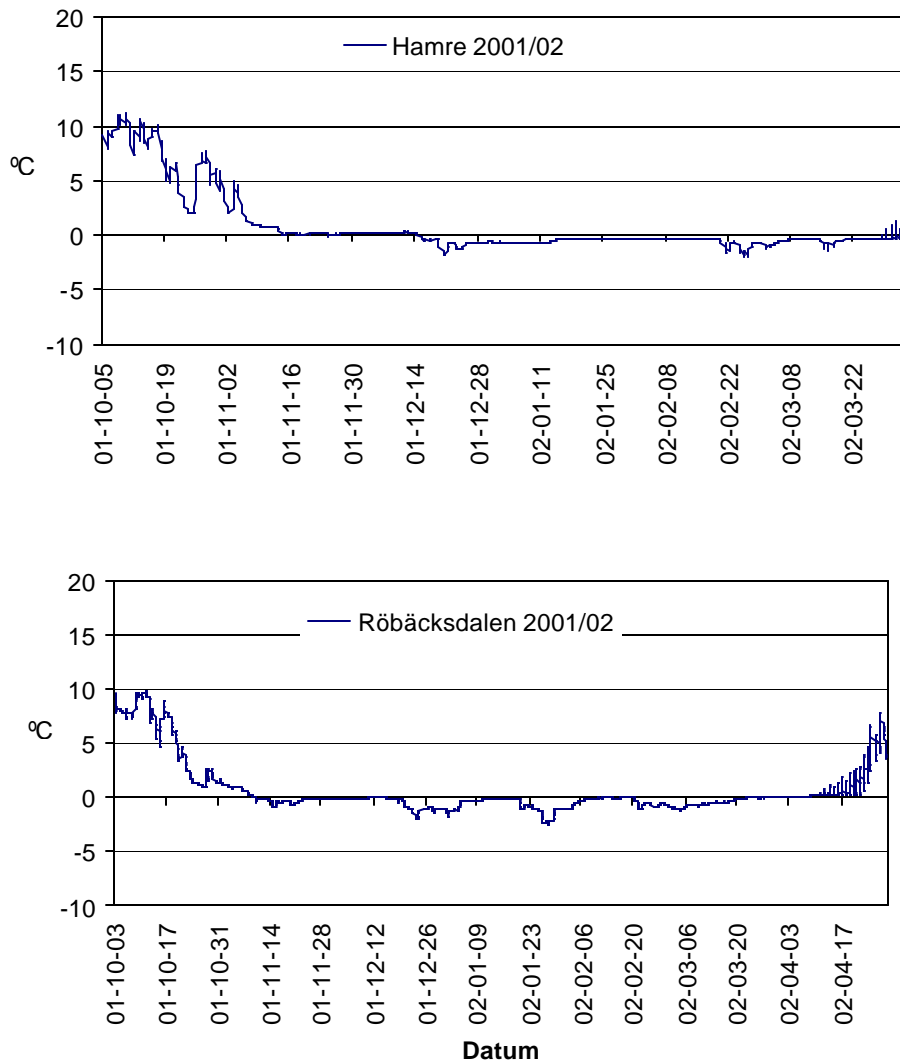
penbarligen genom mineralisering av jordkväve. I oktober, då temperaturen på 20 cm djup sjönk från ca 10 till 2°C, ökade nitratkvävemängden med 5 kg/ha. Men även under tiden mellan de olika provtagningarna från den 1/11 till den 3/4 bildades något nitratkväve, trots att temperaturen huvudsakligen höll sig under nollpunkten. Under tiden 17/12–3/4 tillkom 2–3 kg NO₃-N per ha i den frusna jorden.

Tabell 19. Jordtemperatur (°C) på 20 cm djup på försöksplatsen vid Hamre i södra Dalarna under inkubationsperioden 2001/2002 samt medeltal för lufttemperaturerna (°C) vid SMHI:s meteorologiska stationer i Avesta och Borlänge, ca 20 resp. 40 km från Hamre.

Månad	okt	nov	dec	jan	febr	mars
Jordtemperatur, månadsmedeltal, Hamre						
2000/2001	7,2	0,8	-0,3	-0,5	-0,5	-0,5
Lufttemperatur, månadsmedeltal för Avesta och Borlänge						
2000/2001	7,8	1,3	-4,4	-3,8	-0,8	0,7
1961-90	5,5	-0,2	-4,2	-5,6	-5,1	-1,4

Tabell 20. Förändringar av mängderna ammonium- och nitratkväve vid inkubation av jord och flytgödsel samt enbart jord på ett åkerfält vid Hamre, södra Dalarna under hösten och vintern 2001/2002. Medeltemperatur (på 20 cm djup) avser tidsintervallet mellan två provtagningstillfällen, det aktuella och det föregående.

Provtagningsdatum	Jord och flytgödsel		Enbart jord		Medeltemp. (°C) mellan provtagningsdatum
	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	
<i>Flytgödseltillförelse 5 oktober</i>					
5 okt	65	9	2	10	
15 okt	28	48	2	13	9,4
1 nov	2	79	2	15	5,7
16 nov	2	80	2	16	1,4
3 dec	2	83	2	17	0,1
17 dec	2	85	2	17	0,1
3 apr	2	82	2	20	0,1
<i>Flytgödseltillförelse 1 november</i>					
1 nov	55	19	2	16	
16 nov	45	34	2	18	1,4
3 dec	26	55	2	18	0,1
17 dec	11	70	2	20	0,1
3 apr	3	85	2	23	0,1
<i>Flytgödseltillförelse 16 november</i>					
16 nov	62	17	2	17	
3 dec	50	32	1	19	0,1
17 dec	37	47	2	20	0,1
3 apr	3	89	2	22	0,1



Figur 7. Temperatur (°C) på 20 cm djup på platserna med inkubationsundersökningar under fältförhållanden vid Hamre, södra Dalarna och Röbbäcksdalen, södra Västerbotten år 2001/2002

Röbäcksdalen 2001/2002

Inkubationsundersökningarna vid Röbäcksdalen 2001/2002 startade med utsättning av inkubationsburkar i fält den 3/10, 31/10 och 13/11 2001 (tabell 3). Särskilt den första och den tredje tidpunkten innebär en senareläggning i jämförelse med hösten 2000. Den sista provtagningen gjordes den 29 april 2002.

Jord- och lufttemperaturer. Oktober och november 2001 var i genomsnitt 3-4 °C kallare än 2000, men lufttemperaturen vid Röbäcksdalen blev trots detta ca 1 °C högre än normalt under dessa båda månader (tabell 21). Månadsmedeltemperaturerna under perioden december–mars låg mellan ca -7 och -3 °C, vilket för januari–mars ändå var ungefär 1-5 grader mildare än vanligt.

Jordtemperaturen på 20 cm djup höll sig på 7-10 °C fram till omkring den 15 oktober (figur 7), med maximum 9,9 °C den 8/10. Därefter sjönk marktemperaturen och nådde nollpunkten omkring den 10 november. Temperaturen på 20 cm djup höll sig sedan strax under fryspunkten och under kortare perioder vid 1-2 minusgrader, med en minimitemperatur på -2,6 °C, fram till månads skiftet mars-april. Därefter steg temperaturen till ca +5 °C vid slutprovtagningen den 29 april. Begynnande tjälbildning uppkom den 22 oktober (figur 5), varefter tjälen nådde ca 20 cm djup i mitten av november. Sedan frös marken allt djupare, och maximalt tjäldjup (ca 40 cm) registrerades från mitten av februari till mitten av april. Snötäcke bildades inte förrän efter mitten av december. Snön, som låg kvar till i början av april, synes förklara att temperaturen höll sig obetydligt under 0 °C på 20 cm djup.

Nitrifikation av flytgödsel-NH₄-N. Inkubationsburkar sattes som nämnts ut vid tre tillfällen: 3/10, 31/10 och 13/11 (tabell 3 och 22). Efter flytgödseltillsats vid dessa starttidpunkter fastställdes ammoniummängder i jorden motsvarande 59-69 kg NH₄-N per ha inom ett 10-cm-skikt, inkl. jor deget ammoniumkväve (tabell 22). Efter utsättningen av burkar den 3 oktober ombildades allt flytgödselammoniumkväve till nitratkväve inom fyra veckor, varefter bara 2 kg NH₄-N per ha fanns kvar. Medeltemperaturen i jorden på 20 cm djup från inkuberingens start den 3/10 till dess att allt ammoniumkväve kan anses ha nitrifierats var 5 °C.

Efter tillsats av flytgödsel till inkubationsjorden den 31 oktober omvandlades ca 60 % av det tillförda ammoniumkvävet till nitratkväve fram till den 12 december, då en NH₄-N-mängd motsvarande 24 kg/ha inom ett 10-cm-skikt återstod (tabell 22). På grund av att marken sedan var frusen, gjordes inte någon ytterligare provtagning förrän vid inkubationstidens slut den 29 april. Därför kan nitrifikationsförloppet efter den 12/12 inte beskrivas. Den 29/4 återstod 5 kg NH₄-N per ha, vilket innebär att 24 - 5 = 19 kg per ha hade nitrifierats sedan den 12 december, trots frusen jord. Medeltemperaturen var som framgått under 0 °C för alla tidsintervall mellan två provtagningstillfällen efter den 13 november (se även tabell 22). Efter den sista utplaceringstidpunkten (den 13 november) hade drygt 40 % av gödsel-NH₄-N nitrifierats en månad senare, trots temperaturer på 20 cm djup nära eller strax under nollpunkten. Återstoden nitrifierades fram till slutprovtagningen den 29 april, då 3 kg NH₄-N per ha återfanns.

Mineralisering av jordkväve. I alla tre inkubationsomgångarna med enbart jord fastställdes under hela inkuberingsperioden 3 oktober-29 april bara 2 kg NH₄-N/ha (tabell 22). Efter utplaceringen av inkubationsburkarna med enbart jord den 3/10, 31/10 och 13/11 ökade nitratkvävemängderna under de tre perioderna med 12, 8 resp. 8 kg/ha fram till den 29 april genom kvävemineraliseringstillskott. Medeltemperaturen i jorden under var och en av de tre inkuberingsperioderna var 2, 0 och -0,2 °C från start till avslutning. Från 3/10 till 31/10 ökade nitrat-

kvävemängden med 5 kg N/ha (tabell 22). Därefter var tillskotten mindre, uppenbarligen till följd av låga temperaturer, men likväl steg mängderna under varje provtagningsintervall fram till slutprovtagningen. Under tiden 12/12–29/4 blev ökningen 4-5 kg NO₃-N per ha. Detta tyder på att en viss nitratbildning även kan ske strax under nollpunkten.

Tabell 21. Jordtemperatur (°C) på 20 cm djup på försöksplatsen vid Röbbäcksdalen, Umeå under inkubationsperioden 2001/2002 och på 30 cm djup vid klimatstationen på Röbbäcksdalen samt lufttemperatur (°C) vid Umeå flygplats.

