



Effektivt kväveutnyttjande i höstvet

Hur påverkas kvävet's tillgänglighet i marken av kväveform och appliceringsmetod?

Clara Kihlstrand

Examensarbete/Självständigt arbete • 30 hp

Sveriges lantbruksuniversitet, SLU

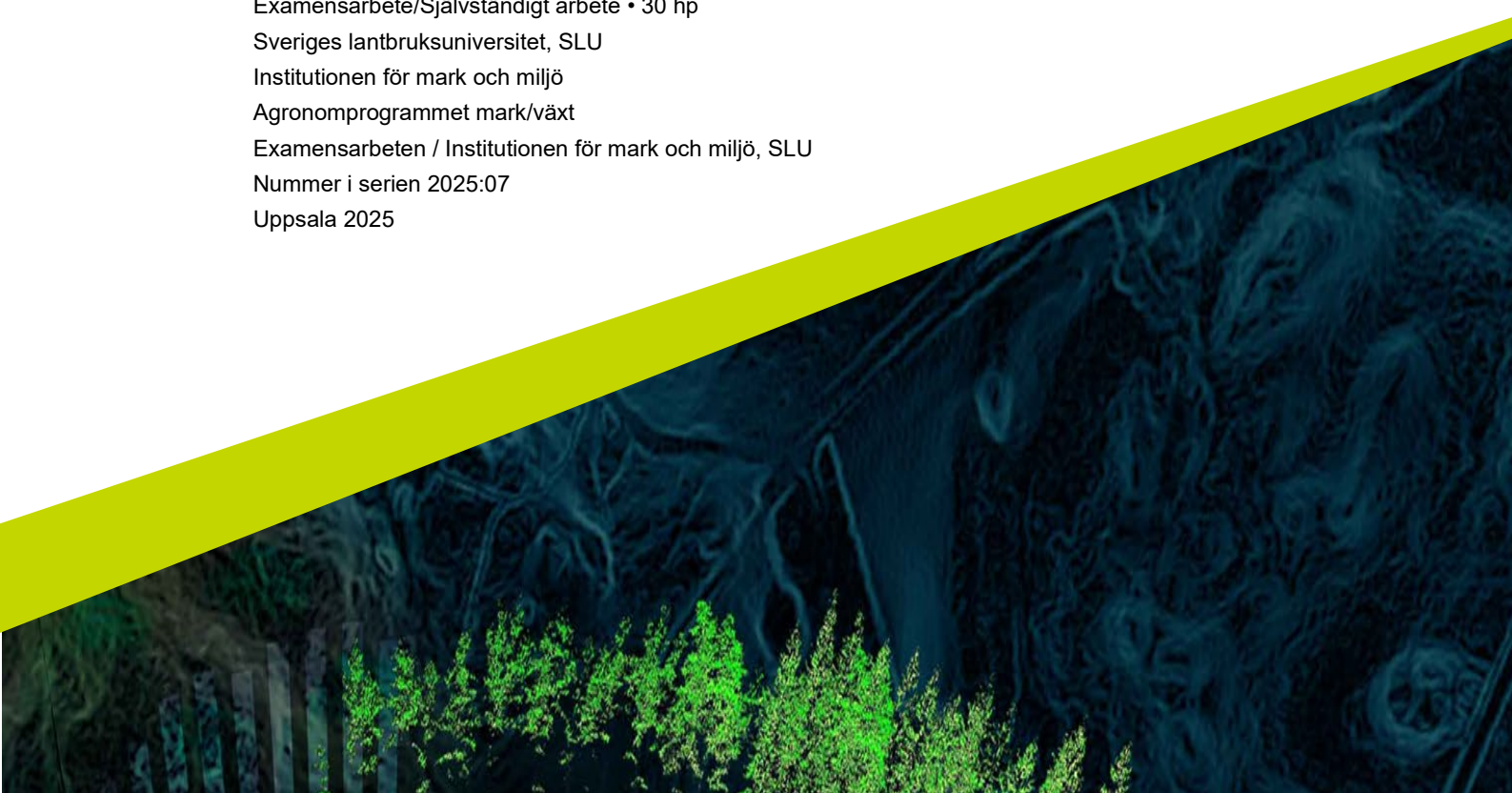
Institutionen för mark och miljö

Agronomprogrammet mark/växt

Examensarbeten / Institutionen för mark och miljö, SLU

Nummer i serien 2025:07

Uppsala 2025



Effektivt kväveutnyttjande i höstvet. Hur påverkas kvävet tillgänglighet i marken av kväveform och appliceringsmetod?

Efficient nitrogen use in winter wheat. How is nitrogen availability in the soil affected by nitrogen form and application method?

Clara Kihlstrand

Handledare:	Karin Hamnér, Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö
Bitr. handledare:	Sofia Delin, Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö
Examinator:	Katharina Meurer, Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö

Omfattning:	30 hp
Nivå och fördjupning:	A2E
Kurstitel:	Självständigt arbete i Markvetenskap
Kurskod:	EX0881
Program/utbildning:	Agronomprogrammet – mark/växt
Kursansvarig inst.:	Institutionen för mark och miljö
Utgivningsort:	Uppsala
Utgivningsår:	2025
Upphovsrätt:	Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd
Serietitel:	Examensarbeten / Institutionen för mark och miljö, SLU
Delnummer i serien:	2025:07
Nyckelord:	kväveeffektivitet, kalksalpeter, ammoniumsulfat, fast och flytande gödselmedel, appliceringsmetod, jordart, svenska förhållanden

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakultet Naturresurser och jordbruksvetenskap (NJ)

Institution Mark och miljö

Sammanfattning

Effektivt resursutnyttjande är av intresse för både ekologisk och ekonomisk hållbarhet. Inom lantbrukssektorn är det viktigt att utnyttja resurser effektivt och på så vis minska miljöpåverkan samt få bättre lönsamhet. I detta arbete har effektivt kväveutnyttjande i höstvetete undersökts. Syftet med arbetet har varit att undersöka hur olika mineralgödselmedel, baserade på nitrat eller ammonium, applicerade i fast eller flytande form, påverkar tillgängligheten av kvävet. Målet var att få en bättre förståelse för hur kvävet uppehåller sig i markens olika kvävepooler beroende på kväveform och appliceringsmetod under svenska förhållanden samt att öka förståelsen för jordartens inverkan.

För att studera detta har ett försök genomförts på två platser i Västergötland, Bjertorp och Lanna. De två platserna representerar en sand- och en lerjord. I försöket har fast och flytande kalksalpeter respektive ammoniumsulfat använts. De gödselmedel som använts har varit anrikade med 10 % 15N för att möjliggöra bestämning av mängd gödselkväve i markens olika kvävepooler. Gödslingen har skett i cylindrar med två olika djup och två olika tidpunkter för provtagning. I själva försöksytan har det inte varit någon växande gröda, men i fältet omkring odlades höstvetete. Efter insamling av jordprover i fält har olika analyser genomförts på laboratorium för att bestämma mängd mineralkväve, mikrobiellt kväve och fixerat kväve. På labb har extraktion med kaliumklorid (KCl), fumigering med kloroform (CHCl_3) följt av extraktion med kaliumsulfat (K_2SO_4), samt behandling med kaliumhypobromit (KOB) följt av sköljning med KCl utförts. För bestämning av 15N i prover har en diffusionsmetod använts för analys av mineral- och mikrobiellt kväve, medan bestämning av 15N i prover för fixerat kväve analyserades direkt i jordprov.

Analys av mineralkväve visade att fast kalksalpeter gav signifikant mer mineralkväve än flytande ammoniumsulfat. Ammoniumbaserade gödslingsbehandlingarna innehöll vid tidig provtagning i princip bara NH_4^+ -mineralkväve. Till den sena provtagningen nitrifierades en stor del av mineralkvävet på sandjorden och på lerjorden minskade mängd mineralkväve till följd av trolig fixering eller ammoniakavgång. Nitratbaserade gödslingsbehandlingar gav upphov till mineralkväve i form av nitrat. På lerjord minskade mängd mineralkväve från tidig till sen provtagning, medan det ökade på sandjord. Resultatet för mikrobiellt kväve gav ingen tydlig distinktion mellan gödslingsbehandling, plats och tidpunkt. Det kan bero på att immobilisering inte påverkades av de olika parametrarna inom försöket alternativt att metoden inte var tillförlitlig. Analys av fixerat kväve visade endast den andel av totalt fixerat kväve som det gödslade kvävet utgör. Det medför att gödslingsbehandlingarna, AS fast och AS flytande, endast kan jämföras inom samma plats och tidpunkt. I resultatet för fixerat kväve går det endast att skilja gödslingsbehandlingarna vid sen provtagning på sandjorden.

Sammanfattningsvis ger analyserna inte den helhetsbild av kvävet fördelning i marken som var målet för att förstå dess tillgänglighet. Detta beror främst på metodosäkerhet, brist på signifikanta skillnader och ofullständiga resultat. Arbetet visar därför inte lika tydligt som tidigare studier att flytande gödselmedel är sämre än fasta, eftersom skillnaderna tycks bero både på om gödseln är fast eller flytande och på vilken kväveform som används.

Nyckelord: kväveeffektivitet, kalksalpeter, ammoniumsulfat, fast och flytande gödselmedel, appliceringsmetod, jordart, svenska förhållanden

Abstract

Today, there is considerable discussion about how to increase the use efficiency of different types of resources. This is of interest from both an ecological and an economic perspective. In this report, the nitrogen use efficiency in winter wheat has been evaluated. The purpose of this field study was to examine how different types of mineral fertilizers, based on nitrate or ammonium and applied in either solid or liquid form, affect the availability of nitrogen. The aim was to gain a better understanding of how nitrogen remains in different nitrogen pools in the soil, depending on the nitrogen form, application method, and soil type under Swedish conditions.

The field trial was conducted at two locations in Västergötland, Sweden: Bjertorp and Lanna. These locations represent a sandy soil and a clay soil, respectively. In the trial, solid and liquid forms of calcium nitrate and ammonium sulphate were used. The fertilizers were enriched with 10% ^{15}N to enable measurements of the applied nitrogen in the different nitrogen pools in the soil. Fertilization was carried out in cylinders of two different depths, allowing for two sampling times. The trial was conducted without a growing crop. After soil sampling, various analyses were performed to measure mineral, immobilized, and fixed nitrogen.

Analysis of mineral nitrogen showed that solid calcium nitrate resulted in significantly more mineral nitrogen than liquid ammonium sulphate. The ammonium-based treatments contained almost exclusively NH_4^+ mineral nitrogen at the early sampling. By the late sampling, a large portion had been nitrified in the sandy soil, while in the clay soil, mineral nitrogen decreased—likely due to fixation or ammonia volatilization. The nitrate-based fertilizers contributed mineral nitrogen in the form of nitrate. In the clay soil, mineral nitrogen levels decreased from the early to the late sampling, whereas they increased in the sandy soil.

The results for microbial nitrogen showed no clear distinctions between treatments, locations, or sampling times. This may be because immobilization was not influenced by the tested parameters, or because the method was not reliable. The analysis of fixed nitrogen only reflected the proportion of total fixed nitrogen derived from the applied fertilizer. Therefore, the treatments—solid and liquid ammonium sulphate—can only be compared within the same location and sampling time. A distinction between the treatments was only observed at the late sampling in the sandy soil.

In summary, the analyses did not provide the comprehensive picture of nitrogen distribution that was intended, mainly due to methodological uncertainties, lack of significant differences, and incomplete results. Consequently, this study does not confirm as clearly as previous research that liquid fertilizers are less effective than solid ones, as the differences appear to depend both on the physical form of the fertilizer and the nitrogen type used.

Keywords: nitrogen efficiency, calcium nitrate, ammonium sulphate, solid and liquid fertilizer, application method, soil type, Swedish conditions

Innehållsförteckning

Tabellförteckning	6
Figurförteckning	7
1. Inledning	8
2. Syfte och mål	9
3. Bakgrund	10
3.1 Kvävet kretslopp och förekomst i marken	10
3.1.1 Ammoniakavgång	11
3.1.2 Mineralisering och immobilisering av kväve	11
3.1.3 Nitrifikation	12
3.1.4 Denitrifikation	12
3.1.5 Utlakning	13
3.1.6 Ammoniumfixering	13
3.1.7 Jordartens betydelse för markens kväveprocesser	14
3.2 Effekt av kväveform och applicering	15
3.2.1 Kvävegödselmedel	15
3.2.2 Appliceringsmetoder	16
3.3 Isotop ¹⁵ N	18
4. Metod	19
4.1 Utformning av fältförsök	19
4.2 Bestämning av olika kvävefraktioner i jord	21
4.2.1 Extraktion av mineralkväve	21
4.2.2 Bestämning av mikrobiellt kväve	22
4.2.3 Bestämning av fixerat kväve	22
4.2.4 Diffusionsmetod för analys av förhållandet mellan ¹⁴ N och ¹⁵ N	23
4.2.5 Beräkningar av gödselkväve i olika fraktioner	24
4.3 Statistik	25
5. Resultat	26
5.1 Väderförhållande under försöksperiod	26
5.2 Mineralkväve	27
5.3 Mikrobiellt kväve	29
5.4 Fixerat kväve	30
5.5 Isotop ¹⁵ N – mineralkväve och mikrobiellt kväve	31
6. Diskussion	32
6.1 Mineralkväve	32
6.2 Mikrobiellt kväve	33
6.3 Fixerat kväve	34
6.4 Utvärdering av metoder	35
6.4.1 Kontaminering under arbetet	35
6.4.2 Kloroforms effektivitet vid nedbrytning av mikrober	35
6.4.3 Diffusionsmetoden	36
7. Slutsats	37
Referenser	38
Populärvetenskaplig sammanfattning	40
Tack	42

Tabellförteckning

Tabell 1. Platser för fältförsök 2024 samt jordarnas egenskaper.	19
<i>Tabell 2. Försöksplan för de två försöksplatserna, Bjertorp och Lanna, Västergötland. Alla behandlingar genomfördes i fyra upprepningar och tillfördes N-giva motsvarande 160 kg/ha.</i>	<i>21</i>
Tabell 3. Lösning som används till spädning, volym av extrakt, total volym i scintburk samt mängd MgO som använts vid förberedning av prover från olika behandlingar/metoder med hög respektive låg koncentration kväve.	24
Tabell 4. Medeltemperatur (°C) och nederbörd (mm) på Bjertorp och Lanna under försöksperiod från gödsling den 23 april fram till provtagning 1 (tidig) (Bjertorp 3/5 och Lanna 2/5), hela försöksperioden (Bjertorp 23/4–29/5 och Lanna 23/4–28/5) samt under maj månad (1–31 maj 2024) och medelvärde för 1–31 maj baserat på normalperioden 1991–2020.....	27

