

Fordampning af ammoniak fra udbragt gødning. Metode og ammoniaktab fra urea og urea-ammonium-nitrat

Volatilization of ammonia from fertilizers and manure.

Methodology and loss of ammonia from urea and urea-ammonium-nitrate

BENT T. CHRISTENSEN og SVEN G. SOMMER

Resumé

Til bestemmelse af fordampningstab af ammoniak fra udbragt handels- og husdyrgødning blev opbygget et vindtunnelsystem bestående af fire tunnelenheder, en dataopsamlingsenhed og et system af gasvaskeflasker til opsamling af ammoniak i luft. Vindtunnelsystemet muliggør en direkte bestemmelse af ammoniakindholdet i den luft, der forlader det gødede areal. Desuden kan vindhastighed og nedbør styres. Med systemet kan der i hvert forsøg undersøges op til fire behandlinger samtidigt.

Hver tunnelenhet består af en omvendt U-formet polycarbonatplade, der dækker forsøgsarealet (0,5 × 2 m), og et 2,3 m langt metalrør monteret med en regulerbar ventilator, der skaber en luftstrøm hen over forsøgsarealet. Hastigheden af luftstrømmen gennem metalrøret, lufttemperaturen, og jordtemperaturen (2 cm dybde) under polycarbonattunnelen registreres hver time. Før luftstrømmen forlader metalrøret, indsamles delprøver af luftstrømmen. Luften ledes gennem en gasvaskeflaske med en fosforsyreopløsning, som binder ammoniakken i luften. Et programmerbart styresystem tilkoblet magnetventiler skifter automatisk mellem fire gasvaskeflasker pr. tun-

nelenhed. Ammoniakiholdet i gasvaskeflaskerne bestemmes efterfølgende ved en Berthelot reaktion.

Den gennemsnitlige genfindelse af ammoniak fordampet fra gylle blev i fire forsøg bestemt til 74 pct. (CV, 9,7 pct.). De efterfølgende bestemmelser af tabet af ammoniak korrigeres med faktoren 100/74 for at beregne det totale fordampningstab. Den i tunnelen målte lufttemperatur var i overensstemmelse med temperaturdata fra en nærliggende klimastation (1,8 m's højde).

Tre gange i perioden 5. maj – 23. juni 1987 og fire gange i perioden 11. februar – 8. marts 1988 blev der gennemført undersøgelser af ammoniaktabet fra overfladeudbragt urea. Undersøgelserne blev foretaget i rug og hvede samt græs. Flydende urea-ammonium-nitrat blev medtaget i to forsøg. I alt blev undersøgt 20 behandlinger af hver seks døgn varighed.

Tabet af ammoniak fra urea over seks døgn var 20–30 pct. i sommerperioden, mens det tilsvarende tab i vinterperioden var 3–10 pct. Tabet fra urea-ammonium-nitrat var mindre end tabet fra urea. Såfremt udbringningen af urea skete under tørre forhold, hæmmedes fordampningen i det

første døgn efter udbringningen sammenlignet med udbringning under mere fugtige forhold.

Vanding med 5 til 10 mm reducerede fordampning, men bragte den ikke til ophør.

Nøgleord: Ammoniakfordampning, vindtunnelsystem, urea, urea-ammonium-nitrat, vanding, atmosfærisk ammoniakindhold, rug, hvede, slætgræs.

Summary

A wind tunnel system was constructed in order to measure the ammonia volatilization loss from mineral fertilizers and animal manure. The system consists of four wind tunnels, a data monitoring unit and a gas trapping unit. The concentration of ammonia in the air leaving the fertilized plot is measured directly, and wind speed and precipitation can be controlled. Four treatments may be examined simultaneously.

The wind tunnel unit consists of an inverted U-shaped tunnel made from transparent polycarbonate and covering the experimental area (0.5×2 m), and a circular steel duct housing an electrically powered fan. The fan draws an airstream across the experimental area and is controlled to produce different wind speeds. The steel duct is 2.3 m long and has a diameter of 0.4 m. The steel duct is equipped with a vane anemometer. Air and soil (2 cm depth) temperatures, and the wind speed in the duct are recorded every hour.

The air stream leaving the steel duct is sampled at 6 different points by using a diaphragm suction pump (5 l per min). The air is drawn through a 100 ml absorption flask fitted with a sintered gas distribution tube and containing 50 ml of 0.005 M orthophosphoric acid. The ammonia is trapped in the acid and subsequently determined in the laboratory by a Berthelot reaction.