Månad	okt	nov	dec	jan	febr	mars	april
Jordtemperatur, månadsmedeltal, Röbbäcksdalen							
2001/2002, 20 cm	5,4	0,0	-0,5	-0,7	-0,4	-0,4	1,3
2001/2002, 30 cm	7,1	1,7	1,1	0,0	-0,4	-0,7	0,1
1980-89, 30 cm	5,8	2,0	1,6	0,0	-0,4	-0,3	0,0
Lufttemperatur, månadsmedeltal, Umeå flygplats							
2001/2002	4,9	-1,1	-7,3	-5,9	-3,4	-3,1	3,4
1961-90	3,8	-2,4	-6,6	-9,1	-8,6	-4,3	1,2

Tabell 22. Förändringar av mängderna ammonium- och nitratkväve vid inkubation av jord och flytgödsel samt enbart jord på ett åkerfält vid Röbbäcksdalen, Umeå under hösten och vintern 2001/2002. Medeltemperatur (på 20 cm djup) avser tidsintervallet mellan två provtagningsstillfällen, det aktuella och det föregående.

Provtag- nings- datum	Jord och flytgödsel		Enbart jord		Medeltemp. (°C) mellan provtag- ningsdatum
	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	NH ₄ -N kg/ha	NO ₃ -N kg/ha	
<i>Flytgödseltillförelse 3 oktober</i>					
3 okt	63	9	2	10	
15 okt	22	58	2	13	8,1
31 okt	2	75	2	15	0,6
13 nov	2	75	2	16	0,6
29 nov	2	81	2	17	-0,3
12 dec	2	81	2	18	-0,1
29 apr	2	91	2	22	-0,2
<i>Flytgödseltillförelse 31 oktober</i>					
31 okt	59	15	2	15	
13 nov	47	30	2	16	0,6
29 nov	31	54	2	18	-0,3
12 dec	24	53	2	19	-0,1
29 apr	5	76	2	23	-0,2
<i>Flytgödseltillförelse 13 november</i>					
13 nov	69	17	2	16	
29 nov	53	32	2	19	-0,3
12 dec	39	48	2	19	-0,1
29 apr	3	90	3	24	-0,2

Studier i klimatskåp av inverkan av låga temperaturer på nitrifikationens hastighet

Inkubationsmetodik

Såsom beskrivits i kapitlet Material och metoder och som framgår av tabell 5 genomfördes en inkubationsundersökning med studier av nitratbildning vid konstanta temperaturer (planerat 5, 2, 0 eller -2°C) i totalt 90 dagar i klimatskåp/kammare efter tillförsel av nötflytgödsel till jord. En blandning av jord och gödsel tillfördes inkubationsburkar av samma slag som i undersökningarna under fältförhållanden. Vattenhalten hölls konstant vid 60 % av WHC. Som redovisas i tabell 5 blev de faktiska, genomsnittstemperaturerna vid inkubationen +4,5, +1,4, -0,6 och -2,4°C med standardavvikelser på 0,6, 0,0, 0,1 resp. 0,3°C. Frekvensen temperaturavvikelser lika med eller större än standardavvikelsen motsvarar i enlighet med definitionen av denna (Finney, 1972) 32 % av inkubationstiden. Ammoniumkvävemängden i flytgödseln motsvarade 70 kg NH₄-N per ha i ett 10 cm djupt jordskikt. Hårtill ingick kontroll-led med enbart jord, som tillfördes vatten till samma vattenhalt som i jord-gödselblandningen. Leden med inkubationen av enbart jord genomfördes vid samma temperaturer som leden med flytgödsel och jord. Provtagning ägde rum efter 0, 15, 30, 50, 70 och 90 dagars inkubation. För att lättare kunna jämföra resultaten med praktikförhållanden räknades analys värdena om till kg N/ha i ett 10 cm djupt jordlager under antagande att jordens volymvikt var 1,25 kg/dm³.

Nitrifikationsförlopp

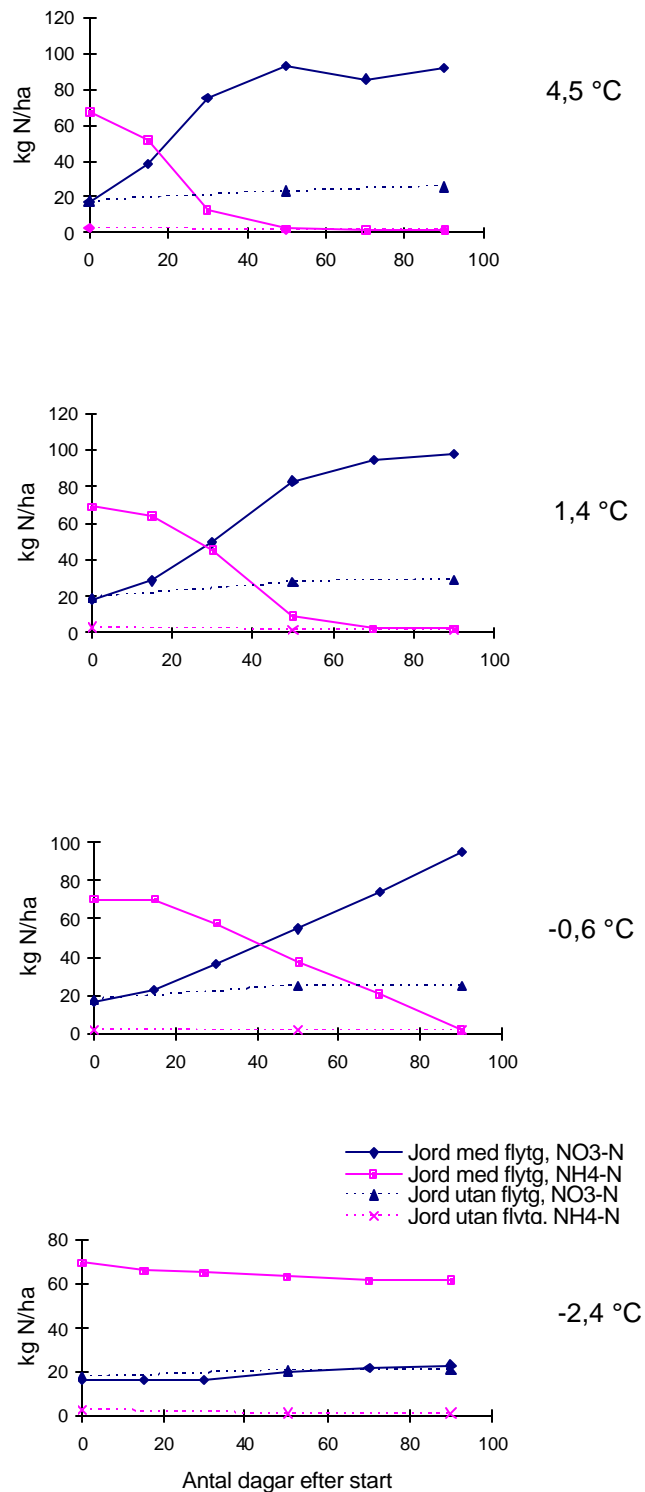
Som framgår av figur 8 visade inkubationen vid +4,5°C, att allt ammoniumkväve härrörande från flytgödseln nitrifierades inom ca 50 dagar. Det försvunna ammoniumkvävet motsvarades av ett i stort sett lika stort tillskott av nitratkväve. Vid +1,4°C hade ammoniumkvävet ombildats till nitratkväve efter 70 dagar. Vid -0,6°C tog förloppet omkring 90 dagar. Vid -2,4°C fortgick nitratbildningen mycket långsamt, men en tydlig nitrifikationsaktivitet kan ändå fastställas. Vid inkubationstidens slut (efter 90 dagar) återstod här 80 % av ammoniumkvävet vid starten. Vid +4,5, +1,4 och 0°C återfanns hälften därav efter 22, 35 resp. 54 dagar.

Under inkubationen av enbart jord vid alla fyra temperaturerna förblev NH₄-N-mängderna mycket små (figur 8) och motsvarade 1-2 kg NH₄-N per ha inom ett 10 cm djupt jordlager, vilket även var fallet i flytgödselleden efter avslutad nitrifiering av gödselammoniumkvävet. Samtidigt ökade emellertid NO₃-N-mängderna något i leden med enbart jord (figur 8), uppenbarligen genom mineralisering av jordeget kväve. Nettomineraliseringsstillskotten (uttryckta i kg N/ha inom ett 10 cm djupt jordskikt) efter 90 dagars inkubation framgår av tabell 23, där även resultat från leden med flytgödseltillsats ingår.

Tabell 23. Nettomineralisering av kväve (beräknat i kg N/ha för ett 10 cm djupt jordlager) vid inkubation av jord, med eller utan tillsats av flytgödsel, i klimatskåp/kammare med olika temperaturer i 90 dagar.

Temperatur:	+4,5°C	+1,4°C	-0,6°C	-2,4°C
Med flytgödsel (n = 3)	10	13	10	-2
Utän flytgödsel (n = 3)	8	9	7	2

Resultaten tyder på att kvävefrigörelse fortgår vid sjunkande temperaturer ned till strax under nollpunkten. Eftersom det inte uppkom någon anhopning av ammoniumkväve genom mineralisering (ammonifikation), måste det genom N-frigörelsen bildade ammoniumkvävet ha nitrifierats. Resultaten tyder på att de låga temperaturer som här studerats tillåter kväve mineralisering och nitratbildning samtidigt. Avvikelserna från medeltemperaturerna med högre gradtal än dessa (se standardavvikelserna ovan) kan dock i någon mån vara orsak till ökad nitratbildning och i viss mindre grad förklara nitrifikationsaktiviteten i studierna vid -0,6 och -2,4°C.

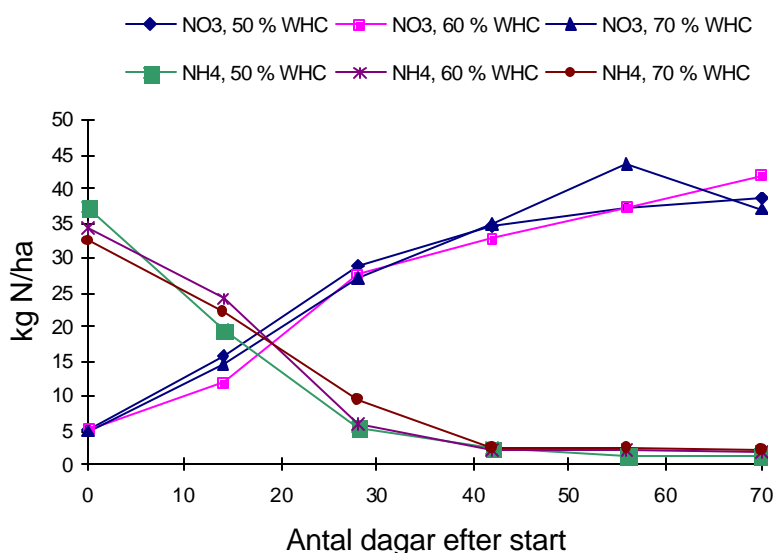


Figur 8. Inverkan av låga temperaturer på nitrifikationen av flytgödselammoniumkväve. Studier i klimatskåp/kammare vid +4,5, +1,4, -0,6 och -2,4°C. Kvävemängderna har omräknats till kg N/ha inom ett 10 cm djupt jordskikt.