Figurförteckning

Figur 1. Kvävet kretslopp. ©Jakob Ekelund	10
Figur 2. Medeltemperatur (°C) och medelnederbörd (mm) på Lanna baserat på data från normalperioden 1991–2020	19
Figur 3. Placering av cylindrar och applicering av fast (A) respektive flytande (B) mineralgödsel i fältförsöket.	20
Figur 4. Medeltemperatur (°C) och nederbörd (mm) inför och under försöks-perioden i april-maj 2024. Gödsling genomfördes den 23 april 2024. Provtagning 1 genomfördes den 3 maj och provtagning 2 den 29 maj 2024. Försöksperioderna från gödsling till respektive provtagningstillfälle är markerad i figuren med blått (inför tidig provtagning) och grönt (inför sen provtagning). .	26
Figur 5. Medeltemperatur (°C) och nederbörd (mm) inför och under försöks-perioden i april-maj 2024. Gödsling genomfördes den 23 april 2024. Provtagning 1 genomfördes den 2 maj och provtagning 2 den 28 maj 2024. Tidsperioden från gödsling till respektive provtagningstillfälle är markerad i figuren med blått (inför tidig provtagning) och grönt (inför sen provtagning).	27
Figur 6. Totalt mineralkväve (kg/ha) redovisat som delmängder av NH_4^+ och NO_3^- för respektive gödslingsbehandling, plats och tidpunkt. Gödslingsbehandlingarna består av fast samt flytande form av ammoniumsulfat (AS) och kalksalpeter (KS). De två platserna är Bjertorp (B) och Lanna (L). Tidpunkterna tidig (10 dagar) och sen (36 dagar) representerar de två provtagningstillfällena efter gödsling. Felstaplar visar standardavvikelsen för totalt mineralkväve och signifikans för skillnader mellan gödslingsbehandlingar ($p < 0,05$) (a, b och ab).	29
Figur 7. Mängd mikrobiellt N (kg/ha), dvs. mängd kväve som mikroorganismer immobiliserat från gödsling till provtagning 1 och 2, i olika gödslingsbehandlingar (Ammoniumsulfat, AS och Kalksalpeter, KS), platser (Bjertorp och Lanna) och tidpunkter för provtagning (tidig 10 dagar och sen 36 dagar efter gödsling). Mängden mikrobiellt kväve är beräknad utifrån differensen mellan två delprov (fumigerat och icke fumigerat) och sammanställt som medelvärde. Negativ mängd mikrobiellt kväve innebär att det obehandlade provet innehöll mer kväve än det behandlade (fumigerat). Felstaplar visar standardavvikelse.	30
Figur 8. Andel av totalt fixerat kväve som utgörs av gödselkväve (%) på de två försöksplatserna (Bjertorp och Lanna), vid två provtagningstidpunkter (tidig och sen) och beroende på vilken gödslingsbehandling (AS fast eller AS flytande). Felstaplar redovisar standardavvikelsen och signifikans för skillnader mellan gödslingsbehandlingar ($p < 0,01$) (a och b).	31

1. Inledning

Effektivt utnyttjande av resurser är idag en högaktuell fråga. Det är viktigt för miljö och klimat, samt för ekonomi och lönsamhet. Inom lantbrukets växtproduktion är effektivt utnyttjande av resurser centralt för att uppnå god avkastning och lönsamhet och samtidigt minimera förluster och negativ miljöpåverkan. Det är viktigt att åtgärder i fält genomförs vid rätt tidpunkt och är anpassade till platsen för att optimera skörd. Genom att få bättre förståelse för vilka åtgärder som är bäst lämpade på den specifika platsen kan effektivitet och resultat bli bättre.

Kväve (N) är det mest skördebegränsande näringsämnet och det näringsämne som tillförs i störst kvantitet varje växtsäsong (Kuśmierz et al. 2023). Kväve tillförs genom spridning av gödselmedel, både i organisk och mineralform. Sammansättningen av näringsämnena och vilka kemiska föreningar som ingår kan variera mellan olika gödselmedel. Innehållet och sammansättning påverkar gödselmedlets egenskaper och syftar till att fylla olika behov hos grödor.

Mineralgödsel innehåller vanligtvis kväve i form av nitrat (NO_3^-), ammonium (NH_4^+) eller en kombination av båda. I teorin tar grödan upp både nitrat och ammonium men i praktiken spelar andra faktorer, så som markens egenskaper och årsmån, roll för hur effektivt kväveformerna kan utnyttjas. Nitrat är en negativt laddad jon (anjon) medan ammonium är positivt laddad (katjon). Denna skillnad i laddning påverkar hur kvävet rör sig i markprofilen och hur det binder till markens partiklar, vilket i sin tur påverkar tillgängligheten för växterna.

En annan viktig aspekt för kväveutnyttjande är hur näring appliceras. Spridningstekniken spelar en avgörande roll för att uppnå en jämn fördelning av gödselmedlet och säkerställa att kvävet blir tillgängligt för grödan när den behöver det. Val av teknik och logistik vid spridning varierar mellan gårdar och är i hög grad beroende av vilken typ av gödselprodukt som används. Appliceringstekniken skiljer sig åt beroende på om fast, flytande, organisk eller mineralbaserad gödsel används. Anpassad spridningsteknik bidrar till att minska förluster, öka effektiviteten och optimera växtnäringsupptaget.

En ökad kväveeffektivitet innebär att större andel av det N som tillförs också skördas i produkten. Det leder till en lönsammare odling med mindre miljöpåverkan (Zhang et al. 2015; Rütting et al. 2018; Cardenas et al. 2019). Därav är det intressant att undersöka hur olika former av kväve och hur det appliceras påverkar hur effektivt det kan utnyttjas av grödan.

2. Syfte och mål

Syftet med detta arbete var att undersöka hur applicering av mineralgödselmedel i olika kväveformer (ammonium och nitrat) i fast och flytande form på två olika jordar (sand och ler) påverkar grödans möjlighet att ta upp och effektivt utnyttja det tillförda kvävet. Genom att undersöka hur kvävet omvandlas i marken är målsättningen att få en bättre förståelse för hur olika kväveformer kan utnyttjas på ett effektivt sätt genom olika appliceringsmetoder och på olika jordarter.

Följande frågeställningar har formulerats i arbetet för att uppfylla syftet och nå målet om en bättre förståelse för kvävegödsling:

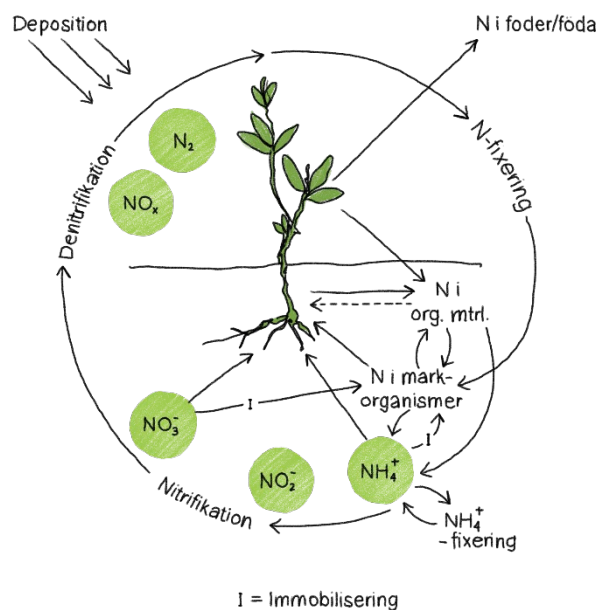
- i. Hur omfördelas kväve i markens kvävepooler beroende på vilken kväveform (ammonium eller nitrat) som används vid gödsling?
- ii. Skiljer sig fördelning och tillgänglighet av kvävet i marken beroende på om gödsling appliceras i fast eller flytande form?
- iii. Påverkas effekten av de olika gödslingsbehandlingarna av jordarten?

3. Bakgrund

3.1 Kvävet kretslopp och förekomst i marken

Kväve är ett näringsämne som är essentiellt för alla levande organismer, och ingår i bland annat proteiner, DNA, RNA och klorofyllmolekylen (Eriksson et al. 2011; Nguyen et al. 2018). I marken förekommer kväve i såväl organisk som oorganisk form. Det kan vara löst i marklösningen, fixerat till lermineral eller organiskt material, alternativt bundet i mark- och mikroorganismer. I marklösningen återfinns mineralkväve i form av ammonium (NH_4^+), nitrat (NO_3^-) samt låga koncentrationer av nitrit (NO_2^-). Det finns även kväve i lösliga organiska föreningar (eng. *Dissolved Organic Nitrogen*, DON) i marklösningen. Ammonium kan adsorberas och fixeras i lermineral eller organiskt material. Mark- och mikroorganismer kan immobilisera olika former av kväve. Immobiliseringen innebär att organismerna binder in kväve i sin egen biomassa för tillväxt. Detta medför att en del av markens kväveinnehåll återfinns där (Eriksson et al. 2011; Cameron et al. 2013; Ferrieri et al. 2018).

I kvävet kretslopp sker förflyttningar av kväve mellan de olika poolerna i marken, men också till och från atmosfären samt växter (Figur 1). I atmosfären förekommer kväve främst i form av kvävgas (N_2) som är en inert gas och utgör 78 % av luften. Kväve förekommer även i form av lustgas (N_2O) och andra kväveoxider (NO_x) i luften. Växten har möjlighet att ta upp kväve i form av NH_4^+ och NO_3^- men även i form av små aminosyror (organiskt N) (Eriksson et al. 2011). Omvandling av kväve sker genom olika processer så som nitrifikation och denitrifikation, mineralisering och immobilisering. Förlust av kväve i odlingssystem sker vanligtvis genom ammoniakavgång, läckage med vatten och genom denitrifikation. Hur kväve tillförs, förloras och omvandlas i marken påverkar tillgängligheten av N till grödan (Eriksson et al. 2011; Cameron et al. 2013; Rütting et al. 2018; Cowan et al. 2019).

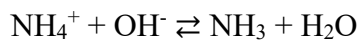


Figur 1. Kvävet kretslopp. ©Jakob Ekelund

3.1.1 Ammoniakavgång

Ammoniakavgång är en av förlustvägarna av kväve i åkermark. Ammoniak (NH_3) i gasform avgår från åkermark för att sedan deponeras med nederbörd eller bundet till partiklar. Vid deponeringen av NH_3 bidrar det till förurning och övergödning i ekosystem. Ammoniakavgång är därför negativt både ur resursutnyttjande- och miljöperspektiv (Cameron et al. 2013).

Vid gödsling kan kväve tillförs i form av NH_4^+ . I marken råder ett pH-beroende jämviktsförhållande mellan NH_4^+ och NH_3 , vilket kan leda till att en del av det tillförda NH_4^+ omvandlas till NH_3 . Högre pH bidrar till att mer kväve föreligger i form av NH_3 , medan ett lägre pH leder till större andel NH_4^+ . En högre koncentration av NH_3 i marklösningen, leder till större risk för ammoniakavgång och därmed kväveförluster (Dari et al. 2019). Jämvikten mellan NH_4^+ och NH_3 förhåller sig enligt följande reaktion:



Förutom pH är jordens textur, vattenhalt och buffringskapacitet viktiga faktorer som påverkar ammoniakavgång. Texturen påverkar jordens egenskaper och bidrar till olika vattenhållningsförmåga och buffringskapacitet. Hög vattenhalt i jorden riskerar att leda till större förluster på grund av minskad nitrifikation samt transport av NH_4^+ till markytan och möjlighet för NH_3 att evaporera. Hög katjonbyteskapacitet (eng. *cation exchange capacity*, CEC) bidrar till jordens buffringskapacitet och är ofta förknippad med lägre förluster. Det beror på att CEC korrelerar med hög lerhalt och organiskt material, vilket kan motverka snabba pH-förändringar och bidrar till fler bindningsytor för ammoniumjoner. När NH_4^+ binder till negativt laddade lerpartiklar minskar koncentration av jonerna i marklösningen och påverkar därmed jämvikten, vilket leder till att även mängden NH_3 minskar (Cameron et al. 2013).

3.1.2 Mineralisering och immobilisering av kväve

Mineralisering och immobilisering av kväve är två olika processer i marken som omvandlar kvävet från organisk till oorganisk form, och tvärtom (Eriksson et al. 2011). Det är två biologiska processer som drivs av mikroorganismers nedbrytning och uppbyggnad. Vid mineralisering bryter mikroorganismer ner organiskt material, till exempel växtrester. Det leder till att organiskt bundet kväve mineraliseras till oorganiskt kväve i form av NH_4^+ , vilket ökar mängden växttillgängligt kväve. Om mikroorganismerna i stället binder in oorganiskt kväve för egen tillväxt, kallas det immobilisering. Immobilisering innebär att tillgängligheten av kväve för växtens upptag minskar, medan det sker en tillväxt av mikroorganismer. De två processerna sker enligt följande reaktion (R står för organisk förening):

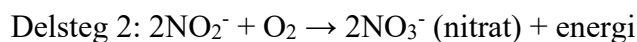
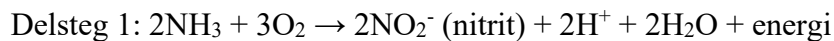


Över tid leder de två processerna antingen till nettomineralisering eller nettoimmobilisering. Framför allt påverkas processerna av mängden kväve och kol (C) i marken, och förhållandet mellan dem. Tillgänglighet av material som är lätt omsättbart

och energirikt möjliggör mikrobiell tillväxt. Mikroorganismer konkurrerar effektivt om tillgängligt kväve, därför kan det uppstå immobilisering i marken om ett kvävefattigt material tillförs. Generellt innebär en C/N-kvot under 20 en netto-mineralisering medan en C/N-kvot över 20 leder till nettoimmobilisering (Eriksson et al. 2011). Processerna påverkas också av abiotiska faktorer, så som temperatur, vattenhalt och tillgång på syre (O) i marken. Mikroorganismerna har ett optimum för sin aktivitet och dessa abiotiska faktorer kan medföra att aktiviteten minskar. Exempelvis finns det en optimal temperatur för mikroorganismernas aktivitet. Om temperaturen är lägre än den blir processerna långsammare och är den för hög riskerar mikroorganismens enzym att brytas ned vilket leder till att processerna hindras. Likaså påverkar vattenhalten mikrobernas aktivitet, då syretillgången minskar vid högre vattenmättnad och då avtar även aktiviteten till följd av syrebrist (Zifcakova 2020).

3.1.3 Nitrifikation

Under aeroba förhållande i marken kan NH_4^+ -joner oxideras till NO_3^- . Denna process kallas nitrifikation och sker i två delsteg. Oxidering av NH_3 är möjlig tack vare olika mikroorganismer, det finns både bakterier och arkéer som bidrar till oxideringen. Dessa mikroorganismer kallas nitrifierare. I det första steget oxideras NH_3 till NO_2^- och i det andra NO_2^- till NO_3^- . Reaktionsförloppet ser ut som följande:



Vid nitrifikation frigörs energi, vilken de autotrofa nitriferarna använder för att fixera koldioxid (CO_2) medan heterotrofa nitrifierare använder energin för att fixera kol från organiskt material. Mikroorganismerna binder in kol för att bygga biomassa. Två viktiga bakteriesläkten som agerar nitrifierare i svensk åkermark är *Nitrospira* (oxiderar NH_3 till NO_2^-) samt *Nitrobacter* och *Nitrospira* (oxiderar NO_2^- till NO_3^-). Nitrifikationsprocessen påverkas av pH, temperatur och syretillgång. Som tidigare nämnts är pH avgörande för den mängd NH_3 som förekommer i marken och mikrobernas effektivitet påverkas av temperatur. Tillgång på syre är nödvändig för att oxidera NH_3 till NO_3^- . Vid lägre syretillgång kan även lustgas (N_2O) bildas, när oxideringen inte slutförs (Eriksson et al. 2011).

