

Nitrifikationshämmare

Ett sätt att minska förlusten av kväve från jordbruksmarken?

Nitrifikationshämmare (NI) är ett preparat som kan appliceras i samband med gödsel-spridning. Syftet är att minska risken för kväveläckage och utsläpp av lustgas från jordbruksmark genom att fördröja kvävet omvandling i marken. Denna studie ger en översikt av forskningsläget för NI. Flera studier visar att NI kan ge stora reduktioner av kväveförluster vid rätt förhållanden. Dock finns kunskapsluckor om när NI ger önskvärd effekt i fält och om det fördröjda kvävet istället förloras genom ökad ammoniakavgång. Det är även oklart om riskerna med NI har utvärderats tillräckligt. Användningen av NI har ej fått genomslag i Sverige och är blygsam i andra länder. Hög kostnad i kombination med en osäker effekt på skördens avkastning gör att kostnaden inte självklart kompenseras av en ökad intäkt. Indikationer finns vidare att kostnadseffektiviteten är låg.

Inledning

Kväve är ett grundläggande näringsämne för växter och djur. Det ingår i många biologiska processer och är bland annat beståndsdel i aminosyror – proteinernas byggstenar. Förr i tiden begränsades jordbrukets skördar av det kväve som finns naturligt tillgängligt. Under 1900-talet utvecklades en industriell process för storskalig produktion av syntetiskt kväve, den så kallade Haber-Bosch processen, vilket möjliggjorde framtagningen av mineralgödsel. Intensifieringen av jordbruket med hjälp av mineralgödsel har gett ökade skördar till gagn för livsmedelsförsörjningen. Men, baksidan är att naturen drabbas negativt av exempelvis övergödning och utsläpp av växthusgaser då kväve förloras från jordbruket till omgivningen.

För att begränsa förlusten av kväve från jordbruket finns olika styrmedel och åtgärder. En vanlig och beprövad ansats är att reglera jordbrukets brukningsmetoder, exempelvis att begränsa mängden gödsel som får tillföras per hektar och att ställa krav på lagringskapacitet så att stallgödsel kan spridas vid den tidpunkt då den gör

störst nytta. En annan ansats är att försöka påverka olika biologiska processer; i det här fallet de processer som styr kvävet omvandling i jorden. Ett exempel på det senare är tillsats av nitrifikationshämmare (NI)¹ vid spridning av stall- och mineralgödsel. NI är kemiska preparat som hämmar de mikroorganismer i marken som gör kväve tillgängligt som näring för växtligheten. Syftet med NI är att bromsa omvandlingen av kväve och ge grödan mer tid att ta upp näringen så att förlusterna kan minska.

NI utvecklades ursprungligen för att motverka läckage av kväve men har även visat sig ha effekt på utsläpp av kväveföreningen lustgas. Lustgas är en mycket potent växthusgas vilket gör NI intressanta i klimatsammanhang. NI används i viss mån i Europa, USA och Australien (Freeman m.fl., 2020). I Sverige har användningen av NI inte fått genomslag. Frågan är om NI skulle kunna vara intressant i ett svenskt sammanhang för att minska jordbrukets klimatbelastning.

Syfte

Syftet med studien är ge en överblick av forskningsläget för NI. Frågor som adresseras är:

¹ NI efter den engelska termen *nitrification inhibitors*.

- Vad vet vi om effekten på utsläpp av lustgas och läckage av kväve?
- Finns det risker med användningen?
- Är det en kostnadseffektiv åtgärd för att uppnå klimat- och miljömål?
- Finns ett intresse bland jordbrukare att använda nitrifikationshämmare?

Tyngdpunkten i studien ligger på NI som en klimatåtgärd. Studien är en litteraturöversikt och finansieras av Naturvårdsverket.

Bakgrund

Förluster av kväve från jordbruket till den omgivande naturen ger upphov till flera miljöproblem. I detta avsnitt ges en bakgrund till problematiken med kväve, vad nitrifikation innebär och vad nitrifikationshämmare är för något.

Planetens gräns för kväve överskrids

Begreppet "planetens hållbara gränser" myntades av Rockström m.fl. (2009). Begreppet pekar ut miljöprocesser som ger stabilitet för livet på jorden. Tanken är att det finns nio gränser för mänsklig miljöpåverkan och när en gräns överskrids kan konsekvenserna bli stora och förödande. Fyra av gränserna överskrids idag (Steffen m.fl., 2015). Det handlar om klimatförändringar, förlust av biologisk mångfald, förändrad markanvändning samt förändrade flöden av näringsämnen kväve och fosfor. Klimatförändringen är den mest kända av dessa men minst lika allvarlig är massutrotningen av arter, att naturen omskapas genom avskogning, gruvdrift, intensifierat jordbruk och städernas utbredning samt att en mycket stor mängd biotillgängligt kväve varje år tillförs naturens kretslopp från jordbruket.²

Vad som gör kväveproblematiken komplex är att kväve kan omvandlas till flera olika föreningar som kan förloras på olika sätt och ställa till olika problem i naturen, se tabell 1.

² Andra kvävekällor är kemiska industriella processer, förbränning och hantering av avloppsvatten.

Tabell 1: Risker till följd av hög tillförsel av biotillgängligt kväve till naturen

Miljö	Negativa effekter	Huvudsaklig form av kväve
Vatten	Förorening av grund- och dricksvatten	Nitrat (NO ₃ -)
Luft	Effekter på humanhälsa, vegetation samt byggnader och monument	Kväveoxider (NO _x) Ammoniak (NH ₃) Partiklar Salpetersyra (HNO ₃)
Jordhälsa	Försurning	Organiskt kväve
Biologisk mångfald och ekosystem	Övergödning och försurning av landbaserade och marina ekosystem	Nitrat (NO ₃ -) Ammonium (NH ₄ ⁺) Organiskt kväve
Växthusgaser och ozonskikt	Global uppvärmning. Nedbrytning av ozonskiktet	Lustgas (N ₂ O)

Källa: OECD (2018)

Överskott av kväve i naturen har en negativ påverkan på vatten- och luftkvaliteten samt jordhälsan. Det skadar ekosystem och den biologiska mångfalden (Sutton m.fl., 2013). Vidare förloras kväve i form av lustgas från jordbruksmark. Lustgas är en kraftfull växthusgas med en uppvärmningspotential som är nästan 300 gånger så stor som den för koldioxid sett över en period på hundra år. Lustgas bryter även ner stratosfärens skyddande ozonskikt. Då flera andra ozonförstörande substanser har åtgärdats är lustgas nu den främsta källan till att ozonskiktet förstörs. Ungefär 70 procent av världens lustgasutsläpp sker från jordbruket (Sutton m.fl., 2019).

Omvandling av kväve i jordbruksmarken

I jordbruksmark finns kväve bundet till mulden, dvs. till jordens organiska material. Markens mikroorganismer bryter ner mulden och då frigörs kvävet och blir tillgängligt som näring för den växande grödan. Förrådet av mull fylls på

av skörderester, stallgödsel och förmultnande rötter (Ernfors, 2021). Kväve tillförs även i form av mineralgödsel samt genom atmosfärisk deposition och så kallad biologisk kvävefixering, dvs. att kvävefixerande växter, som baljväxter, omvandlar luftens kväve till en form som växter kan tillgodogöra sig

Kväve genomgår en cykel med flera stadier; från kvävgas (N_2) i atmosfären via mark, växter och djur för att sedan återgå till atmosfären. I marken är två processer centrala för kvävet omvandling; *nitrifikation* och *denitrifikation*. Nitrifikation är en naturlig process som ger marken dess bördighet; kväveföreningen ammonium omvandlas då till nitrat som växter lätt kan tillgodogöra sig. Nitrat är vattenlösligt och lätt rörligt i marken vilket gör att det lätt kan tas upp av växter men också att det lätt kan förloras till omgivande vattendrag. En snabb nitrifikation kan därför öka risken för kväveförluster om växtligheten inte hinner ta upp allt kväve som blir tillgängligt. Denitrifikation följer på nitrifikation och sker främst i vattenmättad, syrefattig mark. Då ombildas nitrat till olika kvävgasföreningar. Trots att det heter *denitrifikation* är processen alltså inte en motsats till nitrifikation, utan snarare en motsats till kvävefixering. Vid både nitrifikation, men framförallt vid denitrifikation, bildas lustgas.

Nitrifikation och denitrifikation utförs av mikroorganismer i marken. Processerna påverkas av temperatur, pH, syrehalt och hur förekomsten av konkurrerande organismer ser ut (Norton och Ouyang, 2019). I jord mättad med vatten hämmas exempelvis nitrifikation eftersom processen kräver syre. Likaså upphör nitrifikation i princip om jorden är mycket torr (Norton och Ouyang, 2019). Processerna är vidare beroende av mängden kol samt vilka kväveföreningar som finns tillgängliga i marken. Olika jordar har därför olika benägenhet att bilda lustgas och att läcka nitrat (Henriksson m.fl., 2015).

Växtligheten tar sällan upp allt nitrat som görs tillgängligt genom nitrifikation utan en del kan förloras till omgivningen, exempelvis genom utsläpp av lustgas eller kväveläckage.

Utsläpp av lustgas

I Sverige svarar utsläppen av kväveföreningen lustgas för nära hälften av jordbrukssektorns utsläpp av växthusgaser.³ Utsläppen av lustgas från marken varierar kraftigt över tid och rum; merparten sker i korta och kraftiga toppar i samband med nederbörd, gödsling och tjällossning.

Vad som gynnar lustgasbildning är hög tillgång till kväve, en begränsad syretillgång vilket följer av markens vattenhalt, samt markens textur och innehåll av organiskt material. Även pH och typ av gröda påverkar, samt hur den lokala floran av mikroorganismer ser ut. Dessa faktorer påverkas i sin tur av klimat och väder samt av val av odlingsåtgärder. Risken för lustgasutsläpp minskar vid god markstruktur, tillräcklig dränering, lämplig växtföljd och ett bra utnyttjande av gödselmedel (Henriksson m.fl., 2015).

Läckage av kväve

Läckage av kväveföreningen nitrat är en naturlig process som sker från all mark. I vilken grad det sker beror på klimat och jordtyp. Läckage från åkermark påverkas av hur odlingen bedrivs och varierar kraftigt från år till år framförallt beroende på vädret. Läckaget består dels av ytavrinning ut över åkerkanten och dels av utlakning ner genom marken förbi växternas rotzon. När kvävet passerat förbi rotzonen eller över åkerkanten kan det inte längre tas upp av växtligheten på åkern. Risken för läckage minskar om mängden gödselmedel och tidpunkten för spridning anpassas efter grödans behov.

Vad är nitrifikationshämmare?

