

*Statens Planteavls-Laboratorium (Aage Henriksen)**Jordbundskemisk afdeling (Jens Jensen)*

Fiksering og frigørelse af ammonium

Fixation and release of ammonium in Danish soils

J. Dissing Nielsen

Indledning

Det har længe været kendt fra laboratorieforsøg, at mange jorde ved ammoniumtilsætning fastlægger (fikserer) en del af det tilførte ammonium på en måde, så det ikke kan ombyttes med kalium og derfor må antages at være mindre tilgængeligt for planterne end ammonium på ombyttelig form. Barshad (6) foreslog at definere fikseret ammonium som det, der ikke genfindes ved ekstraktion og udvaskning med kaliumsaltopløsninger. Denne fiksering af ammonium foregår, såvel når jorden er fugtighedsinættet som ved tørring.

Lermineraleerne synes på samme måde som ved kaliumfikseringen at være den væsentligste årsag til ammoniumfikseringen. Det antages, at fikseringen sker på følgende måde: Når interlamellart bundet Ca^{2+} , Mg^{2+} og Na^{+} i lermineraleerne ombyttes med NH_4^{+} eller K^{+} , sker der en formindskelse af afstanden mellem de lag, hvoraf lermineralet er opbygget. Herved bliver NH_4^{+} og K^{+} ionerne så fast bundne, at de ikke ombyttes med NH_4^{+} og K^{+} i jordvæsken og kun langsomt ombyttes med kationer, der som Ca^{2+} , Mg^{2+} og Na^{+} formår at øge afstanden mellem lagene.

Der findes forskellige fremgangsmåder til bestemmelse af jordens indhold af fikseret ammonium. Ved Rodriques (19) metode ekstraheres jorden med en blanding af 4 dele 40 pct. fluorbrintsyre og 1 del 50 pct. svovlsyre i 1 time, og det frigjorte ammonium bestemmes ved destillation med alkali efter forudgående afrygning af fluorbrinte med koncentreret svovlsyre. Det er

påpeget af Schachtschabel (20), at denne teknik utvivlsomt frigør en del organisk bundet kvælstof, som omdannes til ammonium-N. Schachtschabel foreslog derfor en forbehandling med en opløsning af 30 pct. brintoverilte og 1 n kaliumchlorid, hvorved det organiske materiale oxideres, og fiksering af det frigjorte ammonium hindres ved tilstedeværelsen af overskud af kaliumioner.

Bremners (8) metode til bestemmelse af fikseret ammonium baseres på forskellen mellem ammoniumfrigørelsen ved ekstraktion med en opløsning, som er 1 n med hensyn til såvel fluorbrintsyre som saltsyre og kaliumchlorid. Det frigjorte ammonium i ekstrakten bestemmes ved alkalisk destillation uden forudgående afrygning af fluorbrinte.

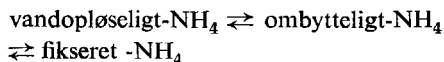
Barshad (6) anvendte en alkalisk destillations-teknik, som er baseret på, at fikseret ammonium frigøres fra vermiculit ved destillation med natriumhydroxid men ikke ved destillation med kaliumhydroxid. Bremner (8) anfører, at denne metode kun er begrænset anvendelig, fordi ekstraktionen af fikseret ammonium med natriumhydroxid blokeres allerede ved tilstedeværelsen af små mængder kaliumioner. En yderligere kritik mod anvendelsen af Barshad's metode er, at det forudsættes, at frigørelsen af ammonium fra organisk bundet kvælstof er den samme ved destillation af jord med natriumhydroxid og kaliumhydroxid. Syreekstraktion til bestemmelse af ammoniumfiksering har mange fordele fremfor Barshad's metode. Således vil absorption og for-

dampning af små mængder ammonium samt mikrobiologisk nitrificering under fikseringsperioden ikke være fejlkilder.

Det er de samme lerminerale, der medvirker ved såvel ammonium- som kaliumfikseringen i jorden. *Allison og Roller* (4) angiver, at den gennemsnitlige ammoniumfikserings kapacitet uden tørring for vermiculit var 50, for montmorillonit 6 og for illit 1 mækv. pr. 100 g lermineral, medens kaolinit ikke fikserede ammoniumionerne.

For lerminerale er ammoniumfikseringen voksende med partikelstørrelsen, og en stærk findeling af vermiculit ved knusning bevirkede en nedgang i fikseringen (*Barshad* (6)). I jorde er fikseringen oftest positivt korreleret med lerindholdet. Den ringe ammonium- og kaliumfiksering, som findes i sandjorde, skyldes et lavt indhold af glimmeragtige bestanddele i disse jorde.

Foruden jordens mineralogiske sammensætning har adskillige andre faktorer betydning for ammoniumfikseringens omfang. Den totale mængde af fikseret ammonium øges således ved stigende tilsætning af ammonium. Dette er i overensstemmelse med den teori, at mængden af fikseret ammonium er bestemt ved følgende reaktion:



Den procentiske fiksering aftager derimod, når ammoniumtilførselen øges.

Fikseringen af ammonium er en relativt hurtig proces, hvis hastighed er størst umiddelbart efter tilsætning og aftager efterhånden, som ligevægtspunktet nås.

Sammenhængen mellem ammonium- og kaliumfiksering har været genstand for adskillige undersøgelser. *Stanford og Pierre* (21) fandt således en signifikant korrelation mellem en jords evne til at fikserer ammonium og kalium, når ionerne tilsættes i ækvivalente mængder. Ved tilsætning af ammonium før kalium fandtes en reduktion i kaliumfikseringen ækvivalent med fikseringen af ammonium og omvendt ved tilsætning af kalium før ammonium. De ovennævnte forfattere konkluderede udfra deres resultater, at ammonium- og kaliumfiksering sker ved den samme mekanisme.

Virkningen på ammoniumfikseringen af stigende mængder kalium tilsat samtidig med ammonium blev undersøgt i en vermiculit-jord af *Nömmik* (16). De 2 ioner fikseredes i forholdet 3,4:1, når ækvivalente mængder af ammonium og kalium tilsattes samtidig til jorden (1 mækv. pr. 100 g jord). Ved små koncentrationer medførte en tilsætning af kalium samtidig med ammonium en lille stigning i ammoniumfikseringen, og selv et betydeligt overskud af kalium overfor ammonium nedsatte ikke ammoniumfikseringen væsentligt.

Betydningen af H^+ -mætningen af jorde og lerminerale for deres evne til at fikserer ammonium har været genstand for betydelig interesse. Resultaterne fra mere end 200 svenske overfladejorde viste en tendens til stigende ammoniumfiksering ved stigende pH i jorden (*Nömmik* (17)). For jorde med pH under 5,5 var ammoniumfikseringen ubetydelig. *Wiklander og Anderson* (24) undersøgte jorden fra et markforsøg 22 år efter kalktilførselen og fandt, at jordens evne til at fikserer ammonium og kalium var forøget ved kalkningen.

De forskellige kationer varierede i deres evne til at fortrænge fikseret ammonium. Dette tilskrives forskelle i kationernes evne til at øge afstanden mellem de lag, hvoraf lerminerale er opbygget. H^- , Na^- , Ca^- og Mg^- -ioner er i stand til at åbne lerminerale og dermed til at frigøre fikseret ammonium, medens K^- , Cs^- og Rb^- ikke er det. *Nömmik* (16) og *Hanway et. al.* (11) fandt, at åbningen af lerminerale og frigørelsen af fikseret ammonium blev hæmmet ved tilstedeværelsen af små mængder kalium. Ved tilstrækkeligt høje kaliumkoncentrationer blev ammoniumfrigørelsen fuldstændig blokeret. Den hæmmende virkning af kaliumioner på frigørelsen af fikseret ammonium synes at være gensidig. Således fandt *Nömmik* (16), at frigørelsen af fikseret kalium fra jorde ved eluering med neutrale saltopløsninger blev formindsket ved tilstedeværelsen af ammoniumioner i ekstraktionsopløsningen.

Nitrifikation af det fikserede ammonium har været genstand for mange undersøgelser. *Allison, Doetsch og Roller* (1) undersøgte tilgængeligheden for mikrobiologisk nitrificering af fikseret ammo-

nium i jorde indeholdende forskellige lermineraller. I løbet af 6 md. nitrificeredes omkring 10 pct. af det fikserede ammonium, og fikseringsmetodikken influerede ikke på dets tilgængelighed, selvom fikseringskapaciteten var større ved tørring end ved vådbehandling med ammoniumsalt. *Bower* (7) og *Allison* og *Roller* (4) fandt, at kun 10-20 pct. af det fikserede ammonium i forskellige typer lerjorde blev omdannet fra ammonium til nitrat indenfor en periode af 14 dage, medens 78-87 pct. af det ombyttelige ammonium blev nitrificeret i løbet af det samme tidsrum. Tilgængeligheden af det fikserede ammonium var mindst i vermiculit-jorde og størst i jorde med montmorillonit som ammoniumfikserende lermineral. I lermineraller, hvor det ombyttelige kalium er fjernet ved udvaskning med calciumchlorid har det fikserede ammonium vist sig at være lige så tilgængeligt for nitrificering som ombytteligt ammonium (*Allison et. al.* (3)). *Welch* og *Scott* (23) fandt, at tilsætning af kalium (100, 200 og 300 ppm.) nedsatte tilgængeligheden for nitrificering af det fikserede ammonium. En ringe tilgængelighed af fikseret ammonium for nitrificering kan således skyldes et højt indhold af ombytteligt kalium eller frigørelse af fikseret kalium under nitrificeringen.