3.1.4 Denitrifikation

Vid anaeroba förhållanden i marken, till följd av exempelvis markpackning eller att jorden är vattenmättad, kan bakterier, främst heterotrofa men även autotrofa och arkéer, utnyttja NO_3^- som elektronacceptor i stället för syre. Processen kallas denitrifikation och innebär att bakterierna reducerar NO_3^- till N_2 , och även mindre mängder till N_2O , som avgår till luften (Chien et al. 2011; Eriksson et al. 2011). Reduceringen sker enligt följande steg:



Riklig tillgång på organiskt material gynnar denitrifikation. Det beror på att det organiska materialet utgör en kol- och energikälla för denitrifierarna samt att mikrobers omsättning av organiskt material kräver stora mängder syre. Förlusterna av kväve i samband med denitrifikation varierar starkt beroende på markegenskaper och årsmån, men processen kan orsaka betydande kväveförluster från åkermark. Proportionerna mellan de olika gaserna som bildas varierar beroende på syretillgång, nitrathalt, pH, temperatur och sammansättning av bakteriesamhällen. Vid låga pH och med viss tillgång till syre gynnas bildandet av N_2O i stället för N_2 . Det är en kraftfull växthusgas som bidrar till klimatförändringen. Till följd av dess långa uppehållstid i atmosfären kan avgången av N_2O få stor effekt på den globala miljön (Eriksson et al. 2011; Fogelsson 2015; Cardenas et al. 2019).

3.1.5 Utlakning

Utlakning av kväve från åkermark sker främst i form av NO_3^- . På grund av dess negativa laddning adsorberas NO_3^- dåligt i marken, eftersom den inte bildar ytkomplex eller binder till de övervägande negativt laddade markpartiklarna. Det medger i stället att NO_3^- är väldigt rörligt och riskerar att lakas ut (Chien et al. 2011). Kväveförlusterna i samband med utlakning av NO_3^- är stora.

Katjonen NH_4^+ binder däremot starkt till markpartiklarnas negativa laddning och fixeras i lermineral vilket bidrar till att utlakning av NH_4^+ är låg. Nitrifikationsprocessen är en annan anledning till att utlakning av NH_4^+ i allmänhet är begränsad. Det är endast i undantagsfall på mo- och sandjordar som utlakning av NH_4^+ kan ske i samband med höga gödselgivor, särskilt efter spridning av flytgödsel (Eriksson et al. 2011).

Det sker även utlakning av kväve i organisk form. Det organiska material i marken som är lösligt kan föra med sig kväve ut i vattendrag och sjöar (Eriksson et al. 2011).

3.1.6 Ammoniumfixering

Ammoniumfixering innebär att NH_4^+ fastläggs på ett sätt så att det inte är lätt utbytligt mot andra joner. När NH_4^+ fixeras är det inte längre tillgängligt för den växande grödan att ta upp, vilket innebär att gödsling med ammoniumbaserade gödselmedel kan få lägre effektivitet till följd av fixering. Denna fixering sker snabbt, inom några få timmar från gödselspridningen (Röing et al. 2006; Nieder et al. 2011; Beuters & Scherer 2012).

Störst risk för ammoniumfixering är det i jordar som innehåller 2:1 lermineral, så som illit, vermikulit och montmorillonit. Dessa lermineral har en naturlig negativ laddning som balanseras av katjoner, till exempel kaliumjon (K^+). NH_4^+ är väldigt lik K^+ , med liknande jonradie och låg hydratiseringsenergi. Detta medför att även NH_4^+ kan bindas in i de ditrigonala utrymmena i det basala syreplanet i 2:1 lermineralen och balanserar på så vis laddningen i dem. Hur starkt K^+ och NH_4^+ fixeras beror på bindingsplatsens position, dvs. om de binds in centralt eller i kanten av skiktet. Det NH_4^+ som tillförs via mineralgödsel fixeras vanligtvis i de yttre

positionerna och är därmed inte så starkt fixerat (Röing et al. 2006; Nieder et al. 2011; Nunes et al. 2019).

I tidigare studier har mängd fixerat kväve undersökts på olika typer av jordar. Beuters och Scherer (2012) undersökte fyra olika tyska jordar och visade att mängden fixerat kväve ökar med lerhalt. Jordarna som användes i denna studie innehöll mellan 3,4–49,9 % ler och mängden fixerat kväve varierade mellan 91–240 mg/kg jord. I en svensk studie har försök utförts på fem platser, på jordar med 10–56 % ler med fokus på att undersöka växtföljdens effekt på mängd fixerat kväve. Resultatet i denna studie visar att den totala mängden fixerat kväve varierar mellan 55–206 mg/kg jord (Röing et al. 2006).

Förutom modermaterial och lerhalt så påverkar bland annat koncentrationen av K^+ och vattenhalt även fixering av NH_4^+ . Vid höga koncentrationer av K^+ fixeras inte NH_4^+ i samma utsträckning eftersom det då är högre konkurrens om bindningsplatser. Tillförs K^+ innan gödsling med NH_4^+ blir fixeringen lägre. Torra och blöta förhållanden i marken påverkar hur lermineralen krymper och sväller, vilket också påverkar fixeringens styrka. Under torra förhållanden riskerar mer NH_4^+ att fixeras eftersom lermineralet då kollapsar (Nieder et al. 2011).

Genom utsöndring av rotexudat kan växter påverka det fixerade NH_4^+ och möjliggöra upptag (Nieder et al. 2011). Generellt har svensk åkermark egenskaper som gynnar ammoniumfixering och därmed är det viktigt att ta i beaktning vid undersökning av gödslingseffektivitet.

3.1.7 Jordartens betydelse för markens kväveprocesser

Jordarten är av stor betydelse för kemiska, biologiska och fysikaliska processer i marken. Jordarten beror på jordens sammansättning av olika mineralpartiklar i olika kornstorlekar och halten organiskt material, mullhalten. I sandjordar byggs texturen upp av större kornstorlekar än i en lerjord. Sandjordar beskrivs som friktionsjordar, medan lerjordar är kohesionjordar. I en friktionsjord hålls materialet samman på grund av mekanisk friktion mellan mineralkornen, det leder till att jorden lätt faller sönder i torrt tillstånd. En kohesionsjord å andra sidan hålls samman tack vare den höga specifika ytan och är inte benägen att falla isär (Eriksson et al. 2011).

Jordartens och jordens biologiska aktivitet är avgörande för markens struktur. Sandjord ger upphov till en enkelkornstruktur medan lerjord till aggregatstruktur. Fördelningen av olika kornstorlekar är av betydelse för jordens sammanhållning och näringsinnehåll. Tack vare att ler består av mindre kornstorlek är lerjordens specifika yta högre. Detta bidrar till att det finns fler bindningsplatser vilket möjliggör högre adsorption av NH_4^+ till lerets negativa laddningar. Lerjordar kännetecknas av ett högt CEC på grund av dess höga andel av negativt laddade partiklar, vilket gör att de har en god förmåga att binda och hålla kvar katjoner. Därmed kan lerjorden till följd av både adsorption och fixering hålla mer NH_4^+ än en sandjord.

Strukturen i marken är av vikt för processerna i jorden och påverkar tillgänglighet av näringsämnen samt jordens vatten- och näringshållande förmåga. Vid gödsling

får jordarten samt dess struktur avgörande betydelse för hur näringen fördelas och uppehåller sig i jorden. En sandjord har lägre vattenhållande förmåga än en lerjord. Detta medför att vattenflödet i sandjorden är snabbare och det leder till ett större läckage av NO_3^- . Lerjordens finare textur bidrar till att vattnet hålls kvar betydligt bättre än i en sandjord, men det kan även ske stora läckage av kväve på en lerjord vid sprickbildningar genom markprofilen. Vattenflödet kan vara så högt i sprickan att näringsämnet läcker ut (Chien et al. 2011; Eriksson et al. 2011; Fogelsson 2015).

3.2 Effekt av kväveform och applicering

Gödsling med kväve är en viktig insats och central del av växtodlingen varje växtsäsong. Kväve kan tillföras i mineral eller organisk form. På konventionellt drivna växtodlingsgårdar tillförs vanligtvis kväve i form av mineralgödsel. Tillförsel av olika former av kväve i odlingssystem påverkar på olika sätt hur det omvandlas i marken, transporteras, sprider sig till yt- och grundvatten, avgår till atmosfären samt grödans möjlighet att ta upp kväve på kort eller lång sikt (Hauck 1981). Vilken form av kväve som används vid spridning samt när och hur den sprids är viktiga faktorer som kan påverka kväveeffektiviteten (Rütting et al. 2018).

Lättillgängligt kväve för grödan utgörs av det kväve som återfinns i marklösningen. I en studie i Polen har bl.a. kväveinnehållet i form av nitrat och ammonium undersökts och hur tillgängligheten påverkas av pH, textur och gödslingsnivåer (Kuśmierz et al. 2023). I studien uppmätts den totala mängden mineralkväve (NO_3^- och NH_4^+) till mellan 15–21 mg N/kg jord beroende på vilken aspekt som undersöks. Studien konstaterar att de två kväveformernas tillgänglighet påverkas olika mycket och på olika sätt av pH i marken respektive jordens textur.

Kväveeffektivitet är ett mått på hur stor del av det gödslade kväve som kommer grödan till nytta. Det går att mäta kväveeffektivitet på olika sätt, men ett vanligt sätt är att mäta den mängd kväve som grödan tagit upp i förhållande till den tillförda kvävemängden, enligt följande formel.

$$N_{\text{effektivitet}} = N_{\text{upptag}} / N_{\text{tillförd}}$$

Grödan tar upp kväve som finns i marklösningen. Det är därför intressant att veta hur kväve transporteras, omvandlas och föreligger i marken efter tillförsel av gödsel. Genom att undersöka den mängd kväve som finns i marklösning (mineralkväve), det kväve som immobiliserats av mikrober (mikrobiellt kväve) och kväve som fixerats till markpartiklarna (fixerat kväve) kan även antaganden om kväveeffektivitet beräknas.

3.2.1 Kvävegödselmedel

För minsta möjliga miljöpåverkan av gödslingen och för bästa möjliga lönsamhet i odlingen ställs höga krav på mineralgödselmedlen. De ska ha optimalt innehåll av växtnäring, näringsämnena ska vara i växttillgänglig form och innehållet av

oönskade ämnen i gödselmedlet ska vara lågt. Vidare ska gödselmedlen ha bra egenskaper för transport, lagring och spridning. Det är viktigt att näringen kan spridas jämnt fördelad över markytan med den spridningsutrustning som finns tillgänglig inom lantbruket (Jordbruksverket 2023).

Kalksalpeter är ett vanligt mineralgödselmedel som används i Sverige. Det består av kalciumnitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) och används i dagsläget främst vid kompletteringsgödsling till följd av sitt höga pris (Jordbruksverket 2025). Vid framställning av Kalksalpeter reagerar salpeter (kaliumnitrat, KNO_3) och NH_3 för att bilda ammoniumnitrat (NH_4NO_3). Genom att blanda NH_4NO_3 med en karbonat, vanligtvis från kalksten eller dolomit, bildas en produkt som innehåller mestadels $\text{NO}_3\text{-N}$ och kalcium (Ca). Resultatet är en flytande produkt som sedan kan processas vidare för att bilda en fast produkt (granuler eller prills). Kalksalpeter marknadsförs för sina snabbverkande egenskaper och pH-höjande effekt i marken.

Ammoniumsulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) är också ett gödselmedel som används i Sverige. Det framställs främst från vattenfri ammoniak och svavelsyra (H_2SO_4) tillsammans med ammoniakgas samt vattenånga i en reaktor, men även från restprodukt vid kemiska processer (Wang et al. 2013). Produkten har ett högt svavelinnehåll vilket gör att det är en populär produkt att använda till svavelkrävande grödor, så som oljeväxter (Öztürk 2010). Användningen leder till en försurning och därför används den med fördel på basiska jordar (Chien et al. 2011). Försurningen vid användning av ammoniumhaltiga gödselmedel beror dels på att NH_4^+ ofta nitrifieras snabbt i åkermark samt att vätejoner (H^+) utsöndras när grödan tar upp kväve i form av NH_4^+ (Eriksson et al. 2011).

Det allra vanligaste gödselmedlen som används i Sverige innehåller ammoniumnitrat. Det är produkter som består av lika delar nitrat- och ammoniumkväve. Kombinationen av de två kväveformerna ger ett gödselmedel som lätt transporteras till växtrötterna för upptag i form av NO_3^- och samtidigt uppehåller sig längre i markprofilen i form av NH_4^+ som är mindre lätttrörligt. Ammoniumkvävet kan fastläggas genom fixering och blir först lätttrörligt efter nitrifikation. Till följd av de två kväveformernas olika egenskaperna är ammoniumnitrat ett gödselmedel med goda förutsättningar för effektivt utnyttjande och lägre risk för förlust av kvävet. Såväl risken för läckage som risken för avgång minskar när nitrat- och ammoniumkväve kombineras (Jordbruksverket 2025).

I försöket jämförs gödsling med kalksalpeter och ammoniumsulfat för att undersöka extremerna, det vill säga produkter som innehåller den ena eller andra av kväveformerna NO_3^- och NH_4^+ . Detta möjliggör en tydligare jämförelse av hur de två olika kväveformerna fördelas i markens olika pooler.

3.2.2 Appliceringsmetoder

Det finns olika tillvägagångssätt för att applicera näring till grödan. Applicering kan ske i fast eller flytande form. Val av appliceringsmetod påverkar vilken typ av utrustning som behövs, kostnad och har i tidigare försök även visat på olika effektivitet av näringsutnyttjande. I Jordbruksverkets rapport *Rekommendation för gödsling och kalkning 2025* används ett femårsmedelvärde (2019–2023) för pris på

gödsel. Det innebär ett schablonpris på 15,42 kr/kg kväve för fast mineralgödsel inför 2025 (Jordbruksverket 2025). Pris på flytande kväve är svårt att uppskatta eftersom det inte säljs i Sverige, men ett rimligt antagande är att det ligger ungefär 10 % lägre i pris¹.

Vid applicering av näringsämnen i fast form är mineralgödseln antingen granulerad, prillad eller kornad. Den fasta gödsel kan antingen bredspridas med hjälp av centrifugal- eller rampspridare alternativt myllas med kombisåmaskin i samband med sådd (Jordbruksverket 2025). För att få en jämn spridning av det granulerade gödselmedlet är det viktigt att granulerna har jämn storleksfördelning, att näringen är likt fördelad och att hållfastheten är bra. Om det granulerade gödselmedlet inte har dessa kvalitéer är risken att det blir en ojämn spridning av näringsämnen. Det krävs nederbörd efter gödsling eller tillräckligt med fukt i marken för att granulerna ska smälta och växtnäringen bli tillgänglig.