At preselected intervals, a programmable magne-

tic valve control automatically switch among the four flasks of each tunnel unit.

Mean recovery of ammonia volatilized from animal slurry was in four experiments found to be 74% (CV 9.7%). Results obtained by the wind tunnel system is corrected by the factor 100/74 in order to correct for recovery percentages. The air temperature under the transparent tunnel was in accordance with the temperatures measured in a climatic station nearby.

The ammonia loss from surface-applied urea was determined in three experiments during 5 May – 23 June 1987 and in four experiments during 11 February – 8 March 1988. Liquid urea-ammonium-nitrate was included in two experiments. The crops were winterrye and winter wheat, and grass cut for silage in one experiment. Totally, 20 treatments were included in the study. The ammonia loss was measured over a period of six days.

The volatilization loss of ammonia from urea was 20–30% during the summer period and 3–10% during winter. The loss from urea-ammonium-nitrate was lower than that from urea. When the application of urea took place under dry conditions, the ammonia volatilization loss during the first day was lower than that found under more humid conditions. Irrigation treatments with 5–10 mm reduced the volatilization loss.

Key words: Ammonia volatilization, wind tunnel system, urea, urea-ammonium-nitrate, irrigation, atmospheric ammonia concentration, winterrye, winterwheat, cut grass.

Indledning

I NPO-redegørelsen (26) skønnes ammoniakfordampningen på landsplan at være omkring 130.000 tons $\text{NH}_3\text{-N}$ pr. år. Mere end 75 pct. af tabet tilskrives håndtering af husdyrgødning, mens der antageligt fordampes væsentlig mindre mæng-

der ammoniak fra ammoniak/ammonium-holdige handelsgødninger. *Buijsmann et al.* (3) og *Meeus – Verdinne et al.* (23) har i tilsvarende opgørelser for Holland og Belgien fundet samme tendenser.

Ammoniaktab fra håndtering af husdyrgødning kan ske 1) fra stalde, 2) fra gødningsoplag, 3) ved udspreddning af gødning og 4) fra gødning udbragt på jordoverfladen. Den her beskrevne metode sigter alene på bestemmelse af ammoniaktab fra udbragt gødning.

Et større kendskab til ammoniaktabets størrelse og til mulighederne for at reducere dette kan øge udnyttelsen af den udbragte gødning. Samtidig kan den samlede reelle N-tilførsel til afgrøderne beregnes. Afsætning af ammoniak kan have en uønsket effekt på næringssaltbegrænsede natursystemer, hvorfor en reduktion i ammoniakfordampningen både vil forbedre udnyttelsen af gødning og have en positiv effekt på det omgivende miljø.

Ammoniakfordampning fra husdyrgødning er tidligere undersøgt i udbytteforsøg (12, 13, 17, 18, 24), ved bestemmelse af ammoniaktabet fra gødning anbragt udendørs på bakker (9, 20), og i laboratoriet ved analyse for indhold af ammoniak i luft, der har passeret gennem flasker indeholdende gødningsprøver (14). Disse undersøgelser viste, at fordampningen af ammoniak kan begrænses ved udbringning af husdyrgødning i koldt og fugtigt vejr, ved direkte nedfældning eller ved nedbringning umiddelbart efter udbringningen.

Når ammoniakfordampningen bestemmes med indirekte metoder, kan resultaterne påvirkes af denitrifikation, N-mineralisering/immobilisering og udvaskning. I bakkeforsøgene indgår ikke vekselvirkning mellem jord og gødning, og resultater fra laboratorieforsøg kan ikke umiddelbart overføres til markforhold. En sammenligning af resultater fra ammoniakfordampning bestemt ved forskellige metoder har vist, at ammoniaktab bestemt ved indirekte målinger synes at være dobbelt så store som tab bestemt ved direkte målinger (4).

På denne baggrund påbegyndtes i 1985 opbygningen af et vindtunnelsystem til direkte bestemmelse af ammoniakindholdet i luft, der har passeret et gødet areal. Metoden skulle give mulighed for, 1) at kontrollere lufthastigheden i et interval svarende til naturligt forekommende vindhastigheder, 2) at kunne styre nedbøren (vanding), og 3) at kunne medtage gentagelser under identiske klimaforhold. Endelig skulle metoden give mulighed for, at et større antal undersøgelser kunne gennemføres uden brug af store forsøgsarealer eller stor ressourceindsats.

