



# Applicering av kväve i fast och flytande form

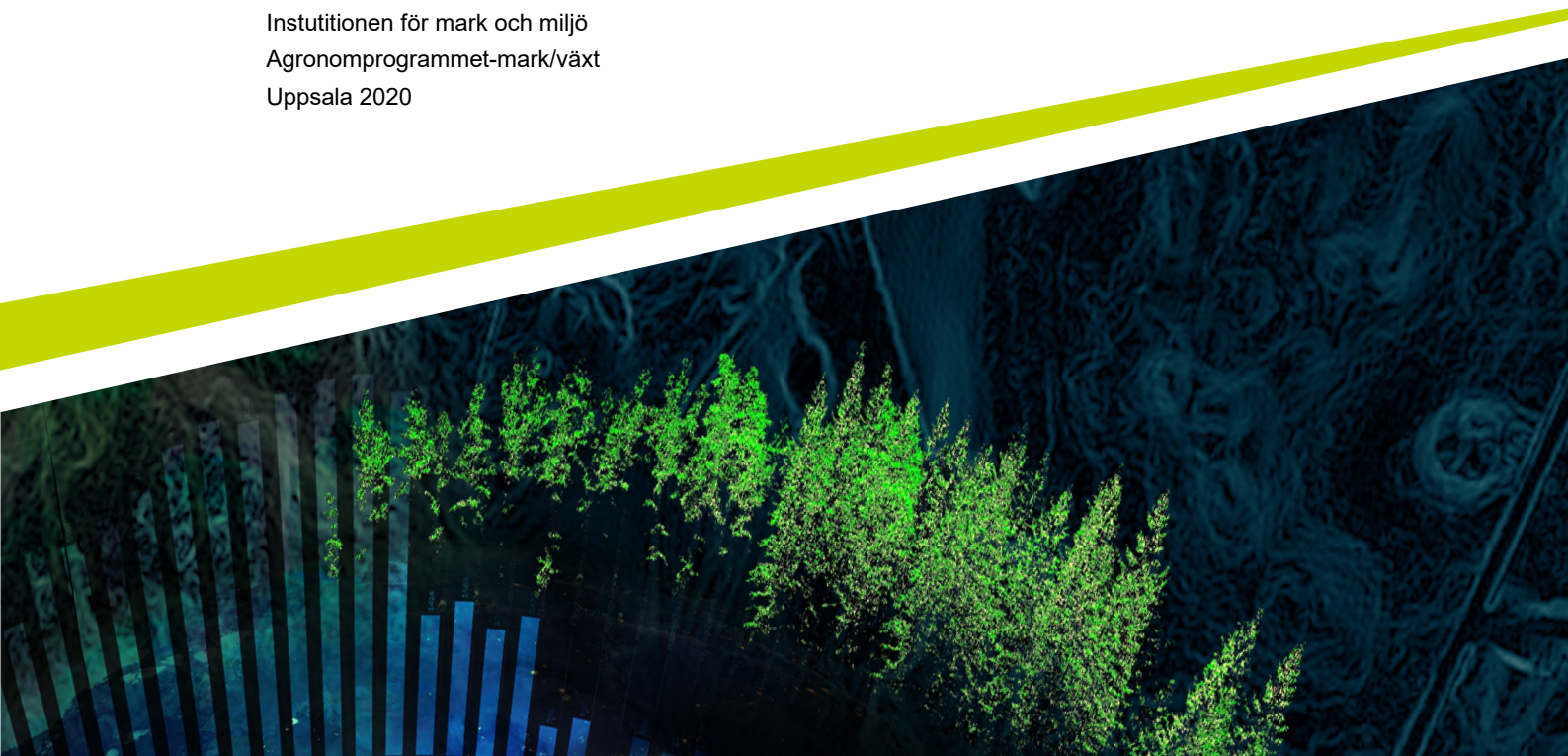
– Effekt på växttillgänglighet i åkermark

---

*Application of nitrogen in solid and liquid form  
-Effect on plant availability in arable soil*

Elizabeth Lövstaf

Examensarbete/Självständigt arbete • 30 hp  
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU  
Institutionen för mark och miljö  
Agronomprogrammet-mark/växt  
Uppsala 2020





# Applicering av kväve i fast och flytande form – Effekt på växttillgänglighet i åkermark

*Application of nitrogen in solid and liquid form and the effect on plant availability in arable land*

Elizabeth Lövfstaf

<b>Handledare:</b>	Karin Hamnér, Sveriges Lantbruksuniversitet, institutionen för mark och miljö
<b>Bitr. handledare:</b>	Ingemar Gruvaeus, Yara Sverige
<b>Examinator:</b>	Johanna Wetterlind, Sveriges Lantbruksuniversitet, institutionen för mark och miljö
<b>Omfattning:</b>	30 hp
<b>Nivå och fördjupning:</b>	A2E
<b>Kurstitel:</b>	Självständigt arbete i Markvetenskap, A2E - Agronomprogrammet - mark/växt
<b>Kurskod:</b>	EX0881
<b>Program/utbildning:</b>	Agronomprogrammet-mark/växt 270hp
<b>Kursansvarig inst.:</b>	Mark och miljö
<b>Utgivningsort:</b>	Uppsala
<b>Utgivningsår:</b>	2020
<b>Nyckelord:</b>	Kvävegödsel, ammoniumfixering, fast gödselmedel, flytande gödselmedel, nitrat, ammonium, regnsimulering

**Sveriges lantbruksuniversitet**

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap  
Institutionen för mark och miljö

## Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Fulltexten kommer dock i samband med att dokumentet laddas upp arkiveras digitalt.

Om ni är fler än en person som skrivit arbetet så gäller krysset för alla författare, ni behöver alltså vara överens. Mer information om publicering och arkivering går att hitta här: <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

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

## Sammanfattning

Kvävegödselmedel är det mest använda gödselmedlet i Sverige till följd av dess goda effekter på en grödas kvalitet och avkastning. Tillförsel av kväve (N) görs vanligen i formerna nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) och ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), gärna i kombination med andra näringsämnen. Fältförsök i vete har visat en högre N-effektivitet vid användning av N-gödselmedel i fast form jämfört med flytande form. Vad som orsakar de här skillnaderna är inte fastställt. Syftet med den här uppsatsen var att undersöka vilka mekanismer som kan inverka på att flytande gödselmedel ger upphov till lägre N-effektivitet, med fokus på ammoniumfixeringens inverkan. Ett experiment utfördes på lerjord där två olika gödselmedel, ett ammoniumbaserat (NS 21–24) och ett nitratbaserat (Kalksalpeter), applicerades i fast och flytande form som sedan behandlades med simulerat regn av olika intensitet under en period på 17 dagar. Under experimentets gång utfördes salthaltsmätningar för att uppskatta mobiliteten av gödselmedlen. Jordproverna skickades därefter på extraktionsanalys för att mäta halterna av mineralkväve (min-N) i proverna med  $\text{CaCl}_2$  samt  $\text{KCl}$  som extraktionsmetoder. Resultatet visade att intensiv nederbörd direkt på torr jord förstärkte skillnaderna mellan fast och flytande gödsel. Fast gödselmedel gav högre min-N än flytande gödselmedel oavsett N-form. Kalksalpeter gav högre min-N än NS 21–24 i alla behandlingarna. Resultaten stärker tidigare studiers indikationer på att skillnader mellan fast och flytande kvävegödselmedel faktiskt existerar. Utifrån resultaten i den här studien går det att utesluta ammoniumfixeringens inverkan på skillnaderna mellan fast och flytande N-gödselmedel och orsaken till skillnaderna har inte kunnat fastställas. Salthaltsmätningarna indikerade också att skillnaderna som uppstod mellan fast och flytande gödselmedel i det här experimentet skedde de första två dagarna. Vidare studier kan med fördel göras under en kortare tidsperiod och undersöka andra möjliga processer som t.ex. immobilisering.

*Nyckelord:* Fast gödselmedel, Flytande gödselmedel. Ammonium, Nitrat, Ammoniumfixering, regnsimulering

## Abstract

Nitrogen fertilizers are well established as the most used fertilizer in Sweden due to its improvement in crop yield and quality. Field trials in Sweden on wheat have shown higher nitrogen use efficiency (NUE) when nitrogen fertilizer is applied in solid form in comparison to liquid form. The reason for the differences is not fully understood. This thesis aimed to examine the mechanisms that influence lower NUE for liquid nitrogen fertilizer with a focus on ammonium fixation. An experiment on clay soil was performed with two different nitrogen fertilizers: one ammonium-based (NS 21-24) and one nitrate-based (Kalksalpeter). These were applied in solid and liquid form respectively and were then exposed to simulated rain with different intensity during a period of 17 days. During the experiment salinity measures were made to estimate the mobility of the different fertilizers. After 17 days the soil samples were extracted with KCl and CaCl<sub>2</sub> as extraction methods and analyzed for mineral-N content in the samples. The results showed that intense precipitation on fertilized dry soil increased the differences between solid and liquid fertilizer. Solid fertilizer gave higher N-recovery than liquid fertilizer regardless of nitrogen form. In addition, Kalksalpeter displayed higher N-recovery than NS 21-24 irrespective of the application form. These results reinforce previous studies that differences between solid and liquid nitrogen fertilizers exist. Based on the results of this study, it is possible to exclude the effect of ammonium fixation on the differences between solid and liquid fertilizer. Salinity measurements also indicated that the differences between solid and liquid fertilizer occurred in the first two days. Further studies can be made during a shorter period and investigate other possible processes, e.g. immobilization.

*Keywords:* Liquid fertilizer, Solid fertilizer, Ammonium, Nitrate, Ammonium fixation, rain simulation

## Populärvetenskaplig sammanfattning

Kvävegödselmedel har haft en avgörande betydelse i jordbruket för att kunna producera den mängd mat som behövs för att försörja en växande befolkning. Till följd är kvävegödsel det mest använda gödselmedlet i Sverige. Däremot kan för hög tillförsel av gödselmedel innebära konsekvenser på miljön till följd av kväveläckage till sjöar och vattendrag. Höga halter av kväve i sjöar och hav leder till övergödning med en negativ påverkan på natur och djurliv såväl som kvaliteten på dricksvatten. Jordbruket står inför stora utmaningar, som ska tillgodose en hög produktion av föda och samtidigt ta hänsyn till de krav som ställs för att minska miljöpåverkan. Det läggs mycket vikt på att utveckla kunskap för att optimera gödslingen, där så lite gödsel som möjligt ska kunna tillföras och fortfarande ge en god effekt på grödans tillväxt. Tidigare studier har indikerat att vid användning av flytande kvävegödselmedel minskar grödans skördar i jämförelse med motsvarande fast kvävegödselmedel. Vad som skulle ge upphov till de här skillnaderna är inte helt förstått. Syftet med den här uppsatsen var att undersöka vilka mekanismer som kan inverka på att flytande gödselmedel ger upphov till lägre kväveeffektivitet, med fokus på ammoniumfixeringens inverkan. Ammoniumfixering binder in ammoniumkväve mellan lermineraler vilket gör växtnäringen otillgänglig för grödor. Svenska jordar har generellt goda förutsättningar för fixering, då de ofta har en hög andel lermineraler med fixeringspotential. Huruvida ammoniumfixeringen kan skilja sig mellan fast och flytande mineralgödselmedel är inte undersökt i svenska studier, men det skulle kunna ha en betydande roll i förklaringen till varför flytande gödselmedel visat på sämre kväveeffektivitet i fältförsök på svenska jordar.

Ett experiment utfördes på lerjord där två olika gödselmedel, ett ammoniumbaserat (NS 21–24) och ett nitratbaserat (Kalksalpeter), applicerades i fast och flytande form som sedan behandlades med simulerat regn av olika intensitet under en period på 17 dagar. Under experimentets gång utfördes salthaltsmätningar för att uppskatta transporten av gödselmedlen i jorden. Jordproverna skickades därefter på extraktionsanalys för att mäta halterna av kväve i proverna med  $\text{CaCl}_2$  samt  $\text{KCl}$  som extraktionsmetoder. Resultatet visade att intensiv nederbörd direkt på torr jord förstärkte skillnaderna mellan fast och flytande gödsel. Fast gödselmedel gav högre halter kväve än flytande gödselmedel. Kalksalpeter gav högre mineralkväve än NS 21–24 i alla behandlingarna. Resultaten stärker tidigare studiers indikationer på att skillnader mellan fast och flytande kvävegödselmedel faktiskt existerar. Då det nitratbaserade gödselmedlet påvisade samma effekt för fast och flytande applicering som det ammoniumbaserade gödselmedlet, går det att utesluta ammoniumfixeringens inverkan på skillnaderna mellan appliceringsformerna. Orsaken till skillnaderna mellan fast och flytande applicering har inte kunnat fastställas i den här studien. Salthaltsmätningarna indikerade också att skillnaderna som uppstod mellan fast och flytande gödselmedel i det här experimentet skedde de första två dagarna. Vidare studier kan med fördel göras under en kortare tidsperiod och undersöka andra möjliga processer som t.ex. immobilisering.





# Innehållsförteckning

<b>1. Inledning</b> .....	<b>11</b>
1.1. Syfte och mål.....	12
<b>2. Bakgrund</b> .....	<b>14</b>
2.1. Kväveprocesser i marken.....	14
2.1.1. Kvävefixering.....	14
2.1.2. Ammoniakavgång.....	14
2.1.3. Mineralisering och immobilisering.....	15
2.1.4. Nitrifikation.....	16
2.1.5. Denitrifikation.....	16
2.1.6. Ammoniumfixering och defixering.....	17
2.2. Kvävet transport i marken.....	18
2.3. Upptag av kväve i växten.....	19
2.4. Kvävegödselmedel och effekter av gödsling.....	20
2.4.1. Produktion och innehåll.....	20
2.4.2. Kväveform och applicering av gödselmedel.....	22
2.4.3. Ammonium- respektive nitratbaserade gödselmedel och påverkan på växtupptag och markprocesser/markförhållanden.....	22
2.4.4. Fast kontra flytande appliceringsform.....	23
2.4.5. Ammoniumfixering vid kvävegödsling.....	24
2.5. Analysmetoder för kväve i mark.....	24
<b>3. Material och metoder</b> .....	<b>26</b>
3.1.1. Utformning av experiment, utrustning, kemikalier.....	26
3.1.2. Utförande.....	28
3.1.3. Analyser.....	29
3.1.4. Beräkningar.....	30
3.1.5. Statistisk analys.....	30
<b>4. Resultat</b> .....	<b>32</b>
4.1. Inverkan av extraktionsmetoder.....	32
4.2. Återfunna mängder mineralkväve.....	34

4.3.	Marktransport .....	36
4.4.	Salthaltsmätningar .....	38
<b>5.</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>40</b>
5.1.	Appliceringsformens inverkan på tillgänglighet och marktransport.....	40
5.1.1.	Appliceringsformens inverkan på ammoniumfixering .....	41
5.1.2.	Appliceringsformens inverkan på immobilisering .....	42
5.1.3.	Appliceringsformens inverkan på nitrifikation och denitrifikation .....	43
5.1.4.	Appliceringsformens inverkan på ammoniakavgång .....	44
5.2.	Utvärdering av metod .....	44
5.3.	Inverkan av extraktionsmetod vid tolkning av resultatet.....	45
5.4.	Framtida forskning .....	46
<b>6.</b>	<b>Slutsatser .....</b>	<b>47</b>
	<b>Referenser.....</b>	<b>48</b>
	<b>Tack .....</b>	<b>56</b>
	<b>Appendix I .....</b>	<b>57</b>
	<b>Appendix II .....</b>	<b>58</b>
	<b>Appendix III .....</b>	<b>60</b>
	<b>Appendix IIII .....</b>	<b>63</b>

# 1. Inledning

Alla essentiella näringsämnen har en betydande roll för en grödas tillväxt och reproduktion, men kvävet (N) är det näringsämne som behövs i störst kvantitet hos växter (Jordbruksverket 2019). Kväve är involverat i flera livsviktiga fysiologiska processer hos grödan och är bland annat en komponent i aminosyror, proteiner, klorofyll, co-enzymmer (Marschner 2012) och har en central roll i grödans fotosyntetiserande förmåga (Delgado et al. 1994). Vid brist på N kan skörden bli markant lägre till följd av bristsymtom som hämmad bladtillväxt, kloroser, underutvecklade rötter och för stråsäd även leda till lägre proteinhalt i kärnan (Wang et al. 2011). God tillgång på N är viktigt för att få en frisk gröda, däremot kan det ur ett växtproduktionsperspektiv finnas nackdelar med för hög N-tillgång i relation till grödans behov. Det kan orsaka liggsäd hos vete (Crook & Ennos 1995), skördarna ökar inte längre signifikant och N-effektiviteten blir sämre med risk för ökat läckage till omgivandemiljön och försämrade ekonomi för lantbrukaren (Ma et al. 2019).

Kvävets betydelse för växtproduktionen är något som syns på marknaden för handelsgödsel i Sverige, då N är det mest sålda näringsämnet i mineralgödsel (Wahlstedt 2019). Vilken applikationsform av N-gödsel som ger bäst resultat på skördarna har länge varit ett omdiskuterat ämne. I den litteratur som finns tillgänglig går det att hitta studier som kan dra slutsatsen att flytande gödselmedel är bättre än den fasta motsvarigheten (Holloway et al. 2001; Lombi et al. 2004). Andra påstår att det inte finns någon skillnad alls såvida de appliceras under samma förhållanden (Michigan State University 2018; Johnson 1999). Fältförsök utförda de senaste åren av Yara och Hushållningssällskapet har däremot visat att fast N-gödselmedel gett en högre N-effektivitet än den flytande motsvarigheten (Yara 2018; Gruvaeus 2019; Jönsson 2018). Vad det är som skulle ge upphov till skillnaderna i N-effektivitet mellan flytande och fast N-gödsel är inte fastställt då många faktorer kan inverka vid applicering av gödselmedel i fält.

Olika N-form kan ha en betydelse för skillnaderna mellan fast och flytande applicering. Gödselmedel med högre andel ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) har visat tendenser till att vara en bidragande faktor till lägre N-effektivitet hos grödan vid jämförelse med nitratgödselmedel. Detta har kunnat påvisas i flera fältförsök på lerjordar men vilka effekter olika N-form får på N-effektiviteten kan variera mellan jord och

klimatförhållanden (Gruvaeus 2018; Yara 2019). Vid applicering av N-gödsel som innehåller  $\text{NH}_4^+$  har studier visat att  $\text{NH}_4^+$ -fixering och defixering kan ha betydelse för andelen tillgängligt N i marklösningen (Ahmad et al. 1982; Liang & MacKenzie 1994). Huruvida  $\text{NH}_4^+$ -fixeringen kan skilja sig mellan flytande och fasta mineralgödselmedel är inte undersökt i svenska studier, men det skulle kunna ha en betydande roll i förklaringen till varför flytande gödselmedel har visat på sämre N-effektivitet i fältförsök på lerjordar. I den här uppsatsen undersöktes skillnaderna i tillgänglighet och transport för  $\text{NH}_4^+$  och  $\text{NO}_3^-$  vid applicering av fast och flytande N-gödsel, med fokus på  $\text{NH}_4^+$ -fixeringens betydelse för detta.