Mineralgödsel kan även appliceras i flytande form med en växtskyddsspruta, det krävs därmed ett färre redskap i maskinparken (Jordbruksverket 2025). Applicering i flytande form ger möjlighet att kombinera spridning av gödning med växtskyddsmedel. Det är enklare att få en jämn spridning med flytande mineralgödselmedel eftersom varje droppe får identiskt innehåll. Vid spridning av flytande gödselmedel får växtnäringen kontakt med marklösningen på ett enklare sätt vilket leder till att det också sprids till lägre koncentrationer. Dock har kväveeffektiviteten i tidigare försök visat sig vara lägre i flytande än fast form av gödselmedel, oavsett kväveform (ammonium eller nitrat). Den sämre effekten av gödselmedel i flytande form tycks främst uppträda på lerjordar. Det finns i dagsläget inte en tydlig förklaring till detta, men teorier om att det flytande kvävet fastläggs i större utsträckning på lerjorden. Under 2021 visade ett försök i Västergötland, på mycket styv lerjord, att mängden skördat kväve var lägre vid användning av flytande gödselmedel jämfört med fast oavsett om kalksalpeter, ammoniumsulfat eller ammoniumnitrat användes. I samband med försöket var nederbörden kraftig, vilket antagligen påverkade kväveformens (NO_3^- , NH_4^+ och Urea) tillgänglighet i marken. Vid kraftig nederbörd riskerar NO_3^- att denitrifieras samt att försvinna genom läckage snabbare än grödan klarar av att ta upp kvävet. Medan NH_4^+ kan omsättas på sikt under fuktiga förhållanden och transporteras ner till växtrötterna (Gruvaeus 2022). Vid jämförelse av försök från 2018 och 2019 i Sverige och Finland, syns samma effekt av dessa gödslingsbehandlingar. Torråret 2018 visar också effekt på kväveformernas effektivitet, som skiljer sig mer mellan det nitratbaserade och ammoniumbaserade gödselmedlet vid mindre nederbörd. Kalksalpeter ger då högre kväveeffektivitet (Gruvaeus 2018, 2022).

I Europa skiljer sig användningen av olika appliceringsmetoder av mineralgödselmedel åt. I Sverige appliceras mindre än 1 % av kväve i flytande form medan i Storbritannien används flytande kväve till 50 % på åkermark med spannmål och oljeväxter. Däremot sprids i princip inget flytande kväve i vall i Storbritannien. Andelen flytande kväve som sprids i Frankrike uppgår till cirka 25 % av den totala

¹ Ingemar Gruvaeus, Yara AB, personligt meddelande 2025.

kvävegivan. I vårt grannland Danmark har spridningen av flytande kväve minskat från drygt 10 % 2020 till cirka 6,5 % under 2024².

3.3 Isotop 15N

Naturligt förekommer kväve främst i två stabila isotopformer, ^{14}N och ^{15}N . Isotop 14 är den vanligaste formen av kväve, medan isotop 15 förekommer i betydligt mindre mängd. Förhållandet mellan de två isotoperna är 272:1. I försök används därför en metod där anrikning med ^{15}N tillämpas för att undersöka transport och fördelning av kväve mellan pooler i marken samt upptag i växter. De två isotoperna förutsätts genomgå samma kemiska och mikrobiella transformationer, vilket är en viktig aspekt för att metoden ska vara användbar. Det är en välanvänd metod och vanligtvis används en anrikning på 5–10 % ^{15}N . När material som tillförs, till exempel gödselmedel, anrikas med ^{15}N förändras förhållandet mellan de två isotoperna i markens pooler dit gödseln transporteras. Förändringen av mängd kväve samt förhållandet mellan de två isotoperna kan då härledas till det tillförda materialet (Buresh et al. 1982; Sørensen & Jensen 1991).

² Ingemar Gruvæus, Yara AB, personligt meddelande 2025.

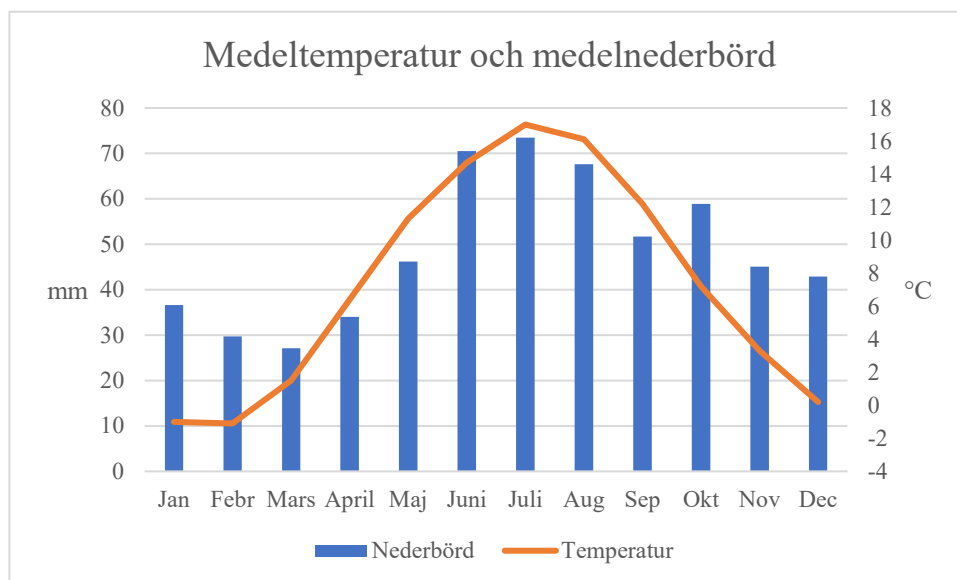
4. Metod

4.1 Utformning av fältförsök

I fältförsök under 2024 har gödsling med kväve i olika kväveformer med olika appliceringsmetoder genomförts på två olika platser i Västergötland, Bjertorp och Lanna. Platserna representera två olika jordarter, sand- och lerjord, se Tabell 1. De två jordarna har båda en måttlig mullhalt (mmh), vilket innebär att de innehåller mellan 3–6 % mull. Medeltemperaturen ligger på 7,3 °C och medelnederbörd är 583,8 mm/år (Normalperioden 1991–2020) (Figur 2).

Tabell 1. Platser för fältförsök 2024 samt jordarnas egenskaper.

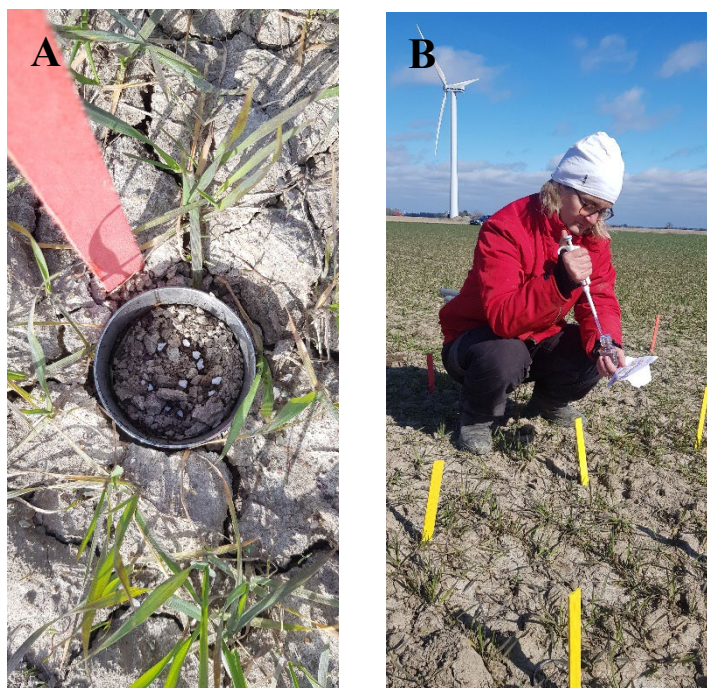
Plats	pH	Mull (%)	Lerhalt (%)	Textur
Bjertorp	5,7	4,5	7	mmh lerig sand
Lanna	7,0	3,1	36	mmh mellanlera



Figur 2. Medeltemperatur (°C) och medelnederbörd (mm) på Lanna baserat på data från normalperioden 1991–2020.

Den del av försöket som är inkluderat i denna studie genomfördes på en yta där grödan avdödat för att kunna exkludera kväueupptag i grödan samt underlätta gödsling och provtagning. Intill låg ett större fältförsök, där effekt på skörd och kväueupptag i höstveten efter olika kväuebehandlingar undersöktes (försöksserie D3-2323). Kväuebehandlingarna som ingick i den studie som redovisas här (Tabell 2) fanns även inkluderat i det stora fältförsöket, men data från det senare har inte ingått i sammanställningen.

I försöket applicerades ammoniumsulfat och kalksalpeter i fast respektive flytande form i cylindrar med en innerdiameter på 72 mm och ett djup av 0–10 cm respektive 0–30 cm. De olika gödselmedlen applicerades på markytan utan någon inblandning (Figur 3). I försöket användes olika långa cylindrar eftersom det gödslade kvävet antogs finnas kvar inom de två cylinderdjupen vid tidig respektive sen provtagning. De använda gödselmedlen var anrikade med 10% 15N för att öka möjligheterna att följa kvävet i marken efter gödsling. I försöket fanns fyra upprepningar av varje behandling samt kontroll, på såväl 0–10 cm som 0–30 cm djup, se Tabell 2. Försöksytan var uppdelad i fyra block och respektive behandling var slumpmässigt utplacerade inom varje block. Cylindrarna placerades på en yta utan växande gröda. Cylindrarna grävdes upp 10 respektive 36 dagar efter gödsling (korta respektive långa cylindrar).



Figur 3. Placering av cylindrar och applicering av fast (A) respektive flytande (B) mineralgödsel i fältförsöket.

Jorden inuti cylindrarna trycktes ut ur cylindrarna efter uppgrävning och lades i kylväskor följt av infrysning inom ett par timmar. Därefter genomfördes olika provprepareringar och kvävebestämningar på laboratorium för att undersöka hur det gödslade kvävet fördelats i jorden. Fördelningen av kvävet i olika former och fraktioner undersöktes för att på så vis kunna beskriva tillgängligheten av kvävet för grödan.

Tabell 2. Försöksplan för de två försöksplatserna, Bjertorp och Lanna, Västergötland. Alla behandlingar genomfördes i fyra upprepningar och tillfördes N-giva motsvarande 160 kg/ha.

Gödslingsbehandling	Form	N-giva (kg/ha)	Provtidpunkt & djup (cm)	
			Tidig	Sen
Ogödslad			0–10	0–30
Ammoniumsulfat	Fast	160	0–10	0–30
Ammoniumsulfat	Flytande	160	0–10	0–30
Kalksalpeter	Fast	160	0–10	0–30
Kalksalpeter	Flytande	160	0–10	0–30

4.2 Bestämning av olika kvävefraktioner i jord

För att undersöka hur kvävet omvandlas och fördelas i jorden efter gödsling användes tre olika analysmetoder. De olika analysmetoderna möjliggjorde en bestämning av mängden kväve som potentiellt är tillgänglig för grödan direkt (mineralkväve), hur mycket som immobiliserats (mikrobiellt kväve) respektive den mängd kväve som fixerats i marken (fixerat kväve). De tre analysmetoderna beskrivs nedan (avsnitt 4.2.1–4.2.3).

Inledningsvis maldes samtliga prover med hjälp av en frysmalningskvarn för att homogenisera proverna (Linden 2013). Därefter bestämdes torrsubstanshalt (TS-halt) för respektive jordprov. Bestämning av TS-halt genomfördes genom att 50–60 g jord av respektive prov vägdes upp i deglar och torkades sedan över natten i 105 °C. Proverna vägdes sedan återigen och genom beräkningar bestämdes TS-halt för respektive prov, se ekvation 1.

$$TS - \text{halt} = \frac{\text{massa (torr jord)}}{\text{massa (fuktig jord)}} \quad (1)$$

4.2.1 Extraktion av mineralkväve

För att extrahera det kväve som föreligger i mineralform, det vill säga lättillgängligt ammonium och nitrat, vägdes prover om 40 ± 1 gram jord upp i skakflaskor. Därefter tillsattes 100 ml 2M kaliumkloridlösning (KCl). Flaskorna skakades över natt och dag två hälldes proverna över i plastprovrör för centrifugering. Efter centrifugeringen överfördes vätskan till två 15 ml-provrör med 10–12 ml i respektive provrör med hjälp av en 20 ml spruta genom 0,2 mm sprutfilter. Extrakten användes sedan för att bestämma total mängd kväve samt förhållandet mellan 14N och 15N. Total mängd ammonium- och nitratkväve bestämdes med hjälp av en Autoanalyser på Mark- och växtlaboratoriet, Institutionen för mark och miljö, SLU. Ett medelvärde av markens mineralkväve i obehandlade led har subtraherats från resultat i de gödslade leden. För att bestämma förhållandet mellan 14N och 15N användes en diffusionsmetod, se avsnitt 4.2.4 för metodbeskrivning.

4.2.2 Bestämning av mikrobiellt kväve

Bestämning av mängd immobiliserat kväve skedde genom fumigering av jordproverna med efterföljande extraktion, enligt den s.k. fumigering-extraktionsmetoden (Brookes et al. 1985). I denna metod sker en avdödning av mikroberna i marken genom fumigering med kloroform (CHCl_3) och mängden mikrobiellt kväve bestäms därefter genom extraktion av fumigerade respektive ofumigerade prover.

För att möjliggöra denna bestämning förbereddes en dubbel uppsättning av varje jordprov, där det ena provet fumigerades och det andra inte. $12,5 \pm 0,5$ g jord vägdes upp i en 50 ml glasbägare (fumigering) respektive i 50 ml provrör (ofumigerad). Jordproverna i bägarna placerades i en exsickator tillsammans med cirka 25 ml CHCl_3 samt fuktigt hushållspapper för att genomgå fumigering. Med hjälp av en pump sänktes trycket i exsickatorn för att öka avdunstningen av kloroformen och efter en timme stängdes pumpen av. Exsickatorns ventil förslöts och exsickatorn täcktes för att stå mörkt under 24 timmar. Därefter genomfördes en procedur för att få bort CHCl_3 ur proverna. Inledningsvis öppnades exsickatorn med hjälp av ventilen och luft fick strömma in. Därefter avlägsnades bägaren med CHCl_3 samt det fuktiga pappret. Exsickatorn stängdes sedan och pumpen sattes på under tre minuter för att avlägsna kloroform ur proverna. Därefter fick luft strömma in i exsickatorn genom att pumpslangen avlägsnades. Proceduren upprepades totalt tre gånger.

De fumigerade jordproverna fördes sedan över från bägarna till 50 ml provrör. 40 ml 0,25M K_2SO_4 tillfördes till samtliga prover (fumigerade och obehandlade). Därefter skakades proverna under en timme och centrifugerades sedan under 15 minuter (3000 n/min). Efter centrifugering överfördes ca 35 ml av extrakt till 50 ml provrör med hjälp av en 20 ml spruta genom 0,2 mm sprutfilter.

Total kvävehalt i extrakten bestämdes genom Kjeldahl-analys av Hushållnings-sällskapets laboratorium på Logården, Västergötland. Den totala mängden mikrobiellt kväve beräknades genom att den totala mängden kväve i de två delproven från samma jordprov jämfördes med varandra. Den totala kvävemängden i delprovet som fumigerats subtraherades med den totala mängden kväve i det ofumigerade provet. Differensen mellan dessa två delprov utgjorde det mikrobiella kvävet. Sedan beräknades ett medelvärde för mikrobiellt kväve utifrån de fyra upprepningar som fanns inom varje led.