Nærværende beretning beskriver det opbyggede vindtunnelsystem samt en afprøvning af systemet. Endvidere præsenteres undersøgelser over ammoniakfordampningen fra overfladeudbragt urea og flydende urea-ammonium-nitrat (UAN). Efterfølgende beretninger vil præsentere undersøgelser af ammoniakfordampningen fra husdyrgødning.

Materialer og metoder

Fig. 1 viser vindtunnelsystemet under måling i marken, og fig. 2 giver en skematisk fremstilling af systemets opbygning. Systemet består af fire vindtunnelenheder, en dataopsamlingsenhed og et system af gasvaskeflasker til opsamling af ammoniak i luft. En skurvogn forsynet med 380 V/220 V tjener som feltlaboratorium og huser en del af instrumenteringen.

Vindtunnelenhed

Udformningen af vindtunnelenheden følger stort set *Lockyer's* (21) beskrivelse. Fig. 3 viser et tværsnit af den her anvendte tunnelenhed.

Vindtunnelen består af en omvendt U-formet polycarbonatplade, der holdes i facon af en metalramme med en 5 cm kant. Kanten kan presses ned i den underliggende jord. På det højeste sted er tunnelen 50 cm, og den afgrænser et forsøgsareal på $0,5 \times 2$ m. Inden for metalrammen er placeret en $0,5 \times 2$ m metalramme ligeledes med en kant på 5 cm. Den indre ramme afgrænser forsøgsarealet, der behandles inden polycarbonattunnelen placeres. Rammen sikrer desuden, at flydende gødninger selv ved store doseringer holdes inden for forsøgsarealet.

I forlængelse af polycarbonattunnelen er placeret et 2,3 m langt metalrør med en indre diameter på 40,2 cm. Overgangen mellem de to tunneldele udgøres af et tragtformet metalrør med en 5 cm kant, der kan forankres i jorden.

I modsatte ende af tilslutningen til polycarbonattunnelen er metalrøret monteret med en ventilator, hvis hastighed kan reguleres i området 4 til 9 m pr. sek. (3-faset axialmotor). Denne motortype er senere udskiftet med en jævnstrømsmotor, der tillader vindhastigheder ned til ca. 1 m/s. Med ventilatoren skabes en vindstrøm hen over forsøgsarealet.