Förbättrade kunskaper om hur N-upptaget i grödan påverkas av gödselmedlets form och applicering är viktigt för att optimera skördarna. Genom att undersöka mekanismerna som kan ge upphov till skillnader mellan olika gödselmedel och appliceringsformer, kan den här uppsatsen förhoppningsvis bidra med en större förståelse för skillnader i N-effektivitet hos grödan vid användning av fast eller flytande gödselmedel.

## 1.1. Syfte och mål

Syftet med den här studien var att undersöka mekanismerna bakom resultat från tidigare fältstudier som indikerar att N-effektivitet, och skörd av höstvet, blir försämrade om N tillförs i flytande form jämfört med fast form i svenska försök.

Målen med den här studien var att:

- i. Skapa en förståelse för de mekanismer som påverkar transport och växttillgänglighet i åkermark vid tillförsel av mineral-N i fast respektive flytande form.
- ii. Undersöka betydelsen av  $\text{NH}_4^+$ -fixering vid applicering av N i fast respektive flytande gödselmedel.

Utifrån de här målen och den tillgängliga litteraturen utformades följande hypoteser:

- i. Tillförsel av N i flytande form ökar kontaktytan med leraggregat, vilket leder till minskad marktransport av N till rotzonen i jämförelse med motsvarande tillförsel av N i fast form.

- ii. Applicering av N-gödselmedel till en torr jord med efterföljande låg nederbörd som får torka upp innan intensiv nederbörd, medför en ökad  $\text{NH}_4^+$ -fixering i aggregat i jämförelse med tillförelse av N gödselmedel till en fuktig jord.
- iii. Skillnaderna mellan fast och flytande applicering uppstår i det översta centimetrarna.

## 2. Bakgrund

### 2.1. Kväveprocesser i marken

Kvävets form och transport genom marken påverkas av många olika faktorer och det är ett komplext samspel mellan kemiska, biologiska och fysikaliska processer som tillsammans utgör kvävet kretslopp (Eriksson et al. 2011). För jordbruket är kunskapen om N processer i marken viktig för att öka grödans näringsupptag och N-effektivitet. Vissa processer såsom defixering, mineralisering och nitrifikation ökar tillgängligheten av N till grödorna medan andra såsom denitrifikation, ammoniakavgång immobilisering, adsorption, läckage och ammoniumfixering leder till en förlust av N eller gör att det blir otillgängligt för grödorna. Det är flera faktorer som inverkar på kvävet transportvägar såsom textur, jordens sammansättning, fysikaliska och kemiska egenskaper och biologisk aktivitet.

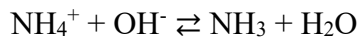
#### 2.1.1. Kvävefixering

Kvävgas ( $N_2$ ) i atmosfären binds in till marken genom N-fixering av bakterier och arkeer som omvandlar det till ammoniak ( $NH_3$ ) genom reduktion (Eriksson 2011). Det sker framförallt i symbios med baljväxter tillsammans med bakterier från släktet *Rhizobium spp* eller andra växtarter som lever i symbios med bakterier från släktet *Frankia*. Kvävefixeringen förekommer även genom icke symbiotiska bakterier som *Azobacter* och *Azospirillum*. Fixeringen minskar vid höga halter av min-N i marken. Kvävefixeringen är en energikrävande process för växten och de tar därför lättare upp oorganiskt N direkt från marklösningen när det finns tillgängligt.

#### 2.1.2. Ammoniakavgång

Ammoniak ( $NH_3$ ) är vid normalt atmosfärstryck en flyktig gas som snabbt kan avgå från markytan till atmosfären (Freney et al. 1981). Till följd av sin reaktiva natur reagerar  $NH_3$  snabbt med andra molekyler i marken och bildar joner, föreningar och

komplex som är mer eller mindre stabila i fast och löslig form. Vid kontakt med marklösningen omvandlas  $\text{NH}_3$  till ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) som blir tillgängligt för mikroorganismer och växter i marklösningen eller binds in till jordpartiklar såsom lermineral och organiskt material (Eriksson et al. 2011). I marklösningen förekommer  $\text{NH}_3$  och  $\text{NH}_4^+$  i ett jämviktssystem enligt följande reaktion:



Ammoniakavgången påverkas till hög grad av det här jämviktssystemet där högre koncentrationer av  $\text{NH}_3$  i marklösningen leder till större  $\text{NH}_3$ -förluster till atmosfären (Dari et al. 2019; Freney et al. 1981). Faktorer som inverkar på jämvikten är framförallt pH i marklösningen då ett högt pH ( $> 7,0$ ) förskjuter jämvikten till ökad produktion av  $\text{NH}_3$ . Jordens textur och buffrande förmåga spelar stor roll för förluster av  $\text{NH}_3$ . En hög katjonbyteskapacitet (eng. "Cation exchange capacity", CEC) är ofta förknippat till lägre förluster eftersom det korrelerar med hög lerhalt och organiskt material vilka dels kan motverka snabba pH-förändringar, dels adsorbera  $\text{NH}_4^+$ -jonen till lerpartiklarna som då inte blir tillgängliga för reaktioner. Även vattenhalten i jorden har en betydelse för förluster av  $\text{NH}_3$  där förhållanden som gynnar evaporation också gynnar avdunstning av  $\text{NH}_3$  (Gardner 1965). En högre vattenhalt ökar dessutom transporten av  $\text{NH}_4^+$  till markytan där förlusterna kan ske.

### 2.1.3. Mineralisering och immobilisering

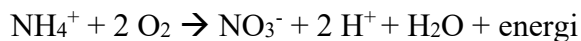
Den biotiska process där mikroorganismer bryter ned organiskt bundet N i organiska gödselmedel, växtrester och andra organiska material till oorganiskt N i form av  $\text{NH}_4^+$  kallas mineralisering (Eriksson et al. 2011). Den omvända processen där mikroorganismer istället binder in oorganiskt N för tillväxt kallas för immobilisering. Processerna pågår ständigt samtidigt enligt följande reaktion:



Beroende på omgivande faktorer kan dessa faktorer över tid leda till nettoimmobilisering eller nettomineralisering. Det är biotiska processer som påverkas av flera faktorer, såsom temperatur, fukthalt i marken och mängden syre ( $\text{O}_2$ ) som finns tillgängligt i marken. Processerna påverkas framförallt av mängden N och kol (C) i jorden, där generellt sett en C/N-kvot över 20 resulterar i en nettoimmobilisering medan en C/N-kvot under 20 leder till nettomineralisering av N.

## 2.1.4. Nitrifikation

Ammoniumjoner som finns i marklösningen oxideras oftast snabbt till  $\text{NO}_3^-$  genom nitrifikationen. Processen är aerob och kan delas upp i två delsteg; omvandlingen av  $\text{NH}_4^+$  till nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) och därefter  $\text{NO}_2^-$  till  $\text{NO}_3^-$ . Vid första steget i processen kan det, utöver nettoproduktionen av  $\text{NO}_2^-$ , förekomma produktion av lustgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) som en biprodukt (Ward 2008). De olika stegen utförs av olika sorters aeroba mikroorganismer som gemensamt kallas för nitrifierare (Eriksson et al. 2011). Genom att oxidera N frigörs energi. Autotrofa mikrober använder energin för att fixera  $\text{CO}_2$  medan heterotrofa använder den för att fixera in C från organiskt material. Kolet binds in för att bygga biomassa. Eftersom de är aeroba används  $\text{O}_2$  som slutlig elektronacceptor i respirationen. Den sammansatta reaktionen ser ut enligt följande:



I den svenska åkermarken dominerar bakteriesläktena *Nitrosospira* vid omvandlingen av  $\text{NH}_3$  till  $\text{NO}_2^-$  medan *Nitrobacter* och *Nitrospira* dominerar vid omvandlingen av  $\text{NO}_2^-$  till  $\text{NO}_3^-$  (Eriksson et al. 2011). Mikroorganismerna som är inblandade i processen påverkas av temperatur, fukthalt, pH samt tillgängligheten av  $\text{NH}_4^+$  och  $\text{O}_2$  i marken. Nitrifikationsprocessen avtar i takt med en lägre temperatur och tillgång på  $\text{O}_2$  (Sahrawat 2008). Optimal temperatur verkar delvis bero på klimatet men generellt gynnar en temperatur mellan 25–35 °C en hög nitrifikation. Optimalt pH-värde ligger mellan 8–9 då det finns mer  $\text{NH}_3$  tillgängligt.

## 2.1.5. Denitrifikation

Vid syrefattiga markförhållanden som exempelvis i vattenmättade eller kompakterade jordar kan anaeroba mikroorganismer, framförallt bakterier och arkeér, omvandla  $\text{NO}_3^-$  till kvävgas ( $\text{N}_2$ ) som avgår från marken till atmosfären (Eriksson et al. 2011). Processen kallas denitrifikation och sker i flera steg enligt följande reaktion:



Denitrifikationen är en anaerob process vilket innebär att mikroorganismerna använder  $\text{NO}_3^-$  istället för  $\text{O}_2$  som elektronacceptor. Processen är energikrävande till skillnad mot nitrifikationen och gynnas om det finns energirika organiska föreningar tillgängligt. Många av denitrifierarna är fakultativa anaerober vilket innebär att de kan utföra nitrifikationsprocessen när det finns tillgängligt  $\text{O}_2$  i marken och därmed spara energi. Men när markförhållandena förändras och det uppkommer brist på  $\text{O}_2$  har de förmågan att använda  $\text{NO}_3^-$  istället för  $\text{O}_2$  som



elektronacceptor i respirationen. En mellanprodukt i denitrifikationen är  $N_2O$  och till följd av att vissa denitrifierare saknar genen för att utföra hela processen, men även på grund av miljöfaktorer såsom lågt pH kan det leda till att hela denitrifikationen inte fullföljs och  $N_2O$  frigörs till atmosfären (Hallin et al. 2018; Philippot et al. 2011).

Processen påverkas till stor del av mängden organiskt material i jorden, tillgängligheten av  $NO_3^-$ , pH, vattenhalten och temperaturen (Eriksson 2011; Prado et al 2006). Tillfälliga miljöförändringar som ett intensivt regnfall kan skapa variationer av aeroba och anaeroba zoner i det övre markskiktet vilket gynnar möjligheterna för denitrifikation och nitrifikation att ske samtidigt (Abbasi & Adams 2000). Det här kan dessutom leda till en tillfällig ökning av  $N_2O$ -utsläpp till följd av stimulering av mineralisering tillsammans med en förändring i gasdiffussionen. Ett vanligt antagande är att N utsläpp från nitrifikation vanligast förekommer vid 50–60% vattenfyllda porer medan lustgasutsläpp från denitrifikation förekommer vid mer än 60% vattenfyllda porer (Davidson et al. 1991; Laville et al 2011).

### 2.1.6. Ammoniumfixering och defixering

En abiotisk faktor som påverkar transport av  $NH_4^+$  och dess tillgänglighet för grödor i marken är  $NH_4^+$ -fixering. Ammoniumfixering definieras som ”adsorption eller absorption av  $NH_4^+$ -jonen till jordens mineral och organiska fraktioner, på ett sådant sätt att de inte är lätt utbytbara av de vanliga metoderna med katjonbyte” (Anon 1965, citerat av Osborne 1976). Mekanismen som ligger bakom fixeringen av  $NH_4^+$  beror på att jonen har en god passform i de ditrigonala utrymmena i det basala syreplanet på 2:1 lermineraler. När jonen penetrerar utrymmena leder det till en kollaps av lerskikten som binder in jonerna och därmed fixerar dem (Nömmik 1965). Det är flera faktorer som påverkar hur benägen en jord är att fixera  $NH_4^+$ , såsom jordens mineralsammansättning, lerhalt, fukthalt och kaliumhalt. Oftast går det att se en större  $NH_4^+$ -fixering med högre lerhalt och profildjup (Nömmik 1981). Jordar som generellt har hög andel fixerat  $NH_4^+$  har sämre förmåga att fixera in ytterligare  $NH_4^+$  (Elmaci 2002). Vid fuktiga förhållanden expanderar lermineralerna vilket leder till lägre fixering medan torra förhållanden istället krymper ihop lerjorden och tenderar att öka fixeringen av  $NH_4^+$ . Fixeringsprocessen förstärks av cykler med våta och torra förhållanden (Allison et al. 1953; Ahmad et al. 1982). Ammoniumfixeringen kan gå snabbt vid gynnsamma förhållanden. Större delen av fixeringen sker redan inom några timmar eller dagar efter tillförsel av  $NH_4^+$  (Nieder et al. 2011; Cavalli et al. 2015; Kowalenko & Cameron 1976).

Fixeringen sker framförallt i lerjordar med lermineralen illit, vermikulit och montmorillonit (Nieder et al. 2011). Majoriteten av den svenska åkermarken har

minst 20% lerhalt och både illit och vermikulit är vanligt förekommande i svenska jordar (Eriksson et al. 2010). Även en del montmorillonit kan förekomma i de jordar där vittringsprocesserna kommit långt (Gjems 1967). Kalium ( $K^+$ ) som är en viktig beståndsdel i dessa lermineraler påverkar också en jords fixerande förmåga (Sherer et al. 2014). Detta beror på jonernas likartade storlek och valensegenskaper som bidrar till liknande fixeringsmekanismer i lermineralerna. En jord med hög andel  $K^+$  kan därmed konkurrera med  $NH_4^+$  om samma bindningsyta och minska  $NH_4^+$ -fixeringen. Det kan skilja sig markant mellan olika lerjordar beroende på sammansättning men svenska jordar har generellt goda förutsättningar för  $NH_4^+$ -fixering.

Ammoniumfixering kan förekomma som löst fixerat  $NH_4^+$  och hårt fixerat  $NH_4^+$  (Nömmik & Vahtras 1982). Det löst fixerade  $NH_4^+$  kan frigöras lättare eftersom det fixeras i den perifera zonen av lerskikten. Medan hårt fixerat  $NH_4^+$  blivit fixerat längre in och mer centrerat i lerskikten på ursprungsmineralerna. Nömmik 1965 föreslog ett jämviktssystem mellan  $NH_4^+$  i marklösningen ( $NH_4^+_m$ ), det löst fixerade  $NH_4^+$  ( $NH_4^+_lf$ ) samt hårt fixerat  $NH_4^+$  ( $NH_4^+_hf$ ) enligt följande reaktion:



Jämvikten mellan dessa påverkas till hög grad av koncentrationen i marklösningen (Shen et al. 1997). Vid lägre koncentrationer av  $NH_4^+$  i marklösningen förskjuts jämvikten och  $NH_4^+$  bundet mellan skiktet diffunderar ut till marklösningen. Medan en högre koncentration ger motsatt verkan med ökad fixering.

En växande gröda kan bidra till att frigöra fixerat  $NH_4^+$  under växtsäsongen då den producerar rotexudat som påverkar populationen av mikroorganismer och deras aktivitet (Nieder et al. 2011). Mikroorganismerna kan vid hög aktivitet i sin tur gynna frigörelsen av fixerat  $NH_4^+$  genom att nitrifikationen påverkar jämvikten för  $NH_4^+$ .

## 2.2. Kvävet transport i marken

Mineralkväve förekommer i jonform i marken som  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$  och  $NH_4^+$  (Eriksson et al. 2011) Jonerna har olika laddningar vilket innebär att de kommer bete sig olika i förhållande till markpartiklarna. De olika N-formernas mobilitet i marken påverkas till stor del av vilken jordart och katjonbyteskapacitet (CEC) som jorden har. Jordarter med ett högt CEC har jordpartiklar med större förmåga att adsorbera katjoner såsom  $NH_4^+$ -joner eftersom de har större antal negativa laddningar som attraherar positivt laddade joner. Katjonbyteskapaciteten i jorden varierar med vilken mineral som förekommer, vittringsgraden samt storleken på mineralerna, egenskaperna hos det organiska materialet och pH-värdet i jorden. Stor andel

lermineral och humus bidrar till högre CEC då dessa har en negativt laddad yta och en stor yta där jonbyte kan ske. Svenska jordar har generellt högt CEC till följd av deras ursprungsmaterial.

Oavsett vilken jonform N förekommer i transporteras det i marklösningen genom två mekanismer: konvektion av massflöde av jonen tillsammans med vatten samt genom diffusion inom marklösningen (Gardner 1965). När N förekommer fritt i marklösningen är det tillgängligt för näringsupptag av grödor och mikrobiell aktivitet (Eriksson et al. 2011). Många av de processer som N genomgår leder till  $\text{NO}_3^-$  som slutprodukt. Nitratet som är en anjon transporteras i marken utan att binda in till lerpartiklar vid innerlösningen då det repelleras mot de negativt laddade lermineralernas ytor. Detta gör att  $\text{NO}_3^-$  förekommer i en lätttrörlig form i marklösningen som därmed är lättillgänglig för grödorna men också benägen att lakas ut. Förutom vid de få fall en jord har hög anjonbyteskapacitet (AEC) som kan binda in anjonen eller om det är en gynnsam miljö för denitrifikation. Ammoniumjonen är en katjon som adsorberas lättare till innerlösningen hos jordpartiklarna. Detta leder till en långsammare transport ner till rotzonen och  $\text{NH}_4^+$  blir inte lika snabbt tillgänglig för grödorna (Reetz 2016). Vilket gör  $\text{NH}_4^+$  är mindre benägen att förloras genom utlakning, samt kan bli tillgänglig för växten under en längre tid i jämförelse med  $\text{NO}_3^-$ .

### 2.3. Upptag av kväve i växten

En stor del av rotupptaget av N äger rum i matjorden där det finns god tillgång på näring tack vare tillfört gödselmedel, stor del mängd organiskt material och hög biologisk aktivitet (Jordbruksverket 2019). Det är många faktorer som påverkar hur mycket N en gröda behöver och det varierar bland annat beroende på art, sort, utvecklingsstadium, jordmån och tillgängligt N i marken. Det största N-upptaget för stråsäd sker under stråskjutningen och det är viktigt att det finns tillräckligt med N i marken innan grödan når det stadiet om man vill uppnå hög avkastning och god kvalité.

Kväve står för 80% av det totala jonupptaget hos växten och sker framförallt i form av  $\text{NO}_3^-$  och  $\text{NH}_4^+$  (Miller & Cramer 2004). Vilken form växten tar upp i störst mängd är beroende av många faktorer. Generellt tenderar växter som växer på sura jordar eller i anaeroba miljöer att ta upp en större andel som  $\text{NH}_4^+$  medan växter som växer under mer alkala och aeroba förhållanden tar upp  $\text{NO}_3^-$  främst. Något som troligtvis beror på snabbare nitrifikationsprocesser och därmed större tillgång på  $\text{NO}_3^-$  i det senare fallet. Assimilering av  $\text{NH}_4^+$  kräver mindre energi och inkorporeras direkt till aminosyror eller lagras i vakoulerna i rötterna, till skillnad mot  $\text{NO}_3^-$  som behöver reduceras till  $\text{NH}_4^+$  innan assimilering (Wirén et al. 2000).

Det förekommer generellt större andel fria  $\text{NO}_3^-$ -joner i marken som dessutom transporteras snabbare till rotzonen, något som naturligt leder till ett högre upptag av  $\text{NO}_3^-$  hos grödan (Miller & Cramer 2004). Efter rotupptag är transporten av  $\text{NH}_4^+$  i växten begränsad då majoriteten snabbt omvandlas till amider och aminosyror i rötterna, till följd av att för höga  $\text{NH}_4^+$ -koncentrationer är toxiska för växten, men viss transport från rötter via xylemet till skotten sker (Baohai et al. 2014; Britto & Kronzucker 2002). Nitrat har en mer dynamisk transport genom xylemet i växten och kan lagras i vakoulerna i rötterna, skotten eller andra lagringsorgan (Hawkesford et al. 2012).