Kjeldahl-metoden innebär förbehandling med koncentrerad svavelsyra (H_2SO_4), vilket medför att allt organiskt kväve omvandlas till ammoniumkväve (Sáez-Plaza et al. 2013). Detta möjliggjorde att diffusionsmetoden kunde användas, för att bestämma förhållandet mellan 14N och 15N i extraktet vilket analyseras på (se avsnitt 4.2.4 för metodbeskrivning). I samband med metoden antogs att inget kväve förelåg i form av NO_3^- .

4.2.3 Bestämning av fixerat kväve

Bestämning av mängd fixerat ammonium genomfördes genom att avlägsna lättillgängligt mineralkväve och organiskt kväve genom behandling med en

kaliumhypobromitlösning (KOB_r) med efterföljande sköljning med kaliumklorid-lösning (KCl) (Silva & Bremner 1966). Detta möjliggjorde sedan bestämning av mängd fixerat ammonium genom en analys av totala kvävehalten i jordprovet. Analysen genomfördes på jordprover från led behandlade med fast och flytande ammoniumsulfat samt kontroll, från de två försöksplatserna (sand- och lerjord).

Inledningsvis vägdes 1 gram torkat (60 °C), mortlat och sållat jordprov in och tillsattes till uppmärkta 200 ml e-kolvar. 15 prover förbereddes per omgång. 20 ml av KOB_r-lösning tillsattes med hjälp av automatpipett till e-kolvarna. Efter tillsättning snurrades respektive e-kolv för att uppnå en bra omblandning och därefter placerades ett urglas över öppningen. Proverna inkuberades under två timmar i rumstemperatur i dragskåp. 60 ml avjoniserat vatten tillsattes till varje e-kolv och urglaset lades tillbaka över öppningen. Proverna kokades under fem minuter på en värmeplatta inuti dragskåpet, med urglaset fortsatt på. Därefter läts proverna svalna och inkuberas över natten.

Dag två dekanterades proverna och KOB_r-lösningen hälldes i en dunk för destruktion. Därefter användes små mängder 0,5 M KCl-lösning i sprutflaska för att skölja över jordproverna till 50 ml centrifugrör. Ytterligare KCl-lösning tillfördes till centrifugröret till en totalvolym av 40 ml. Proverna skakades sedan i cirka 5 minuter för att sedan centrifugeras under 10 minuter (3000 rpm). Lösningen dekanterades och sköljningen upprepades ytterligare två gånger. Efter sköljningen fördes jorden över till aluminiumformar för att sedan torkas i 60 °C. Den torkade jorden skickades sedan SSIL (SLU Stable Isotope Laboratory) i Umeå för analys och bestämning av mängd fixerat kväve samt andel isotop ¹⁵N.

4.2.4 Diffusionsmetod för analys av förhållandet mellan ¹⁴N och ¹⁵N

Eftersom förhållandet mellan ¹⁴N och ¹⁵N inte kan analyseras från extrakt användes en diffusionsmetod. Metoden går ut på att ammonium i extrakten omvandlas till ammoniak som avgår till luften och därefter fångas upp i ett surgjort filterpapper, som sedan kan analyseras (Sørensen & Jensen 1991).

Extrakt av jordprover från bestämning av mineral kväve (se avsnitt 4.2.1) och mikrobiellt kväve (se avsnitt 4.2.2) förbereddes i scintburkar med en total volym av 12 ml respektive 15 ml. För att möjliggöra analys på laboratorium UC Davis Stable Isotope Facility anpassades mängden extrakt som pipetterades för att uppnå en kvävemängd på 20–50 µg i proverna utifrån resultaten från analys av mineral kväve respektive mikrobiellt kväve. I de fall proverna för analys av mineral kväve behövde spädas gjordes detta med tillförsel av 2M KCl i proverna för att totalvolymen skulle bli 12 ml. För spädning av prover för bestämning av mikrobiellt kväve användes i stället destillerat vatten alternativt en ammoniumsulfatlösning, eftersom kvävet var upplöst i svavelsyra (H₂SO₄). Ammoniumsulfatlösning användes för spädning i prover där mängden kväve inte var tillräcklig för detektering efter spädningen. Denna lösning innehöll 1,54 mg N/l och bidrog till att mängden kväve i samtliga prover blev >20 µg vilket var gränsvärdet för detektering.

För att möjliggöra bestämning av mängd NH_4^+ och NO_3^- som finns i de olika fraktionerna förbereddes dubletter av extrakt med rätt mängd kväve. Glödgad magnesiumoxid (MgO) tillsattes för att höja pH-värdet och därmed omvandla NH_4^+ till NH_3 . I den andra uppsättningen av prover tillsattes även 0,4 g Devarda's legering för att möjliggöra analys av NO_3^- i proverna. Devarda's legering medför att NO_3^- omvandlas till NH_4^+ , som i sin tur tack vare MgO omvandlas till NH_3 och fångas upp av filterpapperet. I proverna som innehöll H_2SO_4 (mikrobiellt kväve) tillfördes större mängd MgO eftersom pH-värdet i dessa extrakt var betydligt lägre. Se Tabell 3 för sammanställning av typ, mängd och volym av spädningslösning samt MgO.

Efter att MgO (och Devarda's legering) tillförts till extrakten täcktes scintburkens öppning med en polytetrafluoreten (PTFE) tejp. Ett syratvättat filterpapper (ca 4x10 mm) placerades ovanpå. Därefter tillsattes 10 µl 2,5 M KHSO_4 och sedan ytterligare en PTFE-tejp för att sluta in filterpapperet. Syran tillfördes för att sänka pH, vilket leder till att NH_3 omvandlas tillbaka till NH_4^+ och fångas i filterpapperet. Scintburken förslöts med lock och ställdes i en skakapparat med hastigheten 80 min^{-1} under 72 timmar. Sedan öppnades proverna och filterpapperet placerades tillsammans med den undre PTFE-tejpen i ett vågskepp. Vågskeppen fick sedan stå i en exsickator för att torka över natten i rumstemperatur. De torkade filterpapperen flyttades sedan till varsin tennkapsel som veks ihop och placerades efter andel anrikning av ^{15}N i olika fack på en mikrotiterplatta. Proverna skickades sedan till laboratoriet UC Davis Stable Isotope Facility, University of California, USA för analys av förhållandet mellan ^{14}N och ^{15}N . Resultatet används för att beräkna hur stor andel av gödselmedlet som omfördelats i de olika fraktionerna (mineralkväve och mikrobiellt kväve).

Tabell 3. Lösning som används till spädning, volym av extrakt, total volym i scintburk samt mängd MgO som använts vid förberedning av prover från olika behandlingar/metoder med hög respektive låg koncentration kväve.

Behandling	Spädningslösning	Vol. extrakt	Tot vol.	Mängd MgO
Mineral N	2 M KCl	0,5–12 ml	12 ml	ca 0,2 g
Mikrobiellt N (hög konc. N)	Destillerat vatten	1–3 ml	15 ml	ca 1,5 g
Mikrobiellt N (låg konc. N)	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ -lösning	2 ml	15 ml	ca 0,7 g

4.2.5 Beräkningar av gödselkväve i olika fraktioner

Vid beräkning av resultat räknades koncentrationerna i analyserna om till mängd kväve per hektar (kg N/ha). I beräkningarna användes den torra jordmassan för respektive prov och ett medelvärde för skrymdensitet för respektive plats (Bjertorp och Lanna) som beräknades med hjälp av cylindrarnas volym och jordprovernas torrsvikt. Skrymdensitet användes sedan för att beräkna mängd jord på ett hektar, på 10 respektive 30 cm djup.

4.3 Statistik

För statistisk analys av resultat har statistikprogrammet Minitab använts. I programmet har en trevägs-ANOVA analys med generell linjär modell används för att analysera mineralkväve och fixerat kväve. Resultaten ansågs vara signifikanta då p-värdet var $<0,05$.

I modellen har mängd Total-N, NH_4^+ samt NO_3^- (kg/ha) ansetts som respons och faktorerna utgjorts av plats, behandling och tidpunkt, vid analys av mineralkväve. I programmet har även Tukey-metoden använts för att undersöka statistiska samband. Innan statistiska beräkningar genomförts har kontrollprovernas medelvärde för tidpunkt och plats räknats bort från respektive upprepning inom samma led. I analysen har två prover, från olika behandlingar (ett på Bjertorp och ett på Lanna) plockats bort på grund av förmodad felgödsling vilket gett kraftigt avvikande värden.

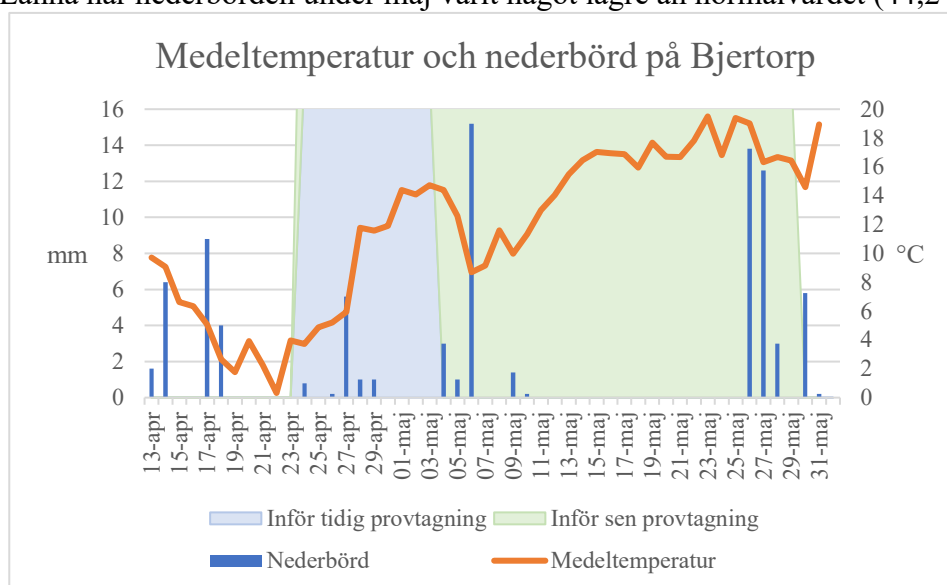
Vid statistisk analys av fixerat kväve har andel fixerat gödselkväve av total mängd fixerat kväve använts i modellen för respons och gödslingsbehandling har utgjort faktorn. På grund av stor osäkerhet i mätningar av den totala kvävekoncentrationen i proverna har endast gödselbehandling inom respektive plats och tidpunkt kunnat jämföras. Statistiska samband för fixerat kväve har även undersökts med hjälp av Tukey-metoden.

5. Resultat

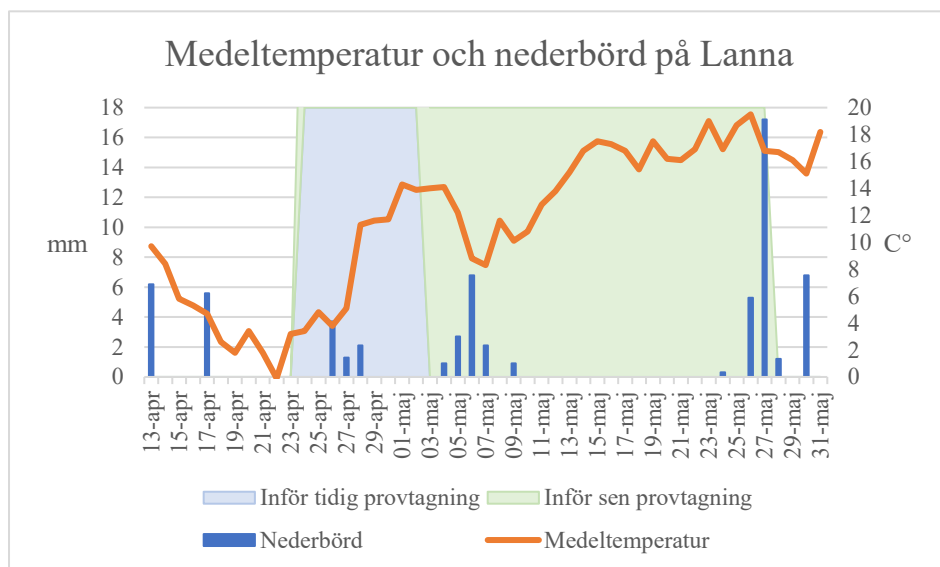
5.1 Väderförhållande under försöksperiod

Under försöksperioden har medeltemperaturen varit något varmare (15,3 °C på Bjertorp och 15,1 °C på Lanna) under maj än i genomsnitt enligt normalperioden 1991–2020 (11,3 °C), se Figur 4, Figur 5 och

Tabell 4. Likaså har mängden nederbörd på Bjertorp varit högre under maj (56,2 mm) jämfört med medelvärdet för normalperioden som ligger på 46,2 mm i maj. På Lanna har nederbörden under maj varit något lägre än normalvärdet (44,2 mm).



Figur 4. Medeltemperatur (°C) och nederbörd (mm) inför och under försöksperioden i april-maj 2024. Gödsling genomfördes den 23 april 2024. Provtagning 1 genomfördes den 3 maj och provtagning 2 den 29 maj 2024. Försöksperioderna från gödsling till respektive provtagningstillfälle är markerad i figuren med blått (inför tidig provtagning) och grönt (inför sen provtagning).



Figur 5. Medeltemperatur (°C) och nederbörd (mm) inför och under försöksperioden i april-maj 2024. Gödsling genomfördes den 23 april 2024. Provtagning 1 genomfördes den 2 maj och provtagning 2 den 28 maj 2024. Tidsperioden från gödsling till respektive provtagningstillfälle är markerad i figuren med blått (inför tidig provtagning) och grönt (inför sen provtagning).

Tabell 4. Medeltemperatur (°C) och nederbörd (mm) på Bjertorp och Lanna under försöksperiod från gödsling den 23 april fram till provtagning 1 (tidig) (Bjertorp 3/5 och Lanna 2/5), hela försöksperioden (Bjertorp 23/4–29/5 och Lanna 23/4–28/5) samt under maj månad (1–31 maj 2024) och medelvärde för 1–31 maj baserat på normalperioden 1991–2020.

Tidsperiod	Medeltemperatur (°C)		Nederbörd (mm)	
	Bjertorp	Lanna	Bjertorp	Lanna
Fram till provtagning 1	9,3	8,3	8,6	7,1
Hela försöksperiod	13,5	13,1	58,8	44,5
Maj 2024	15,3	15,1	56,2	44,2
Maj medel		11,3		46,2

5.2 Mineralkväve

Vid bestämning av den totala mängden mineralkväve (kg/ha) visade resultaten att det skilde sig mellan gödslingsbehandlingar ($p < 0,05$) och platserna ($p < 0,001$). Tidpunkt för provtagning gav inte några signifikanta skillnader. Vid parvisa jämförelser mellan de olika gödslingsbehandlingarna går det endast att signifikant skilja led behandlade med fast KS och flytande AS (Figur 6). Vid analys av enbart mätvärden från Lanna, lerjorden, visar resultat signifikanta skillnader mellan gödslingsbehandlingar ($p < 0,05$) och tidpunkt ($p < 0,01$). Medan statistisk analys av mätvärden från Bjertorp, sandjorden, enskilt inte uppvisar några signifikanta skillnader inom platsen, det finns dock liknande tendenser som på Lanna.