Selvom ammoniumfiksering er ret almindelig i dyrkede jorde, er vort kendskab til dens betydning for tilgængeligheden af ammoniumkvælstof for planterne ret sparsomt og upræcist. Kendskabet er mest baseret på kar- og rammeforsøg og giver derfor kun få oplysninger om tilgængeligheden under markforhold.

Bower (7) og *Allison et. al.* (2), som undersøgte tilgængeligheden af fikseret ammonium ved karforsøg med henholdsvis byg og hirse, fandt meget ringe udnyttelse af det fikserede ammonium. Senere undersøgelser (*Nömmik* (16)) med en stærkt ammoniumfikserende vermiculitjord har vist, at værdien af ammonium-N målt ved tørstofudbytte af havre kun var 10 pct. mindre end af nitrat-N. Analyser af afgrøden gennem vækstperioden viste, at kvælstofoptagelsen forløb langt hurtigere med nitrat end med ammonium som kvælstofkilde. Såvel kærneudbyttet som kvælstofoptagelsen reduceredes ved tilførsel af rela-

tivt store mængder kalium sammen med ammonium-N, medens tilførsel af kalium før ammonium ikke påvirkede udbyttet eller kvælstofoptagelsen i ovennævnte forsøg. *Jansson* (12) fandt ved karforsøg med byg i en stærkt fikserende skånsk undergrundsjord, at kaliumtilførsel før ammoniumgødskning formindskede ammoniumfikseringen stærkt. Tilførsel af stigende mængder kalium samtidig med ammonium havde en tydelig negativ virkning på bygplanternes vækst, medens kaliumtilførsel sammen med nitrat virkede positivt. For at kunne undersøge eftervirkningen af fikseret ammonium var det mærket med N^{15} ved forsøgene med stigende kaliummængder. Det fremgik, at eftervirkningerne af kalium måtte ophæves, før det fikserede ammonium kunne udnyttes af bygplanterne. Forsøg i marken bekræftede resultaterne fra karforsøgene.

Sammenligninger mellem ammonium- og nitratgødninger under markforhold har antydnet, at jordens fikseringskapacitet for ammonium ikke har helt så stor betydning for værdiforholdet mellem de 2 N-gødninger, som man skulle forvente efter laboratorieundersøgelserne. Værdiforholdet mellem de 2 kvælstoffer anvendt på ammoniumfikserende jorde varierer efter svenske undersøgelser (*Nömmik* (16)) fra det ene år til det andet og med afgrødens art. Ammoniumfikseringen er større i tørre end i fugtige år, hvilket bevirker et ugunstigt forhold i tørre år for ammonium overfor nitrat som kvælstofgødning. Danske sammenligninger (*Kofoed, Lindhard* og *Søndergaard Klausen* (13)) i rammeforsøg mellem flydende ammoniak-N og nitrat-N til vårraps viste, at ammonium-N udnyttedes bedst i Lundgård sandjord, medens de 2 kvælstoffer gav omtrent samme tørstofudbytte og kvælstofoptagelse, når den ammoniumfikserende Blangstedgaard-jord anvendtes ved rammeforsøgene.

Ved Statens Planteavlslaboratorium er der tidligere foretaget undersøgelser over kaliumfikseringen i nogle danske jorde fra forskellige lokaliteter (*Dissing Nielsen* (9)). Kaliumfiksering forekom især i lerjorde og udgjorde i enkelte tilfælde 50 til 80 pct. af det tilførte kalium. I de senere år er der sket en ændring i vort forbrugsmønster af kvælstofgødninger, således at en stadig større del

af kvælstofforbruget tilføres som ammoniumgødninger. Interessen for deres værdi som kvælstofgødning sammenlignet med nitrat-N er derfor voksende, og i denne forbindelse er det bl.a. vigtigt at undersøge ammoniumfikseringens omfang og betydning i forskellige typer af danske jorde samt de fysiske og kemiske forhold i jordbunden, som er af betydning for fikseringens størrelse.

Materiale

Til undersøgelsen blev anvendt jordprøver, som tidligere var undersøgt for kaliumfiksering. De udgjorde en del af et jordarkiv, som er beskrevet af Lamm (14). Forbehandling af prøverne samt bestemmelse af våd- og tørfikseringen af kalium er beskrevet i en beretning om kaliumfiksering (Dissing Nielsen (9)), hvori også er anført jordenes Kt, kaliumfrigørelse, pH og lerprocent.

Fra forskellige konsulenter blev der indsendt jordprøver fra fastliggende kvælstofforsøg til belysning af den flerårige virkning af forskellige kvælstofgødninger. Forsøgsplanen og udbytte-tallene for de enkelte år er angivet i fællesberetningerne fra 1966, 67, 68 og 69 (18), og forsøgsbehandlingen er gennemført i 4 på hinanden følgende år. Prøverne er udtaget i efteråret 1969 i de øverste 20 cm, og forbehandlingen var den samme som for arkivjordene. Udover bestemmelsen af naturligt fikseret ammonium blev der i jordprøverne foretaget teksturanalyse og bestemmelse af reaktionstal.

Metoder

Der blev ved fremstillingen af opløsninger anvendt vand, som foruden at være rensat på laboratoriets ionbytteranlæg yderligere blev rensat ved passage gennem en resinsøjle. Alle analyserne blev udført som dobbeltbestemmelser, og resultaterne er angivet som gennemsnit heraf.

Ombytteligt ammonium: 5 g jord ekstraheres med 3 gange 25 ml 1 n KCl. Efter hver ekstraktion centrifugeres, og prøven opslemmes derpå grundigt i en ny portion KCl. Prøven vaskes derefter 3 gange med 25 ml vand og efter hver vaskning

centrifugeres. Resultatet af den efterfølgende NH_4^+ -bestemmelse i KCl-ekstrakt + vaskevand indgår i den indirekte bestemmelse af den ved laboratorieforsøgene fikserede ammoniummængde. Ombytteligt- NH_4^+ i de foreliggende prøver er kun analytisk af interesse, idet nitrificering efter udtagning af prøverne sandsynligvis har omdannet en del letopløselige NH_4^+ -forbindelser til NO_3^- .

Naturligt fikseret ammonium (Bremner (8)): Efter fjernelse af ombytteligt NH_4^+ frigøres prøvernes indhold af fikseret NH_4^+ ved rystning i plasticflasker i 20 timer med 200 ml af en opløsning, der er 1 normal med hensyn til såvel fluorbrinte som saltsyre (1 n HF:1 n HCl). Naturligt fikseret- $\text{NH}_4^+ = \text{NH}_4^+$ i ekstrakt.

Vådfiksering af ammonium: 5 g jord tilsættes 2 ml 0,05 n NH_4Cl eller 2 mækv. pr. 100 g jord og derefter 2 ml. vand (jord:væske 5:4). For at forhindre nitrificering tilsættes 2 dråber toluen, og prøverne står i kølerum ved 5°C i mindst 2 døgn. Derefter ekstraheres det ombyttelige NH_4^+ som foran angivet. I de med KCl og vand udvaskede prøver bestemmes det fikserede NH_4^+ ved rystning i plasticflasker i 20 timer med 200 ml 1 n HF: 1 n HCl. Fikseret- $\text{NH}_4^+ = \text{NH}_4^+$ i HF:HCl-ekstrakt — naturligt fikseret NH_4^+ . Som kontrol på den direkte bestemmelse af NH_4^+ -fiksering bestemmes fikseringen indirekte i KCl-ekstrakt + vaskevand. Fikseret- $\text{NH}_4^+ = \text{tilsat-NH}_4^+ + \text{ombytteligt-NH}_4^+ - \text{NH}_4^+$ i KCl-ekstrakt + vaskevand.

Tørfiksering af ammonium: NH_4Cl tilsættes som ved vådfiksering. Derefter tørres prøverne ved 55°C i mindst 1 døgn, og de ekstraheres med KCl og vaskes med vand som ved bestemmelse af vådfiksering. Fikseret $\text{NH}_4^+ = \text{NH}_4^+$ i HF:HCl-ekstrakt — naturligt fikseret NH_4^+ .

Samtidig tilsætning af ammonium og kalium: NH_4^+ og K^+ blandes før tilsætningen til jordprøverne, hvorefter de behandles som angivet ved bestemmelse af fikseringen af NH_4^+ og K^+ .