Assimileringen av  $\text{NH}_4^+$  i rötterna producerar en väteproton ( $\text{H}^+$ ) per  $\text{NH}_4^+$ -molekyl, vilken frigörs till marklösningen för att upprätthålla det intracellulära pH-värdet i cytoplasman (Hinsinger et al 2003; Marschner 2012). Utsöndringen leder till en pH-sänkning i rhizosfären. På motsvarande sätt vid assimilering av  $\text{NO}_3^-$  produceras en hydroxidjon ( $\text{OH}^-$ ) för varje  $\text{NO}_3^-$ -jon som frigörs i marklösningen vilket istället ökar pH-värdet i rhizosfären. All form av jonupptag i växten kräver likvärdigt upptag av joner med motsatt laddning eller frigörelse av en jon av samma laddning för att upprätthålla jonbalansen. Ofta förekommer ett överskott av katjonupptag vilket leder till större frigörelse av katjoner än anjoner till marklösningen (Eriksson et al. 2011).

## 2.4. Kvävegödselmedel och effekter av gödsling

### 2.4.1. Produktion och innehåll

Alla mineralkväve-gödselmedel har sitt ursprung i  $\text{NH}_3$  tillverkat genom Haber-Bosch processen, vilken är en industriell framställning av  $\text{NH}_3$  från  $\text{N}_2$  och vätgas ( $\text{H}_2$ ) under hög temperatur och tryck (Tilman et al 2002). Metoden utvecklades i mitten av 1900-talet och har revolutionerat jordbruket tack vare möjligheten att tillgodose grödors N-behov på en storskalig nivå. Sedan dess har flera olika gödselmedel framställts i många olika kombinationer som kan förekomma i både fast, flytande och gasform. Mineralkvävegödselmedel oavsett form är ofta sammansatt i olika föreningar av  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  och urea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ) tillsammans med andra näringsämnen såsom fosfor (P) och K (European Fertilizer Manufacturing Association 2000). Framställningen av gödselmedel leder till en flytande form vilken kan säljas direkt eller gå vidare i processen för att omvandlas till fasta gödselmedel. Fasta mineralgödselmedel förekommer framförallt i form av granuler, prills, eller kristalliner. Vid prillning formas lösligt gödselmedel till droppar som får falla ner från ett prillningstorn i motströms luftflöde. Processen kyler ner dropparna som solidifieras. Granulering produceras på flera olika sätt och med olika typer av utrustning. Generellt kan produktionen delas in två olika

processer, torr granulering vilken innebär att råmaterialet i form av torrt pulver pressas samman under ett högt tryck och bildar granuler, eller våt granulering där flytande råmaterial blandas med tillsatser av bindningsmedel för att binda samman produkten.

Många gödselmedels hygroskopiska egenskaper (förmåga att absorbera fukt) gör dem både lösliga och känsliga för fukt vilket leder till att granuler och prills tenderar att klumpa ihop sig vid lagring och transport i bulk samt brytas ner innan applicering (Gezerman 2011). För att minska deras hygroskopiska egenskaper täcks ofta prills och granuler med ett överdragningsmedel i sista steget av processen till fast gödselmedel (Trenkel 2010). Dessa har haft en stor betydelse för fasta gödselmedels förmåga att lagras under en längre tid samt kontrollera upplösningen av näringsämnen i fält. Det skyddande överdragningsmedlet kan bland annat bestå av polymer, vaxer, mineraloljor och svavel med syftet att skapa en fysisk barriär som är mer eller mindre genomträngligt för vatten. Vilka ämnen och proportioner som är att föredra är beroende på vilka effekter som är önskade i fältförhållanden. Egenskaperna leder till att applicerat gödselmedel i fält frigörs snabbt eller långsamt.

Kalciumnitrat ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ), även kallat Kalksalpeter i dagligt språkbruk, är ett vanligt mineralgödselmedel i Sverige. Det produceras genom att först låta salpeter och  $\text{NH}_3$  reagera och bilda ammoniumnitrat ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) som sedan blandas med karbonat i någon form, ofta från kalksten eller dolomit (European Fertilizer Manufacturing Association 2000). Produkten blir en flytande lösning som granuleras eller prillas till fast form. Kalksalpeter kan ha varierande sammansättning beroende på produkt och producent, gemensamt är dock att det nästan är uteslutande nitratkväve ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) och kalcium (Ca) i produkten och det marknadsförs för snabbverkande egenskaper med en pH-höjande effekt i marken.

Ett annat gödselmedel som används i Sverige är ammoniumsulfat ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ). Ammoniumsulfat tillverkas framförallt syntetiskt genom att blanda vattenfri  $\text{NH}_3$  och svavelsyra ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) tillsammans med  $\text{NH}_3$ -gas och vattenånga i en reaktor (Speight 2017). Processen ger en lösning vilken kan formas till rombformade kristaller genom att låta den rotera i en evaporator som leder till en mer trögflytande lösning som sedan centrifugeras för att separera lösningen från de bildade kristallerna. Ammoniumsulfat bildas även som en biprodukt vid kemiska processer som tillverkning av koks och kaprolaktam. Tillverkningen ger ofta små kristaller men vid användning till gödselmedel tillverkas de ofta i större granuler på 2–4 mm eftersom det underlättar vid förvaring i bulk och bidrar till en långsammare frigörelse av näringsämnen, vissa produkter täcks även med överdragningsmedel (Wang et al 2013). Produkten har ett högt svavelinnehåll vilket gör det populärt att

använda till svavelkrävande grödor. Vid användning blir det en försurande reaktion i marken och gödselmedlet användas därför med fördel på basiska jordar.

#### 2.4.2. Kväveform och applicering av gödselmedel

Kvävegödselmedel kan ha en stor markkemisk inverkan på mikroklimatet där gödselmedlet interagerar med marken (Hauck 1981). De processer som sker precis i den närmiljö som gödselmedlet kommer i kontakt med kan skilja sig kraftigt från den omgivande markmiljön. Hur stor inverkan det har på den markkemiska miljön beror på vilken sorts gödselmedel och dess egenskaper, fördelningen vid applikation samt vilken typ av mark det appliceras på. Dess påverkan på det markkemiska klimatet har en stor betydelse för flera olika markprocesser såsom mineralisering/immobilisering, nitrifikation, denitrifikation,  $\text{NH}_4$ -förluster och  $\text{NH}_4^+$ -fixering vilka i sin tur kan vara avgörande för hur det tillförda gödselmedlet kommer vara tillgängligt för grödor och därmed dess N-effektivitet.

#### 2.4.3. Ammonium- respektive nitratbaserade gödselmedel och påverkan på växtupptag och markprocesser/markförhållanden

Kväveformen vid gödsling kan ha inverkan på tillväxt och avkastning hos grödan. Fältförsök i Sverige har påvisat skillnader mellan N-produkter, där de gödselmedel som har högre andel  $\text{NO}_3^+$  ger en högre N-effektivitet gentemot de med högre andel  $\text{NH}_4^+$  (Jönsson 2018; Yara 2019). Studier visar på att N-gödsling med  $\text{NH}_4^+$  som primär N-källa kan leda till sämre tillväxt och avkastning hos grödor i jämförelse med  $\text{NO}_3^-$  (Helali et al. 2010). Ammoniumjonen har dessutom lägre mobilitet i marken vid jämförelse med  $\text{NO}_3^-$  och når därmed rotzonen långsammare. Generellt är en kombination av de båda N-formerna i gödselmedel allmänt accepterat att ge bäst skörd (Miller & Cramer 2004; Wirén et al. 2000).

Rotupptag av  $\text{NO}_3^-$  och  $\text{NH}_4^+$  ger, som tidigare konstaterats i uppsatsen, upphov till olika kortvariga markkemiska förändringar i rhizosfären. Ensidig användning av  $\text{NO}_3^-$ -baserade eller  $\text{NH}_4^-$ -baserade gödselmedel kan leda till ökning eller sänkning av pH-värdet i marken över tid och inte bara det i rhizosfären (Miller & Cramer 2004). Detta beror dels på att växten tenderar att ta upp mer av den N-form som förekommer i marklösningen vilket leder till stor utsöndring av antingen  $\text{H}^+$  eller  $\text{OH}^-$ . Vid  $\text{NH}_4^-$ -baserade gödselmedel leder det även till en försurande effekt i marken till följd av mer substrat till mikroorganismerna som gynnar en snabbare nitrifikation (Eriksson et al. 2011).

En annan faktor som inverkar vid markens reaktion med gödselmedel är om jorden är sur eller alkalisk eftersom det har en inverkan på nitrifikationen (Hauck 1981).

Om mikroklimatet får ett pH runt 8 vid reaktion mellan gödselmedel och mark så tenderar  $\text{NO}_3^-$ -oxidationen att hämmas i förhållande till  $\text{NH}_4^+$ -oxidationen, något som leder till ackumulering av  $\text{NO}_3^-$ . Det omvända kan istället hända vid lägre pH-värden.

#### 2.4.4. Fast kontra flytande appliceringsform

Det finns för- och nackdelar med både flytande och fasta N-gödselmedel (Michigan State University 2016). Flytande gödsel är generellt sett enklare att hantera och sprida. Dessutom går det att kombinera spridning av växtskyddsmedel vid appliceringstillfället. Fasta gödselmedel är lättare att förvara samt har större utrymme för att spridas under en längre tidsperiod än för flytande. Vid applicering av flytande mineralgödselmedel får varje droppe identiskt innehåll vilket leder till jämn fördelning över hela fältet. Vid bulkblandning av fast gödselmedel kan näringsinnehåll skilja sig lite mellan vardera granulen/prillen men vid samgranulerade gödselmedel får även dessa identiskt innehåll i varje granul. Fasta gödselmedel kan orsaka punktvis höga salthalter som bränner grödans rötter i marken medan flytande gödselmedel kan orsaka brännskador på blad om det appliceras vid en tidpunkt då grödorna är utsatta för någon form av stress eller i för hög mängd. Vilken appliceringsform som är bäst avgörs i slutändan av lantbrukaren utifrån dennes förutsättningar i form av maskiner, kostnader, arbetstid och grödor.

De kemiska reaktionerna som sker vid kontakt med marken verkar vid första anblick vara densamma för flytande respektive fasta gödselmedel eftersom det framförallt påverkas av gödselmedlets kemiska egenskaper. Påvisade skillnader mellan fast och flytande gödselmedel har dock visats i tidigare studier gällande andra näringsämnen såsom Zink (Zn) och Magnesium (Mg) (Hettiarachchi et al 2008). Där visar studier att flytande gödselmedel en bättre effekt än fasta produkter, delvis på grund av en bättre mobilitet i marken. Även för P har det uppvisats skillnader mellan de två appliceringsformerna där flytande haft en bättre effekt (Hettiarachchi 2006). Granulerna har gett upphov till en zon med massflöde av vatten in mot granulen som lett till lägre diffusion av P till marklösningen.

För N förekommer forskning på urea som har visat att den fasta formen leder till större förluster av  $\text{NH}_3$  gentemot flytande applicering. Vilket framförallt beror av hydrolysen av urea leder till högt pH vid granulen som skjuter jämvikten mot  $\text{NH}_3$  (Titko III et al. 1987; Dari et al. 2019). De senaste åren har flera försök utförts för att titta närmare på effekter av olika appliceringsformer på N-effektivitet (Gruvaeus 2019; Yara 2019; Yara 2019a). Flytande gödsel har visat på en sämre N-effektivitet i fältförsök utförda på lerjordar i Sverige, Finland och Frankrike. Vad som orsakar dessa skillnader är inte klarlagt. I ett inkubationsförsök med fast och flytande

applicering av samma N-form som utfördes på lerjord och sandjord utan gröda gick det däremot inte att bekräfta en signifikant skillnad de två appliceringsformerna.

En skillnad mellan fast och flytande gödselmedel är koncentrationerna som uppkommer där mark och gödsel interagerar (Hauck 1981). Vid applicering i fast form är gödselmedlet i kontakt med en liten yta där reaktionerna sker vilket ger upphov till höga koncentrationer precis vid den kontaktpunkten. Där krävs det regn eller tillräckligt hög markfuktighet för att granulerna ska lösas upp och frigöra näringsämnen till marklösningen. Hur snabbt det här går är beroende av ämnets hygroskopiska egenskaper och löslighetsförmåga, likaväl som vilka förutsättningar som finns i omgivande miljön. Medan ett flytande gödselmedel snabbare kommer i kontakt med marklösningen och späds ut till lägre koncentrationer. Skillnaderna mellan olika gödselmedel avtar vid ett intensivt regnfall då gödselmedel späds samt får en ökad kontaktyta med markpartiklarna och mikroorganismerna, vilket minskar effekterna och ger upphov till liknande reaktioner oavsett form.

#### 2.4.5. Ammoniumfixering vid kvävegödsling

Ammoniumfixering kan ha en betydelse vid användning av  $\text{NH}_4$ -baserade gödselmedel då det inverkar på mängden lättillgängligt N för växterna. Tillförsel av  $\text{NH}_4$ -baserade gödselmedel till fixerande jordar kan öka fixeringen i översta skiktet där applicering sker och finns inte med säkerhet tillgängligt för grödan vid önskat tillfälle (Juang et al. 2001). Ammoniumfixeringen kan å andra sidan fungera som ett förråd i marken av N som frigörs under tid och därmed bidra till minskad användning av N-gödselmedel (Liu et al. 2008).

Studier har visat att  $\text{NH}_4$ -gödselmedel tenderar att bli löst fixerat  $\text{NH}_4^+$  och kan frigöras snabbare än hårt fixerat  $\text{NH}_4^+$  (Black & Waring 1972; Liang & McKenzie 1994). Detta visades bland annat i en studie gjord under växthusförhållanden på rajgräs av Dou & Steffens (1995), där frigjordes 90–95 % av löst fixerat  $\text{NH}_4^+$  under en period på 14 dagar. I en annan fältstudie av Kowalenko (1978) blev 66% av löst fixerat  $\text{NH}_4^+$  frigjort under en period på 86 dagar efter att fixering skett. Resterande  $\text{NH}_4^+$  blev hårt fixerat i 426 dagar.

### 2.5. Analyismetoder för kväve i mark

För analys av lättillgängligt min-N ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) är KCl och  $\text{CaCl}_2$  två väl beprövade extraktionslösningar men de tenderar att ge lite olika resultat (Li et al. 2012). Effekten av de olika saltlösningarna påverkas bland annat av lösning och koncentration, skaktiden, kornstorlek på jorden vid siktning samt förhållandet



mellan extraktionslösning och jord. KCl är ett starkare extraktionsmedel som oftast används i en extraktionslösning på 1–2 M medan CaCl<sub>2</sub> i en extraktionslösning på 0,01 M, något som inverkar på halten som återfinns i provet. I en studie som jämförde de två lösningarna visade 2 M KCl en genomsnittlig återhämtning på 113,3 % för NO<sub>3</sub><sup>-</sup> och 94,9 % för NH<sub>4</sub><sup>+</sup> medan CaCl<sub>2</sub> i jämförelse visade på 100,1 % för NO<sub>3</sub><sup>-</sup> och 57,3 % för NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Det är framförallt NH<sub>4</sub><sup>+</sup> som påverkas, vilket troligtvis är ett resultat av att de binds till lerpartiklarna och behöver starkare lösningsmedel för att frigöras vid extraktionen. Generellt används CaCl<sub>2</sub> för att extrahera det min-N som förekommer i marklösningen medan KCl även extraherar det som är löst fixerat.

Bestämning av fixerat NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (NH<sub>4</sub><sup>+</sup><sub>lf</sub> + NH<sub>4</sub><sup>+</sup><sub>hf</sub>) har länge varit en utmaning eftersom det är svårt att särskilja på det löst fixerade NH<sub>4</sub><sup>+</sup> och det som varit hårt fixerat. Bremner (1965) definierade hårt fixerat NH<sub>4</sub><sup>+</sup> som den fraktionen som inte kan extraheras med 2 M KCl. Däremot har det varit svårare att skapa en väl definierad metod för att bestämma det löst fixerade NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Flertalet metoder har testats och jämförts med vitt skilda resultat (Bremner et al. 1967; Nunes et al. 2019; Paramasivam & Breitenbeck 2000). Många metoder baseras på att först avlägsna organiska föreningar, utbytbar NH<sub>4</sub><sup>+</sup> och sedan extrahera fixerat NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ur kvarvarande prov med en stark lösning. Svårigheterna ligger i att organiskt N tenderar att frigöras vid extraktionen som blandas in i provet. Dessutom kan hårt fixerat NH<sub>4</sub><sup>+</sup> frigöras vid de metoder där organiska föreningar avlägsnas med en stark bas (Nunes et al. 2019). Två faktorer som leder till överskattade värden av det faktiskt löst fixerade NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Den främst använda metoden idag baseras på Silva & Bremner (1966) som avlägsnar organiska föreningar med en KOBr lösning, tvättar resterna med 0,5 M KCl och skakar proverna med 5 N HF:1 HCL under en period på 24 h. Metoden anses vara överlägsen andra metoder vid bestämning av NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-fixering eftersom förbehandlingen med KOBr som avlägsnar organiska föreningar inte leder till frigörelse av fixerat NH<sub>4</sub><sup>+</sup> då K<sup>+</sup> skyddar det från att diffundera ut från lermineralerna (Nieder et al. 2011; Paramasivam & Berienbeck 2000).

## 3. Material och metoder

### 3.1.1. Utformning av experiment, utrustning, kemikalier

Jorden som användes i experimentet var en Oxyaquic Haplocryoll, en måttligt mullhaltig styv lera från Vreta Kloster, Sverige (se tabell 1 och 2). Matjorden (0–20 cm) samlades in, lufttorkades, mortlades till homogena partiklar och siktades genom en 2 mm såll.

Tabell 1. Jordegenskaper för matjorden (0–32 cm)

Plats	Textur	Lera (%)	Huvudmi neral	Density (g/cm <sup>-3</sup> )	C/N-kvot	pH
Vreta Kloster	mmh styv lera	47,6 %	Illit (45%) Vermikulit (9%)	1,3 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	6,6 <sup>3</sup>

Jordegenskaper hämtade från tidigare studier utförda på jorden (Kirchmann et al. 2005)

<sup>1</sup>Beräknad i den här studien

<sup>2</sup>Hämtat från Bördighetsförsöket R3-9001 (2019)

<sup>3</sup>pH-mätning av jorden utförd i den här studien

Tabell 2. Egenskaper för katjonbyteskapacitet (CEC) i matjorden (0–32 cm)

Djup	Ca	Mg	K	Na	Summa	CEC
	(cmol kg <sup>-1</sup> jord)					
0–32 cm	21.26	2.03	0.63	0.08	24.00	28,7 %

Jordegenskaper hämtade från tidigare studier utförda på jorden (Kirchmann et al. 2005)

För varje jordprov användes kolonner av PVC-material som var 6 cm höga och 11 cm i diameter. Kolonnerna placerades i en plastburk utan kontakt med botten av burken. De var skyddade från insläpp av luft underifrån. I botten av varje kolonn fästes en polyamidväv (50 µm). Kolonnen delades upp i två skikt som separerades med likadan väv, där de både skikten var 3 cm vardera. För konduktivitetmätningar gjordes två hål på motsatt sida från varandra för varje kolonn vid 15 samt 45 mm djup. Varje kolonn fylldes med 670 g jord, varav 335 g jord i vardera skiktet. Två

olika gödselmedel, Kalksalpeter och NS 21–24, har använts i experimentet (Tabell 3).