NI är kemiska preparat som tillfälligt kan hämma de mikroorganismer som svarar för omvandlingen av ammonium till nitrat. Vid långsammare nitrifikation får växtligheten mer tid

³ I de utsläpp som hänförs till jordbrukssektorn ingår inte utsläpp från arbetsmaskiner, lokaler, utsläpp av koldioxid från markanvändning eller importerade utsläpp i form av mineralgödsel eller foder.

på sig att ta upp näringen och tanken är att kväveförlusterna därmed ska minska.⁴ Vanliga NI är Nitrapyrin, DCD och DMPP, se ruta 1. Preparaten kan appliceras på flera sätt; blandas med flytgödsel, tillsätts till mineralgödsel i fabrik, sprutas på betesmark/vall eller injiceras i mark.

Ruta 1: Vanliga nitrifikationshämmare

Dicyandiamid (DCD) Effekten av DCD kvarstår vanligen i 4-8 veckor beroende på miljöfaktorer. Ju varmare och våtare, desto snabbare bryts medlet ner. DCD är vattenlösligt. Vid nederbörd riskerar det att sköljas bort från rotzonen där det ska verka. Används i Europa.

3,4-Dimethylpyrazol fosfat (DMPP) Effekten av DMPP är verksam under 4-10 veckor beroende på miljöfaktorer. Det är en mer kraftfull hämmare än DCD och appliceras därför i mindre mängd. Den är även mindre löslig och rörlig i jorden jämfört med DCD. Används i Europa.

Nitrapyrin registrerades i USA år 1974 för användning inom jordbruket och har sedan dess främst använts vid odling av majs. Nitrapyrin är volatilt och appliceras därför vanligen genom att injiceras i marken. Det bryts ner inom 30 dagar i varma jordar men är stabilt vid lägre temperaturer. Används främst i Nordamerika.

Källa: Byrne m.fl. (2020)

Svensk erfarenhet av nitrifikationshämmare

I Sverige genomfördes studier och fältförsök med NI på 1980- och 90-talet. Tanken var då att använda dem för att begränsa kväveläckage vid höstspridning av stallgödsel. Särskilt för flytgödsel, som har en hög andel ammoniumkväve som lätt kan nitrifieras, sågs en potential för bättre resursutnyttjande och positiva miljöeffekter (Nilsson, 1991). Resultaten av studierna visade positiva effekter på både läckage och avkastning. Att NI trots detta aldrig kom att användas i större skala kan ha berott på att det saknades kunskap avseende dess långsiktiga effekter (Henriksson m.fl., 2015). Tillkomsten av regelverk med krav på lagringskapacitet och begränsad spridning av stallgödsel ledde också till att intresset för NI minskade.

⁴ Förutom nitrifikationshämmare finns även ureahämmare som används vid gödning med urin. De båda hämmarna kan kombineras i form av en dubbelhämmare.

Effekten av NI på lustgasutsläpp

På senare tid har NI lyfts som en möjlig klimatåtgärd för att minska utsläppen av lustgas från jordbruksmark. Vad vi skulle vilja veta är hur mycket NI kan minska utsläppen och under vilka förhållanden NI passar att användas. Det visar sig att det inte är helt enkelt att få ett entydigt svar på dessa frågor.

Flera studier visar minskade utsläpp

Effekten av NI på utsläppen av lustgas har undersökts i flera studier och många av dem visar att utsläppen minskar. Ett exempel är Guzman-Bustamante m.fl. (2019) som utförde fältexperiment med nitrifikationshämmaren DMPP på en försöksgränd i södra Tyskland under två år. De fann att utsläppen av lustgas vid odling av höstvetete i genomsnitt nästan halverades när DMPP tillsattes. Ett annat exempel är Misselbrook m.fl. (2014) som utförde experiment på 14 olika platser i England. De fann att DCD i mineralgödsel minskade utsläppen av lustgas med i genomsnitt 39 procent. För att få en överblick av forskningen om NI har det genomförts så kallade metaanalyser där flera studier ställs samman och övergripande slutsatser dras, se tabell 2.

Tabell 2: Metaanalyser av effekten av NI på utsläpp av lustgas

NI	Minskning	Studie
Olika NI	38 procent	Akiyama m.fl. (2010)
DCD	42 procent	Gilsanz m.fl. (2016)
DMPP	40 procent	
NI generellt	35 procent	Ruser och Schulz (2015)
Olika NI	38 procent	Thapa m.fl. (2016)

Ofta visar även metaanalyser på en betydande reduktion av lustgasutsläpp (Ruser och Schulz, 2015). Exempelvis fokuserade Gilsanz m.fl. (2016) på studier där nitrifikationshämmarna DCD och DMPP använts vid fältförsök. I deras

analys ingick 39 studier och de undersökte betydelsen av markanvändning, jordtyp och typ av preparat. De fann en minskning på i genomsnitt 40 procent av lustgasutsläppen för båda preparaten och att minskningen var störst för vallodling. I en metastudie av effekten av olika NI vid odling av majs, ris och vete där 43 studier ingick fann Thapa m.fl. (2016) en minskning av lustgasutsläppen på i snitt 38 procent.

Flera faktorer påverkar effekten av NI

Intressant är att skillnaderna kan vara stora mellan studier (Cahalan m.fl., 2015). Förutom studier med stor effekt på lustgasutsläppen finns det studier där effekten är liten eller helt uteblir (Dell m.fl., 2014), (Dougherty m.fl., 2016). I en metastudie för DMPP fann exempelvis Zhu m.fl. (2019) att effekten av preparatet varierade mellan 0 och 75 procent i olika studier. I en översikt av litteraturen fokuserade Woodward m.fl. (2021) på Nitrapyrin och konstaterar att effekten varierade såväl mellan som inom studier och mellan år, och att effekten ibland uteblev. I en studie av Nitrapyrin över två år fann exempelvis Parkin och Hatfield (2010) att lustgasutsläppen minskade vid majsodling men bara under ett av de två försöksåren, och enbart under en kortare tid. På årsbasis uppmätte de ingen minskning. I ett nyligen utfört danskt fältförsök med flytgödsel fann forskarna ingen effekt på lustgasutsläppen av DMPP (Wolf m.fl., 2022).

En förklaring till att effekten av NI varierar beror på att de påverkas av flera faktorer. Exempel är vilken gröda som odlas, klimat och väderhändelser, brukningsmetod och jordtyp (Thapa m.fl., 2016). Centralt är förhållandena i marken, se tabell 3.

När det gäller andra faktorer, som val av gröda, fann exempelvis (Thapa m.fl., 2016) en större effekt av NI på lustgasutsläppen vid odling av majs jämfört med vid odling av vete eller ris. Rörande brukningsmetoder spelar det roll när och hur gödselspridningen sker, exempelvis om nitrifikationshämmaren myllas ner eller tillsätts ovan jord, eller om grödan konstbevattnas (Abalos m.fl., 2014). Det har också visat sig att NI

är mest effektiva vid förhållanden med höga lustgasutsläpp (Gilsanz m.fl., 2016). En annan aspekt är koncentrationen av NI i marken (Li m.fl., 2020). Hur snabbt ett preparat bryts ner är därför av betydelse. Vid låga temperaturer är exempelvis den mikrobiologiska aktiviteten i marken låg. Då bryts NI ner i långsammare takt och har verkan över längre tid. Effekten kan även skilja sig mellan olika NI (Sha m.fl., 2020).

Tabell 3: Studier av NI och markförhållanden

Faktor	Effekt
Temperatur	DCD och DMPP är mindre effektiva vid högre temperatur (Guardia m.fl., 2018), (Lan m.fl., 2018). DCD är verksam under kortare tid och ger därför mindre effekt vid högre temperatur och blötare jord (Raza m.fl., 2021).
Marktyp	Interaktionen mellan temperatur samt jordens lerhalt och kolinnehåll bestämmer hur effektiv DCD är (McGeough m.fl., 2016). DMPP har lägre effekt i lerjordar och i jordar med högt organiskt innehåll (Zhu m.fl., 2019). NI fungerar bättre i sandig jord än i lerjord (Barth m.fl., 2019). Effekten av DCD är beroende av jordart (Cahalan m.fl., 2015).
pH-värde	DCD och DMPP blir mindre effektiva vid högre pH (Guardia m.fl., 2018). Lågt pH ger större effekt av NI (Abalos m.fl., 2014).
Nederbörd	I en blötare jord har DMPP effekt under en längre tid (Menéndez m.fl., 2012). När nederbörden varierar för grödor som inte konstbevattnas kan effekten av NI bli låg (Dell m.fl., 2014).

Forskningen har kommit långt i att peka ut faktorer som påverkar effekten av NI, men det är inte entydigt hur mekanismerna fungerar eller vilka faktorer som ger det ena eller andra utfallet (Zhu m.fl., 2019), (Li m.fl., 2018). Exempelvis konstaterar (Wolf m.fl., 2022) att utebliven effekt av DMPP troligen hänger samman med markförhållandena men att det är oklart hur. Steget från forskningsresultat till praktisk användning i fält är därför inte taget.

Användningen av NI i fält

För att NI ska få avsedd effekt i fält måste jordbrukaren ha kunskap om hur preparaten ska användas. I Maharjan m.fl. (2020) konstateras att NI måste vara välriktade, ha god timing och vara riktade mot situationer med hög risk för att de ska kunna ha avsedd effekt. Ett problem med NI är att effekten beror på omständigheterna och att det är oklart i vilka situationer preparaten har önskad effekt.

För nitrifikationshämmaren DMPP konstaterar Zhu m.fl. (2019) att även om vi börjar förstå vilka faktorer som påverkar effektiviteten och vilka jordar som passar bäst för preparatet, behövs det fortfarande mer forskning för att kunna guida jordbrukaren i hur det ska användas för att ge optimal effekt i fält på lustgasutsläppen. Även Dougherty m.fl. (2016) konstaterar att det saknas tillräcklig kunskap om hur NI kan användas i fält på ett effektivt sätt. De betonade att det behövs forskning om vilka fältförhållanden som NI är effektiva under för att rådgivningen ska kunna ge råd och åtgärdsförslag till jordbrukare.

Liknande tankegångar lyfts av rådgivningen. I en genomgång av hur rådgivningen kan hjälpa jordbrukare konstateras att utsläppen av lustgas från mark är ett svagt område i klimatrådgivningen (Henriksson m.fl., 2015). Rådgivarna har inte redskap att på gårdsnivå avgöra hur olika odlingsåtgärder påverkar utsläppen av lustgas. Detta är problematiskt för en åtgärd som tillsats av NI eftersom effekten är beroende av de lokala förutsättningarna i fält (Henriksson m.fl., 2015).

Hittills har vi sett att det finns en potential för reduktion av lustgasutsläppen men en problematik kring hur denna potential ska kunna realiseras i praktiken av jordbrukaren. Ytterligare en fråga som har uppmärksamats är var det av nitrifikationshämmaren fördröjda kvävet tar vägen – kan det förloras på annat sätt?