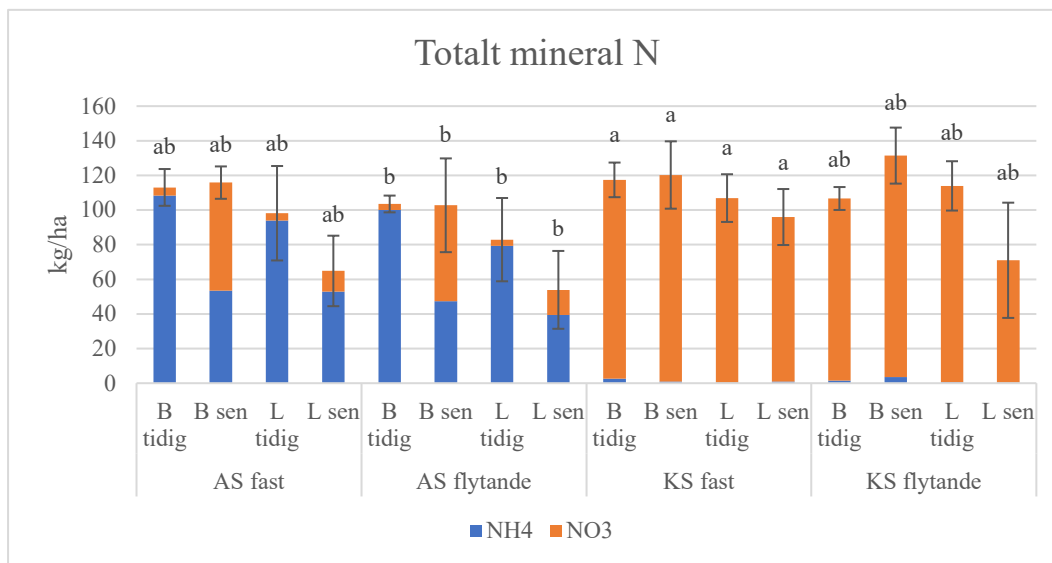
Vid analys av enbart ammoniumkväve visade resultaten på tydliga skillnader mellan gödslingsbehandlingar och de två tidpunkterna ($p < 0,001$). Däremot fanns inga skillnader mellan de två platserna. För nitratkväve visade resultaten på signifikanta skillnader för samtliga faktorer, plats ($p < 0,001$), gödslingsbehandlingar ($p < 0,001$) och tidpunkt ($p < 0,05$).

De led som är gödslade med det NH_4^+ -baserade gödselmedlet ammoniumsulfat (AS) består till störst del av NH_4^+ i mineralform vid tidig provtagning, medan mineralkvävet vid den sena provtagningen även förekommer i kväveformen NO_3^- . Det finns skillnader mellan de två platserna (jordarterna) i fördelningen av NH_4^+ och NO_3^- vid behandling med AS. På sandjorden (Bjertorp) är förhållandet mellan NH_4^+ och NO_3^- 20:1 vid tidig provtagning och vid sen provtagning ungefär 1:1 i led behandlade med AS. På lerjorden (Lanna) är den totala mängden mineralkväve i medeltal för samtliga behandlingar signifikant lägre än på sandjorden, 84,5 kg total-N/ha jämfört med 117,2 kg total-N/ha. Vid tidig provtagning på Lanna är förhållandet mellan NH_4^+ och NO_3^- i AS-leden också 20:1 medan förhållandet vid sen provtagning är 4:1 (fast) respektive 3:1 (flytande).

Den totala mängden mineralkväve på Bjertorp är ungefär lika stor oavsett provtagningstidpunkt, och gäller för alla behandlingar förutom flytande kalksalpeter (KS). För detta led skiljer sig mineralkvävemängden mellan de två tidpunkterna, där cirka 25 kg/ha mer totalkväve återfanns vid sen än tidig provtagning. På Lanna skiljer sig den totala mängden mineralkväve mellan provtagningstidpunkterna i samtliga led, då totalmängden minskar från den tidiga till den sena tidpunkten. Minskningen är minst, 11 kg/ha, i ledet med fast KS. Störst är förändringen i ledet med flytande KS, där mängden totalt mineralkväve minskar med 43 kg/ha. I leden med AS sker en minskning på cirka 30 kg/ha.

Vid jämförelse av led behandlade med KS är mängden NH_4^+ låg och mineralkvävet består huvudsakligen av NO_3^- oavsett plats och tidpunkt för provtagning. Totalmängden mineralkväve varierar mellan 71–131 kg N/ha.

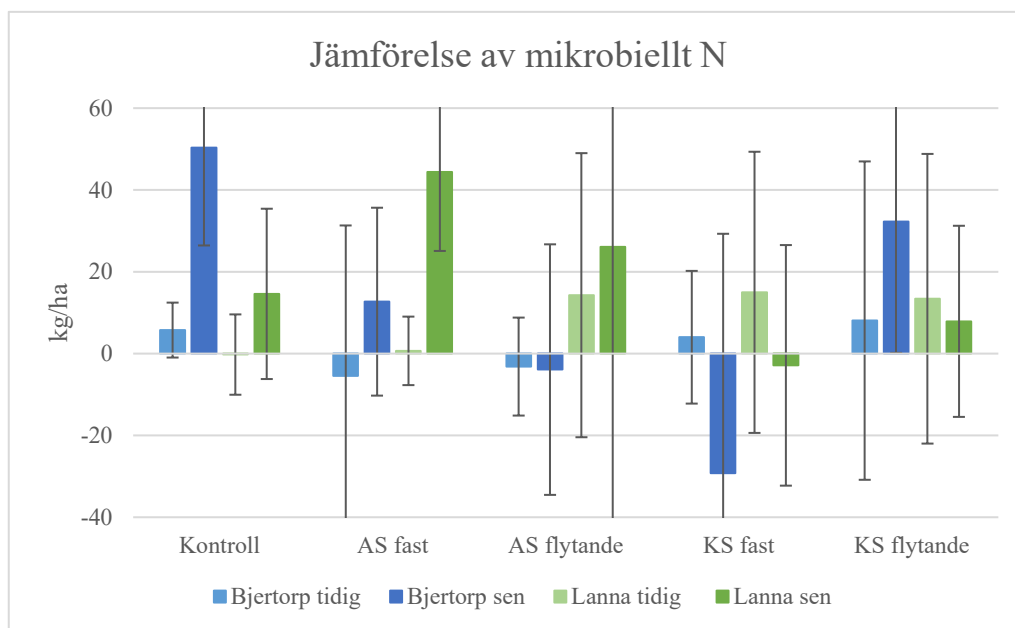
I kontrollproverna (obehandlade) på de två platserna och vid de två provtagningstidpunkterna uppmättes totalt mineralkväve till mellan 0,9–26,3 kg N/ha. På Bjertorp är variationen störst och ligger på mellan 0,9–26,3 kg N/ha medan mängden totalt mineralkväve på Lanna låg på mellan 1,0–7,4 kg N/ha i kontrollleden. På båda platserna uppmäts en högre mängd mineralkväve vid det sena provtagningstillfället.



Figur 6. Totalt mineralkväve (kg/ha) redovisat som delmängder av NH_4^+ och NO_3^- för respektive gödslingsbehandling, plats och tidpunkt. Gödslingsbehandlingarna består av fast samt flytande form av ammoniumsulfat (AS) och kalksalpeter (KS). De två platserna är Bjertorp (B) och Lanna (L). Tidpunkterna tidig (10 dagar) och sen (36 dagar) representerar de två provtagningstillfällena efter gödsling. Felstaplar visar standardavvikelsen för totalt mineralkväve och signifikans för skillnader mellan gödslingsbehandlingar ($p < 0,05$) (a, b och ab).

5.3 Mikrobiellt kväve

Resultatet för mätningarna av mikrobiellt kväve, dvs. den mängd kväve som mikroorganismer immobiliserat från gödsling till provtagning 1 och 2, visade att det inte fanns några signifikanta skillnader mellan de olika gödslingsbehandlingarna, tidpunkterna eller platserna. Mängden mikrobiellt kväve (kg/ha) är beräknat utifrån differensen i mängd kväve mellan delprovet som fumigerats och delprovet som inte fumigerats ur samma jordprov. Därefter har medelvärdet för differensen beräknats för proverna inom samma led och utgör mängden mikrobiellt kväve (Figur 7). Resultatet av denna jämförelse visar att det inte är större kvävemängd i de behandlade (fumigerade) provet än det obehandlade. En negativ mängd mikrobiellt kväve innebär att kvävemängden i det obehandlade provet var större än det behandlade. Mätningarna visar en stor variation inom respektive gödslingsbehandling, plats och tidpunkt för provtagning.



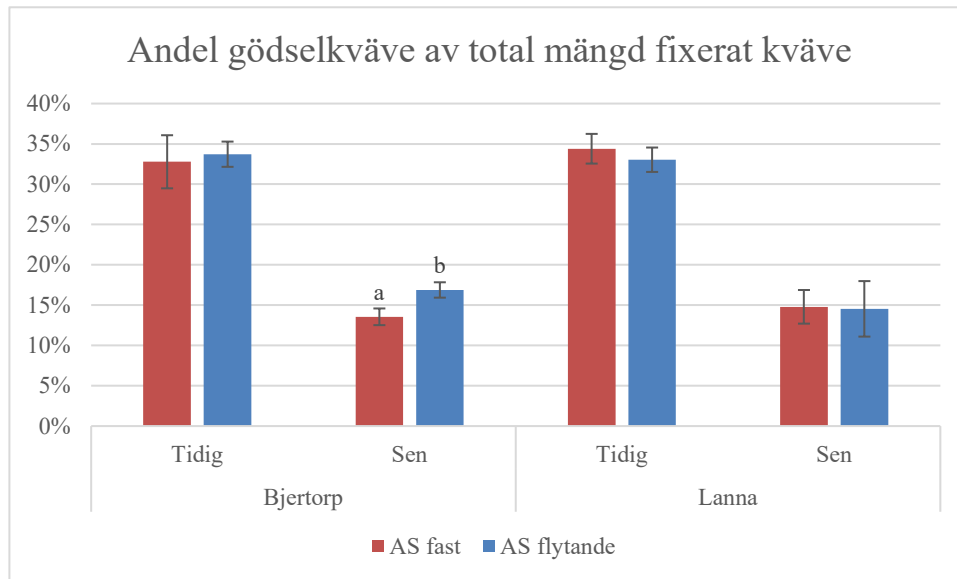
Figur 7. Mängd mikrobiellt N (kg/ha), dvs. mängd kväve som mikroorganismer immobiliserat från gödsling till provtagning 1 och 2, i olika gödslingsbehandlingar (Ammoniumsulfat, AS och Kalksalpeter, KS), platser (Bjertorp och Lanna) och tidpunkter för provtagning (tidig 10 dagar och sen 36 dagar efter gödsling). Mängden mikrobiellt kväve är beräknad utifrån differensen mellan två delprov (fumigerat och icke fumigerat) och sammanställt som medelvärde. Negativ mängd mikrobiellt kväve innebär att det obehandlade provet innehöll mer kväve än det behandlade (fumigerat). Felstaplar visar standardavvikelse.

5.4 Fixerat kväve

Proverna för bestämning av fixerat kväve visade på mycket stor osäkerhet i mätningar av den totala kvävekoncentrationen i proverna pga. alltför låga koncentrationer för mätinstrumentet. Enligt analysen innehöll proverna i led som gödslats 0,01–0,02 % kväve, vilket motsvara 100–200 mg N/kg jord. Medan kontrollproverna innehöll 0,00–0,01 % kväve, dvs. 0–100 mg N/kg jord. Detta gjorde det svårt att göra jämförelser mellan platser (Bjertorp och Lanna) och tidpunkter för provtagning (tidig och sen), eftersom den totala mängden kväve inte går att skilja. Analys av halt $15N$ möjliggjorde däremot att jämförelser kunde göras inom respektive plats och tidpunkt, dvs. AS fast och AS flytande.

I resultatet redovisas andel av totalt fixerat kväve som utgörs av gödselkväve (Figur 8). En jämförelse mellan gödslingsbehandlingarna, AS fast och AS flytande, för respektive tidpunkt och plats visar på signifikanta skillnader endast för Bjertorp vid sen provtagning, med högre andel fixerat gödselkväve för AS flytande än AS fast ($p < 0,01$). Andelen gödselkväve av den totala mängden fixerat kväve varierar mellan 0,15–0,34, vilket innebär att mellan 15–34 % av det fixerade kvävet utgörs av gödselkväve.

Vid beräkning av mängd fixerat gödselkväve (kg/ha), trots stor osäkerhet, så blir medelvärdet för samtliga prover sammanslaget (gödselbehandling, plats och tidpunkt) 54 kg/ha.



Figur 8. Andel av totalt fixerat kväve som utgörs av gödselkväve (%) på de två försöksplatserna (Bjertorp och Lanna), vid två provtagningstidpunkter (tidig och sen) och beroende på vilken gödslingsbehandling (AS fast eller AS flytande). Felstaplar redovisar standardavvikelsen och signifikans för skillnader mellan gödslingsbehandlingar ($p < 0,01$) (a och b).

5.5 Isotop ^{15}N – mineralkväve och mikrobiellt kväve

Resultat från denna del av studien sammanställs inte i rapporten, då analysresultat från laboratoriet UC Davis Stable Isotope Facility, University of California, USA blivit kraftigt försenade.

6. Diskussion

Resultaten i arbetet kan delvis ge svar på de tre frågeställningar som formulerats i arbetet och visar tendenser som tyder på att det är skillnad på hur effektivt kväve kan utnyttjas beroende på vilken kväveform som används och hur den appliceras. Till följd av viss osäkerhet i metoder, fördröjda analyssvar och avsaknad av signifikanta skillnader i vissa av resultaten går det inte att, med anledning av resultaten i detta arbete, ge något absolut svar på hur kvävet effektivitet i höstvetet påverkas av kväveform och appliceringsmetod.

6.1 Mineralkväve

Resultat för mätning av mineralkväve i formerna NH_4^+ och NO_3^- visar skillnader mellan hur mycket av de två kväveformerna samt den totala mängden mineralkväve som återfinns i profilen beroende på gödselmedelbehandling, tidpunkt efter gödsling och jordart.

Kontrollleden i försöket visar på att den initiala mängden lättillgängligt kväve på de två försöksplatserna är låg. Vid analys av mineralkväve i kontrollleden återfinns mer mineralkväve i sandjorden (0,9–26,3 mg/kg jord) än lerjorden (1,0–7,4 mg N/kg jord). Mätningarna på Bjertorp visar på en större variation än Lanna, med värden som är betydligt högre i enskilda prover än andra. Jordarten är av betydelse för hur kvävet uppehåller sig i marken och lerjorden har större bindningskapacitet än sandjorden (Eriksson et al. 2011).