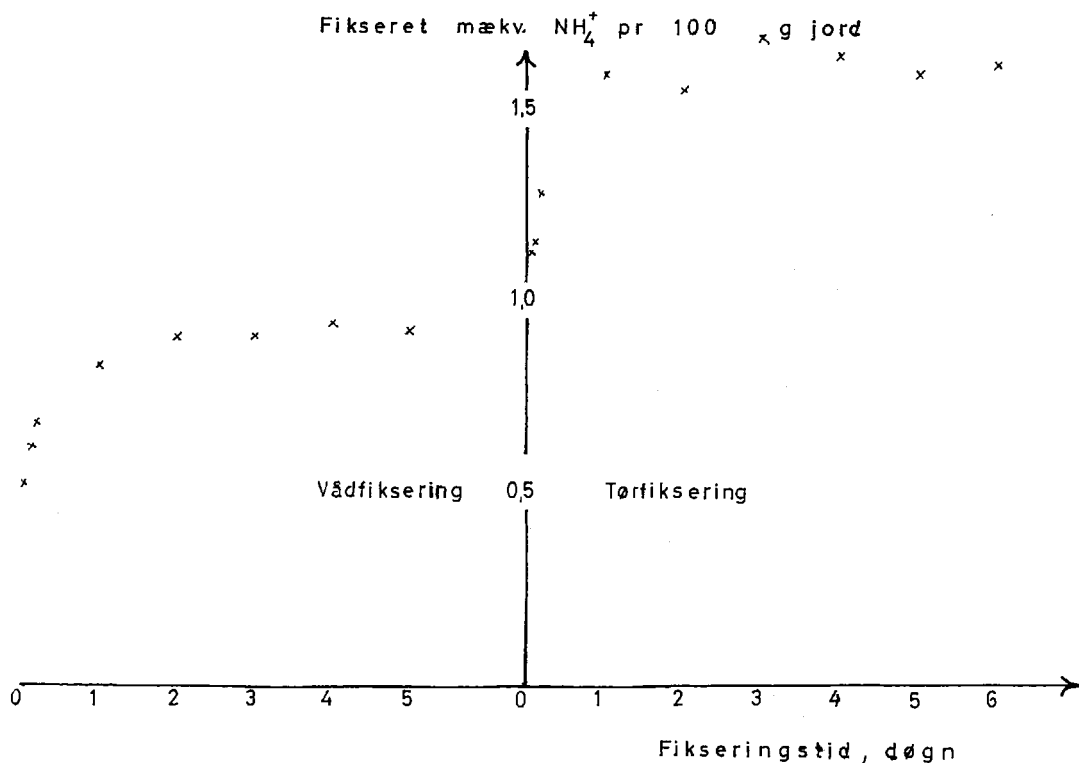


Fig. 1. Ammoniumfiksering i relation til fikseringstiden. Jordprøve 7 b, tilsat 2 mækv. NH_4^+ /100 g jord.

Tilsætning af kalium før ammonium: KCl tilsættes prøverne, og de anbringes 2 døgn i kølerum ved 5°C (vådfiksering) eller 1 døgn i tørreskab ved 70°C (tørfiksering). Prøverne tilsættes derefter NH_4Cl , som angivet under bestemmelsen af våd- og tørfiksering af NH_4^+ .

Ammoniak-destillation: NH_4^+ frigøres i $\text{HF}:\text{HCl}$ -ekstrakten eller KCl-ekstrakt + vaskevand ved tilsætning af et overskud på 5 g MgO . Kogningen sker i et specielt bygget apparatur med glasslib, og NH_3 opsamles i destilleret H_2O .

Ammoniakbestemmelse: Ved NH_3 -bestemmelsen blev benyttet Nessler reaktionen, som er mere følsom end titreranalysen. En destillatmængde indeholdende fra 2×10^{-3} til 15×10^{-3} mækv. NH_3 overføres til en 100 ml målekolbe, der fyldes halvt op med vand. Der tilsættes 2 ml 1 pct. gummi-arabicum-opløsning for at stabilisere far-

ven, som herefter fremkaldes ved tilsætning af 5 ml Nesslers reagens (Egner et. al. (10)), og kolberne fyldes op til mærket med vand. Efter henstand i 15 min. måles farven i et kolorimeter ved 420-465 $\text{m}\mu$.

Fiksering af kalium: Bestemmelse som beskrevet af Dissing Nielsen (9).

Resultater

Fiksering af ammonium er en ret hurtig forløbende proces, som stort set er afsluttet indenfor et døgn eller to (fig. 1). Det samme gjaldt for kaliumfikseringen (9), hvor det angives, at 90 pct. af den over flere dage fikserede kaliummængde fikses i løbet af de første 10 min.

Undersøgelse af arkivjorde. Der blev foretaget en undersøgelse af jordprøver fra jordarkivet udtaget i 3 dybder og repræsenterende 17 lokaliteter.

Tabel 1. Fiksering og frigørelse af ammonium i jordprøver fra 17 lokaliteter, udtaget i 3 dybder

a: 0-20 cm, b: 20-50 cm, c: 50-100 cm

mækv./100 g jord

Lokalitet og nr. i jordarkiv		vådfiksering			tørfiksering		pH	Ler
		NH ₄ ⁺ -fikseret naturligt	NH ₄ ⁺ -fiks.	K ⁺ -fikseret	NH ₄ ⁺ -fiks.	K ⁺ -fikseret		
			syreekstr. (direkte)		syreekstr. (direkte)		H ₂ O	pct.
Aarslev 1	a	0,72	0,09	0,14	0,36	0,51	5,5	9
	b	0,47	0,07	0,07	0,45	0,54	6,1	10
	c	0,51	0,08	0,16	0,26	0,78	5,4	16
Aarslev 2	a	0,76	0,19	0,22	0,37	0,35	6,8	12
	b	0,72	0,06	0,25	0,25	0,45	6,7	9
	c	0,68	0,15	0,25	0,18	0,68	5,8	13
Aarslev 3	a	0,61	0,13	0,19	0,36	0,39	6,0	11
	b	0,40	0,15	0,17	0,27	0,42	6,5	9
	c	0,41	0,05	0,16	0,37	0,73	6,5	9
Aarslev 4	a	0,58	0,29	0,21	0,35	0,46	6,4	10
	b	0,86	0,09	0,18	0,13	0,65	6,7	14
	c	0,88	0,15	0,26	0,65	0,92	6,6	20
Abed 5	a	0,73	0,47	0,46	1,06	0,34	8,0	15
	b	0,61	0,91	1,07	1,25	2,08	8,2	14
	c	0,49	0,59	1,02	1,04	1,48	8,3	25
Blangsted- gaard 6	a	0,87	0,48	0,33	0,72	1,23	5,9	12
	b	0,74	0,64	0,75	1,18	2,02	6,4	15
	c	0,44	1,11	1,07	1,58	2,13	8,1	13
Blangsted- gaard 7	a	0,77	0,33	0,34	0,52	1,05	6,7	13
	b	0,48	1,04	1,14	1,60	1,65	7,7	14
	c	0,35	1,01	1,00	1,22	1,77	8,3	15
Virumgaard 38	a	0,68	0,34	0,31	0,26	0,28	4,7	12
	b	0,54	0,34	0,28	0,30	0,42	4,7	13
	c	0,43	0,12	0,39	0,34	0,57	4,9	11
Virumgaard 39	a	0,53	0,27	0,34	0,29	0,52	6,8	11
	b	0,50	0,41	0,29	0,31	0,30	6,2	11
	c	0,80	0,46	0,51	0,87	0,78	5,8	16
Ødum 40	a	0,75	0,11	0,17	0,35	0,58	7,0	12
	b	0,59	0,11	0,14	0,30	0,52	7,3	15
	c	0,63	0,24	0,22	0,54	0,71	6,8	19
Ødum 41	a	0,75	0,06	0,21	0,24	0,48	6,9	12
	b	0,65	0,07	0,21	0,53	0,57	7,1	13
	c	0,72	0,32	0,33	0,75	1,01	7,1	18
Ribe 46	a	1,74	0,16	0,50	0,54	1,24	7,1	34
	b	1,46	0,16	0,49	0,41	0,56	7,1	37
	c	1,16	0,45	0,48	0,66	0,72	6,7	42
Ribe 47	a	1,47	0,45	0,50	0,92	1,36	7,1	33
	b	1,64	0,23	0,52	0,71	1,13	6,7	44
	c	1,18	0,25	0,51	0,65	0,96	6,8	39
Askov 48	a	0,64	0,04	0,49	—0,03	0,66	6,2	10
	b	0,44	0,16	0,20	0,15	0,45	6,3	9
	c	0,15	0,25	0,03	0,26	0,34	6,3	8

Tabel 1 (fortsat)

a: 0-20 cm, b: 20-50 cm, c: 50-100 cm
mækv./100 g jord

Lokalitet og nr. i jordarkiv		NH ₄ ⁺ -fiks. naturligt	vådfiksering			tørfiksering		pH	Ler
			NH ₄ ⁺ -fiks. syreekstr. (direkte)	K ⁺ -fikseret	NH ₄ ⁺ -fiks. syreekstr. (direkte)	K ⁺ -fikseret			
							H ₂ O		
Askov 51	a	0,22	0,05	0,13	0,19	0,08	6,8	4	
	b	0,21	0,09	0,05	0,19	0,18	6,6	4	
	c	0,10	0,02	0,04	0,07	0	6,3	3	
Lundgaard 52	a	0,27	0,03	0,11	0,05	0,05	6,4	2	
	b	0,21	0,01	0,05	0,13	0,14	6,1	4	
	c	0,19	—0,08	0,09	0,14	0,10	6,0	3	
Lammefjord 53	a	2,60	0,07	0,44	1,25	1,20	7,7	7	
	b	2,63	0,24	0,39	1,62	1,01	7,7	7	
	c	2,21	0,20	0,32	1,11	0,68	7,6	5	
m		0,032	0,092	0,036	0,137	0,054			

Resultaterne er vist i tabel 1, og der er for hver af analysemetoderne til bestemmelse af fikseringen og frigørelsen af ammonium og kalium nederst i tabellen anført en fælles middelfejl. Fikseringen er angivet i mækv. pr. 100 g jord, og der er tilsat 2 mækv. ammonium eller 2,5 mækv. kalium. De anførte tal fra laboratorieundersøgelsen angiver næppe den absolutte fiksering af ammonium under praktiske forhold, men det relative forhold mellem jordene, som er fundet i laboratoriet, gælder antagelig også i marken. Dette sandsynliggøres bl.a. af korrelationen ($r = 0,75$), som fandtes mellem våd- og tørfiksering af ammonium.