Pollution swapping kan urholka effekten

Merparten studier fokuserar på att NI minskar bildningen av lustgas i samband med nitrifikation och denitrifikation; vilket ger en *direkt* effekt

på utsläppen av lustgas. Det finns dock även en *indirekt* effekt på lustgas av NI som verkar åt motsatt håll; att använda NI kan ge ökad avgång av kväveföreningen ammoniak, och ammoniak kan i ett senare skede ombildas till lustgas (Denier van der Gon och Bleeker, 2005). Fenomenet benämns *pollution swapping*, dvs. en förorening byts mot en annan (Udvardi m.fl., 2021). Det finns två förklaringar:

- NI verkar genom att behålla kvävet i marken i form av ammonium och då kan avgången av ammoniak öka.
- NI har en pH-höjande effekt på jorden och ett högt pH stimulerar avgången av ammoniak.

Det innebär att NI både kan öka och minska utsläppen av lustgas (Qiao m.fl., 2015), (Lam m.fl., 2017), (Li m.fl., 2018). Det är därmed den sammanlagda effekten som är av intresse; den direkta minskningen då nitrifikation hämmas plus den indirekta ökningen då ammoniak först avgår, sedan deponeras och därefter ombildas till lustgas. Detta betyder i sin tur att NI kan vara betydligt mindre effektiva än man tidigare trott (Lam m.fl., 2017). Det finns några metaanalyser som inkluderar båda effekterna, se tabell 4.

Tabell 4: Metaanalyser av den indirekta och direkta effekten av NI på utsläppen av lustgas

Nitrifikationshämmare	Minskning av utsläpp	Studie
DCD, DMPP, Nitrapyrin	48% (d) 28,2-39,7%	Wu m.fl. (2021)
NI generellt	33 - 58% (d) Med indirekta utsläpp är reduktionen betydligt lägre	Li m.fl. (2018)
DCD, DMPP, N-Serve och pyrazole derivat	8 - 57% (d) Med indirekta utsläpp kan utsläpp av lustgas totalt sett öka	Lam m.fl. (2017)

Not: (d) innebär att bara direkta utsläpp inkluderas

I en metaanalys av 89 studier visade Wu m.fl. (2021) på en märkbar minskning av effekten av NI när hänsyn tas till avgången av ammoniak. De såg en direkt effekt på 48 procent i minskade utsläpp av lustgas av NI, och en nettoeffekt på mellan 28,2 - 39,7 procent när den indirekta effekten vägdes in. Även Li m.fl. (2018) fann en märkbart lägre effekt när hänsyn togs till indirekta utsläpp. Den indirekta effekten kan även överväga, vilket innebär att utsläppen totalt sett ökar när NI används (Lam m.fl., 2017).

Det är intressant att veta vad som påverkar hur stor de indirekta utsläppen av lustgas blir (Wu m.fl., 2021). En studie fann att det spelar roll vilken NI som används, där nitrifikationshämmaren DMPP visade sig ge en lägre avgång av ammoniak än andra preparat, och att jordar med lågt pH och högt innehåll av organiskt material gav lägre avgång av ammoniak än andra jordar när NI tillsätts (Wu m.fl., 2021). Vikten av en låg kvävegiva framgick också; en begränsad kvävegödsling minskade risken för ammoniakavgång när NI sprids. Det finns studier som indikerar att en kombination av NI med så kallade ureashämmare, som påverkar bildningen av ammoniak, i vissa fall kan minska problemet (Chen m.fl., 2008). Rent generellt betonar Lam m.fl. (2017) vikten av att vidta åtgärder för att förhindra avgången av ammoniak när NI används.

Förekomsten av en *trade-off* mellan direkta och indirekta utsläpp betyder att det krävs mer forskning för att ta reda på hur man i praktiken kan få en effektiv användning av NI, konstaterar Wu m.fl. (2021). På ett bredare plan noterar exempelvis Zhu m.fl. (2019) och (Ernfors m.fl., 2014) att vi idag saknar kunskap om hur NI *totalt* sett påverkar omvandlingen av kväve i marken och därmed hur förluster kan ske.

Avslutande kommentar

Det finns en bred konsensus i litteraturen att NI har potential att reducera utsläpp av lustgas från jordbruksmarken och att reduktionen kan vara betydande. Effekten av NI har dock visat sig variera beroende på klimat, jordtyp och brukningsmetod och det är fortfarande oklart under vilka

förutsättningar NI ger önskat resultat. Det råder därför osäkerhet om hur potentialen i praktiken kan realiseras. Vidare är det oklart i vilken grad effekten av NI på lustgas urholkas genom att kväve istället förloras som ammoniak, vilket senare ombildas till lustgas.

Vidare behöver fler faktorer än enbart effekten på lustgas vägas in vid beslut om användning av NI eller ej. Det handlar om den totala effekten på kväve av NI men också vilka risker användningen kan medföra, hur kostnadseffektiviteten ser ut samt hur jordbrukaren ser på preparaten. Dessa faktorer diskuteras nedan.

Avkastning och läckage av nitrat

NI påverkar inte enbart utsläppen av lustgas. Även andra förluster av kväve från jordbruksmark kan påverkas, som läckage i form av nitrat. Den andra sidan av myntet är att skörden kan öka om växtligheten nyttjar kvävet snarare än att det går förlorat.

Läckage av kväve

Resultaten för läckage av nitrat varierar. Vissa studier fann att läckaget minskar när NI används (Qiao m.fl., 2015). Andra studier såg ingen effekt (Woodward m.fl., 2021). En nyligen utförd dansk fältstudie fann ingen påverkan på kväveläckaget av DMPP (Wolf m.fl., 2022) medan en annan dansk studie fann att effekten av DMPP varierade (Nair m.fl., 2020). Precis som i fallet med lustgas spelar olika miljöfaktorer, val av brukningsmetoder och graden av mikrobiell aktivitet i marken roll för resultatet (Woodward m.fl., 2021). NI reducerar exempelvis läckaget av nitrat bättre i lätta, sandiga jordar än i lerjordar (Barth m.fl., 2019). Läckage av nitrat kan vidare ge upphov till indirekta utsläpp av lustgas.

Avkastning och behovet av gödsling

Om NI ger ett bättre utnyttjande av kvävet i gödselmedel vore det rimligt att skörden ökar när medlen används. Ett flertal studier har undersökt hur skörden påverkas av NI. Vissa fann en positiv effekt på skörden av NI (Abalos m.fl., 2014), (Thapa m.fl., 2016) men inte alla

(Misselbrook m.fl., 2014). Ökad skörd innebär att den ekonomiska avkastningen per hektar ökar; användningen av NI kan alltså betala sig för jordbrukaren. I en metastudie som omfattade grödorna majs, vete och ris fann exempelvis Li m.fl. (2018) att användningen av NI lönade sig för risodling men inte för de två andra grödorna.

En förklaring till att skörden påverkas positivt i vissa fall men inte i andra lyfts av Ferguson m.fl. (2021) som noterar att om väder- och markförhållanden är sådana att kväveförluster inte uppstår, så skyddar NI inte mot förluster och då påverkas inte heller skörden. Istället har NI störst chans att vara ekonomiskt fördelaktiga när de används selektivt i situationer där risken för förlust av kväve är hög (Norton och Ouyang, 2019).

En annan aspekt lyfts av Li m.fl. (2018). De argumenterar att en effekt på skörden av NI endast kan uppstå om kväve är en begränsande faktor för grödans tillväxt. Hur pass effektiv NI är beror alltså inte enbart på hur själva frisättningen av kväve påverkas (som fördröjs) utan också om det fördröjda kvävet tas upp av växtligheten när det sedan frisätts. Finns det mycket tillgängligt kväve i marken har växtligheten inget behov av det fördröjda kvävet. För mycket kvävegödning innebär därför att NI inte får avsedd effekt. Li m.fl. (2018) poängterar vidare att merparten studier av NI enbart använder sig av *en* nivå på kvävegivan, och att det är den traditionella/höga givan, och trycker på att det behövs mer forskning om vikten av reducerad kvävegiva i olika odlingssystem. Ett exempel på en sådan studie är Muller m.fl. (2022) som fann att en minskad kvävegiva gör användningen av NI lönsam vid odling av majs.

Rose m.fl. (2018) är inne på samma spår. De är kritiska till hur lönsamhetsbedömningen vanligen görs för NI i litteraturen. De menar att frågan inte ska vara "ökar skörden?" utan "i vilken mån kan kvävegivan minskas utan att skörden minskar, och är detta lönsamt?" De fann endast

10 studier med denna ansats och gjorde en meta-studie av dem. Resultatet pekade på en betydligt bättre effekt på lönsamheten av NI. Störst effekt såg de vid en halvering av kvävegivan. Dock konstaterar de att även om enstaka försök med minskad kvävegiva i kombination med NI visar på lönsamhet krävs det fler studier för att se under vilka förutsättningar detta kan uppnås.

Avslutande kommentar

NI kan i vissa fall minska läckaget av kväve från jordbruksmarken men liksom i fallet med lustgas finns även här finns oklarheter. Det är också möjligt att skörden kan öka när NI används.

Risker med nitrifikationshämmare

Flera möjliga risker med att använda NI har lyfts i litteraturen. Det handlar om att rester hamnar i livsmedel, att markens mikroorganismer påverkas negativt, att den biologiska mångfalden i omgivande miljöer skadas, samt att luft- och vattenkvaliteten påverkas negativt. Vad vet vi om dessa risker?

Säkra livsmedel

På Nya Zeeland användes DCD vid spridning av urin på vall/betesmark fram till 2011. Då upptäcktes spår av preparatet i mjölk vilket gjorde att det drogs tillbaka från marknaden där. Det finns ett intresse på Nya Zeeland för alternativ till DCD som är säkra att använda. I en genomgång av litteraturen för *New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre* konstaterar exempelvis Adhikari m.fl. (2019) att för alternativen DMPP och Nitrapyrin har uppenbara hälsorisker inte påvisats. Men, de betonar att nuvarande kunskap inte är tillräcklig utan att ytterligare forskning behövs för att undvika att liknande problem som med DCD uppstår för dessa preparat. De trycker på behovet att ta fram gränsvärden för preparaten i livsmedel och menar att preparaten bör inkluderas i Codex Alimentarius.⁵ De framhåller även vikten av att utveckla mätmetoder med tillräcklig precision för att

⁵ Codex Alimentarius Commission är ett program för livsmedelsstandarder som bildades i början av 1960-talet av FAO och WHO i syfte att ta fram internationella standarder för säkra livsmedel, redlighet i

livsmedelshandlingen och frihandel med livsmedel. Samlingen av godkända standarder kallas Codex Alimentarius.

mäta koncentrationen av preparaten i både växt- och jordprov och i livsmedel.