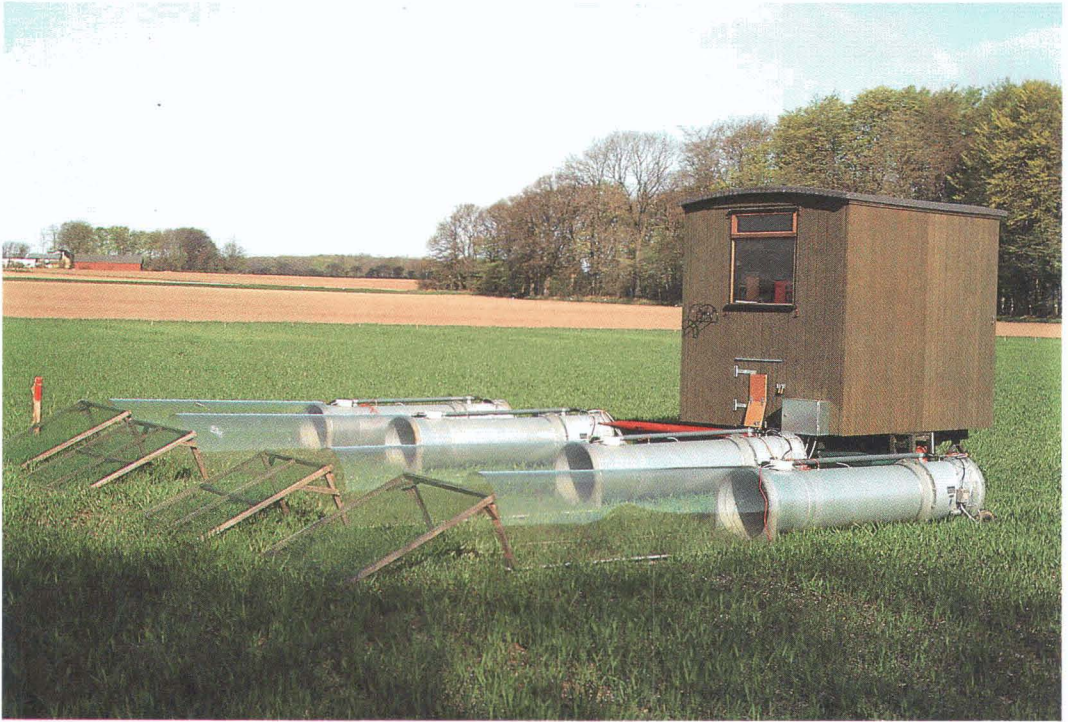


Fig. 1. Vindtunnelsystemet opstillet til måling af NH_3 -fordampning fra urea udbragt d. 5. maj 1987 til vinterhvede (Askov).

The wind tunnel system in position for measuring the ammonia loss from urea applied to winter wheat on the 5 May 1987 (Askov).

Dataopsamlingsenhed

Metalrøret er udstyret med et turbineanemometer, der anvendes ved indstilling til ønsket vindhastighed, og som efterfølgende aflæses for at følge udviklingen i luftstrømmens hastighed gennem tunnelen. Signalerne fra anemometeret ledes til signalkonverteringsenhed (EDRA 5, Airflow Developments) og derfra videre til datalogger (Minilogger MLX-20, A. D. Data Systems). Luftstrømmens hastighed aflæses hver time. Værdier for jord- og lufttemperatur (Comark Thermocouple) aflæses med tilsvarende intervaller. Jordtemperaturen bestemmes i 2 cm dybde under polycarbonattunnelen, og lufttemperaturen måles i metalrøret.

De opsamlede data overføres automatisk til hulstrimmel (GNT-3401 Perforator, GNT Automatic).

Nedbør (vanding)

Idet vindtunnelen afskærmer forsøgsarealet mod nedbør, kan denne indgå som forsøgsvariabel. Nedbør simuleres ved vanding med 5 mm i en eller flere omgange uden flytning af vindtunnel. Vandingsaggregatet består af et 2,5 m langt rør, der fungerer som håndtag, og som leder vandingsvandet frem til et tværgående rør, hvis længde svarer til bredden af forsøgsarealet. Det tværgående rør er på undersiden perforeret, således at vandingsvandet fordeles jævnt på tværs af forsøgsarealet. Vandingsaggregatet er via en plastslange fra håndtaget tilsluttet et 5 l reservoir. Ved at føre vandingsaggregatet frem og tilbage i forsøgsarealets længde tildeles 5 mm nedbør pr. vanding.