Det naturligt fikserede ammonium udgør en kvælstofmængde, svarende til 50-600 kg N/ha i de øverste 20 cm. Prøverne fra den humusrige jord fra Lammefjord har det største indhold af naturligt fikseret ammonium, men en del af det ved

syreekstraktion frigjorte ammonium kan muligvis hidrøre fra nedbrydningen af organiske kvælstofforbindelser. Det naturligt fikserede ammonium udgør i de øvrige jordprøver fra 0,15 til ca. 1,7 mækv. pr. 100 g jord. De øverste jordlag indeholder mere naturligt fikseret ammonium end undergrunden (tabel 2), men spredningen er stor mellem prøver udtaget i samme dybde. Modsat ammoniumfrigørelsen var lerprocenten og kaliumfrigørelsen voksende med dybden i jordprofilen (*Dissing Nielsen (9)*).

I tabel 1 er angivet vådfikseringen af ammonium bestemt ved syreekstraktion. Der fandtes omtrent samme resultat for vådfiksering af ammonium ved direkte og indirekte bestemmelse, men usikkerheden var størst ved den indirekte metode. I de fleste prøver er ammoniumfikseringen mindre end 0,5 mækv. eller 25 pct. af den

Tabel 2. Fiksering og frigørelse af ammonium i forskellige jorddybder

Gennemsnit og spredning af prøver fra 17 lokaliteter, udtaget i 3 dybder
mækv./100 g jord

Dybde	Vådfiksering						Tørfiksering			
	NH ₄ ⁺ -fikseret		NH ₄ ⁺ -fikseret		K ⁺ -fikseret		NH ₄ ⁺ -fikseret		K ⁺ -fikseret	
	naturligt		syreekstr.				syreekstr.			
			(direkte)				(direkte)			
	S		S		S		S		S	
0-20 cm	0,86	0,63	0,21	0,16	0,30	0,14	0,46	0,35	0,62	0,41
20-50 cm	0,77	0,61	0,29	0,32	0,37	0,33	0,58	0,53	0,81	0,67
50-100 cm	0,67	0,51	0,33	0,32	0,39	0,32	0,63	0,43	0,85	0,54

Tabel 3. Relation mellem forskellige indeks til karakterisering af jordens ammonium- og kaliumtilstand

r = korrelation, b = regression								
	NH ₄ ⁺ -fiksering-våd KCl-ekstr. + vaskevand (indirekte)	NH ₄ ⁺ -fiks.-tør syreekstr. (direkte)	Ler pct.	K ⁺ -fiksering våd tørring	K ⁺ -frigørelse glødning syreekstr.			
NH ₄ ⁺ -fiksering naturligt	r = -0,19	r = -0,20	r = 0,35*	r = 0,24		r = 0,59***	r = 0,69***	b = 0,81
NH ₄ ⁺ -fiksering-våd KCl-ekstr. + vaskevand (indirekte)		r = 0,91*** b = 0,97		r = 0,05	r = 0,87*** b = 0,97			
NH ₄ ⁺ -fiksering-våd syreekstr. (direkte)			r = 0,75*** b = 0,50	r = 0,07	r = 0,86*** b = 0,90			
NH ₄ ⁺ -fiksering-tør syreekstr. (direkte)				r = 0,01	r = 0,78*** b = 0,79			

* Signifikant med 95 % sandsynlighed

** » » 99 % »

*** » » 99,9 % »

tilførte mængde, men prøverne fra Abed og Blangstedgaard har haft en betydelig vådfiksering af ammonium, og undergrundsprøverne fikserede her omkring 50 pct. af den tilsatte mængde. Det fremgår af gennemsnitstallene i tabel 2, at vådfikseringen af ammonium er større i undergrunden end i muldlaget modsat det naturlige indhold af fikseret ammonium, men spredningen er stor mellem prøver udtaget i samme dybde.

Tørfikseringen af ammonium er større end vådfikseringen, men er gennemgående lidt mindre end tørfikseringen af kalium. Det er især jordene fra Abed, Blangstedgaard, Ribe og Lammefjorden, som fikserer ammonium ved tørring. Gennemsnitstallene i tabel 2 viser, at også tørfikseringen af ammonium er større i undergrunden end i muldlaget.

I tabel 3 er vist relationen mellem forskellige indeks til karakterisering af jordens ammonium- og kaliumtilstand. Jordprøvernes indhold af naturligt fikseret ammonium har ingen eller ringe relation til fikseringen af tilført ammonium, og dette gælder såvel i fugtig jord som ved tørring. Derimod synes der at være nogen forbindelse mellem frigørelsen af naturligt fikseret ammonium

ved syreekstraktion og kaliumfrigørelsen ved syreekstraktion eller glødning. Jordens frigørelse af naturligt fikseret ammonium har kun i ringe grad været bestemt af dens lerprocent, medens der fandtes en nær sammenhæng mellem jordens lerindhold og dens frigørelse af kalium, såvel ved kogning med 2 n saltsyre som ved glødning (*Dissing Nielsen* (9)). Den direkte og den indirekte metode til bestemmelse af vådfikseringen af ammonium giver, som tidligere anført, omtrent ens resultater (regression = 0,97), og korrelationen mellem de 2 metoder er 0,91. Fikseringen af ammonium ved tørring er kun bestemt direkte ved syreekstraktion, idet den indirekte metode på grund af ammoniakfordampning under tørring giver fejlagtige, for høje resultater i hvertfald for prøver med pH over 7. Der er ret nær sammenhæng mellem jordens vådfiksering af ammonium og kalium (korrelation = 0,87). Tørfikseringen af ammonium er noget større end vådfikseringen, og korrelationen mellem de to metoder er 0,75. Sammenhængen mellem tørfikseringen af ammonium og kalium er noget svagere (korrelation = 0,78), end det var tilfældet ved vådfikseringen.

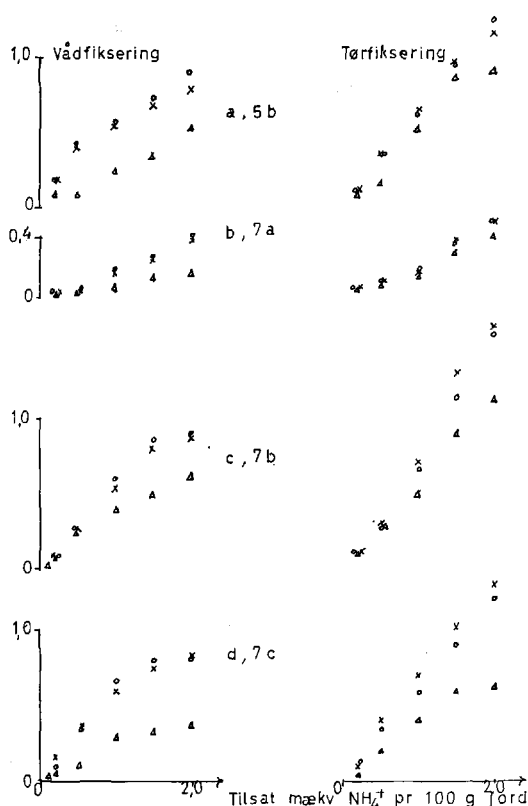


Fig. 2. Ammoniumfiksering ved tilsætning af stigende mængder af NH_4^+ .

○-○ NH_4Cl

×-× $\text{NH}_4\text{Cl} + 2 \text{ mækv. KCl}/100 \text{ g jord}$ tilsat samtidig

△-△ $\text{NH}_4\text{Cl} + 2 \text{ mækv. KCl}/100 \text{ g jord}$ tilsat før NH_4^+ .

Ammoniumfikseringen ved tilsætning af kalium: I fig. 2a, 2b, 2c og 2d er vist kaliumionens betydning for jordens ammoniumfiksering, når der tilføres stigende mængder ammonium. De undersøgte jorde er udvalgt på grund af deres betydelige ammoniumfiksering, og fordi de havde et relativt lille indhold af organisk stof. 5b havde et højt indhold af calciumcarbonat. Et mækv. ammonium pr. 100 g jord svarer til ca. 350 kg kvælstof pr. ha i 20 cm dybde for almindelig agerjord. Fikseringen af ammonium udgør ca. 50 pct. af den tilførte mængde ved tilsætning af 1 mækv.

ammonium alene til prøverne fra undergrunden. Den største procentiske fiksering forekommer ved de mindste tilførsler af ammonium. Vådfikseringen af ammonium er ved alle de undersøgte koncentrationer langt mindre i de øverste 20 cm af jorden end i de følgende lag, selvom lerindholdet stort set er det samme. Tørfikseringen af ammonium har for alle de undersøgte jorde været større end vådfikseringen, og kurveformen antyder, at fikseringskapaciteten for ammonium er noget større ved tørring end i våd jord, idet fikseringen ved tørring fortsat er proportional med ammoniummængden selv ved tilsætning af 2 mækv. pr. 100 g jord. Forholdet mellem jordene er det samme ved våd- og tørfiksering af ammonium.