En fördjupad analys av risken för rester av NI i mjölk ges av Byrne m.fl. (2020). De betonar att även om tidigare forskning indikerar att risken för kontaminering av mjölk är låg så behövs mer forskning för att säkerställa att NI inte utgör ett hot för människors hälsa. Även de lyfter behovet av bättre mätmeter för att påvisa rester av preparaten. Ray m.fl. (2020) påpekar att hälsoriskerna med NI i mjölk kan vägas mot nyttan av NI i en kvantitativ riskvärdering men noterar att det i dagsläget fattas kunskap för att kunna göra en sådan analys.

Det finns ett fåtal äldre studier som påvisat rester i andra livsmedel (Woodward m.fl., 2021). Rester av Nitrapyrin har påträffats i havre, majs, sallad och tomat där jorden behandlats med preparatet, även om halterna var låga (Redemann m.fl., 1965). För rödbetor visade sig resterna av Nitrapyrin vara starkt korrelerat med doseringen av preparatet; ju högre dos, desto högre rest (Kallio m.fl., 1980). Även i jordgubbar har låga halter påträffats (Iwata m.fl., 1981).

Jordbruksmarkens mikroorganismer

Nitrifikationshämmare verkar genom att hämma de bakterier som står för nitrifikation i marken. Det kan dock finnas risker med detta både för målorganismerna och för andra mikroorganismer.

De mikroorganismer som utför nitrifikationen är centrala för näringsomvandlingen i marken. Långvarig användning av nitrifikationshämmare kan påverka bakteriernas antal och funktion (Ramotowski och Shi, 2022). Här finns få studier. Ett exempel är Dong m.fl. (2021) som inte fann någon långsiktig påverkan av DMPP under ett sex år långt försök med majs i Kina.

Forskningen om NI har hittills främst fokuserat på målorganismerna (Hayatsu m.fl., 2021). Få studier har hittills undersökt hur andra mikroorganismer påverkas av NI. De fann att även

andra mikroorganismer i marken än målorganismerna påverkas (Ramotowski och Shi, 2022), (Bachtsevani m.fl., 2021). Exempelvis finner Corrochano-Monsalve m.fl. (2021) att nitrifikationshämmaren DMPP och det relaterade preparatet DMPSA påverkar mångfalden av mikroorganismer i jorden negativt. Även mängden av vissa mikroorganismer och interaktionerna mellan mikroorganismer minskade till följd av preparaten. En studie av Bachtsevani m.fl. (2021) fann att applikation av DMPP i doser som är mycket högre än vad som rekommenderas stör viktiga mikrobiella processer i marken.

En komplicerande faktor är att förståelsen av mikroorganismerna i jorden är ofullständig (FAO, 2020). Flertalet bakterier i matjorden är inte identifierade och det är oklart vad de har för funktion. Vad som är tydligt är att vikten av en god *jordhälsa* uppmärksammas allt mer, såväl för bördigheten som för avkastningens skull men även för andra ekosystemtjänster som jordbruksmarken genererar. För jordhälsa är en mångfald av mikroorganismer centralt (Lehmann m.fl., 2020), se ruta 2.

Ruta 2: Vad menas med jordhälsa?

Med jordhälsa menas en frisk matjord med hög biologisk aktivitet. En hälsosam jord är ett levande ekosystem som kan leverera ekosystemtjänster till nytta för växter, djur och människor. Förutom jordens bördighet påverkas även dess förmåga att exempelvis rena vatten och fungera som kolsänka av dess hälsa. De funktioner som krävs för en god jordhälsa är:

- nedbrytning av kol i organiskt material,
- näringscykler, exempelvis för kväve och fosfor,
- en god markstruktur, och
- biologisk reglering av patogener och skadegörare.

De biologiska processer som tillhandahåller ovanstående fyra funktioner ges av en mängd olika mikroorganismer i jorden. Dessa organismer är beroende av varandra och är alla del i ett interaktivt system. Centralt är näringstillförseln mellan dem. Exempelvis bryter svampar och bakterier ned organiskt material till komponenter som blir till näring för andra organismer.

Källa: Kibblewhite m.fl. (2008)

Flera forskare lyfter behovet av mer kunskap om

mikroorganismerna och de mikrobiella processerna (Ruser och Schulz, 2015) (Zhu m.fl., 2019), (Ramotowski och Shi, 2022). I en intervju noterar Sara Hallin, forskare vid SLU som följt forskningen om NI, att vi saknar tillräcklig kunskap om hur NI påverkar marken och jordhälsan, och hon menar att NI därför inte borde tillåtas i Sverige (Hoffman, 2021). En viktig brist, påtalar hon, är att det saknas studier av effekten av användning under lång tid. Intressant i sammanhanget är att studier av helårseffekten av NI visar på kvarstående effekter efter att preparaten ska ha upphört att verka, se ruta 3.

Ruta 3: Vad händer utanför växtsäsongen?

Studier av NI fokuserar vanligen på växtsäsongen. En betydande del av lustgasen avgår dock under vintern och det är därför intressant att studera effekten av NI på helårsbasis (Ekwunife m.fl., 2021).

För höstvetete i Tyskland fann Guzman-Bustamante m.fl. (2019) att utsläppen av lustgas minskar under växtsäsongen med NI. De fann dessutom en minskning även under efterföljande vinter och vår. Effekten kvarstod alltså nästan ett år efter att DMPP hade applicerats. Eftersom preparatet vid det här laget inte längre ska vara verksamt konstaterar forskarna att det är oklart vad som gav effekten. De spekulerar i att det kan bero på att DMPP påverkat mikroorganismerna i jorden mer långsiktigt.

I en meta-studie av 21 studier fick Ekwunife m.fl. (2021) liknande resultat. De fann att NI i genomsnitt minskade utsläppen av lustgas under vinterhalvåret. Även här påvisades effekt efter att preparaten borde upphört att verka, dvs. preparat som applicerats under våren hade effekt påföljande vinter. De konstaterar att olika förklaringar har förts fram men att det inte är klart vilka mekanismer som ligger bakom resultatet. De betonar att mer forskning om den här så kallade "carry-over" effekten av NI behövs och lyfter behovet av ytterligare studier av hur markens mikroorganismer påverkas av NI.

Biologisk mångfald i akvatiska miljöer

En möjlig risk är att NI läcker till omgivande vattendrag. Vissa studier har funnit rester av DCD i yt- och grundvatten (Smith och Schallenberg, 2013). Förekomsten av DCD i akvatiska miljöer kan ha negativa effekter genom att blockera den nitrifikation som pågår där, vilket kan ge toxiska effekter för djur- och växtliv (Smith och Schallenberg, 2013). Det finns få studier; ett undantag är Kösler m.fl. (2019) som finner toxiska

effekter av två nitrifikationshämmare (Piadin och Vizura) men inte av DCD.

Woodward m.fl. (2016) noterar att det saknas studier av Nitrapyrin i det här sammanhanget. De menar att det kan bero på att Nitrapyrin bryts ner snabbt och inte är så vattenlösligt, och att preparatet därför helt enkelt inte förväntas läcka till omgivande vattenområden. För att undersöka hypotesen tog de prov från 11 vattendrag i Iowa, USA. Iowa tillhör det så kallade majsbältet, där merparten av majsodlingen i USA sker. Forskarna fann rester av Nitrapyrin i sju av vattendragen. Koncentrationen var som högst efter nederbörd i samband med vårens gödning. Studien utvidgades i (Woodward m.fl., 2019) med fler prov i ett större område som förutom Iowa inkluderade Illinois, också det en delstat med omfattande majsodling. De fann rester av Nitrapyrin i vattendrag, diken och jordprov. Halterna var i merparten av fallen lägre än vad som i litteraturen bedöms vara toxiskt för olika organismer. Ett problem, konstaterar forskarna, är att kunskapen i litteraturen är ofullständig om både nivån på gränsvärden för toxiska effekter och vad som händer vid exponering över längre tid.

Avslutande kommentar

Det är inte självklart var forskningen står i fråga om riskerna med NI. Exempelvis konstaterar (Adhikari m.fl., 2019) att det inte finns påtagliga bevis att en användning av NI som följer dosrekommendationerna har negativa effekter på miljö och hälsa. Dock betonar flera forskare att vi helt enkelt vet för lite för att veta säkert. I en översikt av kunskapsläget rörande riskerna menar exempelvis Freeman m.fl. (2020) att det sammantaget inte finns så mycket kunskap om vilken effekt NI har på hälsa och miljön, och att åsikterna går isär om hur stora riskerna är.

Intresset bland jordbrukare för NI

Vad tycker då jordbrukaren om att använda NI? Flera faktorer påverkar jordbrukarens beslut rörande val av brukningsmetoder, som kostnader och upplevda risker. Detta visar sig spela roll även för NI.

Lönsamhet och risk

Bruket av NI verkar inte vara spritt i andra länder. I USA bedöms exempelvis att NI används på mindre än 10 procent av arealen, och då främst för majs (Christensen, 2002). Att använda nitrifikationshämmare innebär en extra kostnad för jordbrukaren. Om inköpskostnaden inte uppvägs av ökad avkastning eller av att andra kostnader minskar, saknas incitament att använda preparaten (Li m.fl., 2018). Ett exempel är Danmark, ett land där kväveöverskott länge varit en stor utmaning. Där har NI inte fått genomslag just för att inköpskostnaden inte motsvaras av ökad skörd (Eriksen m.fl., 2020).

Även om det går att visa att NI kan vara lönsamt finns en ekonomisk risk för den enskilde jordbrukaren. Eftersom många faktorer spelar roll för vad effekten blir på ett enskilt fält ställs en säker inköpskostnad mot en osäker effekt av NI på den egna gården (Freeman m.fl., 2020). I en studie rörande möjligheten att använda NI i klimatarbetet i Skottland fann man att användningen av NI inte var utbredd trots att NI funnits länge på marknaden. I studien var experternas bedömning att cirka 5 procent av jordbrukarna använde NI (Freeman m.fl., 2020). Förklaringen de landade i var att en hög kostnad kopplad till risken för låg effekt gjorde att upptaget bland jordbrukarna var lågt (Freeman m.fl., 2020).

En metastudie för Kina visade att flera metoder för ett bättre kväveutnyttjande, däribland NI, kan öka lönsamheten men att jordbrukarna ändå inte använde metoderna (Xia m.fl., 2017). Forskarna pekade på att jordbrukarna var negativt inställda till ekonomisk risk, att de var tveksamma till ökade kostnader och att lantbruket för många bara var en del i försörjningen och att de därför inte satte sig in i nya metoder.

Oro för negativa bieffekter och rådgivning

En brist på konsensus rörande vilka negativa bieffekter NI har kan vara ytterligare en förklaring till det låga intresset för NI i Skottland (Freeman m.fl., 2020). Det gällde i synnerhet inverkan på jordhälsan. Även oro för hälsorisker nämndes.