Studier i klimatskåp av inverkan av jordens vattenhalt på nitrifikationen

Inkubationsmetodik

Såsom redovisats i kapitlet Material och metoder och som framgår av tabell 6 genomfördes en studie av nitratbildningen vid olika, men konstanta fuktighetsförhållanden i jord. De vattenhalter som studerades motsvarade 50, 60 och 70 % av jordens vattenhållande förmåga (WHC). Undersökningen utfördes i klimatskåp genom inkubation vid en planerad, konstant temperatur av 4°C i totalt 70 dagar efter inblandning av nötflytgödsel i jord. Den faktiska temperaturen vid inkuberingen blev som nämnts $3,7 \pm 0,8^\circ\text{C}$ (medel och standardavvikelse), se tabell 6. Inkubationsburkar av samma slag som i inkuberingsundersökningarna under fältförhållanden användes. Ammoniumkvävemängden i flytgödseln motsvarade 30 kg $\text{NH}_4\text{-N}$ per ha i ett 10 cm djupt jordskikt. Härtill ingick kontroll-led med enbart jord, som tillfördes vatten till samma vattenhalter som i leden med jord-gödselblandningen. Provtagning ägde rum med 14-dagarsintervall. För att lättare kunna jämföra resultaten med praktikförhållanden räknades analysvärdena om till kg N/ha inom ett 10 cm djupt jordlager under antagande att jordens volymvikt var $1,25 \text{ kg/dm}^3$.



Figur 9. Inverkan av olika vattenhalter på nitrifikationen av flytgödselammoniumkväve i jord. Studier i klimatskåp vid vattenhalter motsvarande 50, 60 och 70 % av jordens vattenhållande förmåga (WHC). Kvävemängderna har omräknats till kg N/ha inom ett 10 cm djupt jordskikt.

Nitrifikationsförlopp

Såsom framgår av figur 9 nitrifierades allt tillfört flytgödselammoniumkväve inom högst 50 dagar, oavsett vattenhalt i jorden. Ammoniummängderna minskade och nitralterna ökade på ett mycket likartat, spegelvänt sätt och utan tidsförskjutningar leden emellan. De bildade NO₃-N-mängderna var likstora. Efter avslutad nitrifikation var den återstående NH₄-N-mängden i flytgödselleden lika liten som i leden med enbart jord: ca 2 kg NH₄-N per ha inom ett 10 cm djupt jordskikt (ej redovisat i figur 9). I leden utan flytgödsel ökade NO₃-N-mängderna med i storleksordningen 8 kg N/ha utan nämnvärda skillnader med hänsyn till vattenhalten (ej redovisat i figur 9).

Nitrifikationsförloppen tycktes således inte påverkas av de skilda, konstanta fuktighetsgraderna inom de studerade vattenhaltsgränserna. Dessa varierade som framgått från betingelser som skulle ha tillåtit harvning av jorden i praktiken (50 % av WHC) till höstlika förhållanden med ganska kladdig jord (60 % av WHC) och mycket våt jord som tenderade att flyta ut något (70 % av WHC).

I de resultat som erhållits ingår förutom nitrifikation även ett slags nettomineralisering av kväve, som kan sägas innefatta tillskott genom kvävefrigörelse, minskat med möjliga förluster genom kväveimmobilisering, ammoniakavdunstning och denitrifikation. Resultaten från den våtaste behandlingen (70 % av WHC) tyder på att det i jämförelse med de båda andra fuktighetsgraderna inte uppkom ökade förluster genom denitrifikation. Den ringa jordmängden (300 g med omkring 5 cm jordhöjd inne i inkubationsburkarna) kan vara en av orsakerna, genom att syre troligtvis kunde diffundera ända ned till jorden närmast botten av burkarna, trots den höga vattenhalten.

ÖVERGRIPANDE RESULTATREDOVISNING OCH DISKUSION

Temperaturförhållanden i fältstudierna

Temperaturen under inkubationsperioderna 2000/2001 och 2001/2002 höll sig generellt sett över normalvärdena för 1961-90 (tabell 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19 och 21). För en överblick över väderförhållandena kan följande sammanfattning göras: Hösten 2000 och delvis även under vintern därefter var i storleksordningen 3–5°C varmare än normalt på de fyra undersökningsplatserna med fältstudier, dock med långvarig tjäle i marken vid Röbbäcksdalen och Hamre. År 2001 var oktober nästan lika varm som 2000, men därefter blev vädret kallare med ganska normala temperaturer i november och december. Det rädde köldgrader under vintermånaderna vid Röbbäcksdalen och Hamre med långvarig tjäle i marken. Likväl var vintern på dessa platser betydligt mildare än normalt. Vid Lanna och Lilla Böslid var det i genomsnitt 2–4 plusgrader under de tre månaderna januari, februari och mars. Dessa förhållanden avspeglar uppenbarligen en del av de förändringar som troligen skett i klimatet under de senaste 15 åren. Detta är också betingelser som man antagligen får räkna med i framtiden och som då påverkar kvävemineralisering, nitratbildning och kväveutlakning i åkerjord.

Nitratbildning vid inkubation under fältförhållanden

Hösten och vintern 2000/2001. I undersökningarna 2000/2001 påbörjades den första inkubationsomgången på alla fyra platserna med utsättning av inkubationsburkar med jord, med eller utan nötflytgödsel, den 13–15 september. Den höga temperaturen under den närmaste tiden därefter ledde till att gödselammoniumkvävet fullständigt nitrifierades inom ca två veckor. Även vid Röbbäcksdalen tillät det milda vädret så snabb nitratbildning.

Den andra inkubationsomgången startade den 4, 6 och 10 oktober vid Röbbäcksdalen, Hamre respektive Lanna. Det tog i detta fall omkring tre veckor för fullständig nitrifiering av gödselammoniumkvävet. På grund av det sydligare läget startades denna inkubationsomgång först den 2/11 vid Lilla Böslid. Därefter ägde fullständig nitrifikation rum inom 3–4 veckor.

Ungefär samtidigt (den 1 november) påbörjades den tredje omgången på Röbbäcksdalen. Allt gödselammoniumkväve försvann sedan till den 1 december, dvs. inom ca fyra veckor. Vid Lanna och Hamre sattes denna omgång burkar ut den 3 november. Även på dessa båda platser skedde fullständig nitrifikation inom loppet av fyra veckor, dvs. till den 1 december. Med hänsyn till det mildare senhöstklimatet i Halland placerades den tredje omgången inkubationsburkar ut först den 30 november. Genom kallare väder därefter fanns här emellertid något gödselammoniumkväve kvar ännu den 15 januari, dvs. efter närmare sju veckor.

Eftersom det på alla fyra platserna generellt skedde fullständig nitrifikation av det tillförda flytgödselammoniumkvävet före vinterns ankomst p.g.a. den milda och långvariga hösten, vare sig gödseltillförseln utfördes tidigt eller sent på hösten, skulle det under motsvarande praktikförhållanden ha uppkommit ökade risker för nitratkväveutlakning under vinterhalvåret. Vid Lilla Böslid fortgick visserligen gödselkvävet nitrifikation fram till mitten av januari efter den sista utsättningen av burkar den 30/11, men genom i huvudsak mildt väder under resten av vintern borde utlakningsrisken i praktiken ha blivit stor även i detta fall.

Hösten och vintern 2001/2002. Denna höst senarelades i stort sett alla tre inkubationsomgångarna för att få möjlighet att undersöka nitratbildningen vid lägre temperaturer. Den första utsättningen av inkubationsburkar med jord, med eller utan nötflytgödsel, skedde den 2-5 oktober. Genom att oktober månad hade högre temperatur än normalt, nitrifierades flytgödselammoniumkvävet även detta år fullständigt inom två veckor vid Lilla Böslid och drygt denna tid på Lanna. Däremot tog det förmodligen tre–fyra veckor vid Hamre och Röbbäcksdalen p.g.a. något lägre temperaturer. Den andra inkubationsomgången startade den 30/10–1/11. Vid Lilla Böslid och Lanna nitrifierades därefter det då tillförda gödselammoniumkvävet inom ca fyra veckor, medan det vid Hamre och Röbbäcksdalen fortfarande fanns en del sådant kväve kvar i mitten av december.

Efter tillförsel av gödselammoniumkväve vid starten av den tredje inkubationsomgången vid Röbbäcksdalen och Hamre den 13 resp. 16 november återfanns upp emot 60 % av ammoniumkvävet i mitten av december, men resten nitrifierades senare under vintern. På Lanna sattes den tredje omgången inkubationsburkar ut den 27 november. Något ammoniumkväve återfanns ännu i slutet av januari, varefter resten försvann under vinterns lopp. Efter utplacering den 29/11 på Lilla Böslid återstod även där gödselammoniumkväve i mitten av januari, vilket sedan nitrifierades till i mitten av februari.

Överfört till praktikförhållanden tyder resultaten från hösten 2001 på att flytgödseltillförsel under denna årstid fram till månadsskiftet oktober–november under de temperaturförhållanden som då rådde skulle leda till fullständig nitrifikation av flytgödselammoniumkvävet före vinterns ankomst. Det var bara efter tillförsel av flytgödsel i mitten av november vid Hamre och Röbbäcksdalen och i månadsskiftet november–december vid Lanna och Lilla Böslid som påtaliga ammoniummängder ännu inte hade nitrifierats innan vintern kom.

Nedre gräns för ammoniumkvävehalter vid nitrifikation.

Av resultaten från fältundersökningarna framgår, att det för ammoniumkväve finns en nedre haltgräns eller jämviktspunkt för nitratbildning, som i de använda jordarna befann sig vid 1-3 kg NH₄-N per ha inom ett 10 cm djupt jordskikt. När NH₄-N-mängderna översteg detta gränsvärde, bildades nitratkväve av det ”extra” ammoniumkvävet, varvid NH₄-N-halterna minskade till gränsvärdet. Efter tillförsel av ammoniumkväve med t.ex. flytgödsel är det således

bara $\text{NH}_4\text{-N}$ -mängden över gränsvärdet som kan nitrifieras. Dessa förhållanden överensstämmer med tidigare erfarenheter av nedre haltgränser (se t.ex. Lindén, 1981). Den nedre gränsen synes under fältförhållanden i jordar i landets norra delar befinna sig vid högre $\text{NH}_4\text{-N}$ -halter än längre söderut (jmf. Gustafson & Torstensson, 1993 och 1984).