Figur 1. Kolonn som användes i experimentet. (Foto: Elizabeth Lövfstaf)

Tabell 3. Översikt över de använda gödselmedlen i experimentet, deras näringsinnehåll och egenskaper.

Gödselmedel	YaraLiva Kalksalpeter©	NS 21–24
Namn	Kalciumnitrat	Ammoniumsulfat
Formel	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
Löslighet vid 25°C (g/l)	2500 <sup>1</sup>	764 <sup>2</sup>
Nitrat (%)	14,4	0
Ammonium (%)	1,1	21
Kalcium (%)	18,8	0
Svavel (%)	0	24
Reaktion i jorden	Basisk	Sur

<sup>1</sup>Löslighetsvärde för YaraLiva Kalksalpeter© är hämtade från Crystal Growing Wiki (2018).

<sup>2</sup>Löslighetsvärde för NS 21–24 är hämtade från CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th edition

I experimentet simulerades regn med en sprayflaska (Activa 360°) som var fäst i ett stativ 15 cm över jordkolonnen. Varje spray motsvarade 0.37-0,4 ml destillerat vatten. Allt vatten som sprayades träffade jordytan där det fördelades jämnt över hela ytan. Mängden vatten som tillfördes dividerat med arean på ytan av kolonnen uppskattades motsvara mm regn tillfört till kolonnen. Temperaturen på vattnet som användes var 10 °C.

Mätningar av saltaktiviteten utfördes med en portabel konduktivitetmätare (hi-993310 Hanna Instruments) tillsammans med en sond för mätningar direkt i jorden (HI-76305 Hanna Instruments). Vägning av jordprover, gödsel- och vattenmängder utfördes med digitalvåg (A&D HF-2000) med två decimalers noggrannhet.

Experimentet utfördes i klimatrium med en temperatur på 10 °C under en period på 17 dagar.

### 3.1.2. Utförande

Det fasta gödselmedlet bestod av granuler för både NS 21–24 och Kalksalpeter, vikt och antal för varje granul dokumenterades (Appendix I). Granulerna placerades jämnt över jordytan på varje kolonn. I den flytande gödselmotsvarigheten för både NS 21–24 och Kalksalpeter vägdes samma mängd gödsel upp, men löstes sedan till en 75% lösning (Tabell 4). Det flytande gödselmedlet tillfördes genom att sprayas på jordytan med likadan sprayflaska som användes under regnsimuleringen, kolonnerna vägdes direkt efter tillförsel för att säkerställa tillsatt mängd vilket dokumenterades (Appendix II). På grund av en felbedömning av de flytande gödselmedlens densitet, applicerades fel mängd gödselmedel vilket resulterade i olika mängd tillfört N för respektive gödselmedel och applikationsform (Tabell 4). Fasta gödselmedlet för både NS 21–24 och Kalksalpeter beräknades motsvara 150 kg ha<sup>-1</sup> medan flytande NS 21–24 motsvarade 122,95 kg ha<sup>-1</sup> och flytande Kalksalpeter 111,94 kg ha<sup>-1</sup>. För att kompensera för detta har resultaten justerats genom att dividera resultaten med vad som faktiskt blivit tillfört för varje prov.

Tabell 4 Översikt över mängderna som tillförts i flytande respektive fast form för gödselmedlen.

Behandling	Flytande (ml)	Tillfört N (g)	Fast (g)	Tillfört N (g)
YaraLiva Kalksalpeter	0,9	0,11	0,92	0,14
Ammoniumsulfat	0,98	0,12	0,68	0,14

Gödselmedlen, Kalksalpeter och NS 21–24, applicerades i fast respektive flytande form. Båda gödselmedlen i varje appliceringsform utsattes för tre vattenregimer.

1. *Intensiv nederbörd torr jord*: Jorden var torr från början och ett kraftigt regnfall (15,6 mm) simulerades under 12 h direkt efter applicering av gödselmedel tills jordkolonnerna nått en fukthalt på 40% av WHC. Fukthalten justerades till 39–41% av WHC varannan dag med simulerad nederbörd under en period på 6 h. Vattenregimen hade tre replikat för varje gödselmedel i fast respektive flytande appliceringsform samt tre replikat med kontroller. Sammanlagt blev det femton kolonner.
2. *Fördröjd intensiv nederbörd torr jord*: Jorden var torr från början och ett lätt regnfall (1,7 mm) simulerades direkt efter applicering av gödselmedel

med syfte att lösa upp de fasta gödselmedlen. Jordkolonnerna fick torka upp under fyra dagar och därefter simulerades ett kraftigt regnfall (14,9 mm) under en period på 12 h tills kolonner nådde en fukthalt på 40% av WHC. Fukthalten justerade till 39–41% varannan dag med simulerad nederbörd under en period på 6 h. Vattenregimen hade tre replikat för varje gödselmedel i fast respektive flytande appliceringsform samt tre replikat med kontroller. Sammanlagt blev det femton kolonner.

3. *Låg nederbörd fuktig jord*: Jorden justerades till en fukthalt på 32% innan gödselmedel tillfördes. Ett lätt regnfall (3,47 mm) simulerades direkt efter applicering av gödselmedel under en period på 12 h tills jordkolonnerna nått en fukthalt på 40% av WHC. Fukthalten justerades till 39–41% varannan dag med simulerad nederbörd under en period på 6 h. Vattenregimen hade tre replikat för varje gödselmedel i fast respektive flytande appliceringsform samt tre replikat med kontroller. Sammanlagt blev det femton kolonner.

Salthaltsmätningarna utfördes 5 h efter varje simulerat regnfall. Sammanlagt utfördes sex mätningar varannan dag på vattenregim 1 och 3 där första mätningen utfördes två dagar efter experimentets start. På vattenregim 2 utfördes fem mätningar varannan dag, varav första mätningen utfördes fyra dagar efter experimentets start. Sista mätningen utfördes två dagar innan experimentets avslut för alla regimer. All data dokumenterades (Appendix III). Salthaltsmätningarna gjordes i horisontellt läge på kolonnen, där sonden fördes in 1,5 centimeter in i jordprovet.

Vid experimentets avslut separerades skikten för respektive kolonn för att kunna analyseras separat. Alla jordprover frystes och skickades på analys till Yara Research Center i Hanninghof, Tyskland.

### 3.1.3. Analyser

Det utfördes två olika extraktionsmetoder för alla prover, enligt tyska respektive svenska standardmetoden. Den svenska standardmetoden använder ett starkare extraktionsmedel, vilket förväntas ge högre halter av  $\text{NH}_4^+$  och  $\text{NO}_3^-$  i analysresultaten.

I Tyskland är standardmetoden för analys av  $\text{NH}_4^+$  och  $\text{NO}_3^-$  extraktion med 0,0125 M  $\text{CaCl}_2$ . Extraktionslösningen blandades i ett förhållande av 1:4, skakades en timme, filtrerades med MN 6191/4 filterpapper. SAN++ Continuous Flow Analyser användes för att bestämma  $\text{NH}_4^+$ - respektive  $\text{NO}_3^-$ -halterna.

I Sverige är standardmetoden för analys av  $\text{NH}_4^+$  och  $\text{NO}_3^-$  extraktion med 2 M  $\text{KCl}$ . Extraktionslösningen blandades i ett förhållande av 1:5, skakades i två timmar,

filtrerades med MN 6191/4 filterpapper. SAN++ Continuous Flow Analyser användes för att bestämma  $\text{NH}_4^+$ - respektive  $\text{NO}_3^-$ -halterna.

### 3.1.4. Beräkningar

Data från analyserna bearbetades i Excel, alla medelvärden subtraherades med kontrollproverna för att kunna likställa data med endast påverkan från gödselmedlen. Alla gödselmedel och appliceringsformer har anpassats utefter sin tillförda mängd N och omvandlats efter procentandel för att bli jämförbara med varandra. Salthaltsmätningar uppmättes ursprungligen i g salt  $\text{L}^{-1}$  vatten $^{-1}$  men är omvandlad på liknande sätt till procentform utifrån vad det tillförda saltet skulle motsvara i g  $\text{L}^{-1}$  för att kunna jämföras mellan de olika appliceringarna. Detta gjordes enligt följande steg:

$$X_{H_2O} = \frac{WHC_u * X_{H_2O_t}}{1000} \quad (\text{ekvation 1})$$

Där  $WHC_u$  är WHC vid mättillfället och  $X_{H_2O_t}$  motsvarar mängden vatten i ml då WHC är 100%. Således blir  $X_{H_2O}$  mängden vätska i provet vid mättillfället uttryckt i L.

$$g_t = \frac{g_f}{X_{H_2O}} \quad (\text{ekvation 2})$$

Där  $g_f$  är faktiska mängden gödsel tillfört till provet uttryckt i g  $\text{L}^{-1}$ . Således blir  $g_t$  den uppskattade salthalten som totalt förekommer i provet uttryckt i g  $\text{L}^{-1}$ .

Omvandlingen till procentform gjordes enligt följande ekvation:

$$\text{Procentuell andel salt i provet} = \frac{g_u}{g_t} \quad (\text{ekvation 3})$$

Där  $g_u$  är den uppmätta salthalten vid mättillfället uttryckt i g  $\text{L}^{-1}$ .

### 3.1.5. Statistisk analys

Insamlade data består av uppmätta N-halter (mg  $\text{L}^{-1}$ ) från extraktionsanalyser samt salthaltsmätningar (g  $\text{L}^{-1}$ ). Varje kolonn med jord behandlades som ett replikat. Vid jämförelse av N-halter uttrycktes de i procentuell form av vad de blivit tillförda. Salthaltsmätningarna uttrycktes i procentuell form av totala salthalten i kolonnen.

All data har bearbetats i Excel. För de statistiska analyserna användes JMP® Pro 15 (SAS Institute Inc., Cary, NC, 1989–2020). Statistiska analyser utfördes för att jämföra skillnader mellan appliceringsformer, gödselmedel och vattenregimer. För

att avgöra om det fanns en statistisk signifikans och förekom interaktionseffekter mellan gödselmedel, appliceringsformer, vattenregimer utfördes trevägsanalys (ANOVA). De beroende variablerna i analyserna sattes till återfunnet min-N och data från salthaltsmätningarna, de oberoende variablerna var gödselmedel, appliceringsformer och vattenregimer. Det utfördes även trevägsanalys (ANOVA) för att jämföra skillnaderna mellan extraktionsmetoderna (KCl och CaCl<sub>2</sub>) med samma oberoende och beroende variabler som ovan. Vid statistisk signifikans gjordes ett Tukey's honestly significant difference test (HSD) test för att se vilka variabler som skiljde sig. Signifikansnivån sattes till 5% ( $p \leq 0,05$ ) för all analyserade data.

Det gick inte att utföra en statistisk analys för min-N och salthaltsmätningarna på skillnaderna mellan det nedre och övre skiktet i jordproverna. I det nedre skiktet förekom många nollor samt negativa värden till följd av att transporten för NS 21–24 var låg till nedre skiktet. Det förekom även stora variationer mellan vissa replikat vilket ledde till att kraven för normalfördelning inte uppfylldes för att kunna göra en ANOVA. Det var inte möjligt att transformera data och värdena var inte möjliga att modellera i vare sig parametriska eller icke-parametriska tester Därav har en tolkande analys gjorts för resultaten kring skillnaderna i transporten mellan skikten samt för det nedre skiktet. I det övre skiktet var det möjligt att göra statistisk analys med trevägsanalys (ANOVA).

## 4. Resultat

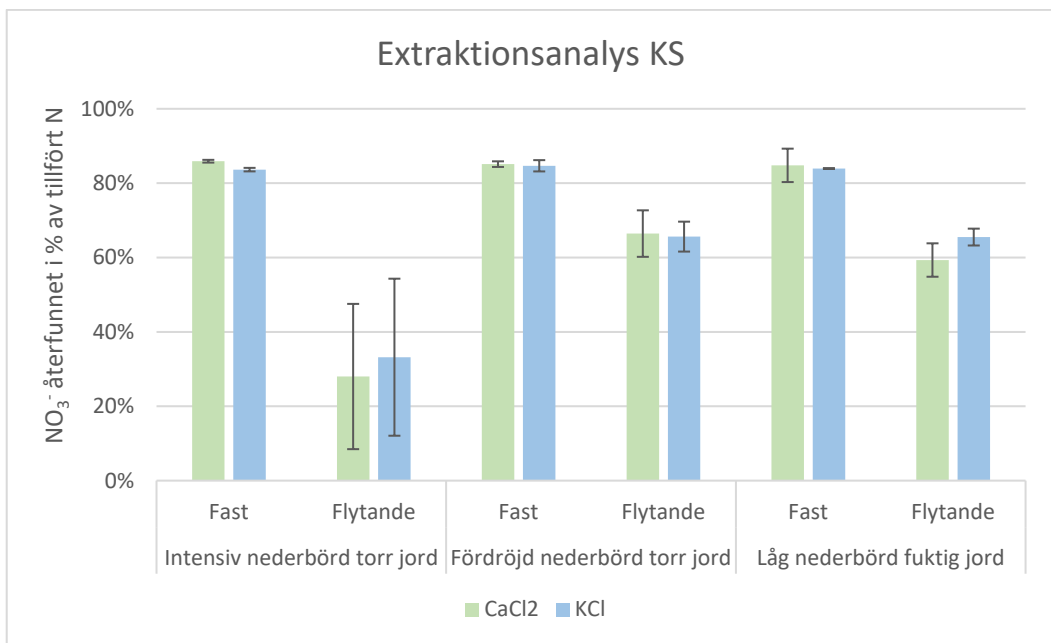
### 4.1. Inverkan av extraktionsmetoder

Data i avsnittet är tagen från båda extraktionsanalyserna (CaCl<sub>2</sub> och KCl). Mätvärdena från kontrollproverna subtraherades från varje prov för att endast visa påverkan från tillfört gödselmedel. Figur 1–2 visar återfunna mängder min-N för de olika vattenregimerna i procentuell form utifrån den totala tillförda mängden N för respektive gödselmedel och appliceringsform.

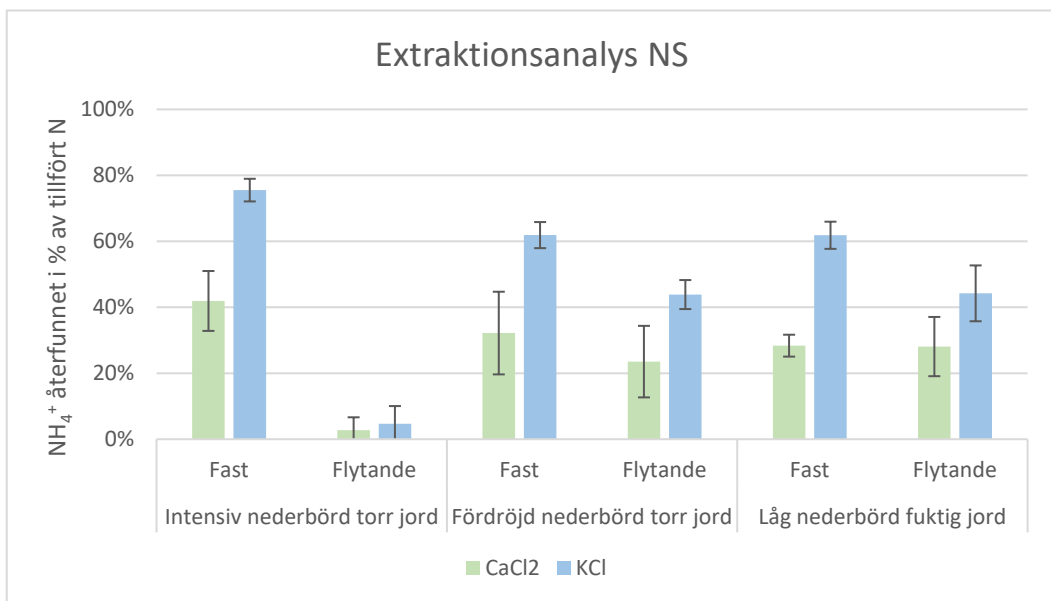
Resultaten för analyserna från de två extraktionsmetoderna visade på skillnader i återfunnet min-N mellan CaCl<sub>2</sub> och KCl, men skillnaderna var olika stora beroende på vilken N-form som analyserades (Figur 1–2). CaCl<sub>2</sub>-extraktionen visade avsevärt lägre halter av NH<sub>4</sub><sup>+</sup> i jämförelse med KCl-extraktionen och skillnaderna var signifikanta ( $p < 0,001$ ). Extraktion av NO<sub>3</sub><sup>-</sup> visade liknande värden för de båda extraktionsmetoderna utan signifikant skillnad.

Generellt gav KCl som extraktionsmetod värden med lägre variation mellan replikaten (Appendix III), även om det också med denna metod påvisades relativt stor standardavvikelse inom flera behandlingar (Figur 1–2). I vattenregimen *Intensiv nederbörd torr jord* förekom det stora skillnader för alla tre replikaten i den flytande appliceringen både för Kalksalpeter och NS 21–24 (Appendix III). Det var ett replikat med avsevärt lägre N-halter än de övriga i både NS 21–24 och Kalksalpeter vilket bidrar till ett lågt medelvärde samt en stor standardavvikelse. Det här gällde båda analysmetoderna men det gick inte att identifiera ett enskilt jordprov utan det var olika replikat som var avvikande för de olika extraktionsmetoderna.





Figur 2. Återfunnet  $\text{NO}_3^-$  från två olika extraktionsmetoder ( $\text{KCl}$  och  $\text{CaCl}_2$ ), för vattenregimerna (Intensiv nederbörd torr, Fördröjd nederbörd torr och Låg nederbörd fuktig) för gödselmedlet Kalksalpeter (KS) och appliceringsform (fast respektive flytande).



Figur 3. Återfunnet  $\text{NH}_4^+$  från två olika extraktionsmetoder ( $\text{KCl}$  och  $\text{CaCl}_2$ ) för vattenregimerna (Intensiv nederbörd torr, Fördröjd nederbörd torr och Låg nederbörd fuktig) för gödselmedlet NS 21–24 (NS) appliceringsform (fast respektive flytande).