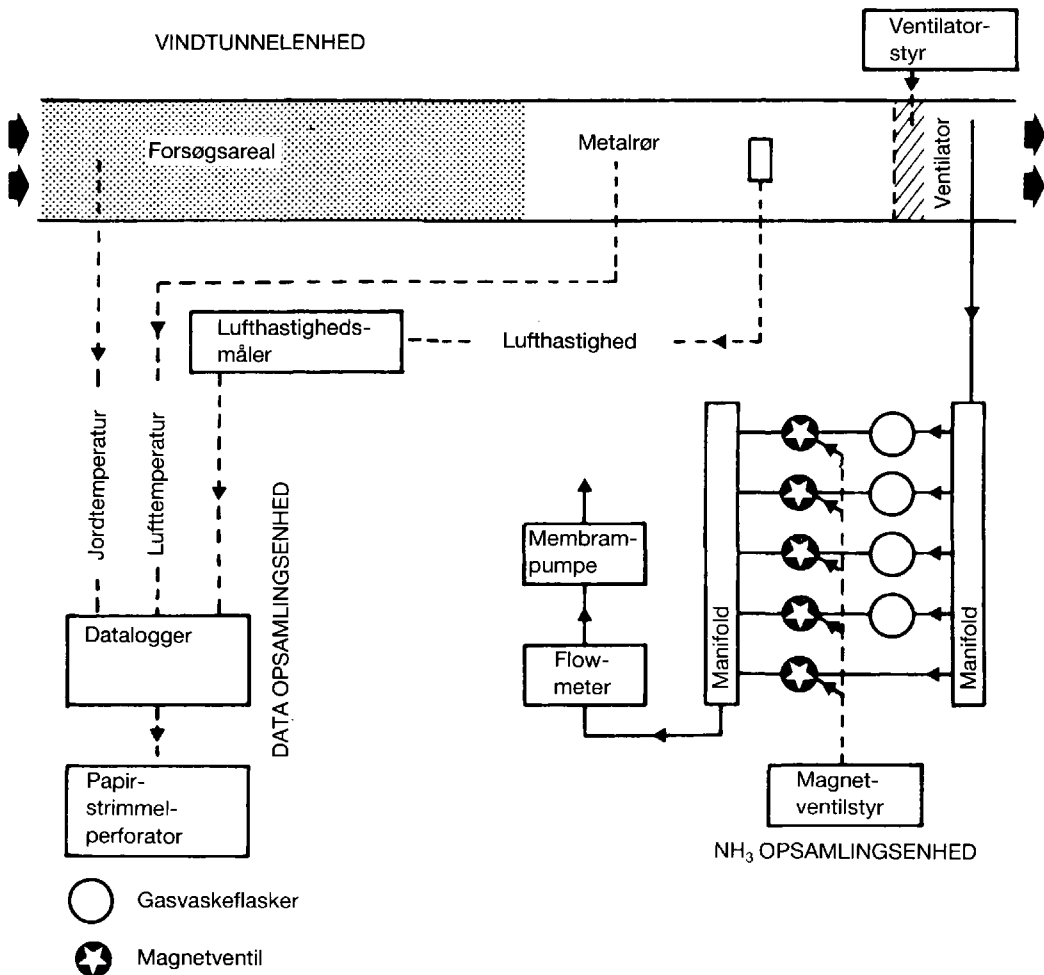


Fig. 2. Skematisk fremstilling af det anvendte vindtunnelsystem. Der benyttes fire vindtunnelenheder til hvert forsøg.

Outline of the wind tunnel system. Four tunnels were used for each experiment.

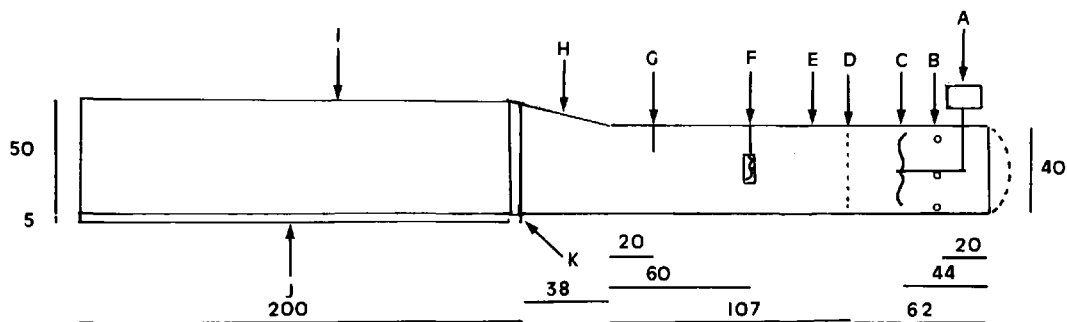


Fig. 3. Tværsnit af en vindtunnelenhed med dimensioner angivet i cm.

A, motor; B, udtag for luft til ammoniakanalyse; C, ventilator; D, net; E, metalrør; F, luftfartighedsmåler; G, temperaturføler; H, metaltragt; I, tunnel af polycarbonat; J, metalramme; K, kant på undersiden af metalrøret.

Cross section of one wind tunnel unit with dimensions given in cm.

A, motor; B, air sampling points; C, fan; D, steel-net; E, steel duct; F, vane-anemometer head; G, temperature sensor; H, steel-funnel; I, tunnel of polycarbonate; J, metal frame; K, spade-edge.

Ammoniakopsamling

Efter ventilatoren, men inden luftstrømmen forlader metalrøret, udtages seks steder en delprøve af luften med en membranpumpe (ASF 7010 Z). Pumpen er placeret i skurvognen og arbejder med et flow på 5 l pr. min. Flowet kontrolleres med et Dweyer flowmeter (RMA-21-SSV). Fra de seks indsamlingssteder ledes luften via PVC slanger til en manifold og herfra til en 100 ml gasvaskeflaske indeholdende 50 ml 0,005 M orthofosforsyre.