Nitrifikationens temperaturberoende

Nitratbildningens förlopp i undersökningarna under fältförhållanden har utnyttjats för att belysa nitrifikationens hastighet vid olika temperaturer. I figur 10 redovisas detta samband som den andel ursprungligt ammoniumkväve (utöver gränsvärdet) som vid olika temperaturer återfanns två veckor efter tillförseln till jord. Resultaten visar, att vid 10–12°C nitrifierades allt ammoniumkväve (ovanför gränsvärdet) inom denna tid. Vid 5°C återstod omkring 50% av gödselammoniumkvävet och vid 2°C ca 70% efter två veckor. Ett motsvarande samband för de återstående $\text{NH}_4\text{-N}$ -mängderna efter fyra veckor (figur 10) visar, att det vid alla temperaturer över ca 1°C skett en fullständig nitrifiering av gödselammomiumkvävet inom denna tid. Det fordrades temperaturer vid eller strax under nollpunkten för att större $\text{NH}_4\text{-N}$ -mängder (över gränsvärdet) skulle återfinnas efter fyra veckor. Den temperatur som här avses under 2 eller 4 veckor gäller medeltal på 20 cm djup för tidsintervallen mellan provtagningarna i fält, på basis av temperaturdata från loggrarna. Detta innebär att temperaturen tidvis varit något högre och tidvis lägre, särskilt under övergångsperioder från mildare till kallare väder.

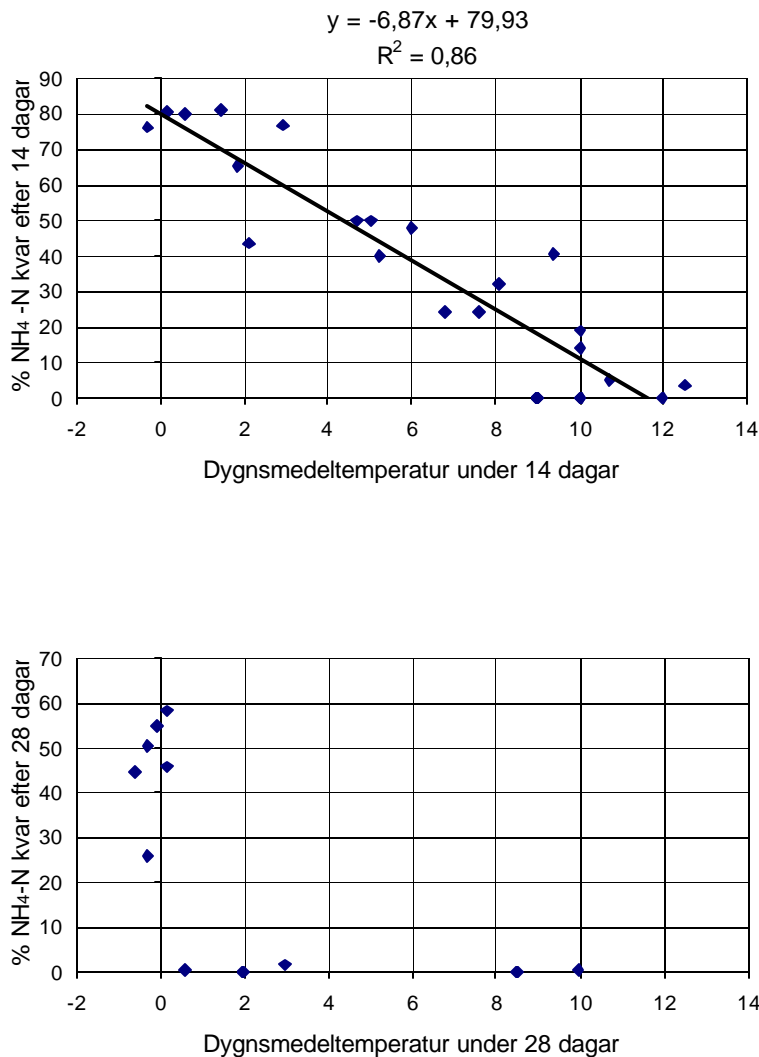
Av studierna under konstanta förhållanden i klimatskåp/kammare av nitrifikationshastigheten vid låga temperaturer (figur 8) framgår, att det vid 4,5, 1,4 och -0,6°C uppnåddes fullständig nitrifikation av gödselammoniumkvävet efter omkring 50, 70 resp. 90 dagar. Detta kan jämföras med att Frederick (1956) för jordar med god nitrifikationsförmåga fann, att efter tillförsel av ammoniumnitrat i en mängd motsvarande 50 kg $\text{NH}_4\text{-N}$ per ha nitrifierades allt tillfört ammoniumkväve inom ca två månader vid temperaturer på 0–2°C.

Resultaten från fältundersökningarna på de fyra platserna Lilla Böslid, Lanna, Hamre och Röbbäcksdalen visar emellertid en något hastigare nitratbildning än vid de jämna temperaturerna i laboriestudierna. Det är därför troligt att det under fältförhållanden fortgår en något snabbare nitrifikation efter tillförsel av ammoniumkväve än vad undersökningarna med de konstanta temperaturerna visar. Orsaken är att nitrifikationens hastighet inte ändras rätlinjigt vid ändrade temperaturer, utan fortare vid högre och långsammare vid lägre gradtal (se kapitlet Litteraturoversikt). Därför medför temperaturväxlingar hastigare nitratbildning vid en viss medeltemperatur än vid samma gradtal under konstanta förhållanden.

Resultaten från både fält- och klimatskåpsstudierna bekräftar emellertid det ovan sagda, att temperaturer ända ned till nollpunkten möjliggör nitratbildning efter tillförsel av exempelvis flytgödsel. Nitrifikationshastigheten är stor även vid någon enda plusgrad. Temperaturen i marken efter tillförsel av flytgödsel måste således inom kort tid nå ned till fryspunkten för att väsentligt minska nitrifikationstakten.

Laboriestudierna vid -0,6°C och -2,4°C visar dock, att en inte oväsentlig nitratbildning även sker alldeles under nollpunkten, och uppenbarligen stoppar inte ens ett par minusgrader aktiviteten fullständigt (figur 8). Såsom framgår av fältundersökningarna vintern 2001/2002, fanns det i december eller januari kvar en del av det gödsel- $\text{NH}_4\text{-N}$ som tillförts jorden vid starten av den sista inkubationsomgången i mitten av november eller i månadskiftet november-december. Därefter försvann detta ammoniumkväve under vinterns lopp, och vid provtagningarna vid tiden för tjällossningen återstod bara mängder motsvarande gränsvärdet (2–3 kg

NH₄-N per ha inom ett 10 cm djupt jordskikt). Eftersom marken var frusen hela vintern vid Röbbäcksdalen och Hamre (figur 4, 5 och 7), måste denna nitratbildning ha fortgått vid nollpunkten och ned till ett par minusgrader, dvs. vid de temperaturförhållanden som enligt loggermätningarna rådde på 20 cm djup på dessa platser.



Figur 10. Nitrifikationens temperaturberoende: samband mellan dygnsmedeltemperaturen under 14 dagar eller 28 dagar och den procentuella andel ursprungligt flytgödselammoniumkväve i jord som återstod efter dessa tidsperioder. Data för 14-dagarsperioder är hämtade från inkubationsförsök höstarna 2000 och 2001 med tillsats av nötflytgödsel till jord på de fyra platserna och vid olika tidpunkter på hösten. Data för 28-dagarsperioder avser dessa undersökningar endast under hösten 2001.

Flowers & O'Callaghan (1983) visade att nitrifikationen av ammoniumkväve i svinflytgödsel påverkas av vattenhalten, med optimala nivåer vid omkring 60 % av jordens maximala vattenhållande förmåga (WHC). Höga vattenhalter i jorden skulle kunna medföra att nitrifikationstakten nedsätts p.g.a. att minskad syretillgång kan tänkas hämma nitrifikationsbakterier-

nas aktivitet. Härtill borde mycket höga vattenhalter medföra anaeroba betingelser med denitrifikation som följd. Studierna av vattenhalternas inverkan på nitrifikationen (figur 9), som utfördes i klimatskåp vid $3,7 \pm 0,8$ °C (medeltal och standardavvikelse), visar emellertid mycket likartade nitrifikationsförlopp vid de undersökta vattenhalterna (50, 60 och 70 % av WHC), vilket motsvarar fuktighetstillstånd som ofta kan förekomma under hösten. Kväve i mineralisk form tycktes inte gå förlorat från jorden under inkubationen ej ens vid den högsta vattenhalten. Detta tyder på att någon påtaglig inverkan på kväveomsättningarna genom denitrifikation inte förekom, ej ens vid 70 % av WHC. Den ganska låga temperaturen kan ha bidragit till detta, då även denitrifikationen är temperaturberoende.

Den ringa jordmängden i inkubationsburkarna kan som nämnts också vara orsak till att vattenhalterna inte påverkade nitrifikationen och troligen ej heller gav upphov till påtaglig denitrifikation under inkubationen. Det är möjligt att syre kunde diffundera in i jorden i tillräckligt stor utsträckning genom att jordlagret i inkubationsburkarna bara vara omkring 5 cm tjockt. Efter höstplöjning, som luckrar jorden, bör dock även förhållandena i fält medge relativt god genomluftning, vilket förbättrar förutsättningarna för syreförbrukande processer såsom nitrifikation.

Som ovan redovisats användes jord från åkerskiften på Götala i Västergötland för alla inkubationsstudier, inkl. de fyra försöksplatserna med fältstudier. Frågan är då, om vanligt förekommande jordar i de olika landsdelarna har nitrifierande egenskaper som liknar Götala-jordarnas. Detta påverkar tolkningen av resultaten. Skulle jordar längre norrut råka nitrifiera ammoniumkväve sämre, borde sådant kväve finnas kvar i jorden i större utsträckning efter flytgödselspridning, vilket i och för sig skulle minska kväveutlakningsrisken. Nitrifikationsbakteriers aktivitet vid olika temperaturer undersöktes som nämnts av Anderson et al. (1971), som i jämförande studier under enhetliga betingelser fann större nitratbildning i jordar från kallare områden i Georgia, USA än i jordar från sydligare och varmare delar av delstaten. Jordar i södra Dalarna och i södra Västerbotten borde också ha anpassats till kallare klimat och därför ha minst lika god kapacitet att nitrifiera ammoniumkväve vid hösttemperaturer som jordar exempelvis i Götaland. När nu Götala-jordarna visat sig kunna nitrifiera $\text{NH}_4\text{-N}$ även vid temperaturer nära nollpunkten, vore det anmärkningsvärt om nitrifikationsbakterier i åkermark längre norrut och under förhållanden med likvärda jordegenskaper i övrigt skulle ha sämre nitrifierande förmåga vid sådana gradtal.