Tilsætning af 2 mækv. kalium samtidig med tilsætning af ammonium har kun i ringe grad influeret på dets fiksering. For jordprøve 7b og 7c har tørfikseringen været noget større, når der samtidig med ammonium tilføres 2 mækv. kalium. *Nömmik* (17) anfører ligeledes, at ammoniumfikseringen øges i visse jorde, når der samtidig tilsættes ækvivalente mængder kalium.

For jordprøve 7b var ammoniumfikseringen næsten uafhængig af samtidig tilsætning af sti-

Tabel 4. Vådfiksering af ammonium og kalium tilsat samtidigt til jorden, 7b

a. Alle prøver tilsat 2 mækv. $\text{NH}_4^+/100 \text{ g jord}$

mækv. K^+ tilsat/100 g jord	mækv. fikseret/100 g jord NH_4^+	K^+	$\text{NH}_4^+ + \text{K}^+$
0	1,01	—	1,01
0,2	1,02	0,03	1,05
0,5	1,04	0,08	1,12
1,0	1,04	0,22	1,26
1,5	1,03	0,34	1,37
2,0	1,04	0,46	1,50

b. Alle prøver tilsat 2 mækv. $\text{K}^+/100 \text{ g jord}$

mækv. NH_4^+ tilsat/100 g jord	NH_4^+	K^+	$\text{NH}_4^+ + \text{K}^+$
0	—	0,99	0,99
0,2	0,10	0,78	0,88
0,5	0,29	0,54	0,83
1,0	0,54	0,51	1,05
1,5	0,78	0,51	1,29
2,0	0,91	0,51	1,42

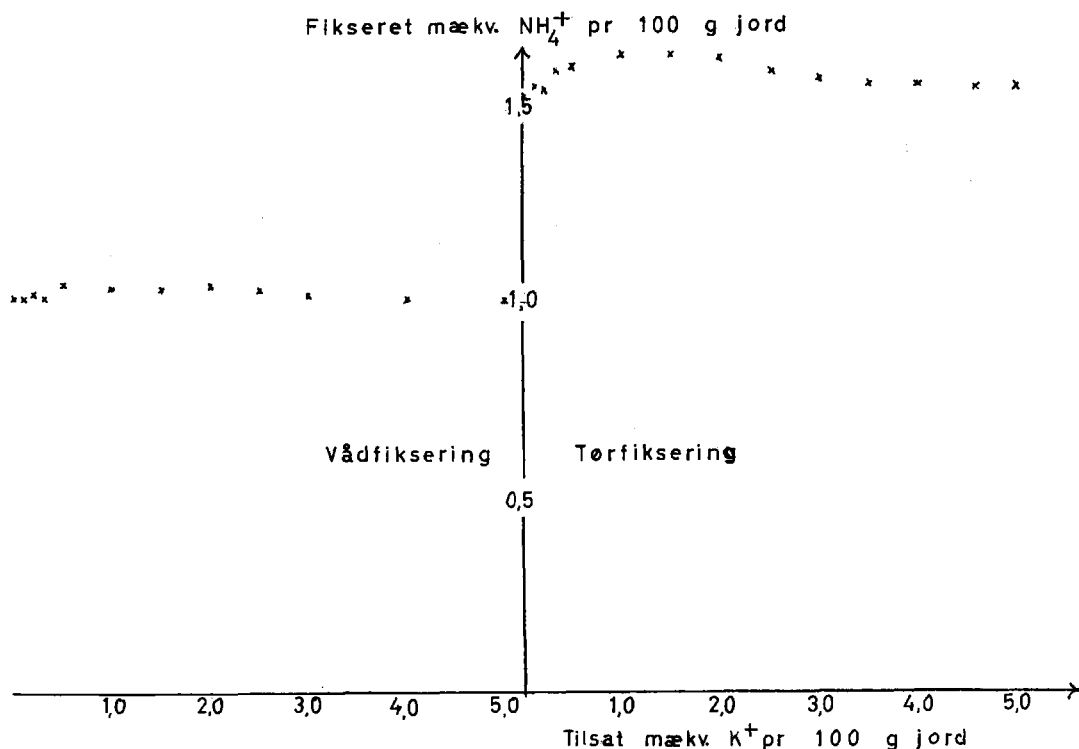


Fig. 3. — Ammoniumfiksering ved samtidig tilsætning af 2 mækv. NH_4Cl /100 g jord og stigende mængder af KCl . Jordprøve 7 b.

gende mængder kalium (fig. 3) bortset fra en lille stigning ved tilsætning af små mængder. Selv tilsætning af relativt store mængder kalium har ikke kunnet undertrykke ammoniumfikseringen, som ved vådfikseringen var 1,0 mækv. og ved tørfikseringen 1,5 mækv. pr. 100 g jord.

Ved samtidig tilsætning af 2 mækv. ammonium og kalium er fikseringen henholdsvis 0,91 og 0,46 mækv. pr. 100 g jord ved vådfiksering (tabel 4a). Ammoniumfikseringen er således en del større end kaliumfikseringen, når de 2 ioner tilsættes samtidig og i ækvivalente mængder. Summen af ammonium- og kaliumfiksering er voksende, når der samtidig med de 2 mækv. ammonium tilsættes stigende mængder af kalium. I tabel 4b er der vist samtidig tilsætning af konstant 2 mækv. kalium og stigende mængder af ammonium. Små mængder ammonium nedsætter kaliumfikseringen, og summen af fikseringen af

de 2 ioner falder, indtil tilsætningen og fikseringen af ammonium bliver så stor, at den opvejer reduktionen i kaliumfikseringen. Ammonium-effekten på kaliumfikseringen er åbenbart ikke blot en ækvivalenseffekt, således at ammonium erstatter kalium ved fikseringsprocesserne, men koncentrationer af ammonium, der er så små, at dets fiksering kvantitativt kun bliver ganske ringe, reducerer kaliumfikseringen med ca. 50 pct.

Ammoniumfikseringen forbliver således næsten upåvirket af en samtidig tilførsel af kalium. I fig. 2a, 2b, 2c og 2d er ligeledes vist, hvorledes tilsætning af kalium før ammonium påvirker ammoniumfikseringen. For alle de undersøgte prøver er den reduceret ganske betydeligt, når jorden forinden har fikseret en del kalium. Dette gælder især ved vådfiksering, men også ved tørfiksering er der en betydelig reduktion i fikseringen af

Tabel 5. Forholdet mellem ammonium- og kaliumfiksering ved tilførsel af 2 mækv.
 NH_4^+ og K^+ /100 g jord

Nr.	Vådfiksering				K ⁺ tilsat 2 døgn før NH ₄ ⁺			
	Samtidig tilsætning af NH ₄ ⁺ og K ⁺ mækv. fikseret/100 g jord				mækv. fikseret/100 g jord			
	NH ₄ ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺ +K ⁺	NH ₄ ⁺ :K ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺ +K ⁺	NH ₄ ⁺ :K ⁺
5 b	0,81	0,54	1,35	1,50	0,57	0,93	1,50	0,61
7 a	0,39	0,26	0,65	1,30	0,14	0,37	0,51	0,38
7 b	0,91	0,46	1,37	1,98	0,59	0,96	1,55	0,61
7 c	0,87	0,59	1,46	1,47	0,36	0,86	1,22	0,42

Nr.	Tørfiksering				K ⁺ tilsat 2 døgn før NH ₄ ⁺			
	Samtidig tilsætning af NH ₄ ⁺ og K ⁺ mækv. fikseret/100 g jord				mækv. fikseret/100 g jord			
	NH ₄ ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺ +K ⁺	NH ₄ ⁺ :K ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺ +K ⁺	NH ₄ ⁺ :K ⁺
5 b	1,14	1,52	2,66	0,76	0,90	1,67	2,57	0,54
7 a	0,48	0,47	0,95	1,02	0,44	0,92	1,36	0,48
7 b	1,61	0,74	2,35	2,18	1,13	1,36	2,49	0,83
7 c	1,32	1,26	2,58	1,05	0,63	1,61	2,24	0,39

ammonium, når der forinden er tilsat kalium. Det fremgår af tabel 5, at ved de angivne koncentrationer (2 mækv. ammonium og kalium) forbliver fikseringssummen af de 2 ioner stort set konstant, uanset om tilførslen sker samtidig, eller kalium tilsættes før ammonium, og formindskelsen i ammoniumfikseringen ved en forudgående tilsætning af kalium svarer til den målte stigning i fikseringen af kalium. Dette måtte man også forvente, idet ammoniumionen har vanskeligt ved at fortrænge kaliumionen, når den først er fikseret. Fikseringsforholdet mellem de 2 ioner ændres, således at der ved tilsætning af kalium før ammonium fikseres forholdsvis mindre ammonium og mere kalium, end når de 2 ioner tilføres samtidig. Dette kan tænkes at have praktisk interesse, idet man herved med forskellige udbringningsmetoder for de 2 plantenæringsstoffer kan regulere deres fikseringsgrad. Forholdet NH₄:K-fiksering ved samtidig tilsætning er mindre, når jorden tørres ved 55°C, end når ammonium og kalium fikseres i våd jord. Den fordobling af fikseringssummen, som fremkommer ved tørring sammenlignet med vådfiksering, skyldes således især en forøget kaliumfiksering. Forholdet NH₄:K-fiksering varierer i de forskellige jorde, således at nogle åbenbart især er disponeret for ammoniumfiksering, medens andre i lige så stor udstrækning kan fikserer kalium. Dette

kan muligvis henføres til jordprøvernes forskellige mineralogiske sammensætning og udpining for de 2 plantenæringsstoffer.