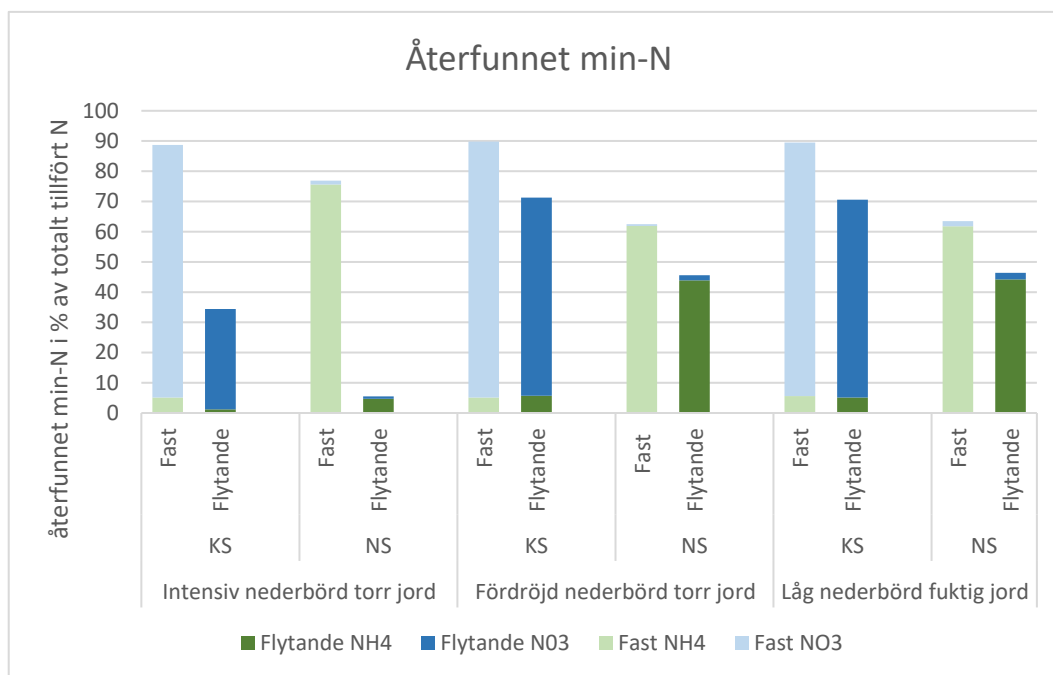
## 4.2. Återfunna mängder mineralkväve

Data i avsnittet är tagen från extraktionsanalysen där KCl användes som extraktionsmetod. Mätvärdena från kontrollproverna subtraherades från varje prov för att endast visa påverkan från tillfört gödselmedel. Figur 3 visar återfunnet min-N för de olika vattenregimerna i procentuell form utifrån den totala tillförda mängden N för respektive gödselmedel och appliceringsform.

Det fanns en signifikant skillnad mellan appliceringsformer oavsett gödselmedel och vattenregim. Flytande applicering resulterade i en lägre halt återfunnet min-N i jämförelse med fast applicering (Tabell 5).

Det fanns en signifikant skillnad i återfunnet min-N för flytande gödselmedel mellan vattenregimer (Tabell 5). Vattenregim *Intensiv nederbörd torr jord* visade lägre återfunnet min-N än de övriga vattenregimerna. Det fanns inga skillnader mellan flytande applicering i vattenregimerna *Fördröjd nederbörd torr jord* och *Låg nederbörd fuktig jord*. Fast gödselmedel visade inte skillnad i återfunnet min-N mellan vattenregimer (Figur 3).

Det gick att påvisa signifikant skillnad mellan de två gödselmedlen (Tabell 5). Kalksalpeter visade högre halt återfunnet min-N gentemot NS 21–24 som gödselmedel. Majoriteten av det återfunna N för respektive gödselmedel bestod av  $\text{NO}_3^-$  för Kalksalpeter och  $\text{NH}_4^+$  för NS 21–24. Det fanns inga skillnader mellan appliceringsformer i andelen återfunnet  $\text{NO}_3^-$  eller  $\text{NH}_4^+$  för respektive gödselmedel.



Figur 4. Återfunnet min-N i % av totalt tillfört kväve för de tre olika vattenregimerna (Intensiv nederbörd torr jord, Fördröjd intensiv nederbörd torr jord, Låg nederbörd fuktig jord) för respektive gödselmedel (Kalksalpeter (KS) och NS 21–24 (NS)) och appliceringsform (fast och flytande). 2 M KCl användes som extraktionsmetod.

Tabell 5. Variansanalys för återfunnet min-N för variablerna Vattenregim (Intensiv nederbörd torr jord, Fördröjd intensiv nederbörd torr jord, Låg nederbörd fuktig jord), gödselmedel (NS 21–24 och Kalksalpeter) samt appliceringsform. (fast och flytande form) Signifikansnivån sattes till 5%

	F-värde	P-värde
Vattenregim	12,35	0,0002
Gödsel	63,11	<0,0001
Appliceringsform	115,33	<0,0001
Vattenregim x Gödsel	0,36	0,6995
Gödsel x Appliceringsform	0,50	0,4827
Behandling x Appliceringsform	23,94	<0,0001

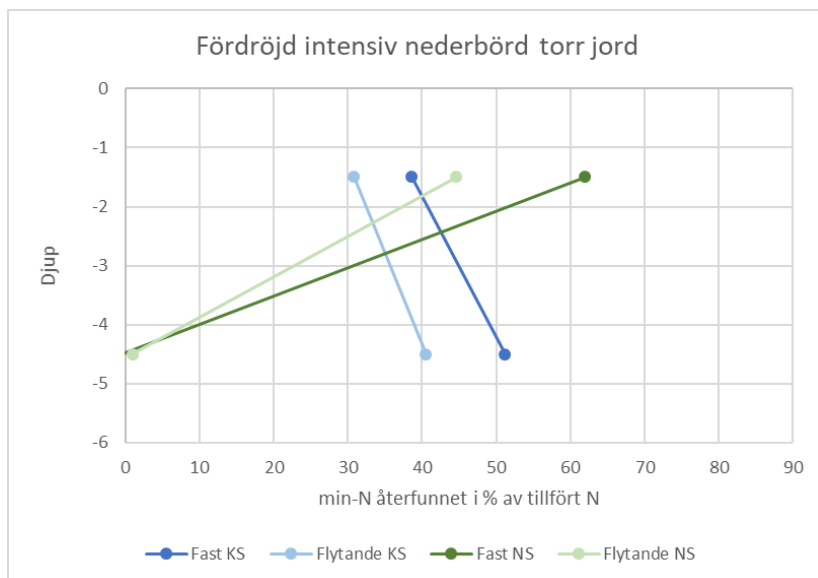
### 4.3. Marktransport

Data i avsnittet är tagen från extraktionsanalyserna med KCl som extraktionsmetod. Mätvärdena från kontrollproverna subtraherades från varje prov för att endast visa påverkan från tillfört gödselmedel. I det nedre skiktet har endast en tolkande analys gjorts. Mineralkväve återfunnen i de två skikten presenteras i procent av tillförd N-mängd i Figur 4–6.

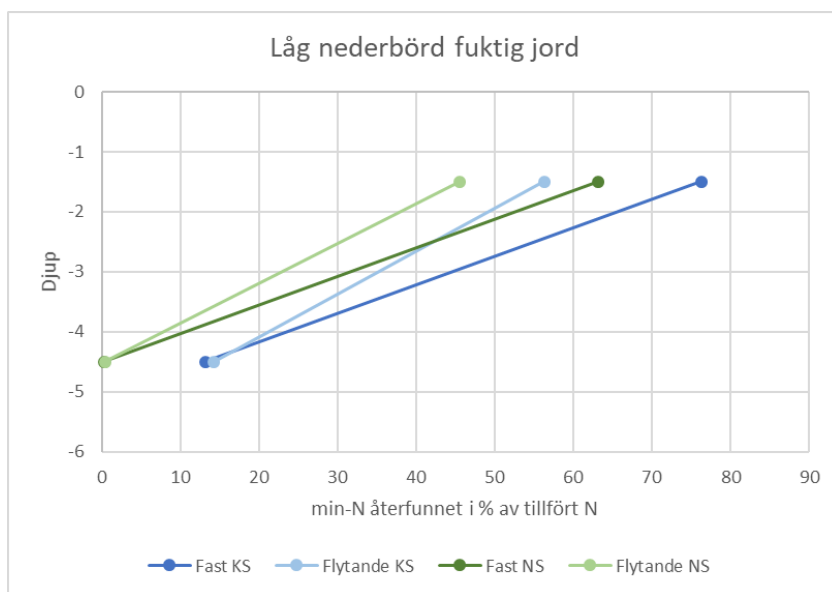
Det fanns en signifikant skillnad mellan fast och flytande gödselmedel i det övre skiktet oavsett vattenregim och N-form ( $p < 0,0001$ ). Flytande gödselmedel påvisade lägre återfunnet min-N i jämförelse med fast gödselmedel. För NS 21–24 syntes ingen skillnad mellan appliceringsformer i återfunnet min-N i nedre skiktet, oavsett vattenregim. Endast 0,4–1 % respektive 0–0,3 % av tillförd N återfanns som min-N för flytande respektive fast applicering. Kalksalpeter visade skillnader i återfunnet min-N i nedre skiktet för appliceringsformer och vattenregimer. Vattenregim *Intensiv nederbörd torr jord* och *Fördröjd intensiv nederbörd torr jord* visade lägre återfunnet min-N för flytande applicering i jämförelse med den fasta motsvarigheten. I *Låg nederbörd fuktig jord* uppmättes lika stora mängder återfunnet min-N i nedre skiktet för båda appliceringsformerna.



Figur 5. Återfunnet min-N i övre och nedre skiktet för vattenregim *Intensiv nederbörd torr jord* för respektive gödselmedel (Kalksalpeter (KS), NS 21–24 (NS)) och appliceringsform (fast och flytande). 2 M KCl användes som extraktionsmetod.



Figur 6. Återfunnet min-N i övre och nedre skiktet för vattenregim Fördröjd intensiv nederbörd torr jord för respektive gödselmedel (Kalksalpeter (KS), NS 21–24 (NS)) och appliceringsform (fast och flytande). 2 M KCl användes som extraktionsmetod.



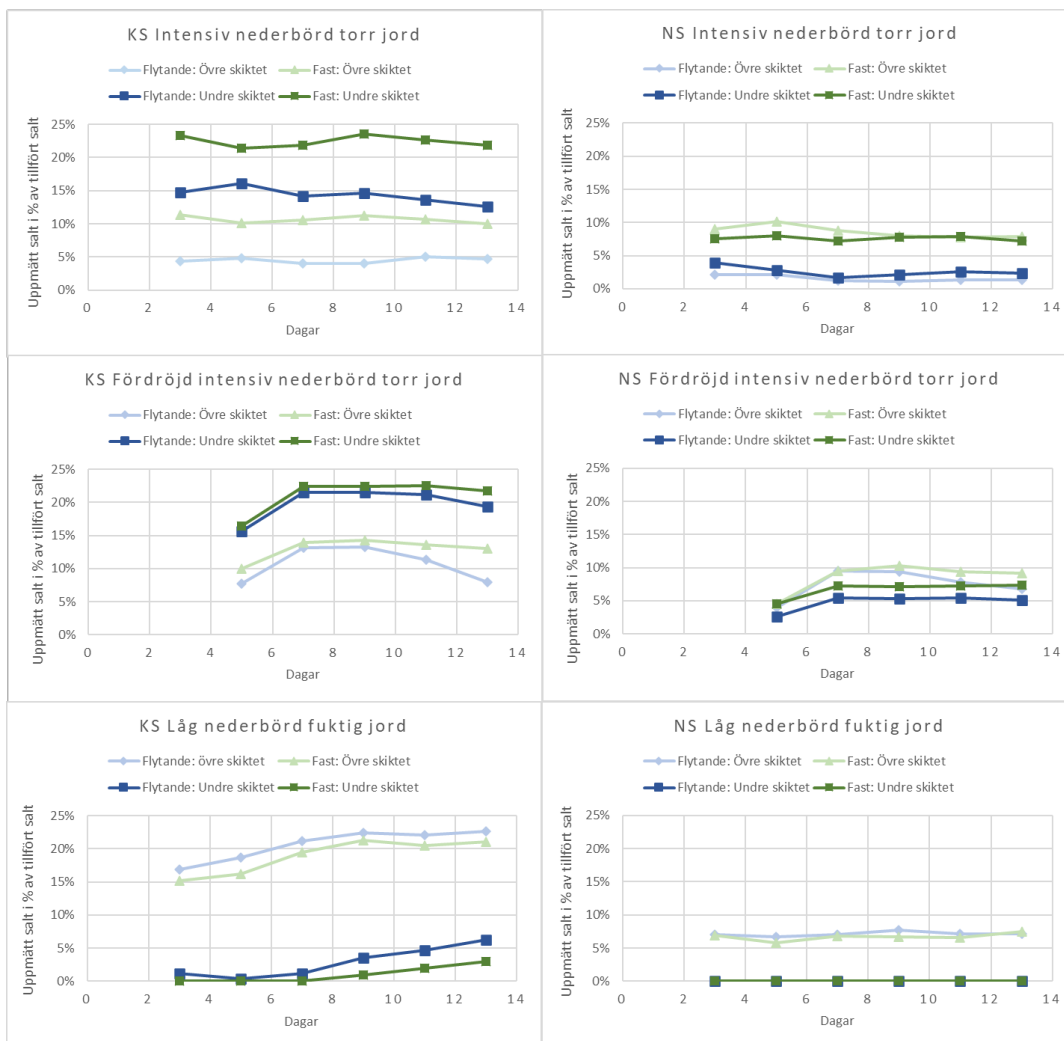
Figur 7. Återfunnet min-N i övre och nedre skiktet för vattenregim Låg nederbörd fuktig jord för respektive gödselmedel (Kalksalpeter (KS), NS 21–24 (NS)) och appliceringsform (fast och flytande). 2 M KCl användes som extraktionsmetod.

## 4.4. Salthaltsmätningar

Mätvärdena från kontrollproverna subtraherades från varje prov för att endast visa påverkan från tillfört gödselmedel. Salthalten uttryckt i procentandel av tillfört salt (gödselmedel) över tid för respektive gödselmedel, appliceringsform och vattenregim visas i Figur 7. För det nedre skiktet har endast en tolkande analys gjorts.

Fast appliceringsform resulterade i högre salthalter än flytande form oavsett gödselmedel i vattenregimerna *Intensiv nederbörd torr jord* och *Fördröjd intensiv nederbörd torr jord*. I vattenregim *Låg nederbörd fuktig jord* uppmättes högre salthalter för flytande appliceringsform i jämförelse med fast appliceringsform hos båda gödselmedel.

Salthaltsmätningarna visade att appliceringssättet inte verkar påverka hur salthalterna förändras över tid, då fast och flytande, oavsett gödselmedel och vattenregim, uppvisade liknande mönster i rörelse utan signifikanta skillnader. Dessa likheter syns i både undre och övre skiktet. Skillnaderna som syns mellan de olika appliceringsformerna syns redan vid första mättillfället och ligger sedan konstanta under hela försöksperioden. I de led där salthalterna indikerar att det finns min-N även i det undre skiktet syns även detta redan vid första mättillfället. De mer eller mindre konstanta salthalterna under hela försöksperioden tyder på att ingen fortsatt transport från det övre till det undre lagret händer under försöksperioden.



Figur 8. Salthaltsmätningar över tid för de tre olika vattenregimerna (Intensiv nederbörd torr jord, Fördröjd intensiv nederbörd torr jord, Låg nederbörd fuktig jord) för respektive gödselmedel (Kalksalpeter (KS) och NS 21–24 (NS)) och appliceringsform (fast och flytande). Uttryckt i procentuell andel för uppmätt salt av totalt salt tillfört i provet.

## 5. Diskussion

### 5.1. Appliceringsformens inverkan på tillgänglighet och marktransport

Resultaten visar att under detta experiments förutsättningar finns det signifikanta skillnader i N-tillgänglighet i marken efter applicering med fast respektive flytande gödselmedel. Detta stämmer överens med tidigare fältförsök men inte med inkubationsförsök som utförts under liknande förutsättningar och med likadan extraktionsmetod som föreliggande experiment (Yara 2019; Gruvaeus 2018;2019). För NS 21–24 sker i princip ingen marktransport till nedre skiktet oavsett appliceringsform. Kalksalpeter påvisar god transport för både fast och flytande appliceringsform till nedre skiktet i jämförelse med NS 21–24, men överlag transporteras mindre mängd N till nedre skiktet när Kalksalpeter appliceras i flytande form. Mycket tyder på att skillnaderna som uppkommit mellan fast och flytande N-applicering skedde i början av experimentet. Salthaltsmätningarna visar på liknande rörelsemönster mellan fast och flytande applicering, oavsett gödselmedel, under hela mätperioden. Tillsammans med det faktum att i princip allt återfunnet min-N NS 21–24 förekom i det översta skiktet oavsett appliceringsform, går det att dra slutsatsen att skillnaderna mellan fast och flytande uppstår i det övre skiktet de första två dagarna innan salthaltsmätningarna är gjorda.

Resultaten visar att appliceringsformen påverkas av olika nederbördsintensitet. Återfunnet min-N minskade markant för flytande applicering då det applicerats på torr jord när intensiv nederbörd simulerades direkt efter appliceringstillfället. Faktorer som kan bidra till skillnaderna som uppstått mellan vattenregimerna är dels den kontaktyta olika gödselmedel fått med lerpartiklar, dels de koncentrationer som uppstått i övre skiktet de första timmarna av experimentet. Hauck (1981) presenterade konceptet att fast gödsel kan innebära stora effekter på jordens markemiska processer till följd av höga koncentrationer vid den kontaktpunkt där gödselgranul och lerpartiklar möts. Flytande gödselmedel får istället en jämnt fördelad koncentration, blir snabbare en del av marklösningen där det späds ut och får stor kontaktyta med lerpartiklar vid applicering. Ovanstående resonemang kan



ge en övergripande förklaring till varför det uppkommit stora skillnader mellan både appliceringsformer och vattenregimer i den här studien. I *Intensiv nederbörd torr jord* kan koncentrationerna spätts ut i högre grad då det tillfördes ungefär 4 gånger mer vatten. Intensivt regnfall kan även ha bidragit till större kontaktyta för gödselmedel och lerpartiklar. I *Fördröjd intensiv nederbörd torr jord* blev endast 0,5 cm av övre skiktet fuktigt under tillförsel av låg nederbörd. Det här bör gett upphov till höga koncentrationer i det övre skiktet. Liknande effekt kan förväntas även i vattenregim *Låg nederbörd fuktig jord*, där tillförseln av nederbörd var låg och transporten ned i skiktet varit väldigt låg.

De presenterade förutsättningar i ovanstående stycken indikerar att den stora kontaktytan med lerpartiklar, alternativt de koncentrationer som uppstår i marklösningen inverkar för att ge upphov till skillnaderna som uppstått. Flera faktorer kan påverkas av dessa förutsättningar i den här studien, som  $\text{NH}_4^+$ -fixering, immobilisering, nitrifikation, denitrifikation och  $\text{NH}_3$ -avgång. Vilken betydelse dessa olika faktorer kan ha haft i det här experimentet kommer diskuteras i följande avsnitt.

### 5.1.1. Appliceringsformens inverkan på ammoniumfixering

Det fanns inte signifikanta skillnader i återfunnet min-N mellan vattenregimerna *Fördröjd intensiv nederbörd torr jord* och *Låg nederbörd fuktig jord* för något gödselmedel eller appliceringsform. Detta var oväntat då Black & Waring (1972) visade att en fixering kan öka då en jord torkar upp och Allison et al. (1953) påvisade att cykler av våta och torra förhållanden ökar fixeringen. En sådan effekt har inte synts i det här experimentet och den vattenregim som fick torka upp påvisade liknande resultat som en jord som hölls fuktig under hela experimentets gång. Detta kan bero på att det inte blivit tillräckligt extrema förhållanden mellan fuktighet och upptorkning, då tidigare studier (Ahmad et al 1982; Black & Waring 1972) skett på blötare jordar som sedan fått torka upp under än längre period eller i ugn. Då Kalksalpeter och NS 21–24 påvisar likartade skillnader mellan fast och flytande oavsett vattenregim går det att utesluta  $\text{NH}_4^+$ -fixeringens enskilda betydelse för skillnaderna mellan appliceringsformer.