Götala-jordarnas representativitet i ett sådant geografiskt sammanhang kan i någon mån belysas med data dels från två mineralkväveundersökningar i utlakningsförsök längre söderut (vid Mellby i Halland: Torstensson et al. 1992; Lindén et al., 1998) och dels från ett fältförsök längre norrut (vid Bofara, Kilafors i Hälsingland: Lindén, opublicerat). Undersökningarna vid Mellby (sandig mojord) visade att ammoniumkväve i svinflytgödsel, som spreds i slutet av september, helt nitrifierades under hösten. I försöket vid Bofara, som anlades 1982 på ett fält med mjällig lättlera (stubbåker efter korn), innehöll markprofilen (0-90 cm djup) 23 kg $\text{NH}_4\text{-N}$ och 54 kg $\text{NO}_3\text{-N}$ per ha i den 16/9. I början av oktober spreds ca 40 ton svinflytgödsel per ha, som sedan plöjdes ned. Den 20/11, alltså en och en halv månad efter spridningen, fastställdes 29 kg $\text{NH}_4\text{-N}$, således bara 6 kg mer än vid provtagningen före flytgödseltillförsele. Däremot hade $\text{NO}_3\text{-N}$ -mängderna ökat till 118 kg N/ha (0-90 cm), uppenbarligen genom att gödselammoniumkvävet i det närmaste helt nitrifierats.

Kvävemineralisering (ammonifikation) vid låga temperaturer

Såsom framgår av beskrivningarna ovan av fältundersökningarna ökade mängderna mineralkväve (summa $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{NO}_3\text{-N}$) efterhand under inkubationsperioderna och var som störst vid de avslutande provtagningarna på våren (se tabell 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 och 22 samt beskrivningarna till dessa tabeller). Detta gäller inkubation av såväl jord+flytgödsel som enbart jord. I tabell 24 redovisas beräkningar av nettofrigörelsen av organiskt jordkväve, baserade på resultaten från leden med enbart jord. N-mineraliseringstillskotten avser ökningen av summa ammonium- och nitratkväve från starten till avslutningen av inkubationsperioden ifråga.

Tabell 24. Mineralisering av jordkväve under inkubationsperioderna i fältstudierna 2000/2001 och 2001/2002 beräknat som förändringarna av mineralkvävmängderna ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) under var och en av de tre inkubationsperioderna från utsättningen av inkubationsburkar i fält på hösten till den sista provtagningen på våren efterföljande år. Värdena har uttryckts i kg N/ha inom ett 10 cm djupt jordskikt under antagande att jordens volymvikt var $1,25 \text{ kg/dm}^3$.

Plats och år	Inkubationsomgång 1		Inkubationsomgång 2		Inkubationsomgång 3	
	Period	Kg N/ha	Period	Kg N/ha	Period	Kg N/ha
<i>Lilla Böslid</i>						
2000/2001	15/9-15/3	32	2/11-15/3	17	30/11-15/3	15
2001/2002	4/10-15/3	20	1/11-15/3	10	29/11-15/3	9
<i>Lanna</i>						
2000/2001	13/9-10/4	32	10/10-10/4	25	3/11-10/4	21
2001/2002	2/10-19/3	11	30/10-19/3	10	27/11-19/3	6
<i>Hamre</i>						
2000/2001	14/9-25/4	25	6/10-25/4	26	3/11-25/4	16
2001/2002	5/10-3/4	10	1/11-3/4	7	16/11-3/4	5
<i>Röbäcksdalen</i>						
2000/2001	13/9-2/5	27	4/10-2/5	19	1/11-2/5	18
2001/2002	3/10-29/4	12	31/10-29/4	8	13/11-29/4	9

Kvävemineralisering (kg N/ha) för olika tidsperioder - sammanställning av resultaten från de fyra undersökningsplatserna:

Period	Antal observationer	Medeltal	Minsta värde	Högsta värde
Ca 15/9 – tidig vår	4	29	25	32
Ca 1/10 – tidig vår	8	18	10	26
Ca 1/11 – tidig vår	7	13	7	21
15/11...31/11 – tidig vår	5	9	3	15

Av tabell 24 framgår att från starten av fältinkubationsstudierna i mitten av september 2000 till den avslutande provtagningen på våren 2001 frigjordes 29 kg N/ha beräknat för ett 10 cm djupt jordskikt som medeltal för de fyra platserna. Efter inkubationsstart ca 1/10 fastställdes i genomsnitt 18 kg frigjort kväve (data från både 2000/2001 och 2001/2002). Efter ca 1/11 till nästa vår mineraliserades 13 kg och efter start i mitten eller slutet av november 9 kg N/ha fram till våren. Kvävemineralisering ägde rum under vinterperioden november–tidig vår inte bara på de sydligt belägna platserna Lilla Böslid och Lanna utan även vid Hamre och Röbäcksdalen. Resultaten tyder på att N-mineralisering således pågår vid temperaturer nära 0°C och rent av vid omkring en minusgrad. I inkubationsundersökningarna på alla fyra platserna under ett och samma år användes samma jord (från Götala i Västergötland). Studierna belyser således inte skilda jordars N-mineraliseringsförmåga utan avspeglar istället renodlat olika temperaturregimers inverkan på kvävefrigörelsen. Resultaten överensstämmer med erfarenheterna från klimatskåpsstudien med olika, konstanta temperaturer (tabell 23), som visar att

en påtaglig kvävefrigörelse fortgick vid $-0,6^{\circ}\text{C}$, medan denna däremot i det närmaste upphört vid $-2,4^{\circ}\text{C}$. Detta kan jämföras med resultat som redovisats av Hanschmann (1983) och Van Schöll et al. (1997), vilka fann påtaglig mineralisering av kväve ned till $+1^{\circ}$, och Stadelmann et al. (1983), som fastställde mineralisering och nitrifikation vid 0°C .

Beräkningarna visar som nämnts kvävemängder i kg/ha inom ett 10 cm djupt jordlager. Detta innebär dubbelt så mycket inom ett 20 cm tjockt matjordsskikt. Genomsnittligt skulle man på basis av tabell 24 då få en N-mineralisering på $2 \times 13 = 26$ kg N/ha inom 0-20 cm djup från början av november till tidigt nästa vår. Denna mängd kan jämföras med en frigörelse av i medeltal 22 kg N/ha under samma period i ett utlakningsförsök på mojord vid Fotegården i Västergötland (Lindén et al., 1999) under helt naturliga fältförhållanden (stubbearbetad och plöjd jord, förfrukt stråsäd) och 23 kg N/ha i ett annat sådant försök med stråsäd på lerjord vid Lanna (Lindén et al., 1993).

Som framgår av klimatskåpsstudierna vid varierade temperaturer (tabell 23) mineraliserades inte bara jordkväve utan uppenbarligen även något organiskt kväve i flytgödseln inom inkubationsperioderna. Frågan är då i vilken utsträckning mineralisering av sådant flytgödselkväve bidragit till de ökade anhopningar av frigjort kväve som fastställdes i leden med jord+flytgödsel i fältundersökningarna (se tabell 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 och 22). I tabell 25 redovisas beräkningar av nettotfrigörelsen av organiskt flytgödselkväve. Denna nettomineralisering har beräknats som differensen mellan å ena sidan N-mineraliseringstillskotten i leden med jord+flytgödsel och å den andra tillskotten i leden med enbart jord. Tillskotten avser ökningen av summa $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{NO}_3\text{-N}$ från starten till slutet av inkubationsperioden i fråga.

Tabell 25. Mineralisering av kväve, härstammande från flytgödselns organiska substans, under inkubationsperioderna i fältstudierna 2000/2001 och 2001/2002, beräknat från utsättningen av inkubationsburkar i fält på hösten till den sista provtagningen på våren efterföljande år. Värdena har uttryckts i kg N/ha inom ett 10 cm djupt jordskikt under antagande att jordens volymvikt var $1,25 \text{ kg/dm}^3$.

Plats och år	Inkubationsomgång 1		Inkubationsomgång 2		Inkubationsomgång 3	
	Period	Kg N/ha	Period	Kg N/ha	Period	Kg N/ha
<i>Lilla Böslid</i>						
2000/2001	15/9-15/3	8	2/11-15/3	7	30/11-15/3	0
2001/2002	4/10-15/3	9	1/11-15/3	8	29/11-15/3	1
<i>Lanna</i>						
2000/2001	13/9-10/4	21	10/10-10/4	7	3/11-10/4	5
2001/2002	2/10-19/3	7	30/10-19/3	3	27/11-19/3	6
<i>Hamre</i>						
2000/2001	14/9-25/4	6	6/10-25/4	11	3/11-25/4	10
2001/2002	5/10-3/4	0	1/11-3/4	10	16/11-3/4	7
<i>Röbäcksdalen</i>						
2000/2001	13/9-2/5	0	4/10-2/5	11	1/11-2/5	18
2001/2002	3/10-29/4	9	31/10-29/4	0	13/11-29/4	0

Mineralisering (kg N/ha) av flytgödselkväve under olika tidsperioder - sammanställning av resultaten från de fyra undersökningsplatserna:

Period	Antal observationer	Medeltal	Minsta värde	Högsta värde
Ca 15/9 – tidig vår	4	9	0	21
Ca 1/10 – tidig vår	8	8	0	11
Ca 1/11 – tidig vår	7	8	0	18
15/11...31/11 – tidig vår	5	3	0	7

De beräknade mängderna mineraliserat flytgödselkväve (tabell 25) blev naturligt nog störst under de längsta inkubationsperioderna, som startade vid högre temperaturer. För dessa erhöles en nettotfrigörelse av i medeltal 8-9 kg N/ha. Värdena uppvisar visserligen inbördes stora variationer för samma perioder, men resultaten tyder ändå på att organiskt kväve i flytgödsel kan mineraliseras under vinterhalvåret efter tillförsel till jord på hösten. Eftersom flytgödseln 2000/2001 och 2001/2002 hade kol-kvävekvoterna 13 resp. 12, beräknat på innehållet av totalC och organiskt N (se kapitlet Material och metoder), är det naturligt att nettomineralisering av kväve uppkommer inom relativt kort tid, vilket också de periodvisa provtagningarna visar (tabell 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 och 22). Resultaten är i överensstämmelse med inkubationsstudierna i 90 dagar i klimatskåp vid olika temperaturer (tabell 23), som uppvisar något större kvävefrigörelse vid inkubation av jord med flytgödseltillsats än enbart jord. Eftersom det inte uppkom någon anhopning av $\text{NH}_4\text{-N}$ under inkuberingen (tabell 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 och 22) i något fall, måste det mineraliserade flytgödselkvävet ha omvandlats till nitrat.