Kaliumfiksering ved tilsætning af ammonium. Da kaliumionen således er i stand til at påvirke fikseringen af ammonium, vil det være rimeligt at antage, at ammoniumionen har en effekt på fikseringen af kalium. Dette er vist ved fig. 4a, 4b, 4c og 4d. Kaliumfikseringen vokser med den tilsatte mængde ved tilsætning af kalium alene i det anførte koncentrationsområde, og dette gælder såvel for våd- som tørfikseringen. Overfladejorden 7a har fikseret mindre kalium end lagene fra undergrunden, selvom lerprocenten er næsten den samme i de 3 dybder. Tørfikseringen af kalium er især ved de højeste koncentrationer en del større end vådfikseringen. Antagelig nås mætningen af fikseringskapaciteten først ved vådfikseringen, og derfor bliver forskellen mellem de 2 fremgangsmåder til bestemmelse af kaliumbindingen større ved stigende kaliumtilsætninger. Procentisk er kaliumfikseringen størst ved de mindste tilsætninger, og den er næsten proportional med tilsætningen indtil 2,0 mækv. Sammenligning af kalium- og ammoniumfikseringen viser (fig. 2 og fig. 4), at der i det undersøgte koncentrationsområde fikseres lidt mindre af ammonium end kalium, når de 2 ioner ikke

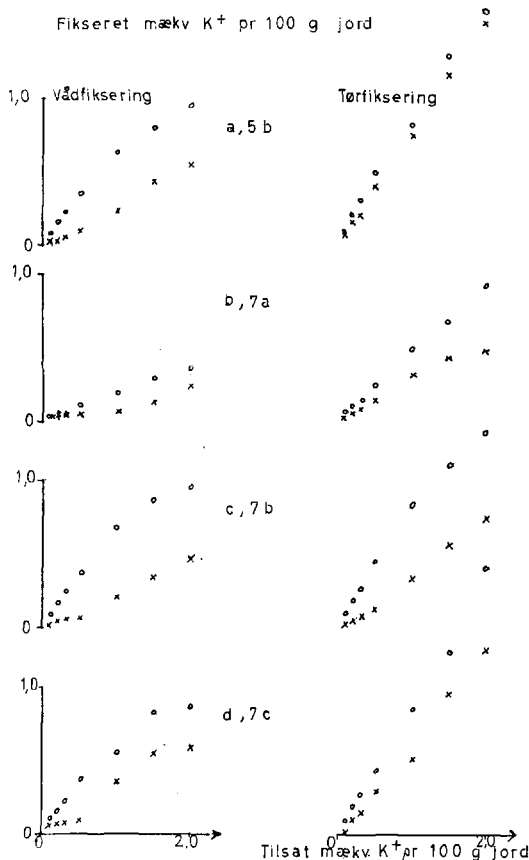


Fig. 4. – Kaliumfiksering ved tilsætning af stigende mængder af K^+ henholdsvis med og uden samtidig tilsætning af NH_4^+

○-○ KCl uden tilsætning af NH_4^+

x-x KCl + 2 mækv. $NH_4Cl/100$ g jord.

konkurrerer indbyrdes om fikseringspladserne; men det fremgår af undersøgelsen (fig. 4 og tabel 5), at ammonium øjensynligt fikseres før kalium, når begge ioner samtidig findes i jordvæsken i ækvivalente mængder.

Tilsætning til jorden af kalium samtidig med ammonium reducerede ikke fikseringen af ammonium, og fikseringssummen svarede næsten til fikseringen ved tilsætning af ækvivalente mængder af enten ammonium eller kalium. Derimod formindskes kaliumfikseringen, når der samtidig med kalium tilføres 2 mækv. ammonium. I våd jord er den i de fleste jorde blevet reduceret med

ca. 50 pct. Iøvrigt varierer kurveforløbet meget for de forskellige jorde. For jordprøve 7a er det tørfikseringen af kalium, som blokeres ved samtidig tilførsel af kalium og ammonium, medens fikseringen i våd jord kun reduceres lidt. I jordprøve 7c ændres kaliumfikseringen forholdsvis lidt ved tilsætning af ammonium, uanset om fikseringen frembringes i våd jord eller ved tørring af jorden. Det er ved de små kaliumtilførsler, mængder som normalt anvendes under praktiske forhold, at ammonium har blokeret kaliumfikseringen mest, og man må derfor forvente, at N-K kombinationen ved gødskningen har betydning for virkningen af de 2 plantenæringsstoffer.

I fig. 5 er vist kaliumfikseringen, når der tilføres 2 mækv. kalium og stigende mængder af ammonium. Det fremgår af fig. 5, at der sker en reduktion i den fikserede kaliummængde ved tilsætning af indtil 0,5 mækv. Der er fortsat en fiksering af kalium i jorden, selvom ammoniumtilsætningen overstiger kaliumtilsætningen; men sammenlignes fikseringen, når begge ioner tilsættes samtidig og i ækvivalente mængder (tabel 5), ses det, at ammoniumfikseringen i undergrundsprøverne i fugtig jord er større end kaliumfikseringen, og ved tørring fikseres der, bortset fra 7b, omtrent ækvivalente mængder.

Fastliggende kvælstofforsøg:

I tabel 6 er vist resultaterne fra bestemmelserne af indholdet af naturligt fikseret ammonium i muldlaget. Det fremgår af tabellen, at indholdet varierer meget fra sted til sted, og er størst i lerjorde.

Det gennemsnitlige indhold er mindre end det tilsvarende for arkivjordene, hvoraf de fleste er indsamlet på forsøgsstationerne, som nok gennemgående har anvendt mere kvælstofgødning end praksis.

Anvendelsen af forskellige kvælstofgødninger har i langt mindre grad end stedet været bestemmende for jordens indhold af fikseret ammonium. Forsøgsleddet gødet med urea som kvælstofgødning har et signifikant højere indhold af naturligt fikseret kvælstof end alle de øvrige forsøgsled, medens der ikke er nogen signifikant forskel mellem de øvrige 5 forsøgsled (95 pct. grænsen).

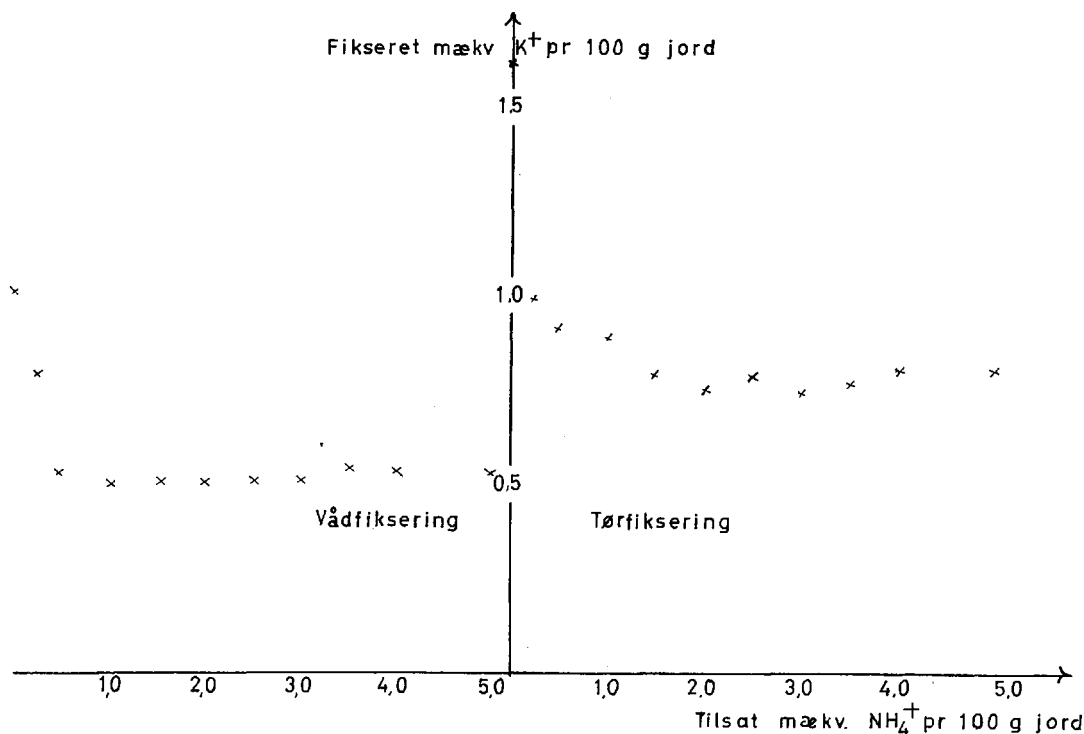


Fig. 5. — Kaliumfiksering ved samtidig tilsætning af 2 mækv. $\text{KCl}/100$ g jord og stigende mængder af NH_4Cl . Jordprøve 7 b.