Det har visat sig att rådgivning spelar roll. I USA används cirka hälften av kvävegödseln för majsodling (USDA, 2018). I en studie av i vilken grad majsodlare använder sig av metoder för ökad närings effektivitet omfattades NI och provtagning av kväveinnehåll i jord och växtmaterial (Weber och McCann, 2015). De fann att tillämpningen av dessa åtgärder var låg och att ungefär 10 procent av jordbrukarna hade använt sig av NI. Sannolikheten att använda NI ökade något om jordbrukarna fått rådgivning om preparaten. Generellt praktiserade yngre jordbrukare åtgärderna i högre utsträckning än äldre.

Avslutande kommentar

Det finns få studier som inkluderar jordbrukarens perspektiv på NI. Indikativt verkar inte intresset vara så stort till följd av kostnaden för preparaten och osäkerhet om resultatet.

Kostnadseffektivitet

En viktig princip för styrmedel är kostnadseffektivitet. Med kostnadseffektivitet menas att uppnå ett visst mål till lägsta kostnad. Att välja åtgärder som är kostnadseffektiva medför exempelvis att en given budget för miljöåtgärder ger största möjliga effekt.

NI som klimatåtgärd

I en studie av OECD undersöktes kostnadseffektiviteten hos olika klimatåtgärder för jordbruket inklusive NI. De noterar att kostnaden för NI kan vara hög samtidigt som effekten varierar stort beroende på faktorer som typ av NI, markförhållanden och klimat. De konstaterar att det därför är en åtgärd som enbart bör användas vid tillfällen då den ger en hög effekt för att maximera dess kostnadseffektivitet (McLeod m.fl., 2014).

I en studie som syftar till att finna kostnadseffektiva åtgärder för att minska utsläppen av växthusgaser från jordbruket i Frankrike undersöktes 26 olika åtgärder. Förutom NI ingick bland annat reducerat kväveinnehåll i foder för mjölk- och kor respektive grisar, och minskad jordbearbet-

ning. Kostnaden per reducerad koldioxidekvivalent beräknades för åtgärderna och tre typer av åtgärder kunde urskiljas. Åtgärder som har i) negativa kostnader, dvs. de lönar sig för jordbrukaren att implementera, ii) låga kostnader eller iii) höga kostnader. NI hamnar kategorin med höga kostnader per minskad koldioxidekvivalent (Pellerin m.fl., 2017). Åtgärder som klassades som lönsamma för jordbrukaren inkluderade exempelvis att använda stallgödsel mer effektivt, att mylla ner gödselmedel och att använda foder med ett lågt kväveinnehåll.

Ruta 4: En dansk studie av NI

Kostnadseffektiviteten av att minska utsläppen av metan, lustgas och koldioxid för olika åtgärder i det danska jordbruket analyserades av Dubgaard och Ståhl (2018). Förutom NI omfattade studien biogas och surgörning av flytgödsel, att ställa om organogena jordar till permanent gräsmark och ändrad foderstat för mjölkkor. Studien räknade på vad ett tvingande krav att tillsätta NI vid gödsling skulle kosta och vad miljöeffekten skulle kunna bli. Potentialen att minska utsläppen uttrycks i koldioxidekvivalenter.

För *mineralgödsel* utformades styrmedlet som ett krav att NI tillsätts, tillsammans med ett krav att 90 procent av mineralgödseln i Danmark ska vara ammoniumbaserad. Kravet gör mineralgödseln dyrare. Förutom effekten av NI i sig medför det högre priset att den optimala givan av kväve blir lägre. Att en mindre mängd gödsel appliceras ger en ytterligare reduktion av kväveläckage, lustgas- och ammoniakavgång. Dessa miljöeffekter ingick i analysen som *negativa* kostnader; den angivna kostnaden är alltså en nettokostnad för samhället där dessa miljövinster ingår. Kravet på NI beräknades ha en potential att reducera utsläppen med 496 000 ton CO₂-ekv./år i Danmark. Kostnaden var 1 157 - 1 296 DKK /ton CO₂-ekv. vilket gjorde detta till en av de mer kostsamma av åtgärderna i studien.

För *flytgödsel* utformades styrmedlet som ett krav att blanda NI i all gödsel. Potentialen att reducera utsläppen var totalt 213 000 ton CO₂-ekv./år med 52 000 ton CO₂-ekv. för lerjordar och 162 000 ton CO₂-ekv. för sandjordar. Nettokostnaden beräknas till 603 - 1 549 DKK /ton CO₂-ekv. Den lägre kostnaden gällde för sandjordar.

Om jordbrukare kompenseras för användningen av NI beräknades kostnaden vara 423 miljoner/år DKK plus 27 miljoner DKK /år i kostnad för att administrera stödet.

Källa: Dubgaard och Ståhl (2018)

Det är inte självklart hur man ska räkna på kostnadseffektiviteten av NI eller hur ett styrmedel kan utformas. Ett danskt räkneexempel där det införs ett krav på att tillsätta NI presenteras i ruta 4. Det visar på en hög kostnad för NI i mineralgödsel och en lägre kostnad för NI i flytgödsel. Att införa ett tvingande regelverk för NI är dock knappast en god idé.

Avslutande kommentar

Det är viktigt att i första hand tillämpa kostnadseffektiva åtgärder. Det är dock inte helt enkelt att beräkna hur pass kostnadseffektiv användningen av NI är eftersom effekten i fält varierar stort beroende på vilka förhållanden som råder.

Diskussion

Kunskapsläget om NI är idag inte entydigt. Flera forskare menar att NI har potential i miljöarbetet men betonar samtidigt att mer forskning behövs. Det finns heller inte tillräcklig kunskap för att kunna bedöma huruvida NI är en lämplig klimatåtgärd i Sverige. Det finns alternativ till NI för minskad nitrifikation men även här är kunskapen begränsad.

Behov av mer kunskap om NI

Det är inte självklart om NI i dagsläget kan anses vara en bra åtgärd i klimatarbetet eller ej. Exempelvis nämns NI som en möjlig klimatåtgärd av IPCC (2022) medan Lam m.fl. (2017) lyfter att NI kan vara ett tveeggat svärd i klimatarbetet på grund av de ovan nämnda indirekta utsläpp av lustgas via ammoniak. Flera forskare uttrycker sig försiktigt i termer av att givet att NI "används på ett optimalt sätt" kan det vara en bra åtgärd för att minska utsläppen av lustgas, och flera betonar att fler studier behövs för att få klarhet (Ruser och Schulz, 2015), (Herr m.fl., 2020), (Sha m.fl., 2020), (Qiao m.fl., 2015). Det rör de aspekter som lyfts ovan, som att den direkta effekten på utsläppen av lustgas kan undermineras eller helt motverkas av ökad ammoniakavgång när NI används eller att markens mikroorganismer kan påverkas negativt, särskilt av en längre tids användning av NI. Exempelvis konstaterar Beeckman m.fl. (2018) att NI verkar vara

en potent åtgärd för att öka effektiviteten av gödselmedel i fält men att det finns utrymme för förbättring och Zhu m.fl. (2019) noterar att flera frågor återstår att besvara för att få en effektiv användning av NI. Med fokus på USA och nitrifikationshämmaren Nitrapyrin, som är vanlig där, konstaterar Woodward m.fl. (2021) att trots preparatet har använts i mer än 50 år finns en rad kunskapsluckor att fylla för att få en effektiv användning av det, se tabell 5.

Tabell 5: Kunskapsluckor för Nitrapyrin

	Frågor för fördjupade studier
Effekt	<ol style="list-style-type: none"> 1. Vilka miljöfaktorer (som marktemperatur, markens pH, markfukt) och brukningsmetoder (som kvävegivans storlek, placering, tidpunkt) förbättrar/försämrar effekten? 2. Vilka miljöfaktorer bestämmer hur länge Nitrapyrin verkar och hur snabbt det bryts ner? 3. Tas Nitrapyrin och dess nedbrytningsprodukter upp av växtligheten? 4. Hur effektivt är Nitrapyrin jämfört med andra NI som DCD och DMPP?
Miljö	<ol style="list-style-type: none"> 1. Hur ser koncentrationen ut av Nitratyrin och dess nedbrytningsprodukter i vattendrag/grundvatten under olika förhållanden? 2. Hur påverkas fiskar och ryggradslösa djur av de koncentrationer som uppstår i omgivande vatten? 3. Vilka organismer är mest utsatta för exponering av Nitrapyrin? 4. Hur påverkas mikroorganismers funktion och sammansättning?
Kvävecykeln	<ol style="list-style-type: none"> 1. Påverkas kvävecykeln i akvatiska system? 2. Påverkas kvävehalten i växtbaserade livsmedel? 3. Påverkas mikroorganismer i mag/tarm hos djur och människor?

Källa: Woodward m.fl. (2021)

För Sveriges del konstaterar Yaras chefsagronom Ingemar Gruvaeus att det finns ett mycket bristfälligt underlag för att förstå vilka effekter som nitrifikationshämmare kan ha under

svenska förutsättningar (Hoffman, 2021). Detta speglas i rapporten *Nordic nitrogen and agriculture: Policy, measures and recommendations to reduce environmental impact* om problematiken med kväve i ett nordiskt sammanhang. Där nämner Hellsten m.fl. (2017) användningen av NI som ett möjligt framtida alternativ men de har inte med dem bland sina åtgärdsförslag då de konstaterar att det dessförinnan behövs mer forskning.

Även Jordbruksverket konstaterar att kunskapen om effekter av NI under nordiska förhållanden är begränsad, och betonar att det finns behov av kunskap om under vilka odlingsförhållanden åtgärden är lämplig samt vilka risker användningen medför.⁶ För att uppmuntra forskning om NI i Sverige hade Jordbruksverket en utlysning under 2020. Det inkom dock inget projekt med den inriktningen som fick bidrag.

Använda NI i Sverige – exemplet höstvet

Om nitrifikationshämmare ska användas i Sverige behöver förutsättningarna för när och var de kan passa undersökas närmare. Viktiga parametrar är, som ovan konstateras, markförhållanden och klimatförutsättningar. Ytterligare en aspekt är om NI passar med de brukningsmetoder som tillämpas här. Ett exempel är val av gödselstrategi, exempelvis rörande tidpunkten då kväve tillsätts och typ av gödselmedel som används.

I Sverige är spannmål en viktig gröda och höstvet utgör drygt hälften av spannmålsskörden.⁷ Höstvet trivs bäst på lerjord. Nedan diskuteras exemplet höstvet och om NI skulle kunna passa för höstvet, givet den gödselstrategi som har visat sig ge god effekt i Sverige. Avsnittet är baserat på personlig kommunikation med Ingemar Gruvaeus, chefsagronom på Yara, samt en intervju med honom av Hoffman (2021).