Gasvaskeflaskerne er placeret i kasser nær metalrøret, således at slangelængden fra indsamlingsstederne til gasvaskeflasken er ca. 2 m. Til hver vindtunnelenhed er knyttet fire flasker. Ved hjælp af magnetventiler og et programmerbart styresystem (Martonair) kan der på forud fastsatte tidspunkter skiftes mellem de fire flasker.

Indholdet af ammonium i fosforsyreopløsningen bestemmes spektrofotometrisk ved en Berthelot reaktion (salicylat-dichloroisocyanat, ni-

Tabel 1. Oversigt over gennemførte forsøg med urea og urea ammonium nitrat.
Summary of experiments with urea and urea-ammonium-nitrate.

Forsøgs- periode <i>Experimental period</i>	Tilført gødning <i>Fertilizer applied</i>		Tidspunkt for vanding vandingsmængde <i>Time for irrigation and amount of water</i>			Jordtype og afgrøde (cm plante højde) <i>Soil type and crop (cm plant height)</i>
	Type <i>Type</i>	Mængde <i>Amount</i> g N/m ²	0 timer <i>hours</i> mm	24 timer <i>hours</i> mm	48 timer <i>hours</i> mm	
5.-11. maj 87	urea	10,12	0	0	0	JB 5
	urea	10,12	0	0	0	Vinterhvede
	urea	10,12	0	0	0	Winterwheat (30 cm)
12.-18. maj 87	urea	10,12	0	10	0	JB 5
	urea	10,12	0	10	0	Vinterhvede
	urea	10,12	0	10	0	Winterwheat (35 cm)
17.-23. juni 87	urea	15,18	0	0	0	JB 5
	urea	15,18	5	5	0	Græs efter slæt
	urea	15,18	5	5	5	Cut grass
11.-17. feb. 88	urea	10,12	0	0	0	JB 1
	urea	10,12	0	0	0	Vinterrug
	urea	10,12	0	0	0	Winterrye (<10 cm)
17.-23. feb. 88	urea	10,12	0	0	0	JB 1
	urea	10,12	5	5	0	Vinterrug Winterrye (<10 cm)
24. feb.- 1. marts 88	urea	10,12	5	0	0	JB 1
	UAN*	3,76	5	0	0	Vinterrug
	UAN	3,76	5	5	0	Winterrye (<10 cm)
2.-8. marts 88	urea	10,12	5	5	0	JB 1
	UAN	3,42	5	5	0	Vinterrug
	UAN	3,42	5	0	0	Winterrye (<15 cm)

* UAN = urea ammonium nitrat opløsning (30 pct. N)
urea-ammonium-nitrate solution (30 p.c. N)

troprussid katalysator). Metoden er beskrevet af Crooke og Simpson (5), Krom (16) og Searle (28).

Total-N i gødning bestemmes ved Kjeldahl nedbrydning og destillation/titrering (Kjeltec Auto 1030 Analyzer). Ammonium/ammoniak-indholdet i gødning bestemmes ved makrodestillation med MgO og CuSO₄ og efterfølgende titrering.

Beregning af ammoniaktab (vindtunnelsystem)

Fordampningstabet af ammoniak beregnes på grundlag af luftmængden, der har passeret forsøgsarealet i et givent tidsrum (metalrørets tværsnitsareal × de aflæste luft hastigheder × tidsrum). Luftmængden for et givent tidsrum (fx 6 timer) multipliceres med koncentrationen af ammoniak i luften i samme tidsrum efter at ammoniakkoncentrationen i luften fra den ubehandlede reference-vindtunnel er trukket fra. Herved fås den fordampede ammoniakmængde. Denne sammenholdes med forsøgsarealets størrelse (1 m²) og den udbragte gødningsmængde. Endelig korrigeres for genfindelsesprocenten (se senere).

Kalibrering og genfindelsesprocent

Reproducerbarheden af resultater opnået med vindtunnelsystemet og genfindelsen af ammoniak blev undersøgt ved at placere gylleprøver på 3 til 5 kg på plastfolie eller i PVC bakker under polycarbonattunnelen. Ved hvert forsøg indgik en tunnel som reference (ubehandlet). Efter placering af gylleprøverne, blev repræsentative delprøver straks udtaget til analyse for indholdet af am-

monium/ammoniak. Umiddelbart herefter blev vindtunnelsystemet sat igang. Undersøgelserne forløb over 24 eller 48 timer, hvorefter der atter blev udtaget gylleprøver til analyse. Prøverne blev opbevaret lufttæt ved 4°C indtil analyse.