Diskussion

Udover en kraftig stigning i kvælstofforbruget de sidste år har også forbrugsmønstret ændret sig, således at en stadig større del af kvælstoffet tilføres som ammoniumgødninger og flydende ammoniak. Såvel nitrat- som ammoniumsalte er letopløselige, men på grund af ammoniumionens adsorption til jordpartiklerne foregår dens nedvaskning langsommere end nitrationsens.

Det er den almindelige opfattelse, at planterne optager størstedelen af deres kvælstofforbrug som nitrat-N, og ammonium må derfor først omdannes til nitrat (nitrificeres). Denne proces sker ved salpetersyrebakteriernes hjælp og foregår bedst i gennemluffet, veldrænet jord ved neutral reaktion. Processen forløber stedse langsommere med aftagende jordtemperaturer for helt at gå i stå omkring frysepunktet. Nitrifikationen er en energileverende proces, og bakterierne udnytter den frigjorte energi i deres livsprocesser.

Man skulle måske umiddelbart forvente, at værdien af kvælstoffet i nitratgødninger var højere end i ammoniumgødninger, hvor kvælstoffet i de fleste tilfælde først iltes til nitrat, inden det optages af planterne. Praktiske forsøg viser imidlertid, at dette ingenlunde er tilfældet, og værdien af ammonium-N er i de fleste tilfælde fuldt ud på højde med og i mange tilfælde endda bedre end af nitrat-N. Dette skyldes især risikoen for nitratudvaskning i perioder, hvor planternes kvælstofoptagelse er lille. Udvasningen af nitrat er især stor på sandjorde i nedbørsrige år.

Nedvaskningen foregår meget langsommere for ammonium-N end for nitrat-N, og lerjorderne er bedre end sandjorderne i stand til at fastholde ammoniumionen. Tilbageholdelsen sker dels som ombytligt og forholdsvis lettilgængeligt ammonium og dels som fikseret ammonium, hvis tilgængelighed er mindre. På sandjorde finder man derfor ofte, at ammonium-N virker bedre

Tabel 6. Fastliggende forsøg med kvælstofgødninger

Forsøgsled	Naturligt fikseret ammonium, mækv. pr. 100 g jord							%
	Ingen N-gødning	1/2 NPK	1 NPK	1 kas	1 urea	1 fl. ammoniak	Gennemsnit	
Nakskov, L.F.	1,01	0,98	1,06	1,12	1,08	1,04	1,05	15
Nykøbing F., L.F.	0,94	1,00	1,94	1,00	1,14	1,15	1,03	12
Fjenneslev, S.	0,87	0,81	0,94	1,05	1,15	1,07	0,98	12
Nykøbing F., L.F.	0,91	0,88	0,91	0,87	0,99	1,00	0,92	9
Tølløse, S.	0,85	0,85	0,86	0,88	1,00	0,87	0,88	9
Ry, J.	0,79	0,71	0,76	0,70	0,78	0,77	0,75	9
Skive, J.	0,71	0,69	0,70	0,82	0,78	0,64	0,72	4
Bryrup, J.	0,75	0,75	0,71	0,63	0,69	0,66	0,70	8
Hjermitslev, J.	0,68	0,61	0,60	0,53	0,69	0,61	0,62	4
Ulstrup, J.	0,57	0,58	0,59	0,63	0,64	0,65	0,61	7
Galten, J.	0,74	0,66	0,53	0,53	0,61	0,53	0,58	5
Hover, J.	0,59	0,51	0,51	0,56	0,60	0,57	0,55	4
Skive, J.	0,50	0,51	0,52	0,59	0,60	0,52	0,54	5
Sindal, J.	0,56	0,58	0,52	0,50	0,53	0,50	0,53	6
Hover, J.	0,50	0,54	0,55	0,55	0,53	0,47	0,52	3
Vrå, J.	0,56	0,53	0,50	0,49	0,50	0,45	0,50	3
Vinderup, J.	0,47	0,42	0,49	0,42	0,53	0,53	0,47	6
Hjørring, J.	0,37	0,36	0,34	0,41	0,39	0,35	0,37	2
Hover, J.	0,22	0,27	0,21	0,21	0,26	0,26	0,24	3
Sunds, J.	0,26	0,20	0,14	0,16	0,18	0,21	0,19	3
Gennemsnit.	0,635	0,618	0,618	0,630	0,681	0,641	0,637	

Med 95 % sandsynlighed er der et signifikant udslag ved en forskel på 0,033 mækv. ammonium.

end nitrat-N, medens de to N-former er omtrent jævnbrydige på lerjorde.

Den almindelige erfaring er, at sandjorde ikke fikserer men adsorberer en stor del af det tilførte ammonium elektrostatiske til jordkolloiderne på en form, så det kan frigøres til jordvæsken, når dens koncentration falder. Den videre diskussion drejer sig derfor overvejende om problemerne, som de foreligger i forbindelse med planternes kvælstofforsyning på lerjorde.

Den foreliggende undersøgelse viste, at ammoniumfiksering forekommer i de samme jorde, som fikserer kalium, og at fikseringen af de 2 ioner sker i nogenlunde ækvivalente mængder. Den er mindst i muldlaget, 0-20 cm og omtrent ens pr. 100 g jord i lagene 20 til 50 og 50 til 100 cm. Ved tilførsel af 2 mækv. ammonium pr. 100 g jord har fikseringen for nogle jorde været over 50 pct af det tilførte, og ved mindre tilførsler er den procentiske fiksering større. Som det er

fremgået af denne undersøgelse, påvirkes ammoniumfikseringens omfang i jorden af såvel mængden som tidspunktet for tilførslen af kaliumgødning. I jorde med en betydelig fikseringskapacitet for ammonium og kalium skulle det således være muligt ved forskellige udbringningsmetoder at påvirke såvel mængden af fikseret ammonium som kalium. Tilførsel af ammonium i blandingsgødninger sammen med kalium må forventes at give en større ammoniumfiksering og mindre kaliumfiksering end ved tilførsel af kalium nogle uger før ammonium, som er den almindelige fremgangsmåde, når flydende ammoniak anvendes som kvælstofgødning.

Fikseringen af ammonium vil under alle omstændigheder give en forsinkelse i planternes kvælstofoptagelse. Ved anvendelse af nitrat som kvælstofgødning for korn var kvælstofoptagelsen afsluttet omkring skridningen (Sørensen C. (22)). Kvælstofoptagelsen i starten var mindre ved an-

vendelse af ammoniumgødninger end for de nitratgødede forsøgsled, men den fortsatte efter at kærnedannelsen var begyndt, og den samlede kvælstofoptagelse ved modenhed var større ved tilførsel af ammonium fremfor nitrat. Under forhold hvor ammonium fikseres kraftigt vil kvælstofoptagelsen blive mindre end i ikke-ammoniumfikserende jorde.

Jordens kaliumstatus synes at være ret afgørende for såvel ammoniumfikseringen som frigørelsen af det fikserede ammonium. Kalium i jorden har to modsatte effekter på tilgængeligheden af ammonium i jorden. Tilsætning af kalium kan nedsætte ammoniumfikseringen, men samtidig blokeres frigørelsen af det oprindeligt fikserede ammonium. I det hele taget må planternes udnyttelse af naturligt fikseret ammonium nok anses for ringe. De fleste undersøgelser vedrørende naturligt fikseret ammonium angiver, at der først frigøres betragtelige mængder ved meget lave kaliumtal. Det må antages, at det tilførte ammonium, som fikseres, vil være noget lettere tilgængeligt for planterne end det naturligt fikserede. Sondringen mellem ombytligt og fikseret ammonium er rent empirisk, og en del af det fikserede ammonium har utvivlsomt lige så stor værdi for planterne som det ombytkelige.

Hvor stor betydning har fikseringen så for den praktiske anvendelse af de to plantenæringsstoffer, kvælstof og kalium? Det er hyppigt blevet fremført, at nedfældningen af flydende ammoniak lokalt udsætter jordpartiklerne og deres omgivelser for så store kemiske påvirkninger, at dette kunne tænkes at formindske effekten af kvælstof i flydende ammoniak. Det basiske milieu, som givet må eksistere i ammoniakstrengen ved nedfældningen, antages at give gode betingelser for ammoniumfiksering. Uanset om der i nogle jorde lokalt sker en fiksering af flydende ammoniak, var muldlagets indhold af fikseret ammonium ikke højere i de med flydende ammoniak gødede forsøgsled end i de grundgødede. Hvis der sker en fiksering af ammonium, frigøres det åbenbart let, og der kan ikke konstateres nogen forøgelse af fikseret ammonium i de med flydende ammoniak gødede forsøgsled i løbet af de 4 forsøgsår. Derimod har anvendelsen af urinstof,

som i jorden omdannes til ammoniak, givet et signifikant større indhold i jorden af fikseret ammonium end de øvrige kvælstofgødninger og grundgødningen. Det må antages, at fikseringen af ammonium er større ved bredspredning end ved båndspredning af kvælstofgødningen. Det er derfor ikke overraskende, at indholdet af fikseret ammonium er større i jordene fra forsøgsleddene gødet med urinstof end i dem gødet med flydende ammoniak. Den fundne ammoniumfiksering er dog kun af størrelsesordenen 0,1 mækv. pr. 100 g jord eller 10 procent af den tilførte mængde kvælstof. Muligvis kan lidt af det tilførte ammonium være fikseret under muldlaget; men undersøgelser fra Askov med forårsudbringning af ammoniumgødninger viser (*Kofoed, Lindhard & Søndergaard Klausen* (13)), at næsten alt kvælstoffet er i nitratform, før der sker en nedvaskning til undergrunden. Ved efterårsudbringning af flydende ammoniak foregår der en betydelig nedvaskning af ammonium-N, især i sandjorde.