I mineralgödsel utgörs kvävet av nitrat och ammonium. Då NI hämmar omvandlingen av ammonium till nitrat passar NI att användas med

⁶ Bidrag till FOU-projekt inom miljöförbättrande åtgärder 2020 - Jordbruksverket.se Nedladdad 2022-03-31.

⁷ Skördeprognos för spannmål och oljevaxter 2021 - Jordbruksverket.se Nedladdad 2022-03-31.

gödselmedel med hög andel ammonium. Gödsel med ammonium passar främst lätta, sandiga jordar. Svenska lerjordar binder ammonium hårt, det transporteras dåligt och är svårt för grödan att ta upp. I kombination med ett nordligt klimat och kort vegetationsperiod ger gödselmedel med hög andel nitrat därför vanligen bättre effektivitet än de med hög andel ammonium vid odling av höstvetete (Jönsson, 2018).

Vidare har mineralgödsling tidigt under våren vid spannmålsodling visat sig ge sämre resultat i Sverige. För höstvetete är kväveeffektiviteten istället vanligen högre vid sen gödsling (Krijger, 2015). Förklaringen är dels att det blir mindre förluster av kväve och dels att mindre näring byggs in i sidoskott. Gödslingen har därför förskjutits närmare skörd mot senvår/sommar snarare än att långsamverkande gödselmedel läggs på tidigt under våren. Vid sen gödsling är en snabb effekt av gödselmedlet eftersträvansvärt för att möta grödans tillväxt, vilket talar för gödselmedel baserat på nitrat snarare än ammonium då nitrat tas upp snabbare av växterna. Att sträva efter fördröjd nitrifikation vid sen gödsling riskerar då att ge sämre kväveeffektivitet om grödan inte hinner ta upp kvävet under tillväxtperioden. En jämförelse kan göras med Danmark som har en annan gödselstrategi; de gödslar med mycket kväve tidigt på våren.

Sen gödsling har även andra fördelar. Sen gödsling är exempelvis en förutsättning för att kunna anpassa kvävegivans storlek till årets och det aktuella fältets skördepotential. Det går inte att avgöra kvävebehovet tidigt på säsongen; istället ökar möjligheten att mäta behovet när grödan utvecklats längre. När gödslingen är optimal blir mängden restkväve lägre efter skörd, vilket i sin tur minskar risken för kväveläckage och denitrifikation efter skörd. Slutligen minskar en delad giva kvävekonzentrationen i marken och när gödsling sker sent på säsongen är marken ofta upptorkad, vilket minskar risken för denitrifikation.

Yara har utfört ett mindre pilotprojekt om nitrifikationshämmare under svenska förhållanden. I experimentet gödslade Yara tidigt om våren med ammoniumbaserat mineralgödsel på lerjord där höstvetete odlades.⁸ Det regnade mycket under våren, vilket gav vattenmättad jord och goda förutsättningar för lustgasutsläpp. Trots att NI hade goda förutsättningar att verka (tidig gödsling, hög vattenhalt i jorden) observerade Yara en sämre effekt i termer av skördad mängd kväve vid tillsats av NI jämfört med motsvarande gödsling utan NI. Det går naturligtvis inte att dra några stora växlar på ett enskilt försök men det är intressant att en studie genomförts under svenska förhållanden.

Sammantaget visar exemplet att det finns en risk att en fördröjd effekt av mineralgödsel med hjälp av NI är kontraproduktiv för kväveeffektiviteten vid odling av höstvetete i Sverige. Exemplet visar även på komplexiteten i att lära från erfarenheten i andra länder när strategier och förutsättningar för lantbruket skiljer sig åt.

Alternativ till NI

Ett möjligt alternativ till kemiska preparat är biologiska nitrifikationshämmare (BNI). Flera växter har visat sig själva tillverka nitrifikationshämmare, exempel är ris, sorghum och kokbanan (platain) (Wang m.fl., 2021), (Podolyan m.fl., 2020). Det sker när rötterna exponeras för ammonium; BNI kan därför ha intressanta fördelar gentemot kommersiella NI eftersom de senares effekt är kort och beroende av omständigheterna (Beeckman m.fl., 2018). Det är möjligt att BNI är mer miljövänliga och kanske också billigare än kommersiella NI (Wang m.fl., 2021). Forskningen om biologiska nitrifikationshämmare är dock ännu i sin linda (Wang m.fl., 2021).

Det finns andra sätt än användning av NI för att reducera nitrifikation och som saknar de möjliga negativa effekter som industriframställda NI har. Exempelvis kan åtgärder som förbättrar jordhälsan ge lägre grad av nitrifikation och minska risken för kväveförluster, samtidigt som

⁸ Det ska poängteras att detta inte är det vanliga sättet som Yara gödslar på utan det gjordes i experimentellt syfte.

avkastningen bibehålls (Norton och Ouyang, 2019). Jordhälsan gynnas av att grödor roteras i växelbruk, att jorden alltid är täckt och att rotsystem bevaras i så stor utsträckning som möjligt (Zhang m.fl., 2015).

Vidare finns mer traditionella ansatser för att öka kväveeffektiviteten och minska olika förluster av kväve från jordbruket. Exempel är precisionsgödsling, odling av fånggrödor, anläggning av dammar, användning av foder med lågt kväveinnehåll och att gödsla på våren snarare än på hösten (Hellsten m.fl., 2017).

Ett argument mot NI är slutligen att de är ett sätt att arbeta *mot* biologin i marken. Ett alternativ är istället att försöka arbeta *med* biologin med olika åtgärder, samt att förutsättningarna för detta är bättre idag då vi har en större kunskap om kvävet omsättning och mikroorganismernas funktion i marken (Wikström, 2021).

Klimatförändringen ökar kväveförlusten

Den pågående klimatförändringen medför högre temperaturer, kraftigare nederbörd med risk för skyfall och ökad risk för torka (Robertson et al., 2013; Bowles et al., 2018). De båda förstnämnda faktorerna ger ökad nitrifikation och därmed ökad risk för förluster av kväve genom läckage och lustgasutsläpp. Det innebär att behovet att hantera förluster av kväve från jordbruket kommer att bli än mer akut framöver (Bowles et al., 2018).

Slutsatser

Det finns många vetenskapliga studier om nitrifikationshämmare. Flera visar att NI kan minska utsläppen av lustgas och läckaget av nitrat från jordbruksmark i betydande omfattning samt öka avkastningen för jordbrukaren. Det är dock tydligt att flera faktorer spelar roll för vilken effekt NI får. Exempel är förhållandena i marken som pH, jordart och markfukt men också klimat, väder och brukningsmetoder. Forskningen indikerar att NI framförallt kan få en effekt i situationer med rätt förhållanden, där risken för förluster är stor samt då kväve är en begränsande faktor för

grödans tillväxt.

Det finns också kunskapsluckor. Flera forskare betonar att det saknas tillräcklig kunskap om hur jordbrukaren i praktiken ska använda NI för att få optimal effekt i fält och därmed realisera fördelarna med preparaten. Detta gäller särskilt för utsläppen av lustgas.

När det gäller klimatnyttan påverkar NI utsläppen av lustgas genom två kanaler som verkar i motsatt riktning: Genom att hämma nitrifikation kan de direkta utsläppen av lustgas minska men genom att avgången av ammoniak stimuleras kan indirekta utsläpp av lustgas öka. Många studier har hittills bara tagit hänsyn till den direkta effekten. När båda effekterna vägs in blir nettoeffekten vanligen lägre. Det är även möjligt att nettoeffekten blir att lustgasutsläppen ökar.

Flera forskare lyfter att det behövs mer forskning om riskerna med att använda NI. Det handlar exempelvis om hur markens mikroorganismer och jordhälsan i stort påverkas, om preparaten eller deras nedbrytningsprodukter kan hamna i livsmedel och hur akvatiska miljöer dit preparaten kan läcka påverkas.

NI har funnits på marknaden under lång tid. Studier i USA, Skottland, Kina och Danmark indikerar dock att preparaten inte används i någon större omfattning av jordbrukare. Förklaringen som lyfts är att kostnad och risk har begränsat upptaget.

Det finns många studier som undersöker kostnadseffektiviteten för åtgärder som minskar förluster av kväve från jordbruket. Vissa av dem inkluderar NI och indikerar en låg kostnadseffektivitet jämfört med andra åtgärder.

Det kan noteras att olika forskare kan dra olika slutsatser om lämpligheten av att använda NI utifrån det kunskapsläge som finns. I grund och botten handlar det om en avvägning mellan nytta, kostnad och risk i en situation med ofullständig information. Nyttan *kan* vara stor men varierar utifrån lokala förutsättningar på ett sätt som inte är helt klarlagt. Riskerna vet vi att de

finns men inte hur stora de är. Flera forskare betonar därför behovet av mer forskning.

Kunskapen om effekten av NI under svenska och nordiska förhållanden är begränsad. Det kan därför vara intressant att utföra fältförsök i Sverige och då också adressera de kunskapsluckor som finns rent generellt om NI i den vetenskapliga litteraturen.

Avslutningsvis, vilka slutsatser kan då dras från litteraturen rörande möjligheten att använda NI i Sverige för att nå miljö- och klimatmål? Bilden som framträder är att NI inte är en *quick-fix* som i stor skala kan minska utsläppen av lustgas från svensk jordbruksmark. Istället kan det vara en möjlig åtgärd i vissa situationer. Förutom att mark- och klimatförhållanden måste vara de rätta krävs då även att NI passar in i den övergripande gödslingsstrategin som tillämpas på gården, exempelvis att kvävegödsling sker tidigt på säsongen i förhållande till grödans tillväxtperiod. Annars finns en risk att användningen av NI är kontraproduktiv för kväveeffektiviteten.

Sammantaget visar forskningen att nitrifikationshämmare under rätt förhållanden kan minska förluster av kväve och öka skördens avkastning. Det finns dock kunskapsluckor; exempelvis hur NI bör användas för att vara effektiva i fält hos jordbrukaren och om reduktionen av lustgasutsläppen urholkas genom att kväve finner andra vägar att bilda lustgas när nitrifikation hämmas. Det är också oklart om riskerna med användning av NI har utvärderats i tillräcklig omfattning.

Referenser

Abalos, D., S. Jeffery, A. Sanz-Cobena, G. Guardia och A. Vallejo (2014). "Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 189: 136-144.

Adhikari, K. P., S. Surinder, P. Simon och C. De Klein (2019). "A review of the potential of nitrification inhibitors DMPP and nitrapyrin to

reduce N₂O emissions following urine deposition in grazed pastures." Manaaki Whenua Landcare research.

Akiyama, H., X. Yan och K. Yagi (2010). "Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis." *Glob Chang Biol*, 16(6): 1837-1846.