NS 21–24 visade genomgående lägre återfunnet min-N än Kalksalpeter oavsett appliceringsform och vattenregim. Det går inte, utifrån den här studiens förutsättningar utesluta  $\text{NH}_4^+$ -fixeringens inverkan på sämre N-effektivitet vid tillförsel av  $\text{NH}_4^+$ -baserade gödselmedel jämfört med ett  $\text{NO}_3^-$ -baserat gödselmedel. Det är svårt att avgöra vad som blivit hårt fixerat av N-förlusterna i proverna, eftersom det inte var slutna prover i experimentet och förluster kan bero på andra faktorer såsom mikroorganismer. Däremot bör det gå att göra en uppskattning av

vad som blivit löst fixerat  $\text{NH}_4^+$  i proverna. Eftersom 2 M KCl är tillräckligt stark för att få med  $\text{NH}_4^+$  som finns fritt i marklösningen och det löst fixerade (Bremner 1965), medan 0,0125 CaCl<sub>2</sub> endast extraherar  $\text{NH}_4^+$  som förekommer fritt i marklösningen. Skillnaderna mellan extraktionsanalyserna skulle med försiktighet kunna tolkas som löst fixerat  $\text{NH}_4^+$ .

Det löst fixerade  $\text{NH}_4^+$  uppgår, utifrån dessa premisser, till nästan hälften av det  $\text{NH}_4^+$  som extraherades med 2 M KCl för alla appliceringsformer oavsett vattenregim. Detta tyder på att  $\text{NH}_4^+$ -fixering haft en inverkan men processen har inte förstärkts för flytande gödselmedel. Även om skillnaderna som påvisats mellan NS 21–24 och Kalksalpeter beror av fixering är det inte säkert att det har en negativ inverkan på N-upptag i fält, eller bidrar till de skillnader mellan  $\text{NH}_4^+$ - och  $\text{NO}_3^-$ -baserade gödselmedel som visats i tidigare fältförsök. Det är framförallt hårt fixerat  $\text{NH}_4^+$  som blir otillgängligt för grödor. Tidigare studier visar att  $\text{NH}_4^+$ -gödselmedel tenderar att bli löst fixerat och kan frigöras snabbare än hårt fixerat  $\text{NH}_4^+$  (Black & Waring 1972; Liang & McKenzie) och till viss del bli tillgängligt för grödupptag under växtsäsong (Dou & Steffens 1995; Kowalenko 1978). Hur stor effekt  $\text{NH}_4^+$ -fixering har i fältförsök påverkas till stor del av fixeringspotentialen i jorden. Skillnaderna som visats i fältförsök är utförda på lerjordar och då lerhalten är en viktig faktor för god fixeringsförmåga (Nömmik 1965) är det mycket möjligt att  $\text{NH}_4^+$ -fixering är en delvis förklaring till varför  $\text{NH}_4^+$ -baserade gödselmedel presterar sämre generellt än  $\text{NO}_3^-$ -baserade i dessa försök.

### 5.1.2. Appliceringsformens inverkan på immobilisering

Det går inte att utesluta inverkan från mikroorganismer i den här studien då det inte var slutna prover och inga mätningar på koldioxid ( $\text{CO}_2$ ),  $\text{N}_2\text{O}$  eller  $\text{N}_2$  utförts. För mikroorganismer kan höga salthalter vid kontaktpunkten leda till att de inte förbrukar N från fasta gödselmedel (McGregor & Syers 1974). Flytande gödselmedel blir som tidigare konstaterat mer utspätt, snabbt en del av marklösningen samt jämnt utspritt på stor kontaktyta vilket istället leder till lättillgängligt N för mikroorganismer (Hauck 1981).

Immobiliseringen i det här experimentet är vid första anblick osannolikt då det tillfördes stora mängder N till en jord som hade en C/N-kvot på 10. Eftersom inget organiskt material tillfördes som skulle öka kolhalten i jorden, leder N-tillförseln till en C/N-kvot under 20 vilket bör gynna nettomineralisering snarare än nettoimmobilisering (Eriksson et al. 2011). Däremot finns det en möjlig förklaring till att nettoimmobilisering kan ha skett i det här, men inte tidigare inkubationsförsök utförda av Yara. De främsta skillnaderna mellan den här och Yaras är att de upprätthöll en WHC på 60%, skiktade jorden endast, utan homogenisering samt förinkuberade proverna vilket skapar mer stabila

förhållanden och minskar inverkan från mikroorganismer under experimentets gång. Dessutom tillfördes flytande gödselmedel med pipettering i Yaras försök och inte med sprayflaska. Sprayflaskans fina droppar har gett en stor spridning över hela ytan, vilket möjliggjort en stor kontaktyta med potentiella mikroorganismer i föreliggande experiment. Homogeniseringen i det här experimentet kan ha krossat små porutrymmen och frigjort organiskt material som varit inkorporerat och otillgängligt för mikroorganismer. Jordproverna togs dessutom under våren så det kan förekomma lite rester kvar från rötter och halm som missats att sorteras ut och krossats i homogeniseringen. Detta skapar prover med högre C-halt jämnt fördelat i proverna, som vid tillförsel av N och nederbörd skapar goda förhållanden för immobilisering. Jämförs resonemanget med Yaras fältförsök som visar på liknande resultat som föreliggande experiment går det att spekulera kring att rester från halm och rötter bidrar till en högre kolhalt i jorden under ett fältförsök, vilket möjliggör högre immobilisering vid applicering av flytande gödselmedel. Dessutom ger spridning av flytande gödsel i ett fältförsök en jämnare och större spridning mer likt appliceringen i den här studien.

Beräkningar utfördes för att uppskatta de mängder C som gått åt för att immobilisera de ”försvunna” N-mängderna från proverna. Utgångspunkten i beräkningarna var en C/N-kvot på 10 samt att mikroorganismerna omsätter 2/3 av C och binder in 1/3 i sin biomassa. För fast och flytande NS 21–24 innebär detta att mikroorganismer skulle omsatt motsvarande 500–3400 kg C ha<sup>-1</sup> för att ha förbrukat de N som försvunnit i proverna. Veera et al (2015) visade att C respirationen kan öka med 0,1–0,2 % inom några dagar efter ett jordprov störts med omrörning. Utifrån denna studie kan mikroorganismer respirerat motsvarande 217–434 kg C ha<sup>-1</sup> i proverna. Dessa argument förutsätter att det är lättomsättbart kol som finns tillgängligt i proverna. Siffrorna är väldigt låga i jämförelse med den mängd C som antas ha förbrukats i denna studie för att förklara förlusterna av N. Dessutom bör *Fördröjd intensiv nederbörd torr jord* påvisat större skillnader mellan fast och flytande om immobilisering är en orsak, eftersom även denna utsattes för ett intensivt regnfall. De uppskattade beräkningarna tyder på att immobilisering inte är en enskild faktor till skillnaderna mellan fast och flytande i den här studien, men kan med fördel studeras vidare i sammanhanget eftersom det inte går att utesluta dess inverkan på experimentet.

### 5.1.3. Appliceringsformens inverkan på nitrifikation och denitrifikation

Abbasi & Adams (2000) visade att tillfälliga miljöförändringar som ett intensivt regnfall kan skapa variationer av anaeroba och aeroba zoner som kan gynna nitrifikation och denitrifikation samtidigt. Något som talar emot att detta haft

betydelse i mitt experiment är att vattenregim *Fördröjd intensiv nederbörd torr jord* inte visat samma effekter trots att även denna fått intensiv nederbörd. Andra faktorer som talar emot nitrifierare och denitrifierare i den här studien är den låga temperaturen i inkubationsrummet på 10°C som inte bör främja en hög aktivitet (Sahrawat 2008; Prado et al. 2006). Extraktionsanalyserna visade dessutom låga NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-halter generellt för båda gödselmedel. De uppmätta halterna som syntes var ungefär lika höga oberoende av appliceringsform. Förutsättningarna för denitrifikation var låga då WHC varit runt 40 % under experimentets gång, medan denitrifikation förväntas förekomma vid mer än 60% vattenfyllda porer (Laville et al. 2011).

#### 5.1.4. Appliceringsformens inverkan på ammoniakavgång

Det uppkom en vattenmättnad i övre skiktet första timmarna efter appliceringstillfället då hög nederbörd simulerades i *Intensiv nederbörd torr jord*. Det skulle bland annat kunna bidra till högre avdunstning i form av NH<sub>3</sub> för NS 21–24 (Gardner 1965). Det flytande gödselmedlet har ökad risk att avdunsta på det här sättet än fast gödselmedel som löses upp under än längre tid. Något som talar emot resonemanget är däremot att jorden har ett pH-värde under 7, vilket borde resultera i obefintlig NH<sub>3</sub>-avgång då jämvikten inte förskjuts för att bilda NH<sub>3</sub> (Freney et al. 1981; Dari et al. 2019). Det är osannolikt att NH<sub>3</sub>-avgången uppgått till 20 % av tillfört N i det här experimentet och därmed är den största faktorn för att förklara skillnaderna som uppvisades mellan fast och flytande NS 21–24. Det faktum att Kalksalpeter uppvisar samma mönster som NS 21–24 leder också till att det går att utesluta NH<sub>3</sub>-avgång som huvudsaklig förklaring.

## 5.2. Utvärdering av metod

Experimentets upplägg utgick från att NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-fixeringens påverkan på fast och flytande gödselmedel skulle studeras. Lerjorden som användes i studien var ett motiverat val då den har hög lerhalt med Illit och Vermikulit i modermaterialet, vilket främjar NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-fixering. Det är även lerhaltiga jordar som dessa skillnader syns på i tidigare fältförsök och en sandjord hade inte förväntats påvisa skillnader mellan fast och flytande gödselmedel. Vattenregimerna inkluderades för att skapa olika förutsättningar för fixering. I det här experimentet användes sprayflaska för att sprida det flytande gödselmedlet vilket ger en jämn och fin spridning med stor kontaktyta med leraggregat. Detta förväntades förstärka skillnaderna mellan appliceringsformerna då en hypotes var att kontaktytan med leraggregat bidrar till skillnaderna som uppstår. Det finns brister i upplägget av experimentet då det inte gått att bedöma huruvida de förluster av N som förekommer beror på specifikt

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-fixering. Kalksalpetern användes för att förstärka eller avfärda hypotesen om NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-fixeringens inverkan, beroende på vilka skillnader eller likheter det NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-baserade gödselmedel skulle påvisa. På så sätt har det varit möjligt att avgöra huruvida fixering har en betydelse för de skillnader som uppstår mellan olika appliceringsformer.

Salthaltsmätningarna utfördes för att upptäcka skillnader mellan fast och flytande under experimentets gång för respektive gödselmedel. Det förekom brister med mätningarna som visade den totala salthalten i provet och inte enbart påverkan av N. Det går därmed inte att utläsa specifikt hur N rör sig för respektive behandling. Mätningarna för NS 21–24 ger intryck av att påverkas mer av SO<sub>4</sub><sup>-</sup>-jonen än vad mätningarna för Kalksalpeter påverkas av Ca<sup>+</sup>-jonen, eftersom salthaltsmätningarna ger utslag i det nedre skiktet för NS 21–24 trots att inget N transporterats dit enligt extraktionsanalyserna. Kalksalpeter påvisar mätningar som påminner mer om extraktionsanalyserna. Tolkningar utifrån dessa resultat har därför gjorts för respektive gödselmedel i sin helhet. Konduktivitetmätaren som användes i experimentet för att mäta salthalterna påverkades i hög grad av kontakt med jordpartiklarna och vattenhalten i jordproverna. Detta ledde till att det inte gick att utföra mätningar under de två första dagarna eftersom vattenhalten inte stabiliserats i jordproverna och inte kunde ge korrekta mätvärden under den perioden. Fast och flytande påvisar ingen tydlig rörelse över tid och det går inte att se drastiska förändringar som indikerar att något händer under själva mätperioden. Trots bristerna med mätningarna har de tillfört information som påvisar att skillnaderna förekommer i början av experimentet, vilket kan underlätta för framtida studier som kan utforma experiment under kortare tidsperiod.

### 5.3. Inverkan av extraktionsmetod vid tolkning av resultatet

Det förekom större variationer mellan replikaten vid extraktion med CaCl<sub>2</sub> jämfört med KCl som extraktionsmetod, även om variationer syntes även för KCl. Framförallt NS 21–24 och flytande gödselmedel visade variationer mellan replikaten i analyserna. Vattenregim *Intensiv nederbörd torr jord* för flytande gödselmedel påvisade större standardavvikelse mellan replikaten än de övriga vattenregimerna och appliceringarna. Det var inte konsekvent mellan vilka replikat som varierade mellan de olika extraktionsmetoderna i den här behandlingen. Det går att tänka sig att om ett replikat visar avsevärt större uppmätta N-halter än de övriga bör samma replikat med den andra extraktionsmetoden visa ett liknande mönster. Men så var inte fallet, utan då kunde den andra analysmetoden påvisa att ett helt annat replikat hade avsevärt högre värden. Dessutom visade ett replikat i

vattenregim *Intensiv nederbörd torr jord* gödslat med NS 21–24 höga  $\text{NO}_3^-$ -halter vid extraktion med  $\text{CaCl}_2$ , något som inte alls förekom för samma replikat vid extraktion med  $\text{KCl}$ . Nitrat bör inte förekommit i provet då resultaten inte indikerar på hög nitrifikation. Detta indikerar att analysmetoderna var instabila eller att något gått snett vid extraktion eller analys. Då  $\text{KCl}$  visade stabilare värden användes den extraktionen för de statistiska analyserna av resultaten.

## 5.4. Framtida forskning

Litteraturen som gått igenom i arbetet tillsammans med det här experimentet visar på att många faktorer kan ha inverkat till skillnaderna som förekommer mellan fast och flytande. Det går inte att avgöra vilken faktor som har störst påverkan i den här studien då inga detaljerade experiment utfördes för att isolera en enskild faktor. Däremot går det i den här studien att utesluta vissa faktorer såsom denitrifikation, nitrifikation och  $\text{NH}_4^+$ -fixering. Utöver detta så tyder det på att immobilisering kan vara involverad till de skillnader vi ser mellan appliceringsformer, framtida forskning skulle kunna bestå av mer kontrollerade förhållanden för att studera vidare detta. Förslagsvis förinkubera jordproverna för att det lättomsättbara kolet ska förbrukas innan experimentets början, samt mäta koldioxidhalter för att uppskatta mikroorganismernas aktivitet. För att identifiera om N immobiliseras, skulle  $^{15}\text{N}$ -isotopen kunna användas. Det tyder på att skillnaderna som förekommer mellan fast och flytande gödselmedel uppkommer de första dagarna, vilket stärks av att salthaltsmätningarna inte visade markanta förändringar under experimentets gång. Framtida studier kan med fördel pågå under en kortare tidsperiod.

## 6. Slutsatser

Resultatet i den här studien visade att det fanns signifikanta skillnader mellan fast och flytande applicering på mängd återfunnet min-N i marken, oavsett form av gödselmedel. Detta stärker tidigare studiers indikationer på att dessa skillnader faktiskt existerar. Resultaten från studien tyder vidare på att  $\text{NH}_4^+$ -fixering inte är den huvudsakliga orsaken till de skillnader som uppkommer mellan appliceringsformerna men däremot att faktorer som nederbörd kan ha en betydelse.

Utifrån resultatet i den här studien kunde följande slutsatser dras utifrån hypoteserna:

- i. Det finns skillnader mellan fast och flytande N-gödselmedel som leder till minskad marktransport av N till rotzonen. Vad skillnaderna beror på har inte gått att fastställa i den här studien.
- ii. Det går att utesluta  $\text{NH}_4^+$ -fixering som en enskild faktor till skillnaderna mellan fast och flytande N-gödselmedel. Däremot kan  $\text{NH}_4^+$ -fixering ha en påverkan till att NS 21–24 generellt leder till en mindre mängd återfunnet mineralkväve än Kalksalpeter.
- iii. Studien visar tydligt att skillnaderna mellan fast och flytande gödselmedel uppkommer i det övre skiktet (0–3 cm).

Övriga observationer som gjordes:

- iv. Skillnaderna som uppstod i mängd återfunnet min-N efter applicering med fast respektive flytande gödselmedel beror troligtvis på processer som uppkommer under de första två dagarna efter N-tillförseln.
- v. Immobilisering kan ha en betydelse för skillnaderna som syns mellan fast och flytande i den här studien och tidigare fältstudier. Det finns saker som talar för och emot detta som enskild förklaring. Fortsatta studier krävs.