I almindelighed skal man nok ikke overvurdere ammonium- og kaliumfikseringens betydning i danske jorde. Dels er det kun på ler- og marskjordene, at den er af væsentlig omfang, og dels er det især undergrundslagene og ikke muldlaget, som er disponeret for fiksering af ammonium og kalium.

Sammendrag

Nærværende beretning behandler spørgsmål vedrørende jordens fiksering og frigørelse af ammonium. En række fysiske og kemiske forhold i jordbunden er bestemmende for såvel fikseringen som frigørelsen af det fikserede ammonium. Resultaterne fra laboratorieforsøg med danske jorde fra forskellige lokaliteter viste, at det er de samme jorde, som fikserer ammonium og kalium. Lerjorde fikserede indtil 50 pct. af det tilsatte ved vådfiksering og 50 til 80 pct. ved tørring, og fikseringen var størst i prøverne fra undergrunden. Vådfikseringen af ammonium var mindre end tørfikseringen, og korrelationen mellem de to metoder 0,75. Ved ekstraktion af jorden med en opløsning, der er 1 n med hensyn til såvel fluorbrintesyre som saltsyre opløstes fra 0,15 til

2,6 mækv. ammonium pr. 100 g jord, og frigørelsen var lidt større i det øverste jordlag end i undergrunden.

Tilførsel af kalium samtidig med ammonium formindskede ikke fikseringen af ammonium, og fikseringen af $\text{NH}_4^+ + \text{K}^+$ var den samme som ved tilførselen af en ækvivalent mængde ammonium. Derimod gav tilsætning af kalium før ammonium en væsentlig formindskelse af ammoniumfikseringen. Kaliumfikseringen blev formindsket ved samtidig tilsætning af små mængder ammonium, hvis fiksering synes at gå forud for kalium, når de 2 ioner samtidig er tilstede i jordvæsken.

Frigørelsen af fikseret ammonium blev undersøgt i jorde fra et flerårigt, fastliggende forsøg med forskellige kvælstofgødninger. Muldlagets indhold af fikseret ammonium var ikke større i de med flydende ammoniak gødede forsøgsled end i de ugødede, men gødskning med urinstof gav et signifikant større indhold af fikseret ammonium end de øvrige kvælstofgødninger.

Summary

Fixation and release of ammonium in Danish soils

The present report deals with problems concerning fixation and release of ammonium ions in soil. Several physical and chemical factors are known to control these two processes.

The results of investigations in Danish soils from different localities have shown that the same soils will fix ammonium and potassium. Clay and loam soils could fix as much as 50 pct. of the added ammonium and/or potassium in the wet state, 50-80 pct. by drying, and more in the subsoil than in top soil. Wet fixation was less than dry fixation, and the results were positively correlated ($r = 0.75$). Extraction of the soil with a solution containing N HF and N HCl dissolved 0.15-2.6 meq ammonium per 100 g soil, the amounts being slightly higher in top soil than subsoil.

Addition of potassium together with ammonium did not diminish the fixation of the latter ion, and the fixation of ammonium + potassium remained the same as when an equivalent amount of ammonium was added. On the other hand the addition of potassium prior to ammonium caused a considerable decrease in the fixation of the latter. Fixation of potassium decreased when small amounts of ammonium

were added. The fixation of ammonium thus seems to precede that of potassium when both ions are present in the soil solution.

In soils with an appreciable capacity for fixation of ammonium and potassium it should thus be possible to influence the relative amounts of fixed ammonium and potassium by choosing different methods of adding the two ions. Application of ammonium simultaneously with potassium in mixed fertilizers may be expected to result in a stronger ammonium and a weaker potassium fixation than would happen after application of potassium a few weeks prior to ammonium which is the case in agricultural practice when anhydrous ammonia is used as nitrogenous fertilizer.

Release of fixed ammonium was investigated in soils from a permanent field experiment with different nitrogenous fertilizers. The content of fixed ammonium in the top soil layer was not higher in the plots receiving anhydrous ammonia than in those without nitrogen, but application of urea resulted in a significantly higher content of fixed ammonia compared to other nitrogenous fertilizers. The observed fixation of ammonium was of the order of only 0.1 meq/100 g soil, or 10 pct. of the added nitrogen.

Upon the whole the importance of ammonium and potassium fixation in Danish soils should not be exaggerated. There are few heavy clay and marsh soils where the fixation would reach a considerable degree, and moreover it is the subsoils rather than the top soil layers that are the predominant sites for ammonium and potassium fixation.

Litteratur

- (1) Allison, F. E., Doetch, J. H. & Roller, E. M., 1951. – Ammonium fixation and availability in Harpster clay loam. *Soil Sci.*, 72: 187-200.
- (2) Allison, F. E., Doetch, J. H. & Roller, E. M., 1952. – Availability of fixed ammonium in soils containing different clay minerals. *Soil Sci.*, 75: 373-381.
- (3) Allison, F. E., Roller, E. M. & Doetch, J. H., 1952. – Ammonium fixation and availability in vermiculite. *Soil Sci.*, 75: 173-180.
- (4) Allison, F. E. & Roller, E. M., 1955. – Fixation and release of ammonium ions by clay minerals. *Soil Sci.*, 80: 431-441.
- (5) Andrews, W. B., 1956. – Anhydrous ammonia as a nitrogenous fertilizer. *Advances in Agronomy*, 8: 61-125.

- (6) *Barshad, I.*, 1951. – Cations exchange in soils, *Soil Sci.*, 72: 361-371; 77: 463-477; 78 57-76.
- (7) *Bower, C. A.*, 1951. – Availability of ammonium fixed in difficultly exchangeable form by soils of semiaerid regions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 15: 119-122.
- (8) *Bremner, J.*, 1959. – Determination of fixed ammonium in soil. *J. Agric. Sci.*, 52: 147-160.
- (9) *Dissing Nielsen, J.*, 1969. – Fiksering og frigørelse af kalium. *Tidsskr. for Planteavl*, 74: 24-43.
- (10) *Egnér, H., Brodin, G. & Johanson, O.*, 1955. – Sampling technique and chemical examination of air and precipitation. *Kungl. Lantbrukshögskolans annaler*, 22: 397.
- (11) *Hanway, J. J., Scott, A. D. & Stanford, G.*, 1957. – Replaceability of ammonium fixed in clay minerals as influenced by ammonium or potassium in the extracting solution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 21: 29-34.
- (12) *Jansson, S. L.*, 1958. – Tracer studies on nitrogen transformations in soil with special attention to mineralisation-immobilization relationship. *Kungl. Lantbrukshögskolans Ann.*, 24: 101-361.
- (13) *Kofoed, A. D., Lindhard, J. & Søndergaard Klausen, P.*, 1967. – Forsøg med flydende ammoniak. *Tidsskr. for Planteavl*, 71: 145-225.
- (14) *Lamm, C. G.*, 1968. – Et dansk jordarkiv. *Ugeskrift for Agronomer*, 261-266.
- (15) *McDonnell, P. M., Stevenson, F. J. & Bremner, J. M.*, 1959. – Release of fixed ammonium from soil by milling. *Nature*, 183: 1414-1415.
- (16) *Nömmik, H.*, 1957. – Fixation and defixation of ammonium in soils. – *Acta Agric. Scand.*, 7: 395-436.
- (17) *Nömmik, H.*, 1961. – Kalium und ammoniumfixierung in schwedischen Ackerböden. *Kungl. Skogs- och Lantbruksakad. Tidskr.*, Suppl. 5: 28-39.
- (18) *Olesen, J.*, 1966, 67, 68, 69. – Fastliggende kvælstofforsøg. *Beretrn. om Fællesforsøg i Landbo- og Husmandsforeningerne*.
- (19) *Rodrigues, G.*, 1954. – Fixed ammonium in tropical soils. *J. Soil Sci.* 5: 264-274.
- (20) *Schachtschabel, P.*, 1961. – Bestimmung des fixierten Ammoniums in Boden. *Zeitschr. f. Pflanzenern. Düng. Bodenk.*, 93: 125-136.
- (21) *Stanford, G. & Pierre, W. H.*, 1946. – The relation of potassium fixation to ammonium fixation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 11: 155-160.
- (22) *Sørensen, C.*, 1959. – The influence of nutrition on the nitrogenous constituents of plants. *Plant and Soil*, 10: 250-265.
- (23) *Welch, L. F. & Scott, A. D.*, 1960. – Nitrification of fixed ammonium in clay minerals as affected by added potassium. *Soil Sci.*, 90: 79-85.
- (24) *Wiklander, L. & Anderson, E.*, 1959. – Kalkens markeffekt, III: Kemiska undersökningar av ett långvarigt kalkningsförsök på skifte IV vid Lanna. *Grundförbattring*, 12: 1-40.