Bachtsevani, E., C. V. Papazlatani, C. Rousidou, E. Lampronikou, U. Menkissoglu-Spiroudi, G. W. Nicol, D. G. Karpouzas och E. S. Papadopoulou (2021). "Effects of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on the activity and diversity of the soil microbial community under contrasting soil pH." *Biology and Fertility of Soils*, 57(8): 1117-1135.

Barth, G., S. von Tucher, U. Schmidhalter, R. Otto, P. Motavalli, R. Ferraz-Almeida, T. Meinel, Schmiedt Sattolo, H. Cantarella och G. C. Vitti (2019). "Performance of nitrification inhibitors with different nitrogen fertilizers and soil textures." *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182(5): 694-700.

Beeckman, F., H. Motte och T. Beeckman (2018). "Nitrification in agricultural soils: impact, actors and mitigation." *Current Opinion in Biotechnology*, 50: 166-173.

Byrne, M. P., J. T. Tobin, P. J. Forrestal, M. Danaher, C. G. Nkwonta, K. Richards, E. Cummins, S. A. Hogan och T. F. O'Callaghan (2020). "Urease and Nitrification Inhibitors—As Mitigation Tools for Greenhouse Gas Emissions in Sustainable Dairy Systems: A Review." *Sustainability*, 12(15): 6018.

Cahalan, E., E. Minet, M. Ernfors, C. Müller, D. Devaney, P. J. Forrestal och K. G. Richards (2015). "The effect of precipitation and application rate on dicyandiamide persistence and efficiency in two Irish grassland soils." *Soil Use and Management*, 31(3): 367-374.

Chen, D., H. C. Suter, A. Islam, R. Edis, J. Freney och C. Walker (2008). "Prospects of improving efficiency of fertiliser nitrogen in Australian agriculture: A review of enhanced efficiency fertilisers." *Australian Journal of Soil Research*, 46.

- Christensen, L. A. (2002). "Soil, nutrient, and water management systems used in U.S. corn production." *Agriculture information bulletin no. 774*, Washington, DC.: USDA.
- Corrochano-Monsalve, M., C. González-Murua, J.-M. Estavillo, A. Estonba och I. Zarraonaindia (2021). "Impact of dimethylpyrazole-based nitrification inhibitors on soil-borne bacteria." *Science of The Total Environment*, 792: 148374.
- Dell, C. J., K. Han, R. B. Bryant och J. P. Schmidt (2014). "Nitrous Oxide Emissions with Enhanced Efficiency Nitrogen Fertilizers in a Rainfed System." *Agronomy Journal*, 106(2): 723-731.
- Denier van der Gon, H. och A. Bleeker (2005). "Indirect N₂O emission due to atmospheric N deposition for the Netherlands." *Atmospheric Environment*, 39(32): 5827-5838.
- Dong, D., W. Yang, H. Sun, S. Kong och H. Xu (2021). "Nitrous oxide emissions in response to long-term application of the nitrification inhibitor DMPP in an acidic luvisol." *Applied Soil Ecology*, 159: 103861.
- Dougherty, W. J., D. Collins, L. Van Zwieten och D. W. Rowlings (2016). "Nitrification (DMPP) and urease (NBPT) inhibitors had no effect on pasture yield, nitrous oxide emissions, or nitrate leaching under irrigation in a hot-dry climate." *Journal of Soil Research*, 54(5): 675-683.
- Dubgaard, A. och L. Ståhl (2018). "Omkostninger ved virkemidler til reduktion af landbrugets drivhusgasemissioner: Opgjort i relation til EU's 2030-målsætning for det ikke-kvotebelagte område." *IFRO Rapport Nr. 271*, København: Københavns universitet.
- Ekwunife, K. C., C. A. Madramootoo och N. A. Abbasi (2021). "Assessing the impacts of tillage, cover crops, nitrification, and urease inhibitors on nitrous oxide emissions over winter and early spring." *Biology and Fertility of Soils*.
- Eriksen, J., I. K. Thomsen, C. C. Hoffmann, b. Hasler och B. Jacobsen (2020). "Virkemidler til reduktion af kvælstof belastningen af vandmiljøet", Århus: Århus universitet.
- Ernfors, M. (2021), "Lustgas från mark – jordbrukets stora utmaning."
- Ernfors, M., F. P. Brennan, K. G. Richards, K. L. McGeough, B. S. Griffiths, R. J. Laughlin, C. J. Watson, L. Philippot, J. Grant, E. P. Minet, E. Moynihan och C. MÜller (2014). "The nitrification inhibitor dicyandiamide increases mineralization-immobilization turnover in slurry-amended grassland soil." *The Journal of Agricultural Science*, 152(S1): 137-149.
- FAO (2020). "State of knowledge of soil biodiversity: Status, challenges and potential." Washington: Food and Agricultural Organization of the United Nations.
- Ferguson, R., B. Maharjan, C. Wortmann och B. Krienke "Nitrogen Inhibitors for Improved Fertilizer Use Efficiency." 2019 Crop Production Clinic, 2021 Lincoln. University of Nebraska-Lincoln.
- Freeman, D., J. Wiltshire och B. Jenkins Ricardo (2020). "Evidence review of the efficacy of nitrification and urease inhibitors." Climatexchange: Scotland centre of expertise connecting climate change research and policy.
- Gilsanz, C., D. Báez, T. H. Misselbrook, M. S. Dhanoa och L. M. Cárdenas (2016). "Development of emission factors and efficiency of two nitrification inhibitors, DCD and DMPP." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216: 1-8.
- Guardia, G., K. A. Marsden, A. Vallejo, D. L. Jones och D. R. Chadwick (2018). "Determining the influence of environmental and edaphic factors on the fate of the nitrification inhibitors DCD and DMPP in soil." *Science of The Total Environment*, 624: 1202-1212.
- Guzman-Bustamante, I., T. Winkler, R. Schulz, T. Müller, T. Mannheim, J. C. Laso Bayas och R. J. N. C. i. A. Ruser (2019). "N₂O emissions from a loamy soil cropped with winter wheat as affected by N-fertilizer amount and nitrification inhibitor." *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 114(3): 173-191.
- Hayatsu, M., C. Katsuyama och K. Tago (2021).

"Overview of recent researches on nitrifying microorganisms in soil." *Soil Science and Plant Nutrition*: 1-14.

Hellsten, S., T. Dalgaard, K. Rankinen, K. Tørseth, A. Kulmala, E. urtola, F. Moldan, K. Pira, K. Piil, L. Bakken, Bechmann, Marianne och S. Olofsson (2017). "Nordic nitrogen and agriculture : Policy, measures and recommendations to reduce environmental impac." *TemaNord 2017:547*, Nordiska ministerrådet.

Henriksson, M., M. Stenberg och M. Berglund (2015). "Lustgas från jordbruksmark: Konkreta råd för att minska lustgasavgången på gårdsnivå." Hushållningssällskapet Halland.

Herr, C., T. Mannheim, T. Müller och R. Ruser (2020). "Effect of Nitrification Inhibitors on N₂O Emissions after Cattle Slurry Application." *Agronomy*, 10(8): 1174.

Hoffman, M. (2021). "Nyttvaknat intresse för nitrifikationshämmare." *Latbrukets affärer*(5).

IPCC (2022). "Climate change 2022. Mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Iwata, Y., T. M. Dinoff, J. B. Bailey, V. Voth och F. A. Gunther (1981). "Analytical method for nitrapyrin and 6-chloropicolinic acid residues in strawberry fruit and soil." *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 29: 235-239.

Jönsson, E. (2018). "Kväveform och strategi för höstvetete." *Sverigeförsöken*, Hushållningssällskapet.

Kallio, H., R. R. Linko, E. Tikanmäki och I. Puntari (1980). "Effect of nitrapyrin on nitrapyrin residues and nitrate content in red beet roots fertilised with urea." *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 31(7): 701-708.

Kibblewhite, M. G., K. Ritz och M. J. Swift (2008). "Soil health in agricultural systems." *Philosophical Transactions of the Royal Society*,

363(1492): 685-701.

Krijger, A.-K. (2015). "Kvävestrategi i höstvetete 2013-2015." *Växtnäring*, Hushållningssällskapet.

Kösler, J. E., O. C. Calvo, J. Franzaring och A. Fangmeier (2019). "Evaluating the ecotoxicity of nitrification inhibitors using terrestrial and aquatic test organisms." *Environmental Sciences Europe*, 31(1): 91.

Lam, S. K., H. Suter, A. R. Mosier och D. Chen (2017). "Using nitrification inhibitors to mitigate agricultural N₂O emission: a double-edged sword?" *Glob Chang Biol*, 23(2): 485-489.

Lan, T., H. Suter, R. Liu, S. Yuan och D. Chen (2018). "Effects of nitrification inhibitors on gross N nitrification rate, ammonia oxidizers, and N₂O production under different temperatures in two pasture soils." *Environmental Science and Pollution Research*, 25(28): 28344-28354.

Lehmann, J., D. A. Bossio, I. Kögel-Knabner och M. C. Rillig (2020). "The concept and future prospects of soil health." *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10): 544-553.

Li, T., W. Zhang, J. Yin, D. Chadwick, D. Norse, Y. Lu, X. Liu, X. Chen, F. Zhang, D. Powlson och Z. Dou (2018). "Enhanced-efficiency fertilizers are not a panacea for resolving the nitrogen problem." *Glob Chang Biol*, 24(2): e511-e521.

Li, Y., S. H. H. Shah och J. Wang (2020). "Modelling of nitrification inhibitor and its effects on emissions of nitrous oxide (N₂O) in the UK." *Science of The Total Environment*, 709: 136156.

Maharjan, B., V. Jin, L. Pnutel, J. Iqbal, T. Williams, H. Blanco och C. Wortmann (2020). "Crop management to reduce soil nitrous oxide emissions in Nebraska." *NebGuide Nebraska Extension*, Lincoln, Nebraska: Institute of Agriculture and Natural Resources at the University of Nebraska-Lincoln.

McGeough, K. L., C. J. Watson, C. Müller, R. J. Laughlin och D. R. Chadwick (2016). "Evidence that the efficacy of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) is affected by soil

properties in UK soils." *Soil Biology and Biochemistry*, 94: 222-232.

McLeod, M., V. Eory, G. Gruiere och J. Lankoski (2014). "Cost-effectiveness of greenhouse gas mitigation measures for agriculture: A Literature review." Paris: OECD.

Menéndez, S., I. Barrena, I. Setien, C. González-Murua och J. M. Estavillo (2012). "Efficiency of nitrification inhibitor DMPP to reduce nitrous oxide emissions under different temperature and moisture conditions." *Soil Biology and Biochemistry*, 53: 82-89.

Misselbrook, T., L. Cardenas, V. Camp, R. Thorman, J. Williams och A. Rollett (2014). "An assessment of nitrification inhibitors to reduce nitrous oxide emissions from UK agriculture." *Environmental Research Letters*, 9(11): 115006.