I led som gödslats med ammoniumsulfat ökade mängden NO_3^- från den tidiga till den sena provtagningen på både Bjertorp och Lanna. Mängden totalkväve i mineralform bibehölls på Bjertorp medan totalmängden minskar på Lanna. Nederbörden har varit i samma storleksordning på de två försöksplatserna (Tabell 4). Detta tyder på en skillnad mellan kväveprocesser samt olika förutsättningar för hur kvävet uppehåller sig i marken beroende på jordart. Ökningen av mängd NO_3^- indikerar att det sker en nitrifikation av NH_4^+ under tidsperioden från tidig till sen provtagning. Nitrifikationen sker i båda jordarna, men i större omfattning på Bjertorp. Detta beror troligtvis på att en del av NH_4^+ binds till lermineralen via adsorption eller fixeras på Lanna, och därmed inte kan nitrifieras (Nieder et al. 2011). På Lanna är pH-värdet 7, vilket kan innebära att en del av det gödslade NH_4^+ -N omvandlas till NH_3 enligt jämviktsförhållandet. Det kan innebära att en del av minskningen av mineralkvävet på lerjorden också kan bero på ammoniakavgång (Dari et al. 2019). Syretillgången är också en viktig faktor vid nitrifikation och kan ha skiljt sig åt i de två jordarna (Eriksson et al. 2011). Inom det stora försöket har markfukt mätts i jordarna på de två platserna, men data från mätningarna har inte sammanställts ännu. Därför har det inte varit möjligt att inkludera specifik information om det i detta arbete. När mätningarna väl sammanställts kan det bidra till ytterligare förståelse för förutsättningarna på de två olika platserna.

Vid analys av mängd mineralkväve i led behandlade med kalksalpeter syns tendenser att mängd NO_3^- ökar från tidig till sen provtagning på sandjorden medan det minskar på lerjorden. En anledning till ökning av NO_3^- vid sen provtagning på sandjorden kan bero på immobilisering av kvävet vid tidig provtagning och att det sedan sker mineralisering till den sena provtagningen. Det kan även bero på att det skett en utlakning av NO_3^- från cylinder och att kvävet förflyttat sig djupare än det djup som mättes vid provtagning 1 (0–10 cm) (Chien et al. 2011). Därmed kan det vara intressant att undersöka ett djupare djup redan 10 dagar efter gödsling. Minskning av NO_3^- på lerjord tyder på denitrifikation och kan leda till eventuell förlust av kväve till atmosfären. Marken har antagligen inte varit helt vattenmättad, men i specifika aggregat kan syrebrist uppstått och medfört att denitrifikation skett (Cameron et al. 2013).

Det går inte att se någon signifikant skillnad i mängd mineralkväve beroende på om fast eller flytande kvävegödselmedel används, varken för ammoniumsulfat eller kalksalpeter. Däremot finns det signifikant skillnad i mängd uppmätt mineralkväve vid jämförelse mellan fast kalksalpeter och flytande ammoniumsulfat, där fast kalksalpeter innehåller högre mängd mineralkväve. Vid denna jämförelse har samtliga platser och tidpunkter för provtagning tagits i beaktning. Skillnaden mellan de två gödslingsbehandlingarna tyder på att kombinationen av kväveform och appliceringsmetod är avgörande för mängd mineralkväve. Det faktum att kalksalpeter innehåller NO_3^- medan ammoniumsulfat innehåller NH_4^+ , och att dessa två joner har olika egenskaper är en möjlig förklaring. Nitrat är mer lösligt och uppehåller sig i marklösningen medan NH_4^+ kan binda till markpartiklar. Det är sannolikt att de två kväveformernas, jonernas, egenskaper påverkar innehållet av mineralkväve. Detta, kväveformens betydelse, har även tidigare studier påvisat (Kuśmierz et al. 2023). Även om flytande kalksalpeter och fast ammoniumsulfat inte är signifikant skilda från varandra, eller de två tidigare nämnda gödselbehandlingarna, så finns tendenser som också styrker att kväveformen och appliceringsformen har betydelse för kväveeffektivitet. Flytande kalksalpeter ger nämligen näst högst mineralkvävemängd följt av fast ammoniumsulfat. Trenden för mängd mineralkväve tyder på att nitratbaserade gödselmedel ger högre mängd mineralkväve än ammoniumbaserade samt att applicering av fast gödselmedel ger högre än flytande gödselmedel. Det faktum att det finns signifikanta skillnader på Lanna medan det saknas på Bjertorp visar att effekterna av gödslingsbehandling är större på en ler- än sandjord.

6.2 Mikrobiellt kväve

Resultatet för mätning av mikrobiellt kväve visar en mycket stor spridning inom behandlingarna, vilket gör det svårt att urskilja tydliga skillnader mellan olika gödslingsbehandlingar, platser eller tidpunkter vad gäller immobilisering av kväve efter gödsling. Det finns flera möjliga orsaker till detta. Dels kan det bero på att immobiliseringen av kväve inte påverkas i någon större utsträckning av vilken kväveform som används eller hur den appliceras. En annan möjlig förklaring är brister i metoden som används för att bestämma mängden mikrobiellt kväve.

Vid analysen tas två delprov (cirka 12,5 g) ur varje jordprov – det ena fumigeras med kloroform medan det andra lämnas obehandlat. Därefter extraheras kvävet med kaliumsulfat, och mängden kväve i respektive delprov mäts och jämförs. Syftet med metoden är att skillnaden i kväveinnehåll mellan det fumigerade och det icke fumigerade provet ska motsvara mängden immobiliserat kväve. Dock är detta tillvägagångssätt problematiskt, eftersom det bygger på att två olika delprov ska vara representativa för samma jordprov. Trots att jorden homogeniserats genom malning och omrörning finns det en betydande risk för att delproverna skiljer sig åt. I vissa fall innehåller det fumigerade provet mer kväve, i andra fall det obehandlade, vilket antyder att resultaten påverkas av variationer mellan delproven. För att undvika detta och få säkrare resultat hade fler upprepningar med delprov ur samma jordprov behövts analyserats.

Ytterligare en förklaring kan vara att metoden inte är tillräckligt tillförlitlig – till exempel kan fumigeringen med kloroform vara ojämn i exsickatorn och att mängden kväve som frigörs i de olika proverna skiljer sig åt på grund av det. Det leder i så fall till att mängden kväve undervärderas i de fumigerade proverna. Jordarterna kan även ha betydelse för hur effektivt mikroberna lyseras och påverka resultaten (Landgraf & Scheuner 2005). Den statistiska analysen visar dock inga skillnader mellan ler- och sandjorden som kan härledas till detta. Extraktionsmedlet K_2SO_4 kan vara för svagt för att effektivt tvätta ut allt mikrobkväve. Det leder till att allt kväve inte tas med i analysen, samtidigt kan effektiviteten av extraktionsmedlet antas vara lika för proverna inom försöket. Det vill säga att även om det inte är en fullständig extraktion så extraheras lika stor andel kväve i varje prov. En annan förklaring till variationen kan vara att olika kväveformer beter sig olika i marken. Till exempel är kalksalpeter, som är nitratbaserat, mer lösligt i markvätskan än ammoniumsulfat, vilket kan ge upphov till högre kvävevärden i analysen.

6.3 Fixerat kväve

Resultat för fixerat kväve visar att fast och flytande ammoniumsulfat endast kan skiljas åt vid sen provtagning på Bjertorp (sandjord). Resterande parvisa jämförelser av fast och flytande ammoniumsulfat visar inte några tydliga skillnader. Jordarternas olika egenskaper, så som specifik yta, bindningsplatser och CEC leder till att ”mättet” *andelen gödselkväve av den totala mängden fixerat kväve* inte kan jämföras mellan platserna. Lerjordens specifika yta och CEC är högre än på sandjorden, vilket innebär att mängden NH_4^+ som kan fixeras också är större (Röing et al. 2006; Beuters & Scherer 2012). Andelen gödselkväve utgörs därmed antagligen av olika mängd gödselkväve eftersom den totala mängden fixerat kväve skiljer sig åt på jordarna.

Det finns en osäkerhet i mätvärden till följd av att anrikningen av 15N var högre än 2 % i de prover som analyserats, vilket var mätinstrumentets övre gräns. Dessutom är noggrannheten för mängd kväve per g TS-jord uttryckt i procent väldigt låg. Proverna varierar mellan 0,00–0,02 %, vilket leder till att det inte går att skilja prover från Bjertorp och Lanna åt efter att kontroll dragits bort från led med gödslingsbehandling (AS fast och AS flytande). Mer precision vad gäller mängd kväve per g

TS-jord skulle lett till ett tydligare resultat och bättre möjlighet att se eventuella skillnader mellan de två platserna. Även om noggrannheten är låg kan storleksordningen i mängd fixerat kväve jämföras med tidigare studier. Vid en sådan jämförelse stämmer mängden fixerat kväve (100-200 mg/kg jord) överens med dem 91-240 mg/kg jord (Beuters & Scherer 2012) och 55-206 mg/kg jord (Röing et al. 2006). Detta visar på att metoden för bestämning av fixerat kväve som används i denna studie fungerar tillfredställande.

Även om det finns en stor osäkerhet för resultat av mängd fixerat kväve (kg/ha) som kommer från mineralgödseln så kan medelvärdet för samtliga prover (54 kg/ha) ge en bild av i vilken storleksordning som det gödslade ammoniumkvävet fixerats. Mängden fixerat gödselkväve kan sättas i relation till den totala gödslingsgivan som bestod av 160 kg N/ha. Potentiellt kan mängden fixerat kväve motsvara en del av den minskning som syns i mineralkväve på lerjorden. Men analysen blir bristfällig eftersom det inte går att jämföra från den ena provtagningen (tidig) till den andra (sen).

6.4 Utvärdering av metoder

Det laborativa arbetet har varit tidskrävande och gett mer eller mindre tillfredsställande resultat. Analys av mineralkväve genom extraktion med KCl är en välbeprövad metod och resultaten visar mätvärden som är samlade inom varje led. Däremot är metoderna och resultaten för mikrobiellt kväve och fixerat kväve mer osäkra. Det är flera delsteg i respektive metod och de saknar tydliga synliga effekter av hur väl metoden verkar. Därmed är det först efter analys möjligt att bedöma, utifrån litteratur och tidigare kunskap, ifall resultaten är rimliga. Den mänskliga faktorn är också en potentiell felkälla och särskilt när metoderna består av många delsteg.

6.4.1 Kontaminering under arbetet

Det faktum att prover från kontrollet innehåller mer 15N, än vad som antas förekomma naturligt, i analysen av fixerat kväve tyder på att det förekommit en kontaminering av kontrollproverna. Kontamineringen kan bero på rengöring av frysmalningskvarnen inte varit tillfredställande mellan malning av olika prover. Det kan även ha skett en kontaminering i den fortsatta prepareringen och behandlingen av proverna. För att minska risken för detta skulle kontrollproverna kunna malas och behandlas först och i en franskild provomgång. En viktig aspekt är dock att proverna i de olika leden också riskerar att kontaminera varandra. För att förstå om det är aktuellt är det nödvändigt att använda kontrollprover i samtliga omgångar, som kan jämföras med de kontrollprover som isolerats och fränkskilt från alla behandlade prover.

6.4.2 Kloroforms effektivitet vid nedbrytning av mikrober

Vid analys av mikrobiellt kväve finns en stor osäkerhet kring kloroformens effektivitet och huruvida mikroberna bryts ner, som tidigare nämnts. För att få ett

tydligare gensvar på att kloroformen verkar skulle det underlätta ifall det syntes att kemikalierna reagerat med jorden, t.ex. att jorden färgades in. På så vis skulle det synliggöras att kloroform spridits i hela exsickatorn och i samtliga prover. Ett annat alternativ är att låta färre prover behandlas åt gången, men det är tidskrävande och finns risker för osäkra resultat på grund av olika provomgångar istället.

6.4.3 Diffusionsmetoden

Gemensamt för analys av ^{15}N i mineral- och mikrobiellt kväve är diffusionsmetoden. Även i denna metod finns flera möjliga felkällor, även om resultaten ännu inte analyserats. Under arbetets gång fick metoden anpassas för att hantera bl.a. låga kvävemängder och pH-värden.

I samband med preparering av prover för mikrobiellt kväve behandlades prover med Kjeldahl-analys. Detta medförde att proverna innehöll H_2SO_4 vilket gav extrakten väldigt lågt pH. I diffusionsmetoden är pH-värdet i lösningen en central del. Tillförsel av glödgad MgO medför att pH-värdet höjs vilket leder till att NH_4^+ omvandlas till NH_3 som sedan kan fångas upp i det surgjorda filterpappret. När pH-värdena var betydligt lägre, till följd av Kjeldahl-analys, krävdes större mängd glödgad MgO . Det ledde till svårighet att lösa upp tillräckligt med MgO i extrakten. Problemet löstes genom att späda extrakten i en ammoniumsulfatlösning, vilket säkerställde att proverna innehöll tillräckligt med kväve även efter spädning. Det är inte önskvärt att behandla prover olika inom en analys, men utifrån förutsättningarna var detta en bra lösning på det uppkomna problemet.

En annan utmaning och risk i diffusionsmetoden var vid riggning av fällan, som skulle fånga upp kvävet ur extrakten. När MgO tillfördes till proverna skulle en PTFE-tejp, surgjort filterpapper och ytterligare en PTFE-tejp fästas över öppningen till scintburken som sedan stängdes. Under denna tid finns risk för att kväve i form av NH_3 avgick till luften och gick förlorat. För att denna faktor skulle påverka resultatet så lite som möjligt behandlades proverna så likt som möjligt. En annan viktig faktor är huruvida allt kväve i extrakten verkligen omvandlades till NH_3 och fångades upp av filterpappret.

7. Slutsats

Denna studie visar att det finns skillnader mellan hur ammonium- och nitratbase-rade gödselmedel omfördelas i markens kvävepooler. Resultatet för mineralkväve visar tydligt att det är olika processer i marken och kväveformernas egenskaper som påverkar hur kvävet uppehåller sig i marklösningen. Jordarten är också av betydelse för dessa processer. Det styrks av att nederbörden varit liknande på de två försöks-platserna och därmed inte gett olika effekt på gödslingen.

Den statistiska analysen av gödslingsbehandlingar för mineralkväve visar att kombination av kväveform och appliceringsmetod ger upphov till skillnader mellan dem. På grund av mer otydliga och osäkra resultat för mikrobiellt och fixerat kväve går det inte att fullständigt förklara vart allt gödselkväve tar vägen. Det går att härleda att en del av gödselkvävet fixeras men inte exakt mängd. Applicerings-metoderna, fast och flytande, skiljs i detta fall endast åt i en av fyra parvisa jämförelser. Resultaten för mikrobiellt kväve antyder att varken kväveform eller appliceringsmetod är av vikt för hur gödselkvävet immobiliseras. Detta kan även bero på att metoden för analys av mikrobiellt kväve inte är tillförlitlig.

En styrka i försöket är att det är del av ett större försök på Bjertorp och Lanna, samt ytterligare två platser i Östergötland. Kombinationen av det större fältförsöket med gödselmedel utan ¹⁵N-märkning och ¹⁵N-försöket, som analyserats inom ramen för detta examensarbete, möjliggör jämförelser av fler resultat. Det möjliggör också jämförelse av olika metoder som kan visa på mer effektiva tillvägagångssätt vid mätning av kväveeffektivitet.