Nitratbildningens inverkan på kväveutlakningsriskerna

Kväveutlakningens omfattning under vinterhalvåret sammanhänger i hög grad med nitratkväveförrådets storlek i markprofilen under hösten (Bergström & Brink, 1986; Torstensson et al., 1992; Lindén et al., 1999). Bildas nitratkväve under hösten genom nitrifikation av t.ex. flytgödselammoniumkväve, ökar också nitratkväveförlusterna under vinterhalvåret (Torstensson et al., 1992; Lindén et al., 1998). I fältinkubationsstudierna vid Lilla Böslid, Lanna, Hamre och Röbbäcksdalen medförde som nämnts tillförsel av flytgödsel till inkubationsjorden i mitten av september eller i första veckan i oktober fullständig nitratbildning inom ett par eller några få veckor. Detta måste innebära ökad risk för N-utlakning. Bildas nitrat så pass tidigt under hösten, kommer perkolerande nederbördsvatten normalt att medföra successiv nedvaskning av nitratjonerna relativt djupt ned i markprofilen under vinterhalvåret, där det sedan lättare utlakas. Tillförsel av flytgödsel i mitten eller slutet av november tycks enligt resultaten från fältinkubationsstudierna visserligen leda till fullständig nitratbildning i december eller under kallare förhållanden senare under vinterns lopp. Men i sådana fall kan man förmoda, att nitratkvävet inte lika lätt når större djup, innan marken fryser och därmed åtminstone tillfälligt stoppar perkolationen av nederbördsvatten. Med ledning av de temperaturförhållanden med tjäle i jorden under längre sammanhängande tider som rådde vid Röbbäcksdalen och Hamre kan man för Norrland, Dalarna och andra delar av nordvästra Svealand förmoda, att nedtransporten av vatten med innehåll nitratjoner i markprofilen i stort sett stoppar upp under vintern, med mindre kväveutlakning som följd (jmf. Gustafson, 1987).

Resultaten visar emellertid, att det inte i något fall fanns flytgödselammoniumkväve kvar i inkubationsjorden vid provtagningen under tidig vår. Detta gäller även på de båda nordliga försöksplatserna, när tjälen höll på att gå ur jorden. Det gödselammoniumkväve som återstod när marken frös nitrifierades således under vintern. Laborariestudierna med låga, konstanta temperaturer tyder ju också på att nitrifikationen kan fortgå med påtaglig hastighet vid nollpunkten och troligen ned till ca en minusgrad. Detta innebär under norrländska förhållanden, att större mängder nitratkväve bör kunna finnas anhopade främst i matjorden vid tiden för tjällossningen på våren efter flytgödseltillförsel sent på hösten. Genom att huvuddelen av vattnet vid snösmältning i landets nordligare delar normalt rinner av på markytan (se t.ex. Gustafson & Torstensson, 1983 och 1984), minskar emellertid risken för mer omfattande nitratkväveutlakning i dessa landsdelar.

Längre söderut råder dock vanligen perioder med omväxlande minus- och plusgrader under vintern. Även om perkolationen av vatten ned genom marken minskar eller stannar av under en köldperiod med tjälbildning, sipprar ändå vattnet ned när marken töar igen under blidvädnersperioder, vilket bör kunna medföra att nitratkväve går förlorat. Lindén (1981) visade dessutom, att vatten kan perkolera ned genom porerna i jord med nollgradig tjäle (alltså utan att det nedsipprande vattnet fryser), innan isen i jorden hunnit smälta. Spridning av flytgödsel sent på hösten, och därigenom ofullständig nitrifikation av tillfört gödsel-NH₄-N före vinterns ankomst, bör i sådana situationer således ändå kunna medföra ökad nitratkväveutlakning, allteftersom ammoniumkvävet nitrifieras under vintern.

SLUTSATSER

Som framgår av fältinkubationsundersökningarna vid Lilla Böslid, Lanna, Hamre och Röbbäcksdalen medförde tillförsel av flytgödsel till jorden i mitten av september och i början av oktober fullständig nitrifikation av gödselammoniumkvävet inom två veckor respektive inom två–fyra veckor vid de jämförelsevis höga temperaturer som rådde på undersökningsplatserna höstarna 2000 och 2001. Även efter spridning i månadsskiftet oktober–november 2000 nitrifierades uppenbarligen ammoniumkvävet i flytgödseln mer eller mindre fullständigt före vinterns ankomst, vilket t.o.m. var fallet vid Röbbäcksdalen och Hamre. Resultaten visar, att vid 10–12°C nitrifierades allt gödselammoniumkväve inom två veckor. Vid 5°C återstod enligt fältundersökningarna omkring 50 % av gödselammoniumkvävet och vid 2°C ca 70 % efter två veckor. Efter fyra veckor hade det vid alla temperaturer över ca 1°C skett en fullständig nitrifiering av gödselammomiumkvävet. Det fordrades temperaturer vid eller strax under nollpunkten för att större NH₄-N-mängder skulle återfinnas efter fyra veckor.

Av både fältinkubations- och klimatskåpsstudierna framgår, att en ganska betydande nitratbildning även kan fortgå vid temperaturer nära nollpunkten och troligtvis ned till -1°C, men nitrifikation tycktes enligt klimatskåpsundersökningen också fortgå vid ca -2°C, om än mycket långsamt. Som fältinkubationsundersökningarna också visar, kan där för nitratbildning ske i frusen mark, t.ex. när ett snötäcke isolerar mot kraftigare kyla, så att temperaturen håller sig mellan noll och ett par minusgrader. Sådana förhållanden ledde till slutlig nitrifikation fram till våren av det flytgödselammoniumkväve som ej nitrifierats innan vintern kom.

När nitrifikationen av flytgödselammoniumkvävet fullbordats, återstod en NH₄-N-rest motsvarande ca 2 kg N/ha inom ett 10 cm djupt jordlager, vilket var lika lite som i jord utan flytgödseltillsats. Istället bildades nitratkväve. Av klimatskåpsstudierna vid låga, konstanta temperaturer framgår, att det samtidigt med nitrifikationen fortgick kvävemineralisering ned till nollpunkten eller strax därunder. Även vid inkubation i fält uppkom kvävemineralisering vid temperaturer omkring nollpunkten. Som medeltal för perioden den 1 november – tidig vår beräknades på basis av de funna N-mineraliseringsstillskotten i fältinkubationsstudierna en frigörelse av jordkväve med i medeltal 26 kg N/ha inom ett 20 cm djupt jordlager. Även kväve härstammande från flytgödseln organiska material mineraliserades under perioden 1/11 – tidig vår, i storleksordningen 15 kg N/ha beräknat för ett 20 cm djupt jordskikt. Då det mineraliserade kvävet omvandlades till nitrat, utgör denna kvävefrigörelse en utlakningsrisk. Eftersom samma jord användes i fältinkubationsförsöken i de fyra landsdelarna, visar resultaten inte olika jordars kväve mineraliserande och nitrifierande förmåga utan renodlat, hur processerna i fråga påverkades av temperaturförhållandena på de fyra platserna.

Med stöd av den konstaterade, snabba nitratbildningen i jorden efter tillsats av nötflytgödsel i mitten av september och början av oktober kan slutsatsen dras, att spridning av stallgödsel inför sådd av höstsäd måste medföra risk för ökad N-utlakning. De små mängder kväve som exempelvis höstveten tar upp under hösten efter sådd under den senare delen av september kan tillgodoses genom markens egen kväveleverans (Lindén et al., 2000), särskilt som plöjning och övrig jordbearbetning på hösten stimulerar kväve mineraliseringen i marken under denna årstid (jmf. Stenberg et al., 1999).

Av fältstudierna kan även den slutsatsen dras, att det vore nödvändigt att förskjuta flytgödsel-tillförseln till mitten av november under de förhållanden som rådde under den milda senhösten 2000 vid Röbbäcksdalen och Hamre, till månadsskiftet oktober-november under mer normala senhösttemperaturer på dessa platser såsom 2001 samt till månadsskiftet november-december eller ännu senare på Lilla Böslid och Lanna, för att betydande delar av ammoniumkvävet skall finnas kvar när vintern kommer och marken fryser till mer eller mindre långvarigt. Vid så sen spridning är emellertid marken i allmänhet för våt med hänsyn till riskerna för markpackning, särskilt på lerjordar. Man kan i allmänhet ej heller vänta så pass länge med att plöja för att på detta sätt bruka ned gödseln i jorden efter spridningen. Därmed återstår tillförsel i samband med vårbruket eller i växande gröda. I norra Sverige är det troligtvis inte möjligt att vänta med stallgödselspridning längre än till slutet av oktober p.g.a. av faran för att marken fryser och omöjliggör plöjning efter spridningen. Normalt är emellertid kväveutlakningsrisken mindre i norra Sverige genom långvarig tjäle. Anhopning av nitratkväve i marken på hösten efter t.ex. flytgödselspridning bör därför leda till betydligt mindre kväveförluster fram till våren än i södra Sverige.

Resultaten visar, att temperaturen i marken efter tillförsel av flytgödsel måste nå ned till fryspunkten inom en mycket kort för att väsentligt minska nitrifikationstakten. I stora delar av Götaland, där vintrarna är milda och marken periodvis saknar tjäle, borde man därför som ett alternativ kunna tänka sig flytgödselspridning på ofrusen mark under den egentliga vintern, med omedelbar plöjning därefter. Detta gäller i vart fall på lättare jordar, där vårplöjning vore fullt möjlig som en bra utväg om vinterspridningen inte kan genomföras. Håller sig temperaturen sedan nära nollpunkten, och marken dessutom fryser till efteråt, borde nitratbildningen ske så pass långsamt att bara mindre nitratmängder hinner bildas, innan våren kommer och den största N-utlakningsrisken efterhand är över.

SAMMANFATTNING

Nitrifikation, dvs. omvandling av ammonium till nitrat, är en temperaturberoende mikrobiologisk markprocess. Vid sommartemperaturer sker nitratbildningen snabbt, men aktiviteten avtar med sjunkande temperaturer och har ansetts upphöra vid fryspunkten. Nitrifikation av $\text{NH}_4\text{-N}$ i t.ex. flytgödsel efter tillförsel till åkerjord på hösten påverkar kväveutlakningsrisken, och det finns därför restriktioner i spridningen av stallgödsel under denna årstid. I syfte att belysa hur nitrifikationen av $\text{NH}_4\text{-N}$ i flytgödsel efter tillförsel till åkerjord på hösten påverkas av temperatur, vattenhalt i marken, geografiskt läge i landet samt tidig eller sen höstspridning, utfördes s.k. inkubationsstudier med tillsats av nötflytgödsel till jord. Härvid användes leriga sand- eller mojordar från Götala i Västergötland. Nötflytgödsel i en mängd, som i flertalet delundersökningar motsvarade ca 70 kg $\text{NH}_4\text{-N}$ per ha nedbrukad inom ett 10-cm-skikt, blandades in i jorden, vars vattenhalt dessutom standardiserades. Som kontroll-led användes jord med samma vattenhalt men utan flytgödsel. Jord i en mängd av 300 g vägdes in i plastburkar,

som försågs med ett 33 cm högt plaströr för ventilation. I undersökningarna placerades sådana inkubationsburkar med sitt innehåll av jord (med och utan flytgödsel) dels på fyra åkerfält i olika landsdelar och dels i klimatskåp/kammare under laboratorieförhållanden.