Muller, J., D. De Rosa, J. Friedl, M. De Antoni Migliorati, D. Rowlings, P. Grace och C. Scheer (2022). "Combining nitrification inhibitors with a reduced N rate maintains yield and reduces N₂O emissions in sweet corn." *Nutrient Cycling in Agroecosystems*.

Nair, D., K. R. Baral, D. Abalos, B. W. Strobel och S. O. Petersen (2020). "Nitrate leaching and nitrous oxide emissions from maize after grass-clover on a coarse sandy soil: Mitigation potentials of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP)." *Journal of Environmental Management*, 260: 110165.

Nilsson, L. G. (1991). "Nitrifikationshämmare - flytgödsel." Uppsala: SLU.

Norton, J. och Y. Ouyang (2019). "Controls and Adaptive Management of Nitrification in Agricultural Soils." *Frontiers in Microbiology*, 10(1931).

OECD (2018). "Human acceleration of the nitrogen cycle: Managing risks and uncertainties." Paris: OECD.

Parkin, T. B. och J. L. Hatfield (2010). "Influence of nitrapyrin on N₂O losses from soil receiving fall-applied anhydrous ammonia." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 136(1): 81-86.

Pellerin, S., L. Bamière, D. Angers, F. Béline, M. Benoit, J.-P. Butault, C. Chenu, C. Colnenne-David, S. De Cara, N. Delame, M. Doreau, P. Dupraz, P. Faverdin, F. Garcia-Launay, M. Hassouna, C. Hénault, M.-H. Jeuffroy, K. Klumpp, A. Metay, D. Moran, S. Recous, E. Samson, I. Savini, L. Pardon och P. Chemineau (2017). "Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture." *Environmental Science & Policy*, 77: 130-139.

Podolyan, A., H. J. Di och K. C. Cameron (2020). "Effect of plantain on nitrous oxide emissions and soil nitrification rate in pasture soil under a simulated urine patch in Canterbury, New Zealand." *Journal of Soils and Sediments*, 20(3): 1468-1479.

Qiao, C., L. Liu, S. Hu, J. E. Compton, T. L. Greaver och Q. Li (2015). "How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input." *Glob Chang Biol*, 21(3): 1249-1257.

Ramotowski, D. och W. Shi (2022). "Nitrapyrin-based nitrification inhibitors shaped the soil microbial community via controls on soil pH and inorganic N composition." *Applied Soil Ecology*, 170: 104295.

Ray, A., C. Nkwonta, P. Forrestal, M. Danaher, K. Richards, T. O'Callaghan, S. Hogan och E. Cummins (2020). "Current knowledge on urease and nitrification inhibitors technology and their safety." *Reviews on Environmental Health*(000010151520200088).

Raza, S., Y. Jiang, A. S. Elrys, J. Tao, Z. Liu, Z. Li, Z. Chen och J. Zhou (2021). "Dicyandiamide efficacy of inhibiting nitrification and carbon dioxide emission from calcareous soil depends on temperature and moisture contents." *Archives of Agronomy and Soil Science*: 1-17.

Redemann, C. T., R. T. Martin, J. D. Wien och J. G. Widofsky (1965). "Residue detection: Tracer study of residues from 2-chloro6-(trichloromethyl)pyridine in plants." *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 12: 207-209.

- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. de Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen och J. Foley (2009). "Planetary Boundaries Exploring the Safe Operating Space for Humanity." *Ecology and Society*, 14(2).
- Rose, T. J., R. H. Wood, M. T. Rose och L. Van Zwieten (2018). "A re-evaluation of the agronomic effectiveness of the nitrification inhibitors DCD and DMPP and the urease inhibitor NBPT." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 252: 69-73.
- Ruser, R. och R. Schulz (2015). "The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils—a review." *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(2): 171-188.
- Sha, Z., X. Ma, J. Wang, T. Lv, Q. Li, T. Misselbrook och X. Liu (2020). "Effect of N stabilizers on fertilizer-N fate in the soil-crop system: A meta-analysis." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 290: 106763.
- Smith, I. och M. Schallenberg (2013). "Occurrence of the agricultural nitrification inhibitor, dicyandiamide, in surface waters and its effects on nitrogen dynamics in an experimental aquatic system." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164: 23-31.
- Steffen, W., K. Richardson, J. Rockström, S. E. Cornell, I. Fetzer, E. M. Bennett, R. Biggs, S. R. Carpenter, W. d. Vries, C. A. d. Wit, C. Folke, D. Gerten, J. Heinke, G. M. Mace, L. M. Persson, V. Ramanathan, B. Reyers och S. Sörlin (2015). "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet." *Science*, 347(6223): 1259855.
- Sutton, M. A., A. Bleeker, C. Howard, J. W. Erisman, Y. P. Abrol, M. Bekunda, A. Datta, E. Davidson, W. Vries, O. Oenema och F. S. Zhang (2013). "Our nutrient world. The challenge to produce more food & energy with less pollution." *Global Overview of Nutrient Management*.
- Sutton, M. A., C. M. Howard, T. K. Adhya, E. Baker, J. Baron, A. Basir, W. Brownlie, C. Cordovil, W. de Vries, V. Eory, R. Green, H. Harmens, K. W. Hicks, R. Jeffery, D. Kanter, L. Lassaletta, A. Leip, C. Masso, T. H. Misselbrook, E. Nemitz, S. P. Nissanka, O. Oenema, S. Patra, M. Pradhan, J. Ometto, R. Purvaja, N. Raghuram, R. Ramesh, N. Read, D. S. Reay, E. Rowe, A. Sanz-Cobena, S. Sharma, K. R. Sharp, U. Skiba, h. J. U. Smit, I. van der Beck, M. Vieno och H. J. M. van Grinsven (2019). "Nitrogen: Grasping the challenge. A manifesto for science-in-action through the international nitrogen management system. Summary report." Edinburgh, UK: Centre for Ecology & Hydrology.
- Thapa, R., A. Chatterjee, R. Awale, D. A. McGranahan och A. Daigh (2016). "Effect of Enhanced Efficiency Fertilizers on Nitrous Oxide Emissions and Crop Yields: A Meta-analysis." *Soil Science Society of America Journal*, 80(5): 1121-1134.
- Udvardi, M., F. E. Below, M. J. Castellano, A. J. Eagle, K. E. Giller, J. K. Ladha, X. Liu, T. M. Maaz, B. Nova-Franco, N. Raghuram, G. P. Robertson, S. Roy, M. Saha, S. Schmidt, M. Tegeder, L. M. York och J. W. Peters (2021). "A Research Road Map for Responsible Use of Agricultural Nitrogen." *Front. Sustain. Food Syst.*, 5.
- USDA, E. (2018), "Fertilizer use and price." United States Department of Agriculture.
- Wang, X., J. Bai, T. Xie, W. Wang, G. Zhang, S. Yin och D. Wang (2021). "Effects of biological nitrification inhibitors on nitrogen use efficiency and greenhouse gas emissions in agricultural soils: A review." *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 220: 112338.
- Weber, C. och L. McCann (2015). "Adoption of Nitrogen-Efficient Technologies by U.S. Corn Farmers." *Journal of Environmental Quality*, 44(2): 391-401.
- Wikström, L. (2021). "Vi börjar förstå vad som

ger ett bättre kväveutnyttjande." *Lantbrukets affärer*(Nr 5).

Wolf, K. A., C. D. Børgesen, F. Plauborg och S. O. Petersen (2022). "Nitrous oxide and nitrate as indicators of subsoil removal of N in pig slurry applied to Luvisols in Western Denmark." *Geoderma Regional*, 28: e00441.

Woodward, E. E., T. M. Edwards, C. E. Givens, D. W. Kolpin och M. L. Hladik (2021). "Widespread Use of the Nitrification Inhibitor Nitrapyrin: Assessing Benefits and Costs to Agriculture, Ecosystems, and Environmental Health." *Environmental Science & Technology*, 55(3): 1345-1353.

Woodward, E. E., M. L. Hladik och D. W. Kolpin (2016). "Nitrapyrin in Streams: The First Study Documenting Off-Field Transport of a Nitrogen Stabilizer Compound." *Environmental Science & Technology Letters*, 3(11): 387-392.

Woodward, E. E., D. W. Kolpin, W. Zheng, N. L. Holm, S. M. Meppelink, P. J. Terrio och M. L. Hladik (2019). "Fate and transport of nitrapyrin in agroecosystems: Occurrence in agricultural soils, subsurface drains, and receiving streams in the Midwestern US." *Science of The Total Environment*, 650: 2830-2841.

Wu, D., Y. Zhang, G. Dong, Z. Du, W. Wu, D. Chadwick och R. Bol (2021). "The importance of ammonia volatilization in estimating the efficacy of nitrification inhibitors to reduce N₂O emissions: A global meta-analysis." *Environmental Pollution*, 271: 116365.

Xia, L., S. K. Lam, D. Chen, J. Wang, Q. Tang och X. Yan (2017). "Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis." *Glob Chang Biol*, 23(5): 1917-1925.

Zhang, X., E. A. Davidson, D. L. Mauzerall, T. D. Searchinger, P. Dumas och Y. Shen (2015). "Managing nitrogen for sustainable development." *Nature*, 528(7580): 51-59.

Zhu, G., X. Ju, J. Zhang, C. Müller, R. M. Rees, R. E. Thorman och R. Sylvester-Bradley (2019).

"Effects of the nitrification inhibitor DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) on gross N transformation rates and N₂O emissions." *Biology and Fertility of Soils*, 55(6): 603-615.

Författare

Helena Johansson

Mer information

Helena Johansson

E-post: helena.johansson@agrifood.lu.se

**Vad är AgriFood
Economics
Centre?**

AgriFood Economics Centre utför kvalificerade samhällsekonomiska analyser inom livsmedels-, jordbruks- och fiskeriområdet samt landsbygdsutveckling. Verksamheten är ett samarbete mellan Sveriges lantbruksuniversitet och Lunds universitet och syftar till att ge regering och riksdag vetenskapligt underbyggda underlag för strategiska och långsiktiga beslut.

Publikationer

AgriFood Economics Centre ger ut tre typer av publikationer som vänder sig till beslutsfattare, myndigheter och en intresserad allmänhet. **Policy Briefs** är lättillgängliga sammanfattningar av en av våra vetenskapliga publikationer. **Fokus** är kortare analyser och **Rapporter** är längre analyser som även ges ut i tryckt format. AgriFood skriver också vetenskapliga artiklar och working papers som i huvudsak vänder sig till en vetenskaplig publik. Våra publikationer kan beställas eller laddas ned på www.agrifood.se.

Kontakt

AgriFood Economics Centre
Box 7080, 220 07 Lund