Sammanfattningsvis ger resultaten från de genomförda analyserna inte den helhets-bild av kvävet fördelning i markens kvävepooler som var målsättningen med arbetet. På grund av avsaknad av signifikanta skillnader, osäkerhet i delar av metoderna samt ofullständiga resultat kan endast vissa slutsatser dras från arbetet. Därför ger inte detta arbete en lika tydlig bild av att flytande gödselmedel skulle vara sämre än fasta gödselmedel, som tidigare studier visat. Det finns tendenser till skillnader, men det tycks också förklaras av vilken kväveform som gödslas.

Utifrån resultaten i arbetet skulle en lantbrukare med sandjord kunna välja att applicera kvävet i flytande form likaväl som fast. Vid liknande väderförutsättningar som i försöket kan kalksalpeter och ammoniumsulfat ge lika mycket lättillgängligt kväve, men för att vara på den säkra sidan skulle ett kombinerat gödselmedel med nitrat och ammonium vara att föredra, ifall det kommer kraftig nederbörd. Det faktum att flytande ammoniumsulfat har en signifikant högre andel kväve som fast-läggs, behöver nödvändigtvis inte betyda att det är så stor mängd kväve som fixeras på sandjorden. Därför kan lantbrukaren välja ett ammoniumbaserat gödselmedel även om hen applicerade det i flytande form. På lerjorden är fastläggning av större betydelse, det kan medföra att det tillförda kvävet inte är tillgängligt när grödan behöver det. Behöver grödan tillgodoses med kväve snabbt är kalksalpeter att föredra och fast applicering mer effektiv än flytande.

Referenser

- Beuters, P. & Scherer, H.W. (2012). Modification of the standard method for determination of non-exchangeable $\text{NH}_4\text{-N}$ in soil. *Plant, Soil and Environment*, 58 (12), 557–560. <https://doi.org/10.17221/575/2012-PSE>
- Brookes, P.C., Landman, A., Pruden, G. & Jenkinson, D.S. (1985). Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17 (6), 837–842. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)
- Buresh, R., Austin, E. & Craswell, E. (1982). Analytical methods in ^{15}N research. *Fertilizer research*, 3 (1), 37–62. <https://doi.org/10.1007/BF01063408>
- Cameron, K. c., Di, H. j. & Moir, J. l. (2013). Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Annals of Applied Biology*, 162 (2), 145–173. <https://doi.org/10.1111/aab.12014>
- Cardenas, L.M., Bhogal, A., Chadwick, D.R., McGeough, K., Misselbrook, T., Rees, R.M., Thorman, R.E., Watson, C.J., Williams, J.R., Smith, K.A. & Calvet, S. (2019). Nitrogen use efficiency and nitrous oxide emissions from five UK fertilised grasslands. *Science of The Total Environment*, 661, 696–710. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.082>
- Chien, S.H., Gearhart, M.M. & Villagarcía, S. (2011). Comparison of Ammonium Sulfate With Other Nitrogen and Sulfur Fertilizers in Increasing Crop Production and Minimizing Environmental Impact: A Review. *Soil Science*, 176 (7), 327. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31821f0816>
- Cowan, N., Levy, P., Moring, A., Simmons, I., Bache, C., Stephens, A., Marinheiro, J., Brichet, J., Song, L., Pickard, A., McNeill, C., McDonald, R., Maire, J., Loubet, B., Voylokov, P., Sutton, M. & Skiba, U. (2019). Nitrogen use efficiency and N_2O and NH_3 losses attributed to three fertiliser types applied to an intensively managed silage crop. *Biogeosciences*, 16 (23), 4731–4745. <https://doi.org/10.5194/bg-16-4731-2019>
- Dari, B., Rogers, C.W. & Walsh, O.S. (2019). Understanding Factors Controlling Ammonia Volatilization from Fertilizer Nitrogen Applications. *Idaho: University of Idaho Extension*, (BUL 926). [2025-05-24]
- Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I. & Simonsson, M. (2011). *Marklära*. 1:6. Studentlitteratur AB.
- Ferrieri, R.A., Herman, E., Babst, B. & Schueller, M.J. (2018). Managing the Soil Nitrogen Cycle in Agroecosystems. I: *Soil Nitrogen Uses and Environmental Impacts*. CRC Press.
- Fogelsson, H. (2015). *Vår Mat - Odling av åker och trädgårdsgrödor. Biologi förutsättningar och historia*. Studentlitteratur AB.
- Gruvaeus, I. (2018). Fast slog flytande kvävegödsel 2018. *Issuu*, Växtpressen nr 2 2018, 20–21
- Gruvaeus, I. (2022). Flytande kväve ger dåligt flyt. *Issuu*, Växtpressen, vol 1, 10–11
- Hauck, R.D. (1981). Nitrogen Fertilizer Effects on Nitrogen Cycle Processes. *Ecological Bulletins*, (33), 551–562
- Jordbruksverket (2023). *Gödselmedelsproduktion i Sverige*. <https://webbutiken.jordbruksverket.se/sv/artiklar/ra239.html> [2025-03-18]
- Jordbruksverket (2025). *Rekommendationer för gödsling och kalkning 2025*. <https://webbutiken.jordbruksverket.se/sv/artiklar/jo219.html> [2025-03-17]
- Kuśmierz, S., Skowrońska, M., Tkaczyk, P., Lipiński, W. & Mielniczuk, J. (2023). Soil Organic Carbon and Mineral Nitrogen Contents in Soils as Affected by Their pH, Texture and Fertilization. *Agronomy*, 13 (1), 267. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010267>

- Landgraf, D. & Scheuner, E.T. (2005). Estimation of microbial biomass nitrogen by chloroform fumigation extraction method in a forest soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 51 (5), 571–577. <https://doi.org/10.1080/03650340500133373>
- Linden, B. (2013). Metoder för förvaring och homogenisering av jordprover vid bestämning av mineralkväve. *Rapport (Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för mark och miljö)*, (11). <https://res.slu.se/id/publ/119605> [2025-01-16]
- Nguyen, M.-L., Luo, J. & Quin, B.F. (2018). The Role of Nitrogen Stable Isotopes to Investigate Soil Nitrogen Transformations and Cycling in Agricultural Systems. I: *Soil Nitrogen Uses and Environmental Impacts*. CRC Press.
- Nieder, R., Benbi, D.K. & Scherer, H.W. (2011). Fixation and defixation of ammonium in soils: a review. *Biology and Fertility of Soils*, 47 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0506-4>
- Nunes, V.L.N., Mulvaney, R.L. & Griesheim, K.L. (2019). Simple Diffusion Methods for Determination of Nonexchangeable Ammonium in Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 83 (5), 1421–1430. <https://doi.org/10.2136/sssaj2019.05.0167>
- Rütting, T., Aronsson, H. & Delin, S. (2018). Efficient use of nitrogen in agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110 (1), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9900-8>
- Röing, K., Andrén, O. & Mattsson, L. (2006). ‘Non-exchangeable’ ammonium in soils from Swedish long-term agricultural experiments: Mobilization and effects of fertilizer application. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 56 (3), 197–205. <https://doi.org/10.1080/09064710510038069>
- Sáez-Plaza, P., Michałowski, T., Navas, M.J., Asuero, A.G. & Wybraniec, S. (2013). An Overview of the Kjeldahl Method of Nitrogen Determination. Part I. Early History, Chemistry of the Procedure, and Titrimetric Finish. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 43 (4), 178–223. <https://doi.org/10.1080/10408347.2012.751786>
- Silva, J.A. & Bremner, J.M. (1966). DETERMINATION AND ISOTOPE-RATIO ANALYSIS OF DIFFERENT FORMS OF NITROGEN IN SOILS. 5. FIXED AMMONIUM. *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.*, 30: 587-94(Sept.-Oct. 1966)., <https://doi.org/10.2136/sssaj1966.03615995003000050017x>
- Sørensen, P. & Jensen, E.S. (1991). Sequential diffusion of ammonium and nitrate from soil extracts to a polytetrafluoroethylene trap for ^{15}N determination. *Analytica Chimica Acta*, 252 (1), 201–203. [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(91\)87215-S](https://doi.org/10.1016/0003-2670(91)87215-S)
- Wang, G., Yang, L., Lan, R., Wang, T. & Jin, Y. (2013). Granulation by spray coating aqueous solution of ammonium sulfate to produce large spherical granules in a fluidized bed. *Particuology*, 11 (5), 483–489. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.10.005>
- Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T.D., Dumas, P. & Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528 (7580), 51–59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>
- Zifcakova, L. (2020). Factors Affecting Soil Microbial Processes. I: Datta, R., Meena, R.S., Pathan, S.I., & Ceccherini, M.T. (red.) *Carbon and Nitrogen Cycling in Soil*. Springer. 439–461. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7264-3_13
- Öztürk, Ö. (2010). Effects of Source and Rate of Nitrogen Fertilizer on Yield, Yield Components and Quality of Winter Rapeseed (*Brassica Napus* L.). <https://hdl.handle.net/20.500.12395/24868> [2025-05-21]

Populärvetenskaplig sammanfattning

Inom växtodling vill lantbrukare åstadkomma en god lönsamhet och utnyttja de resurser som tillförs i fält på bästa sätt. När det kommer till växtnäring är ekonomi och miljö två centrala delar. Kväve är ett av de näringsämnen som tillförs i störst mängd varje växtsäsong och det näringsämne som kan verka mest skördebegränsande. Det vill säga att om grödan inte får tillräckligt med kväve så kommer skörden bli betydligt lägre. Inom forskning och rådgivning är det därför intressant att undersöka hur kväve kan tillföras på ett sätt så att näringen kommer till så stor nytta som möjligt för grödan.

Vid gödsling av kväve används vanligtvis gödselmedel som innehåller två olika former av kväve, nitrat och ammonium. Dessa två kväveformer har olika egenskaper som gör att de uppehåller sig i marken på olika vis vilket påverkar kvävet tillgänglighet. Nitrat är ett lättlösligt ämne som uppehåller sig i marklösningen. Detta gör att nitrat enkelt kan transporteras till grödans rotsystem och tas upp, men samtidigt kan kraftig nederbörd leda till att näringen i form av nitrat lakas ut och går förlorad. Ammonium å andra sidan rör sig mindre i marken på grund av att det binder till markens partiklar, detta leder till att kvävet som gödslas i form av ammonium inte är fullständigt tillgängligt för grödan. Däremot är risken för förlust vid stora vattenflöden mindre, vilket är positivt och en försäkring. Kalksalpeter är ett nitratbaserat mineralgödselmedel medan ammoniumsulfat är ett ammoniumbaserat.

Ytterligare en aspekt som lantbrukaren fattar beslut om är hur han eller hon väljer att sprida växtnäringen. Det är möjligt att sprida mineralgödselmedel i fast form eller flytande form. De olika appliceringsmetoderna kräver olika redskap. Av tradition och vana så sprids den absoluta största delen av mineralkväve i fast form i Sverige, mindre än 1 procent av kvävet sprids i flytande form. I andra länder är det desto vanligare att sprida kväve i flytande form och därför har det blivit en aktuell fråga även här i Sverige.

Aktualiseringen av frågan, ”*Vilken appliceringsmetod ska lantbrukaren använda?*”, har bidragit till svenska försök med jämförelse av kvävegödsling i fast och flytande form. Tidigare försök under 2018–2021 i Sverige och Finland har påvisat att effektiviteten är betydligt sämre för de olika mineralgödselmedlen om de appliceras i flytande form istället för fast. En hypotes är att det har med våra jordar att göra. Nu efterfrågas bättre förståelse för varför det är så här på svenska jordar.

Under våren 2024 har därför ett fältförsök genomförts på två olika jordar för att undersöka hur olika tillvägagångssätt för att tillföra kväve påverkar kvävet uppträdande i marken. Behandlingarna har antingen innehållit nitrat- eller ammoniumkväve för att också förstå kväveformens inverkan på effektivitet. Det finns flera kvävepooler i marken, former som kvävet uppehåller sig i, och de är inte alla tillgängliga för grödan att ta upp. Analyser av mängd lättillgängligt kväve (mineralkväve), kväve som mikroorganismer i marken tar upp (mikrobiellt kväve) och kväve som fastläggs i marken (fixerat kväve) kan ge en bättre förståelse för vart det gödslade kvävet tar vägen. För att möjliggöra detta används isotopmärkning av

gödseln. Det innebär att gödselmedlet anrikas med isotop ^{15}N , en variant av kväve som finns naturlig men i mycket mindre mängd än den vanligaste isotopen ^{14}N . Tack vare anrikningen kan det kväve som upptäcks i analyserna härledas till om det kommer från gödselmedlet eller inte.

Resultaten i studien visar att appliceringsmetod och kväveform är av betydelse för mängd lättillgängligt kväve. Kalksalpeter i fast form bidrar till mest lättillgängligt kväve och flytande ammoniumsulfat till minst. Metoden som använts för analys av mikrobiellt kväve har inte gett några tydliga resultat och skulle behöva utvärderas med hjälp av fler upprepningar för att eventuellt kunna ge en bättre förståelse. Analysen av fixerat kväve visar endast att flytande ammoniumsulfat fixeras i större utsträckning än fast ammoniumsulfat på sandjorden vid sen provtagning. Detta antyder att det är sämre kväveutnyttjande vid applicering av ammoniumsulfat i flytande form jämfört med fast ammoniumsulfat.

Sammanfattningsvis så visar denna studie inte lika stora skillnader mellan de två appliceringsmetoderna som tidigare försök. Kombinationen av appliceringsmetod och kväveform är emellertid av betydelse för hur tillgängligt kvävet är. Med de väderförhållande som var under försöksperioden fungerar kalksalpeter och ammoniumsulfat lika bra, och på sandjord kan alla gödslingsbehandlingar tillämpas. På lerjord är fixering av kvävet en mer aktuell fråga och kalksalpeter i fast form ger signifikant mer lättillgängligt kväve än flytande ammoniumsulfat. Nitratbaserat gödselmedel är att föredra om grödan ska tillgodoses med kväve på kort sikt.

Tack

Först och främst ett stort tack till min handledare Karin Hamnér, din handledning och stöttning har varit ovärderlig. Det har varit lärorikt och kul att jobba tillsammans med dig i förberedelser, laborationsmoment och vid bearbetning av data. Tack även till min biträdande handledare Sofia Delin som hjälpt mig med bakgrundinformation om försöket och försöksplatserna samt med beräkningar och tolkningar av resultat. Jag vill också tacka Ingemar Gruvaeus som varit behjälplig med underlag från tidigare försök och aktuell information gällande gödselmedelsanvändning i Sverige och Europa. Avslutningsvis vill jag tack min familj och vänner som funnits med under arbetets gång med uppmuntrande ord, lyssnande öron och hejarop.

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU kan publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver i sådana fall godkänna publiceringen. I samband med att du godkänner publicering kommer SLU även att behandla dina personuppgifter (namn) för att göra arbetet sökbart på internet. Du kan närsomhelst återkalla ditt godkännande genom att kontakta biblioteket.

Även om du väljer att inte publicera arbetet eller återkallar ditt godkännande så kommer det arkiveras digitalt enligt arkivlagstiftningen.

Du hittar länkar till SLU:s publiceringsavtal och SLU:s behandling av personuppgifter och dina rättigheter på den här sidan:

- <https://libanswers.slu.se/sv/faq/228316>

☒ JA, jag, Clara Kihlstrand har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta

☐ NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse till att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.