## Referenser

- Abbasi, M. K. & Adams, W. A. (2000). Gaseous N emission during simultaneous nitrification-denitrification associated with mineral N fertilization to a grassland soil under field conditions. *Soil biology & Biochemistry*, vol. 32, ss. 1251-1259. Tillgänglig:10.1016/S0038-0717(00)00042-0
- Ahmad, N., Reid, E.D., Nkrumah, M., Griffith, S.M & Gabriel. L. (1982). Crop utilization and fixation of added ammonium in soils of the West Indies. *Plant and Soil*, vol 67, ss. 167-186. Tillgänglig:10.1007/BF02182765
- Allison, F.E., Doethsch, J.H. & Roller, E. (1953). Availability of fixed ammonium in soils containing different clay minerals. *Soil Science*, vol. 75, ss. 373-381.
- Anon. (1965). Glossary of soil science terms-ammonium fixation. *Puoc. Soil Science Society America*. 29, 33.
- Bartlett, R.J. & Simpson, T.J. (1967). Interaction of Ammonium and Potassium in a Potassium-Fixing Soil. *Soil Science Society of America*, vol. 31, ss. 219–222. Tillgänglig: 10.2136/sssaj1967.03615995003100020023x
- Baohai, L., Guangjie, L., Herbert, J. K., Frantisek, B & Weiming, S. (2014). Ammonium stress in Arabidopsis: signaling, genetic loci, and physiological targets. *Trends in Plant Science*, vol. 19 (2), ss. 107-114. Tillgänglig: 10.1016/j.tplants.2013.09.004
- Black, A. S & Waring, S. A. (1972). Ammonium fixation and availability in some cereal producing soils in queensland. *Australian Journal of Soil Research*, vol. 10 (2), ss. 197-207. Tillgänglig: 10.1071/SR9720197
- Bremner, J.M. (1965). Inorganic forms of nitrogen. I: Norman, A. G. (red.) *Methods of Soil Analysis*. Madison, Wisconsin: ASA. Tillgänglig:10.2134/agronmonogr9.2.c33
- Bremner, J.M., Nelson, D.W & Silva, J.A. (1967). Comparison and Evaluation of Methods of Determining Fixed Ammonium in Soils. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 31, ss. 466-472. Tillgänglig: 10.2136/sssaj1967.03615995003100040016x
- Britto, D & Kronzucker, H. J. (2002). NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Toxicity in Hogher Plants: A Critical Review. *Journal of Plant Physiology*, vol. 159 (6), s. 567-584. Tillgänglig: 10.1078/0176-1617-0774
- Cavalli, D., Consolati, G., Marino, P. & Bechini, L. (2015). Measurements and simulation of soluble, and exchangeable, and non-exchangeable ammonium in three soils. *Geoderma*, vol. 259-260, ss. 116-125. Tillgänglig: 10.1016/j.geoderma.2015.05.011



- Cramer, M. D & Lewis, O. A. M. (1993). The Influence of Nitrate and Ammonium Nutrition on the Growth of Wheat (*Triticum aestivum*) and Maize (*Zea mays*) Plants. *Annals of Botany*, vol. 72 (4), ss. 359-365. Tillgänglig: 10.1006/anbo.1993.1119
- Crook, M. J & Ennos, A.R. (1995). The effect of nitrogen and growth regulators on stem and root characteristics associated with lodging in two cultivars of winter wheat. *Journal of Experimental Botany*, vol. 46 (8), ss. 931-938. Tillgänglig: 10.1093/jxb/46.8.931
- Crystall Growing Wiki (CGW). (2018). *Calcium-ammonium nitrate*. Tillgänglig: [https://en.crystals.info/Calcium-ammonium\\_nitrate](https://en.crystals.info/Calcium-ammonium_nitrate) [2020-05-27]
- Dari, B., Roger, C. W & Walsh, O. S. (2019). *Understanding Factors Controlling Ammonia Volatilization from Fertilizer Nitrogen Applications* (BUL 926). Idaho: University of Idaho Extension. <https://www.extension.uidaho.edu/publishing/html/BUL926-Understanding-Factors-Controlling-Ammonia-Volatilization-from-Fertilizer-Nitrogen-Applications.aspx?title=Search&category1=Search&category2=NULL> <https://www.extension.uidaho.edu/publishing/html/BUL926-Understanding-Factors-Controlling-Ammonia-Volatilization-from-Fertilizer-Nitrogen-Applications.aspx?title=Search&category1=Search&category2=NULL>
- Davidson, E. A., Vitousek, P. M., Matson, P. A, Riley, R., García-Méndez & Maass, J. M. (1991). Soil emissions of nitric oxide in a seasonally dry tropical forest of México. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 96 (D8), ss. 15439-15445. Tillgänglig: 10.1029/91JD01476
- Delgado E, Mitchell RAC, Parry MA, Driscoll SP, Mitchell VJ, Lawlor DW. 1994. Interacting effects of CO<sub>2</sub> concentration, temperature and nitrogen supply on the photosynthesis and composition of winter wheat leaves. *Plant Cell Environment*, vol, 17, ss. 1205–1213. Tillgänglig: 10.1111/j.1365-3040.1994.tb02018.x
- Dou, H & Steffens, D. (1995). Recovery of <sup>15</sup>N Labelled Urea as Affected by Fixation of Ammonium by Clay Minerals. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, vol. 158, ss. 351-354. Tillgänglig: 10.1002/jpln.19951580407
- Elmaci, Ö, Secer, M., Erdemir, O & Iqbal, N. (2002). Ammonium fixation properties of some arable soils from the Aegean region of Turkey. *European Journal of Agronomy*, vol. 17 (3), ss. 199-208. Tillgänglig: 10.1016/S1161-0301(02)00010-2
- Eriksson, J., Mattsson, L & Söderström, M. (2010). *Tillståndet i svensk åkermark och gröda, data från 2001–2007*. Naturvårdsverket, rapport 6349.
- Eriksson, J. (2011). *Marklära*. uppl 1. Lund: Studentlitteratur.
- European Fertilizer Manufacturers Association (2000). *Production of Ammonium Nitrate and Calcium Ammonium Nitrate*. [Broschyr]. EFMA. [https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2019/08/Booklet\\_6\\_final.pdf](https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2019/08/Booklet_6_final.pdf) [2020-10-16]

- Freney, J. R., Simpson, J. R & Denmead, O. T. (1981). Ammonia volatilization. *Ecological Bulletins*, vol. 33, ss. 291-302. Tillgänglig: [jstor.org/stable/45128671](http://www.jstor.org/stable/45128671)
- Gardner, W. R. (1965). Movement of nitrogen In soil. I: Bartholomew, W. V & Clark, F. E. (red.). *Soil Nitrogen*. Madison: American Society of Agronomy. 550-572. Tillgänglig: [10.2134/agronmonogr10.c15](http://www.jstor.org/stable/10.2134/agronmonogr10.c15)
- Gezerman A.O., Corbacioglu B.D. (2011). Caking and degradation problem on nitrogenous fertiliser and alternative solution processes. *International Journal of Chemistry*, vol, 3 (3), ss. 123-133. Tillgänglig: [10.5539/ijc.v3n3p123](http://www.jstor.org/stable/10.5539/ijc.v3n3p123)
- Gjems, O. (1967): Studies on clay minerals and clay – mineral formation in soil profiles in Scandinavia. *Meddelelser fra det norske skogforsøksvesen*, vol 21, ss. 301–415.
- Gruvaeus, I. (2018). Fast slog flytande kvävegödsel. *Växtpressen*, vol. 2, ss. 20-21.
- Gruvaeus, I. (2019). Kväveeffektivitet beror (inte bara) på kväveform!  
Tillgänglig: <http://www.forsoken.se/Konferens/Mellansvenska/2019/111-Ingmar%20Gruvaeus-Kv%C3%A4veform%20Flytande%20o%20Fast%20%C3%96rebro%20dec%202019.pdf> [2020-10-18]
- Hauck, R. D. (1981). Nitrogen fertilizer effects on nitrogen cycle processes. *Ecological Bulletins*, vol 33, ss. 551-562. Tillgänglig: [jstor.org/stable/45128688](http://www.jstor.org/stable/45128688)
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I.S. & White, P. (2012). Functions of Macronutrients. I: Marschner, P (red). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic press. ss. 135–189. Tillgänglig: [10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6](http://www.jstor.org/stable/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6)
- Hallin, S. Philippot, L., Löffler, F. E., Sanford, R. A., Jones, C. M. (2018). Genomics and Ecology of Novel N<sub>2</sub>O-Reducing Microorganisms. *Trends in Microbiology*, vol. 26 (1), ss. 43-55. Tillgänglig: [10.1016/j.tim.2017.07.003](http://www.jstor.org/stable/10.1016/j.tim.2017.07.003)
- Helali, S. M., Nebli, H., Kaddour, R., Mahmoudi, H., Lachaâl, M & Ouerghi, Z. (2010). Influence of nitrate-ammonium ratio on growth and nutrition of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Soil*, vol. 336, ss. 65-74. Tillgänglig: [10.1007/s11104-010-0445-8](http://www.jstor.org/stable/10.1007/s11104-010-0445-8)
- Hettiarachchi, G. M., Lombi, E., McLaughlin, M. J, Chittleborough, D & Self, P. (2006). Density Changes around Phosphorus Granules and Fluid Bands in a Calcareous Soil. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 70 (3), ss. 960-966. Tillgänglig: [10.2136/sssaj2005.0296](http://www.jstor.org/stable/10.2136/sssaj2005.0296)
- Hettiarachchi, G. M., McLaughlin, M. J., Scheckel, K. G., Chittleborough, D. J., Newville, M., Sutton, S & Lombi, E. (2008). Evidence for different reaction pathways for Liquid and Granular Micronutrients in a Calcareous Soil. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 72 (1), ss. 98-110. Tillgänglig: [10.2136/sssaj2007.0058](http://www.jstor.org/stable/10.2136/sssaj2007.0058)

- Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C & Haillard, B. (2003). Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their response to environmental constraints: A review. *Plant and Soil*, vol. 248, ss. 43-59. Tillgänglig: 10.1023/A:1022371130939
- Holloway, R. E., Bertrand, I., Frischke, A.J., Brace, D.M, McLaughlin, M.J & Shepperd, W. (2001). Improving fertilizer efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn. *Plant and soil*, vol. 236, ss. 209-219.
- Jordbruksverket. (2019). Symtom på näringsbrist hos vete. Tillgänglig: [jordbruksverket.se/amnesomraden/odling/jordbruksgrador/vete/vaxtnaring/bristsymtom.4.32b12c7f12940112a7c800036964.html](http://jordbruksverket.se/amnesomraden/odling/jordbruksgrador/vete/vaxtnaring/bristsymtom.4.32b12c7f12940112a7c800036964.html) [2019-03-2020]
- Johnson, J. W. (2015?) "Most Asked Agronomic Questions. The Ohio State University Extension Bulletin 760," (1999), tillgänglig: [http://agcrops.osu.edu/sites/agcrops/files/imce/fertility/Most%20Asked%20Agronomic%20Questions,%20Bulletin%20760,%20Chapter%2013\\_%20Miscellaneous.pdf](http://agcrops.osu.edu/sites/agcrops/files/imce/fertility/Most%20Asked%20Agronomic%20Questions,%20Bulletin%20760,%20Chapter%2013_%20Miscellaneous.pdf).
- Juang, T. C., Wang, M. K., Chen, H. J & Tan, C.C. (2001). Ammonium fixation by surface soils and clays. *Soil Science*, vol. 166 (5), ss. 345-352. Tillgänglig: 10.1097/00010694-200105000-00005
- Jönsson, E. (2018). *Kväveform och strategi i höstvete*. Sverigeförsöken 2018, Mellansverige, ss. 42–48.
- Kainiemi, V., Kirchmann, H & Kätterer, T. (2015). Structural disruption of arable soils under laboratory conditions causes minor respiration increases. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 179, ss. 88-93. Tillgänglig: 10.1002/jpln.201500139
- Kirchmann, H., Snäll, S., Eriksson, J & Mattsson, L. (2005). Properties and classification of soils of the Swedish long-term fertility experiments: V. Sites at Vreta Kloster and Högåsa. *Acta Agriculturae Scandinavica. Section B- Soil & amp; Plant Science*, vol. 55 (2), ss. 98-110. Tillgänglig: 10.1080/09064710510008711
- Kowalenko, C. G. (1978). Nitrogen transformations and transport over 17 months in field fallow microplots using <sup>15</sup>N. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 58, ss. 69-76. Tillgänglig: 10.4141/cjss78-007
- Kowalenko, C. G. & Cameron, D. R. (1976). Nitrogen transformations in an incubated soil as affected by combinations of moisture content and temperature and adsorption-fixation of ammonium. *Canadian Journal Of Soil Science*, vol. 56 (2), ss. 63-70. Tillgänglig: 10.4141/cjss76-010
- Laville, P., Lehuger, S., Loubet, B., Chaumartin, F & Cellier, P. (2011). Effect of management, climate and soil conditions on N<sub>2</sub>O and NO emissions from an arable crop rotation using high temporal resolution measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 151 (2), ss. 228-240. Tillgänglig: 10.1016/j.agrformet.2010.10.008
- Li, K., Zhao, Y., Yuan, X., Zhao, H., Wang, Z., Li, S. & Malhi, S.S. (2012). Comparison of Factors Affecting Soil Nitrate Nitrogen and Ammonium

- Nitrogen Extraction. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 43 (3), ss. 571–588. Tillgänglig: 10.1080/00103624.2012.639108
- Liang, B.C. & MacKenzie, A.F. (1994). Fertilization rates and clay fixed ammonium in two Quebec soils. *Plant and Soil*, vol, 163, ss. 103-109. Tillgänglig: 10.1007/BF00033946
- Lide, D. R. (2004). Physical properties of inorganic compounds. I:Lide, D.R. (red), *CRC Handbook of Chemistry and Physics* . uppl, 84. Boca raton: CRC Press, ss. 4-42.
- Liu, Y., Zhang, B., Hu, F & Velde, B. (2008). Long-Term Fertilization Influences on Clay Mineral Composition and Ammonium Adsorption in a Rice Paddy Soil. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 72 (6), ss. 1580-1590. Tillgänglig: 10.2136/sssaj2007.0040
- Lombi, E., McLaughlin, M.J., Johnston, C., Armstrong, R.D & Holloway, R.E. (2004). Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in calcareous soil. *Soil Science Society of America*, vol, 68, ss. 682-689. Tillgänglig: 10.2136/sssaj2004.6820
- Lu, C & Tian, H. (2017). Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half century: shifted hot spots and nutrient imbalance. *Earth System Science Data*, vol. 9, ss. 181-192. Tillgänglig:10.5194/essd-9-181-2017
- Ma, G., Liu, W., Li, S., Zhang, P., Wang, C., Lu, H., Wang, L., Xie, Y., Ma, D & Kang, G. (2019). Determining the optimal N input to improve grain yield and quality in winter wheat with reduced apparent N loss in the North China Plain. *Frontier Plant science*, vol, 10, ss. 181. Tillgänglig: 10.3389/fpls.2019.00181
- Macgregor, A. N & Syers, J. K. (1974). Nitrogen fertiliser reaction in soils. *Proceedings Agronomy Society of New Zealand*, vol. 4, ss. 24-25.
- Marschner, P. (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants. uppl, 3. London: Academic Press. Tillgänglig: 10.1016/C2009-0-63043-9
- Michigan State University (2018). *All Fertilizers are not created equal*. Tillgänglig: [https://www.canr.msu.edu/news/all\\_fertilizers\\_are\\_not\\_created\\_equal](https://www.canr.msu.edu/news/all_fertilizers_are_not_created_equal) [2020-03-18]
- Michigan State University (2016). *Pros and cons of granular and liquid fertilizers*. Tillgänglig: [https://www.canr.msu.edu/news/pros\\_and\\_cons\\_of\\_granular\\_and\\_liquid\\_fertilizers](https://www.canr.msu.edu/news/pros_and_cons_of_granular_and_liquid_fertilizers) [2020-10-29]
- Miller, A. J. & Cramer, M. D. (2004). Root nitrogen acquisition and assimilation. *Plant and Soil*, vol. 274, ss. 1-36. Tillgänglig: 10.1007/s11104-004-0965-1
- Nieder, R., Benbi, D. K & Sherer, H, W. (2011). Fixation and defixation of ammonium in soils: a review. *Biology and Fertility of Soils*, vol. 47, ss. 1-14. Tillgänglig:10.1007/s00374-010-0506-4

- Nömmik, H. (1965). Ammonium Fixation and Other Reactions Involving a Nonenzymatic Immobilization of Mineral Nitrogen in Soil. I: Bartholomew, W. V. & Clark, F.E. (red). *Soil nitrogen*, uppl 10. Madison, Wisconsin, ss. 198-258. Tillgänglig: [10.2134/agronmonogr10.c5](https://doi.org/10.2134/agronmonogr10.c5)
- Nömmik, H. (1981). Fixation and biological availability of ammonium in soil clay minerals. I: Clark, F. E. & Rosswall, T (red). *Terrestrial Nitrogen Cycles*, uppl 33. Stockholm, ss. 273-279. Tillgänglig: [jstor.org/stable/45128669](https://www.jstor.org/stable/45128669)
- Nömmik, H & Vahtras, K. (1982). Retention and Fixation of Ammonium and Ammonia in Soils.I: Stevenson, F. J. (red.) *Nitrogen in Agricultural Soils*, vol. 22. Tillgänglig: [10.2134/agronmonogr22.c4](https://doi.org/10.2134/agronmonogr22.c4)
- Nunes, V. L. N., Mulvaney, R. L & Griesheim, K. L. (2019). Simple Diffusion Methods for Determination of Nonechangeable ammonium in Soils. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 83, ss. 1421-1430. Tillgänglig: [10.2136/sssaj2019.05.0167](https://doi.org/10.2136/sssaj2019.05.0167)
- Obrestad, T., Pettersen, J. M., Palmgren, O. & Syversen, U. R., Conditioning agent for nitrate-containing fertilizer. EP0320987B1. 1993-09-15.
- Olsson, Y. (2019). *Jordbruksmarkens användning 2019. Slutgiltig statistik*. Jordbruk, skogsbruk och fiske, JO 10 SM 1902. Jordbruksverket. Tillgänglig: [scb.se/contentassets/7621acf8c91f4632a7861ec3af0e02a5/jo0104\\_2019a01\\_sm\\_jo10sm1902.pdf](https://scb.se/contentassets/7621acf8c91f4632a7861ec3af0e02a5/jo0104_2019a01_sm_jo10sm1902.pdf)
- Osborne, G. (1976). The extraction and definition of non-exchangeable or fixed ammonium in some soils from southern New South Wales. *Soil Res.* (14), ss. 373–380. Tillgänglig: [10.1071/SR9760373](https://doi.org/10.1071/SR9760373)
- Paramasivam, S & Breitenbeck, G. A. (2000). Quantitative Determination of Recently Fixed Nonechangeable Ammonium in Soils. *Soil Science Society America Journal*, vol. 64, ss. 1859-1866. Tillgänglig: [10.2136/sssaj2000.6451859x](https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451859x)
- Philippot, L., Andert, J. Jones, C. M., Bru, J & Hallin, S. (2011). Importance of denitrifiers lacking the genes encoding the nitrous oxide reductase for N<sub>2</sub>O emissions from soil. *Global Change Biology*, vol. 17, ss. 1497-1504. Tillgänglig: [10.1111/j.1365-2486.2010.02334.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02334.x)
- Prado, A., Merino, O., Estavillo, J. M., Pinto, M & Gonzàles-Murua. (2006). N<sub>2</sub>O and NO emissions from different N sources and under a range of soil water contents. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, vol. 74, ss. 229-243. Tillgänglig: [10.1007/s10705-006-9001-6](https://doi.org/10.1007/s10705-006-9001-6)
- Raven, J. A & Smith, F. A. (1976). Nitrogen assimilation and transport In vascular land plants in relation to intracellular pH regulation. *New phytologist*, vol. 76 (3), ss. 415-431. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1976.tb01477.x>
- Reetz, H.F. (2016). *Fertilizer and their efficient use*. Paris: International Fertilizer Industry Association.