I fältstudierna sattes inkubationsburkar ut med botten på 20 cm djup i marken och täcktes med jord, så att bara ventilationsröret stack upp. Utsättning av burkar ägde rum höstarna 2000 och 2001 vid Lilla Böslid (56°36'N, 12°56'O) i Halland, Lanna (58°21'N, 13°8'O) i Västergötland, Hamre (60°18'N, 16°1'O) i Dalarna och Röbbäcksdalen (63°49'N, 20°17'O) nära Umeå i södra Västerbotten. Detta skedde vid tre årliga tidpunkter: år 2000 i mitten av september, början av oktober och månadsskiftet oktober–november (vid Lilla Böslid denna gång dock en månad senare för de båda senare tidpunkterna) samt år 2001 första vecka i oktober, månadsskiftet oktober–november och mitten eller slutet av november. Burkarna togs upp ur marken för provtagning och bestämning av innehållet av ammonium- och nitratkväve i inkubationsjorden vid 4–9 tidpunkter fr.o.m. utsättningen till tidigt på våren under efterföljande år. I laboratoriestudierna placerades inkubationsburkar med innehåll av jord (med och utan nötflytgödsel) i klimatskåp dels vid fyra olika temperaturer (-2,4, -0,6, +1,4 och +4,5°C) i 90 dagar samt under konstanta vattenhållsförhållanden (60 % av WHC) och dels med tre olika vattenhalter i jorden (50, 60 och 70 % av WHC) i 70 dagar vid konstant temperatur (+4°C). Även i klimatskåpsstudierna gjordes återkommande provtagningar med bestämning av ammonium- och nitratkväve i jorden.

Temperaturen under hösten 2000 och delvis även under vintern därefter var i storleksordningen 3–5°C högre än normalt på de fyra undersökningsplatserna med fältstudier, dock med långvarig tjäle i marken vid Röbbäcksdalen och Hamre. År 2001 var oktober nästan lika varm som 2000, men därefter blev vädret kallare med ganska normala temperaturer i november och december. Det rädde köldgrader under vintermånaderna vid Röbbäcksdalen och Hamre med långvarig tjäle i marken. Likväl var vintern på dessa platser betydligt mildare än normalt. Vid Lanna och Lilla Böslid rädde i genomsnitt 2–4 plusgrader under de tre månaderna januari, februari och mars. Dessa olika temperaturförhållanden avspeglar uppenbarligen en del av de förändringar mot mildare klimat som troligen skett under de senaste 15 åren och som man antagligen får räkna med i framtiden, bl.a. i utlakningssammanhang.

Efter tillsats av flytgödsel till jord i inkubationsburkar och utplacering av dem på fälten i mitten av september och i början av oktober skedde fullständig nitrifikation av gödselammoniumkvävet inom två veckor respektive inom två–fyra veckor. Även efter tillförsel till jorden i månadsskiftet oktober–november 2000 nitrifierades ammoniumkvävet i flytgödseln mer eller mindre fullständigt före vinterns ankomst, vilket t.o.m. var fallet vid Röbbäcksdalen och Hamre. Hösten 2001 fortgick dock inte nitratbildningen lika fort efter flytgödseltillsats i månadsskiftet oktober–november till följd av kallare höstväder och tidigare vinter detta år. Efter utsättning av inkubationsburkar i mitten av november 2001 vid Hamre och Röbbäcksdalen samt i slutet av november vid Lanna och Lilla Böslid nitrifierades bara en del av ammoniumkvävet i flytgödseln, innan vintern kom med frusen mark. Det ammoniumkväve som fanns kvar i inkubationsjorden vid vinterns ankomst omvandlades emellertid till nitratkväve under vinterns lopp. Fältinkubationsundersökningarna visade således, att nitratbildning kan ske i frusen mark, t.ex. när ett snötäcke isolerar mot kraftigare kyla, så att temperaturen håller sig mellan noll och ett par minusgrader. Det var sådana förhållanden som ledde till slutlig nitrifikation fram till våren av det flytgödselammoniumkväve som ej nitrifierats innan vintern kom. När nitrifikationen av flytgödselammoniumkvävet fullbordats, återstod i alla situationer en NH₄-N-rest motsvarande ca 2 kg N/ha inom ett 10 cm djupt jordlager, vilket var lika lite som i jord utan flytgödseltillsats. Istället hade nitratkväve bildats.

Av klimatskåpsstudierna vid låga, konstanta temperaturer (+4,5, +1,4, -0,6 och -2,4°C) framgår, att vid +4,5°C nitrifierades allt flytgödselammoniumkväve inom ca 50 dagar. Vid +1,4°C hade ammoniumkvävet ombildats till nitratkväve efter 70 dagar. Vid -0,6°C tog förloppet 90 dagar. Vid -2,4°C fortgick nitratbildningen mycket långsamt, men en tydlig nitrifikationsaktivitet kunde ändå fastställas. Temperaturen varierade något kring de angivna värdena, men inverkan av detta bör ha varit minimal.

Vattenhalter inom vida gränser (50, 60 och 70 % av WHC) tycktes enligt resultaten från inkubationsstudierna i klimatskåp inte påverka nitrifikationen, utan nitratbildningen pågick lika fort och blev lika fullständig vid dessa olika vattenhaltstillstånd. Vattenhalten vid 50 % av WHC motsvarade fuktighetsgraden i jorden då det skulle ha varit möjligt i praktiken att harva. Vid 60 % av WHC var jorden för kladdig för detta och vid 70 % av WHC var den mycket våt och något utflytningsbenägen. Resultaten tyder på tillräcklig syretillgång för nitrifikationsprocessen i dessa inkubationsstudier, vilket i många fall även bör gälla under praktikförhållanden på hösten, t.ex. i höstplöjd mark där ju jorden luckrats.

Samtidigt med nitrifikationen fortgick mineralisering av organiskt kväve ned till nollpunkten eller strax därunder. Inkubationsstudierna i fält visade som medeltal för perioden den 1 november – tidig vår en frigörelse av jordkväve med i medeltal 13 kg N/ha inom ett 10 cm djupt jordlager. Även kväve härstammande från flytgödselns organiska material mineraliserades under perioden den 1 november – tidig vår, vilket skedde i en omfattning motsvarande 8 kg N/ha som ett medeltal för ett 10 cm djupt jordlager. Det mineraliserade kvävet omvandlades till nitrat och skulle därför under fältförhållanden ha bidragit till den kväveutlakningsrisken som nitratbildningen efter flytgödseltillförsel på hösten kan medföra.

Då samma jord användes i fältinkubationsförsöken i de fyra landsdelarna, visar resultaten inte olika jordars mineraliserande och nitrifierande förmåga utan renodlat, hur processerna ifråga påverkades av temperaturförhållandena på undersökningsplatserna. Eftersom nitratkvävemängdernas storlek i marken på hösten inverkar på kväveutlakningen under vinterhalvåret, är det tydligt att den påvisade, fullständiga nitrifikationen av flytgödselns ammoniumkväveinnehåll under hösten efter tillförsel tidigt eller vid mitten av denna årstid i praktiken måste leda till ökade kväveförlustrisker. Resultaten från Hamre och Röbbäcksdalen 2001/2002, då senhösttemperaturerna var jämförelsevis normala, tyder emellertid på att spridning i månadsskiftet oktober–november eller senare i landets nordligare delar, där marken sedan snart fryser, inte bör leda till påtagligt ökad kväveutlakning, eftersom nitrifikationen i dessa fall inte hann fullbordas innan vintern kom. Dessutom stoppar tjälen upp perkolationen av nederbördsvatten ned genom marken, med större ytavrinning som följd.

I landets södra delar torde det dock inte vara möjligt att förhindra ökad nitratkväveutlakning efter flytgödselspridning även sent på hösten (t.ex. i månadsskiftet november–december) – om det då vore praktiskt möjligt att köra på fälten. Orsaken är som nämnts omväxlande milda och kalla perioder, med fortsatt nitrifikation av ammoniumkväve under blidvädersperioderna, då vattenavrinningen genom marken dessutom leder till ökad utlakning. Ej heller tycks det vara lämpligt med stallgödseltillförsel inför sådd av höstsäd, som ju har ett alltför litet N-upptag under hösten för tillräckligt stor utlakningsbegränsande verkan. Därmed återstår spridning på våren eller under växtsäsongen. Som komplement till vårspridning kan man i landets södra delar dock tänka sig flytgödselspridning på ofrusen mark under vintern, följd av omedelbar plöjning, när marktemperaturen är nära nollpunkten och nitratbildningen sker långsamt.

LITTERATUR

- Addiscott, T. M. 1983. Kinetics and temperature relationships of mineralization and nitrification in Rothamstead soils with differing histories. *Journal of Soil Science* 34, 343-353.
- Alexander, M. 1965. Nitrification. *Agronomy* 10, 307-343.
- Allison, F. E. 1973. Soil organic matter and its role in plant production. *Developments in Soil Science* 3. Elsevier, Amsterdam, London, New York 1973.
- Andersen, M. K. & Jensen, L. S. 2001. Low soil temperature effects on short-term gross N mineralisation-immobilisation after incorporation of a green manure. *Soil Biology and Chemistry* 33, 511-521.
- Anderson, O. E., Boswell, F. C. & Harrison, R. M. 1971. Variations in low temperature of nitrifiers in acid soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 35, 68-71.
- Beck, Th. 1979. Die Nitrifikation in Böden (Sammelreferat). *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde* 142, 344-364.
- Bergström, L. & Brink, N. 1986. Effects of differentiated applications of fertilizer N on leaching losses and distribution of inorganic N in the soil. *Plant and Soil* 93, 333-345.
- Bergström, L. & Johnsson, H. 1988. Simulated nitrogen dynamics and nitrate leaching in a perennial grass ley. *Plant and soil* 105, 273-281.
- 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.
- Campbell, C. A., Biederbeck, V. O. & Warder, F. G. 1971. Influence of simulated fall and spring conditions on the soil system: II. Effect on soil nitrogen. *Soil Science Society of America Proceedings* 35, 480-483.
- Dryler, K. & Ericson, L. 1994. Spridningstidpunkter av stallgödsel till vall. I: 8:e regionala lantbrukskonferensen för norra Sverige den 27 och 28 september 1994. Röbbäcksdalen meddelar 1994:8. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för norrländsk jordbruksvetenskap, Umeå.
- Engström, L. Lindén, B. & Roland, J. 2000. Höstraps i Mellansverige – Inverkan av såtid och ogräsbekämpning på övervintring, skörd och kvävehushållning. Institutionen för jordbruksvetenskap Skara, Sveriges lantbruks universitet. Serie B Mark och växter, rapport 7, 29 s.
- Ericson, L. & Alskog, G. 2000. Stallgödsel till vall – spridningstider på hösten. Röbbäcksdalen meddelar, Sveriges lantbruksuniversitet, nr 1, 2000, 75-78.
- Ericson, L. 2002. Stallgödsel till vall – spridningstider på hösten. Nytt från Institutionen för norrländsk jordbruksvetenskap, Växtodling - nr 2. Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå.
- Finney, D. J. 1972. An introduction to statistical science in agriculture. Munksgaard, Köpenhamn.
- Flowers, T. H. & O'Callaghan, J. R. 1983. Nitrification in soils incubated with pig slurry or ammonium sulphate. *Soil Biology and Chemistry* 15, 337-342.