- Sahrawat, K. L. (2008). Factors Affecting Nitrification in Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 39 (9), ss. 1436-1446. Tillgänglig: 10.1080/00103620802004235
- Seçer, M., Lütfü Elmaci, Ö & Erdemir, O. (2018) Does the potential ammonium fixation of soils have an impact on the optimum nitrogen fertilizer rate?, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 49 (12), ss. 1522-1529. Tillgänglig: 10.1080/00103624.2018.1474363
- Sharpley, A. N & Syers, J. K. (1983). Transport of phosphorus in surface runoff as influenced by liquid and solid fertilizer phosphate addition. *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 19, ss. 321-326. Tillgänglig; 10.1007/BF00159593
- Shen, S, Ti, S & Kemper, D. W. (1997). Equilibrium and Kinetic Study of Ammonium Adsorption and Fixation in Sodium-Treated Vermiculite. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 61 (6), ss. 1611-1618. Tillgänglig: 10.2136/sssaj1997.03615995006100060011x
- Sherer, H. W, Feils, E & Beuters, P. (2014). Ammonium fixation and release by clay minerals as influenced by potassium. *Plant Soil Environment*, vol. 60 (7), ss. 325-331. Tillgänglig: 10.17221/202/2014-PSE
- Silva, J. A & Bremner, J. M. (1966). Determination and Isotope-Ratio Analysis of Different Forms of Nitrogen in Soils: 5. Fixed Ammonium. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 30 (5), ss. 587-594. Tillgänglig: 10.2136/sssaj1966.03615995003000050017x
- Speight, J. G. (2017). Industrial Inorganic Chemistry, I: Speight, J. G. (red.), *Environmental Inorganic Chemistry for Engineers*. Wyoming: Butterworth-Heinemann, ss. 111-169. Tillgänglig: 10.1016/C2013-0-16023-0
- Tilman, D. Cassman, K. G., Matson, P. A, Naylor, R & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, vol. 418, ss. 671-677. Tillgänglig: 10.1038/nature01014
- Titko III, S., Street, J. R & Logan T, J. (1987). Volatilization of Ammonia from Granular and Dissolved Urea Applied to Turfgrass. *Agronomy Journal*, vol. 79 (3), ss. 535-540. Tillgänglig: 10.2134/agronj1987.00021962007900030027x
- Trenkel, M.E. (2010). Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. uppl. 2. Paris, Frankrike: International Fertilizer Industry Association. Tillgänglig: fertilizer.org/images/Library\_Downloads/2010\_Trenkel\_slow%20release%20book.pdf
- Volpi, I., Laville, P., Bonari, E., Nasso, N & Bosco, S. (2017). Improving the management of mineral fertilizers for nitrous oxide mitigation: The effect of nitrogen fertilizer type, urease and nitrification inhibitors in two different textured soils. *Geoderma*, vol. 307, ss. 181-188. Tillgänglig: 10.1016/j.geoderma.2017.08.018

- Wahlstedt, G. (2019). *Försäljning av mineralgödsel för jord och trädgårdsbruk under 2017/18. Slutgiltig statistik*. Jordbruk, skogsbruk och fiske, MI 30 SM 1901. Jordbruksverket.
- Wang, D., Xu, Z., Zhao, J., Wang, Y & Yu, Z. (2011). Excessive nitrogen application decreases grain yield and increases nitrogen loss in a wheat-soil system. *Acta Agriculture Scandinavica, Section B- Soil & Plant Science*, vol. 61, ss. 681-692. Tillgänglig: 10.1080/09064710.2010.534108
- 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*, vol. 11, s. 483-489. Tillgänglig: 10.1016/j.partic.2012.10.005
- Ward, B. (2008). Nitrification in Marine Systems. I: Capone, D., Bronk, D., Mulholland, M & Carpenter, E. (red.) *Nitrogen in the Marine Environment*. uppl 2. Academic Press. 199-261. Tillgänglig: 10.1016/B978-0-12-372522-6.00005-0
- Wiklander, L. (1965). Marklösningens sammansättning och ekologiska betydelse. *Grundförbättring. Tidskrift för jordbrukets rationalisering genom grundförbättringar*, vol. 2, ss. 76-88.
- Wirén, N., Gazzarrini, S., Gojon, A & Frommer, W. B. (2000). The molecular physiology of ammonium uptake and retrieval. *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 3 (3), ss. 254-261. Tillgänglig: 10.1016/S1369-5266(00)80074-6
- Yara. (2019). Kväveformer och kväveeffektivitet. Yara försök 2018. Tillgänglig: <https://www.slu.se/globalassets/ew/org/inst/mom/fieldstations/uddevallakonf/2019/3ingemargruvaeusuddevalla-yara-kvaveformer-och-kvaveeffektivitet.pdf> [202010-18]
- Yara (2019a). Effect of different N forms on nitrogen turnover under Swedish spring conditions. [Opublikerat försök]. Research Centre Hanninghof. Tyskland: Yara.

# Tack

Det här arbetet har bidragit till likaväl glädjrika stunder som stundtals misär. Med det sagt har det varit med nöje som jag förkovrat mig i de mekanismer som kan inverka på skillnaderna mellan fast och flytande gödselmedel. Det är med frustration och spänning som jag lämnar det här arbetet, bärandes en känsla av att vara lite närmare ett svar på frågorna som ställts, samtidigt som ett fulländat svar känns långt borta.

Det här arbetet har framförallt varit givande tack vare människorna som funnits runt mig under arbetets gång. Jag vill börja med att tacka mina kursare Ida Mackegård, Mina Sattar Panahi, Olof Sundström och Emil Bengtsson som skrattat, gråtit och tagit välbehövliga kaffepauser med mig under arbetets gång. Jag vill tacka min syster Esmeralda Lövfstaf som stöttat mig i alla processer av det här arbetet. Jag vill tacka Claudia von Brömssen som tagit sig tid att hjälpa mig reda ut statistiken när den känts som en fullkomlig djungel. Jag vill även rikta ett tack till Ingemar Gruvaneus och Holger Kirchmann som bidragit med synpunkter och resonemang som stärkt min uppsats.

Sist men absolut inte minst vill jag tacka Karin Hamnér, som ställt upp i mina känslostormar som uppkommit under arbetets gång. Med stort tålamod guidat mig i utformning av metod, uppsatsskrivande och funnits till hands för att svara på varenda fråga som dykt upp i mitt huvud. Karins engagemang och hjälpsamhet har bidragit till att jag lämnar det här exjobbet med en varm plats i mitt hjärta.



## Appendix I

Behandling	Fast	NS 21-24	VIKT	Kalksalpeter	
	Replikat	Antal granuler		Antal granuler	VIKT
<b>1</b>	1	75	0.68	34	0.92
	2	72	0.68	34	0.92
	3	74	0.68	33	0.92
<b>2</b>	1	76	0.68	39	0.92
	2	74	0.68	39	0.92
	3	73	0.68	38	0.92
<b>3</b>	1	67	0.68	37	0.92
	2	66	0.68	36	0.92
	3	68	0.68	36	0.92

Behandling	Flytande	NS 21–24	VIKT	Kalksalpeter	
	Replikat	ml		ml	VIKT
<b>1</b>	1	0.98	1.20	0.91	1.22
	2	1.00	1.22	0.90	1.21
	3	0.99	1.21	0.90	1.20
<b>2</b>	1	0.99	1.21	0.91	1.22
	2	0.99	1.21	0.90	1.21
	3	1.00	1.22	0.91	1.22
<b>3</b>	1	1.00	1.22	0.90	1.21
	2	1.02	1.24	0.90	1.20
	3	0.97	1.18	0.90	1.20

## Appendix II

Tabell över exakta mängden nederbörd som tillförts för alla behandlingar under experimentets gång uttryckt i ml.

<b>NS 21-24 (Flytande)</b>									
<b>Behandling</b>	<b>Replikat</b>	<b>Dag 1</b>	<b>Dag 2</b>	<b>Dag 3</b>	<b>Dag 4</b>	<b>Dag 5</b>	<b>Dag 6</b>	<b>Dag 7</b>	<b>Totalt</b>
<b>1</b>	1	148.4	14.01	14.11	8.51	8.52	8.48	13.02	215.05
	2	148.44	14	13.95	8.5	8.57	8.51	13.01	214.98
	3	148.4	14.08	14.06	8.47	8.51	8.46	13	214.98
<b>2</b>	1	16.03		142.11	8.48	8.46	8.5	13	196.58
	2	16.11		142.03	8.72	8.47	8.53	12.95	196.81
	3	16.03		141.95	8.52	8.49	8.51	13	196.5
<b>3</b>	1	33.11	13.94	13.96	8.48	8.51	8.5	12.97	99.47
	2	33	13.98	13.99	8.48	8.47	8.47	13.02	99.41
	3	33.02	13.97	13.99	8.55	8.52	8.48	13	99.53
<b>Kalksalpeter (Flytande)</b>									
<b>Behandling</b>	<b>Replikat</b>	<b>Dag 1</b>	<b>Dag 2</b>	<b>Dag 3</b>	<b>Dag 4</b>	<b>Dag 5</b>	<b>Dag 6</b>	<b>Dag 7</b>	<b>Totalt</b>
<b>1</b>	1	148.42	13.98	14.02	8.54	8.55	8.51	12.96	214.98
	2	148.45	14.01	13.97	8.51	8.48	8.5	13.03	214.95
	3	148.52	13.97	14.15	8.48	8.48	8.52	12.97	215.09
<b>2</b>	1	15.99		142.10	8.49	8.48	8.49	13.02	196.57
	2	15.98		142.0	8.48	8.52	8.57	12.97	196.52
	3	16.14		142.34	8.49	8.48	8.51	12.99	196.95
<b>3</b>	1	32.98	14.03	14	8.59	8.51	8.5	13.01	99.62
	2	33.02	13.98	13.94	8.53	8.52	8.49	12.99	99.47

	3	32.99	14.35	14	8.52	8.46	8.53	13.13	99.98
--	---	-------	-------	----	------	------	------	-------	-------

---

**NS 21-24 (Fast)**

<b>Behandling</b>	<b>Replik</b>	<b>Dag 1</b>	<b>Dag 2</b>	<b>Dag 3</b>	<b>Dag 4</b>	<b>Dag 5</b>	<b>Dag 6</b>	<b>Dag 7</b>	<b>Totalt</b>
<b>1</b>	1	148.4	13.96	13.97	8.51	8.54	8.52	13	214.9
	2	148.44	13.96	13.99	8.55	8.55	8.47	13	214.96
	3	148.47	14.03	13.96	8.46	8.46	8.51	12.97	214.86
<b>2</b>	1	16.15		142.02	8.46	8.52	8.5	13	196.65
	2	15.97		142.11	8.64	8.5	8.49	12.97	196.68
	3	15.99		141.98	8.48	8.47	8.55	13.17	196.64
<b>3</b>	1	33.02	13.99	13.99	8.52	8.49	8.51	12.96	99.48
	2	32.95	14.05	14.12	8.47	8.68	8.47	13.07	99.81
	3	32.99	14.11	13.99	8.47	8.6	8.48	13.2	99.84

---

**Kalksalpeter (Fast)**

<b>Behandling</b>	<b>Replik</b>	<b>Dag 1</b>	<b>Dag 2</b>	<b>Dag 3</b>	<b>Dag 4</b>	<b>Dag 5</b>	<b>Dag 6</b>	<b>Dag 7</b>	<b>Totalt</b>
<b>1</b>	1	148.48	14.06	13.99	8.63	8.57	8.47	13.09	215.29
	2	148.47	13.98	14.01	8.46	8.54	8.49	12.99	214.94
	3	148.46	13.97	13.97	8.54	8.49	8.49	13.18	215.1
<b>2</b>	1	15.96		142.05	8.58	8.6	8.5	13.01	196.7
	2	16.03		142.02	8.47	8.51	8.51	13.04	196.76
	3	16.06		142.02	8.46	8.52	8.48	12.99	196.53
<b>3</b>	1	33.02	13.95	13.98	8.48	8.47	8.49	13.04	99.43
	2	32.99	13.97	14.02	8.52	8.48	8.54	12.98	99.5
	3	33.03	14.06	14.04	8.48	8.48	8.51	12.99	99.59

---

**Kontroller**

<b>Behandling</b>	<b>Replik</b>	<b>Dag 1</b>	<b>Dag 2</b>	<b>Dag 3</b>	<b>Dag 4</b>	<b>Dag 5</b>	<b>Dag 6</b>	<b>Dag 7</b>	<b>Totalt</b>
<b>1</b>	1	148.41	13.95	14.01	8.5	8.52	8.52	13	214.91
	2	148.51	13.97	14.07	8.48	8.51	8.49	13.01	215.04
	3	148.42	14.01	13.95	8.54	8.51	8.45	13.05	214.93
<b>2</b>	1	16.13		142.1	8.49	8.49	8.49	12.98	196.68
	2	16.56		142.02	8.49	8.46	8.53	13	197.06

	3	16.19		141.97	8.48	8.52	8.52	12.96	196.64
<b>3</b>	1	33.01	14.03	14.2	8.52	8.5	8.53	12.98	99.77
	2	32.97	13.96	14.1	8.53	8.48	8.53	12.97	99.54
	3	33.02	13.97	14.09	8.49	8.52	8.49	13.02	99.6

## Appendix III

Uppmätta salthaltsvärden i g salt för alla vattenregimer, gödselmedel och appliceringsformer.

Dag	Fast Kalksalpeter Övre skiktet 0-3 cm		Undre skiktet 3-6 cm	
	Medelvärde (g salt g <sup>-1</sup> liter vatten)	Std	Medelvärde (g salt g <sup>-1</sup> liter vatten)	Std
Behandling 1				
3	0.23	0.05	0.47	0.09
5	0.23	0.06	0.48	0.08
7	0.24	0.05	0.50	0.04
9	0.25	0.05	0.53	0.04
11	0.25	0.04	0.52	0.04
13	0.23	0.04	0.49	0.05
Behandling 2				
7	0.22	0.14	0.36	0.11
9	0.30	0.09	0.49	0.11
11	0.32	0.07	0.49	0.10
13	0.30	0.06	0.49	0.09
15	0.29	0.06	0.48	0.07
Behandling 3				
3	0.34	0.14	-0.01	0.01
5	0.37	0.11	-0.01	0.02
7	0.44	0.08	0.00	0.01
9	0.48	0.07	0.03	0.02
11	0.47	0.06	0.05	0.02
13	0.47	0.05	0.06	0.02

<b>Flytande Kalksalpeter</b>				
<b>Övre skiktet 0-3 cm</b>			<b>Undre skiktet 3-6 cm</b>	
<b>Dag</b>	<b>Medelvärde (g salt g<sup>-1</sup> liter vatten)</b>	<b>Std</b>	<b>Medelvärde (g salt g<sup>-1</sup> liter vatten)</b>	<b>Std</b>
<b>Behandling 1</b>				
3	0.07	0.05	0.24	0.13
5	0.08	0.07	0.26	0.17
7	0.07	0.06	0.23	0.17
9	0.07	0.05	0.24	0.16
11	0.08	0.06	0.22	0.14
13	0.08	0.06	0.20	0.13
<b>Behandling 2</b>				
7	0.13	0.04	0.26	0.11
9	0.22	0.07	0.35	0.08
11	0.22	0.06	0.36	0.08
13	0.19	0.06	0.35	0.07
15	0.14	0.04	0.33	0.05
<b>Behandling 3</b>				
3	0.28	0.05	0.02	0.01
5	0.31	0.06	0.01	0.02
7	0.35	0.03	0.02	0.02
9	0.37	0.03	0.06	0.02
11	0.36	0.03	0.08	0.02
13	0.36	0.02	0.10	0.02
<b>Fast NS 21-24</b>				
<b>Övre skiktet 0-3 cm</b>			<b>Undre skiktet 3-6 cm</b>	
<b>Dag</b>	<b>Medelvärde (g salt g<sup>-1</sup> liter vatten)</b>	<b>Std</b>	<b>Medelvärde (g salt g<sup>-1</sup> liter vatten)</b>	<b>Std</b>
<b>Behandling 1</b>				
3	0.19	0.04	0.16	0.05
5	0.22	0.04	0.17	0.03
7	0.19	0.03	0.16	0.03
9	0.17	0.03	0.17	0.03
11	0.17	0.02	0.17	0.03
13	0.17	0.02	0.16	0.03
<b>Behandling 2</b>				
7	0.10	0.03	0.10	0.10
9	0.20	0.02	0.15	0.06
11	0.22	0.03	0.15	0.06
13	0.20	0.04	0.15	0.05
15	0.20	0.04	0.16	0.04
<b>Behandling 3</b>				
3	0.15	0.02	-0.01	0.02
5	0.13	0.03	-0.04	0.01
7	0.15	0.02	-0.03	0.01
9	0.14	0.02	-0.01	0.01

11	0.14	0.01	-0.01	0.01
13	0.16	0.02	0.00	0.01

<b>Flytande NS 21-24</b>				
<b>Dag</b>	<b>Övre skiktet 0-3 cm</b>		<b>Undre skiktet 3-6 cm</b>	
	<b>Medelvärde (g salt g<sup>-1</sup> liter vatten)</b>	<b>Std</b>	<b>Medelvärde (g salt g<sup>-1</sup> liter vatten)</b>	<b>Std</b>
<b>Behandling 1</b>				
3	0.04	0.06	0.07	0.05
5	0.04	0.06	0.05	0.05
7	0.02	0.05	0.03	0.04
9	0.02	0.06	0.04	0.03
11	0.02	0.06	0.04	0.04
13	0.02	0.05	0.04	0.04
<b>Behandling 2</b>				
7	0.07	0.05	0.05	0.05
9	0.17	0.05	0.10	0.03
11	0.17	0.04	0.10	0.03
13	0.14	0.04	0.10	0.02
15	0.12	0.04	0.09	0.02
<b>Behandling 3</b>				
3	0.12	0.07	0.00	0.03
5	0.12	0.05	-0.02	0.02
7	0.12	0.06	-0.02	0.02
9	0.13	0.04	0.00	0.02
11	0.13	0.03	0.00	0.02
13	0.12	0.03	0.00	0.01

## Appendix III

Totala mängden extraherat  $\text{NO}_3^-$  och  $\text{NH}_4^+$  uttryckt i mg N för varje vattenregim, gödselmedel och appliceringsform. Varje värde motsvarar medelvärdet  $\pm$  Std.

Behandling	Gödsel	Appliceringsform	$\text{NO}_3^-$ (mg N) med olika reagens		$\text{NH}_4^+$ (mg N) med olika reagens	
			KCl	CaCl <sub>2</sub>	KCl	CaCl <sub>2</sub>
Intensiv torr	KS	Fast	119,23 $\pm$ 0,68	122,46 $\pm$ 0,53	7,22 $\pm$ 1,35	2,26 $\pm$ 0,09
Intensiv torr	KS	Flytande	35,31 $\pm$ 22,46	29,79 $\pm$ 20,78	1,26 $\pm$ 0,73	0,26 $\pm$ 0,35
Intensiv torr	NS 21–24	Fast	1,12 $\pm$ 0,26	0,08 $\pm$ 0,47	107,68 $\pm$ 4,89	59,76 $\pm$ 12,94
Intensiv torr	NS 21–24	Flytande	0,95 $\pm$ 0,66	20,41 $\pm$ 27,86	5,46 $\pm$ 6,29	3,20 $\pm$ 4,58
Fördröjd torr	KS	Fast	120,71 $\pm$ 2,16	121,34 $\pm$ 1,08	7,22 $\pm$ 1,54	1,98 $\pm$ 0,19
Fördröjd torr	KS	Flytande	69,82 $\pm$ 4,28	70,68 $\pm$ 6,65	6,03 $\pm$ 0,27	1,71 $\pm$ 0,47
Fördröjd torr	NS 21–24	Fast	0,17 $\pm$ 0,07	-0,80 $\pm$ 0,46	88,22 $\pm$ 5,64	45,88 $\pm$ 17,87
Fördröjd torr	NS 21–24	Flytande	2,03 $\pm$ 1,05	0,49 $\pm$ 0,75	51,25 $\pm$ 5,14	27,49 $\pm$ 12,67
Låg fuktig	KS	Fast	119,65 $\pm$ 3,23	120,87 $\pm$ 6,40	8,02 $\pm$ 0,87	2,54 $\pm$ 0,73

Låg fuktig	KS	Flytande	69,68 ± 1,04	63,11 ± 16,66	5,44 ± 1,03	1,40 ± 0,09
Låg fuktig	NS 21–24	Fast	62,40 ± 0,26	0,94 ± 0,12	51,25 ± 5,14	40,44 ± 4,73
Låg fuktig	NS 21–24	Flytande	2,07 ± 0,55	1,70 ± 0,10	51,68 ± 9,89	32,82 ± 10,49

---