- Frederick, L. R. 1956. The formation of nitrate from ammonia nitrogen in soils: I. Effect of temperature. *Soil Science Society of America Proceedings* 20, 496-500.
- Frimodt Pedersen, E. 1983. Drænvandsundersøgelser 1971-81. Statens Planteavlsvforsøg, Tidsskrift for Planteavl's Specialserie, beretning nr. S 1667. København.
- Försök i Väst, 1997. Fast stallgödsel till vårsäd. I: Försöksrapport 1997. Hushållningssällskapet, Skara, 22-23.
- Gerretsen, F. C. 1942. Enkele waarnemingen betreffende den invloed van de temperatuur op de nitrificatie en vastlegging van de stikstof. *Landboukundig Tijdschrift* 54, 573-583.
- Gustafson, A. 1987. Water discharge and leaching of nit rate. Dissertation. *Ekohydrologi* 22. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Gustafson, A. & Torstensson, G. 1983. Växtnäringsförluster vid Röbbäcksdalen. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala. *Ekohydrogi* 13, 35-48.
- Gustafson, A. & Torstensson, G. 1984. Växtnäringsförluster i Offer. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala. *Ekohydrogi* 15, 39-52.
- Hanschmann, A. 1983. Einfluß von Temperatur und Feuchtigkeit auf die Mineralisierung von Bodennstickstoff. *Arch. Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, Berlin* 27, 297-305.
- Hansen, S. & Aslyng, H. C. 1984. Nitrogen balance in crop production simulation model NITCROS. Hydrotechnical Laboratory, The Royal Veterinary and Agricultural University, Köpenhamn.
- Hansen, E. M., Thomsen, I. K. & Hansen, M. N. 2003. Udbringning af fast staldgødning. Grøn Viden, Markbrug nr. 274, Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, Danmarks Jordbrugsforskning.
- Jakobsson, C. & Lindén, B. 1992. Kvæveeffekter av stallgödsel på lerjordar. Avdelningen för växtnäringslära, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, rapport 190.
- Jansson, S. L. 1958. Tracer studies on nitrogen transformations in soil with special attention to mineralisation-immobilization relationships. *Kungl. Lantbrukshögskolans Annaler* 24, 101-361.
- Krantz, B. A., Ohlrogge, A. J. & Scarseth, G. D. 1943. Movement of nitrogen in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 8, 189-195.
- Larsen, K. E. 1987. NKJ-projekt 55 "Husdyrgødningens udnyttelse i planteproduktion ved intensivt husdyrhold". Virkning af forskellige udbringningsmåder og -tidspunkter for gylle. I: Husdyrgjødsels virkninger på jord og avling. NJF-utredning/rapport nr. 39, 36-48.
- Lindén, B. 1981. Sambandet mellan odlingsåtgärderna och markens mineralkväveförråd. I: KSLA, rapporter, nr 5 "Sammanfattande resultat av växtnäringsforskningen i jordbruket".
- Lindén, B. & Nouno, S. 1983. Det atmosfäriska nedfallets och kvävemineraliseringens bidrag till grödornas N-försörjning. *Skogs- och Lantbruksakademien, rapporter, nr 6, 1983, 41-59.*
- 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. *Ekohydrologi* 33. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.

Lindén, B., Carlgren, K. & Svensson, L. 1998. Kväveutnyttjande på en sandjord i Halland vid olika sätt att sprida svinflytgödsel till stråsäd. Avdelningen för växtnäringslära, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, rapport 199.

Lindén, B., Engström, L., Aronsson, H., Hessel Tjell, K., Gustafson, A., Stenberg, M. & Rydberg, T. 1999. Kväve mineralisering under olika årstider och utlakning på en mojord i Västergötland. Ekohydrologi 51. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.

Lindén, B., Roland, J. & Tunared, R. 2000. Höstsäds kväveupptag under hösten. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för jordbruksvetenskap Skara. Rapport 5, Serie B Mark och växter.

Linser, H., Mayr, H. H. & Unzeitig, H. 1959. Untersuchungen über die Wanderung von Ionen in Bodensäulen. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde 86, 57-65.

Lochmann, R., van der Ploeg, R. R. & Huwe, B. 1989. Zur Parameterisierung der Stickstoff-Mineralisierung in einem Ackerboden unter Feldbedingungen. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 152, 319-324.

Miller, R. D. & Johnson, D. D. 1964. The effect of soil moisture tension on carbon dioxide evolution, nitrification, and nitrogen mineralization. Soil Science Society of America Proceedings 28, 644-647.

Russel, J. C., Jones, E. G. & Bahrt, G. M. 1925. The temperature and moisture factors in nitrate production. Soil science 19, 381-398.

Sabey, B. R. 1969. Influence of soil moisture tension on nitrate accumulation in soils. Soil Science Society of America Proceedings 33, 263-266.

Stark, J. M. 1996. Modelling the temperature response of nitrification. Biogeochemistry 35, 433-445.

Statens jordbruksverk, 2003. Föreskrifter om ändring i Statens jordbruksverks föreskrifter (SJVFS 1999:79) om miljöhänsyn i jordbruket. SJVFS 2003:66. Statens Jordbruksverk, 551 82 Jönköping.

Steineck, S., Djurberg, L. & Ericsson, J. 1991. Stallgödsel. SLU. Speciella skrifter 43. Uppsala.

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.

Torstensson, G., Gustafson, A., Lindén, B. & Skyggesson, G. 1992. Mineralkvävedynamik och växtnäringsutlakning på en grovmojord med handels- och stallgödslade odlingssystem i södra Halland. Ekohydrogi 28. Avdelningen för vattenvårdslära, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.

Torstensson, G., Aronsson, H. & Lindén, B. 1995. Winter crops as green cover crops - nitrogen uptake capacity and effects on nitrogen leaching. Proceedings of NJF seminar no. 245 "The Use of Catch and Cover Crops to Reduce Leaching and Erosion", Knivsta, Sweden, 3-4 October 1994. NJF-rapport/utredning nr 99, 257-421.

Tyler, K. B., Broadbent, F. E. & Hill, G. N. 1969. Low-temperature effects on nitrification in four California soils. Soil Science 87, 123-129.

Van Schöll, I., Van Dam, A. M. & Leffelaar, P. A. 1997. Mineralisation of nitrogen from an incorporated catch crop at low temperatures: experiment and simulation. Plant and Soil 188, 211-219.

Wiklander, L. 1977. Leaching of plant nutrients in soils. IV. Contents in drainage water and groundwater. Acta Agriculturae Scandinavica 27, 175-189.

Förteckning över utgivna rapporter i serie B Mark och växter:

List of reports published in the series B Crops and soils:

1. Lindén, B. 1997. Humanurin som kvävegödselmedel tillfört i växande gröda vid ekologisk odling av höstvetete och havre. *Human urine as a nitrogen fertilizer applied during crop growth to winter wheat and oats in organic farming*. Rapport 1.
2. Lindén, B., Roland, J., Carlgren, K., Engström, L. och Tunared, R. 1997. Jämförelser mellan olika odlingssystem med konventionell och minimerad jordbearbetning, med och utan fånggrödor: växtproduktion, kväveförlustrisker och synpunkter på ekonomi. Resultat från undersökningar vid Östads säteri i Västergötland 1985-95. Rapport 2.
3. Engström, L. och Gruvaeus, I. 1998. Ekonomiskt optimal kvävegödsling till höstvetete, analys av 160 försök från 1980 till 1987. Rapport 3.
4. Engström, L. 2000. Axanlagsstudier i höstvetete 1999. Skillnader i utvecklingstakt mellan tidiga höstvetesorter och Kosack. *A study of apex development in winter wheat varieties in 1999*. Rapport 4.
5. Lindén, B., Roland, J. och Tunared, R. 2000. Höstsäds kväveupptag under hösten. *Nitrogen uptake of winter cereals during autumn*. Rapport 5.
6. Nyberg, A. och Lindén, B. 2000. Dokumentation av ekologiska växtodlingsgårdar i västra Sverige 1996-98. Rapport 6.
7. Engström, L., Lindén, B. och Roland, J. 2000. Höstraps i Mellansverige - Inverkan av såtid och ogräsbekämpning på övervintring, skörd och kvävehushållning. *Winter oilseed rape in central Sweden - effects of sowing and herbicide use on winter survival, yield and nitrogen efficiency*. Rapport 7.
8. Lundström, C. och Lindén, B. 2001. Kväveeffekter av humanurin, Biofer och Binadan som gödselmedel till höstvetete, vårvete och vårkorn i ekologisk odling. *Nitrogen effects of human urine, meat bone meal (Biofer) and chicken manure (Binadan) as fertilisers applied to winter wheat, spring wheat and spring barley in organic farming*. Rapport 8.
9. Nyberg, A. och Lindén, B. 2002. Inomfältsvariationer i avkastning och grovfoderkvalitet på ett vallskifte 1999-2001. *Within-field variations in forage yield and quality of a grass-dominated ley in southwest Sweden 1999-2001*. Rapport 9.
10. Lindén, B., Engström, L. och Ericson, L. Nitrifikation av ammonium i nötflytgödsel efter tillförsel till jord tidigt och sent på hösten. *Nitrification of ammonium in dairy slurry applied to soil in early and late autumn - implications for the risk of nitrate leaching*. Rapport 10.

Institutionen för jordbruksvetenskap Skara, som är en temainstitution med mark/växt- och husdjurskompetens, bedriver tillämpad, tvärvetenskaplig forskning. Detta sker bl.a. på försöksstationerna Lanna och Götala samt på gårdar i olika slag av fältförsök. Huvudsyftet med denna forskning är att förbättra avkastning och kvalitet hos våra jordbruksprodukter och samtidigt utnyttja våra naturliga tillgångar på ett miljövänligt och resursbevarande sätt. Forskning, utbildning och information präglas av helhetssyn och sker i nära samarbete med näringsliv, myndigheter och rådgivning.

Forsknings- och försöksresultat från institutionen publiceras i två rapportserier, som främst riktar sig till svenska och nordiska läsare:

Serie A Husdjursproduktion

Serie B Mark och växter

Rapporterna kan beställas från institutionen, se nedan. Förteckning över samtliga publikationer i båda serierna erhålles kostnadsfritt. Rapporterna finns också tillgängliga på nedanstående Internetadress.

Research results from the Department of Agricultural Research Skara, Swedish University of Agricultural Sciences are published in two report series:

Series A Animal Production

Series B Crops and Soils

The reports are available at the department and can be ordered from the address below. A list of all publications in both series can be obtained free of charge. The reports are also available at the internet address given below.

Distribution:

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för jordbruksvetenskap Skara
Box 234
532 23 Skara
Tel. 0511-670 00, fax 0511-67134, e-post: Lena.Ljunggren@jvsk.slu.se
Internet: <http://www.jvsk.slu.se>

Pris: 50:- (exkl. moms)

Price: 50:- SEK (excl. V.A.T.)