Ammoniaktabet beregnet som differencen mellem ammoniak/ammonium-indholdet i gyllen før og efter forsøget blev sammenholdt med tabet bestemt med vindtunnelsystemet. Genfindelsesprocenten er beregnet som tabet bestemt ved vindtunnelsystem divideret med tabet bestemt ved differencemåling og multipliceret med 100.

Ammoniaktab fra urea og urea-ammonium-nitrat

Tabel 1 giver en oversigt over de gennemførte forsøg til belysning af ammoniaktabet fra urea og urea-ammonium-nitrat. I hvert forsøg indgik tre behandlinger, mens en vindtunnel blev medtaget som ubehandlet reference. Ved forsøget påbegyndt d. 17. februar 1988 medtoges kun to behandlinger. Forsøgene blev i 1987 gennemført ved Askov forsøgsstation i vinterhvede (maj) og efter græsslæt (juni). I 1988 gennemførtes forsøgene ved Lundgård forsøgsstation i vinterrug.

Den faste gødning urea blev udstroet på jordoverfladen, mens den vandige opløsning af urea-ammoniumnitrat blev tilført med vandkande. De første to døgn efter gødningstilførslen blev ammoniakfordampningen bestemt over seks timers intervaller, mens der de følgende fire døgn blev anvendt 24 timers intervaller.

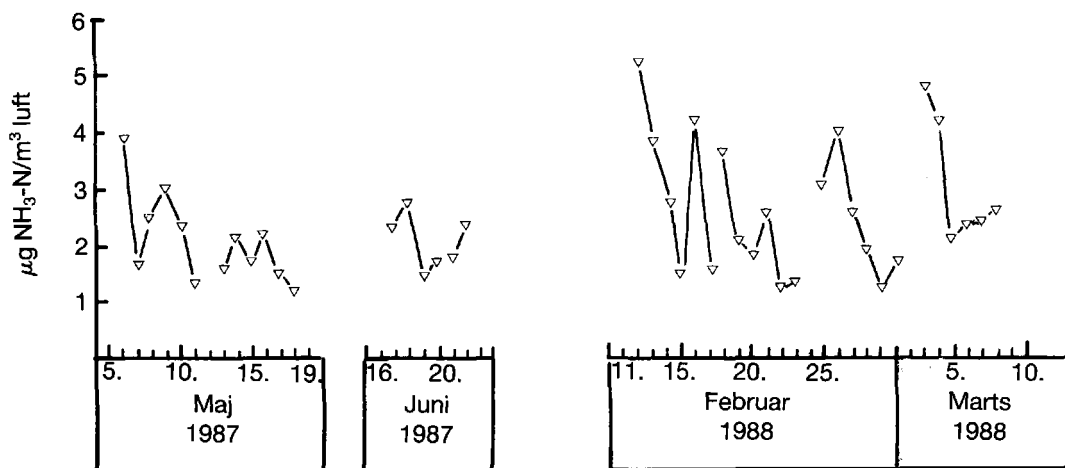


Fig. 4. Ammoniak indholdet i luft fra ubehandlet referencetunnel.
The ammonia content in air leaving the untreated reference tunnel.

Resultater og diskussion

Fig. 4 viser ammoniakindholdet i luft, der har passeret det ubehandlede forsøgsareal (reference-tunnel). Indholdet varierede mellem 1 og 5 $\mu\text{g NH}_3\text{-N pr. m}^3$ luft og udviste ikke systematiske forskelle mellem de forskellige forsøgsperioder. Der fandtes en tendens til højere indhold af ammoniak i luften i begyndelsen af de enkelte forsøgsperioder. Den målte ammoniakkoncentration i luften fra det ubehandlede areal (baggrundsværdier) er i overensstemmelse med værdier rapporteret af *Ferm et al.* (7), *Jørgensen* (15) og *Söderlund* og *Svensson* (30).

Luft- og jordtemperaturerne afveg ikke væsentligt mellem de fire vindtunneler (fig. 5). Lufttemperaturen bestemt i vindtunnelerne var i overensstemmelse med lufttemperaturen målt ved en

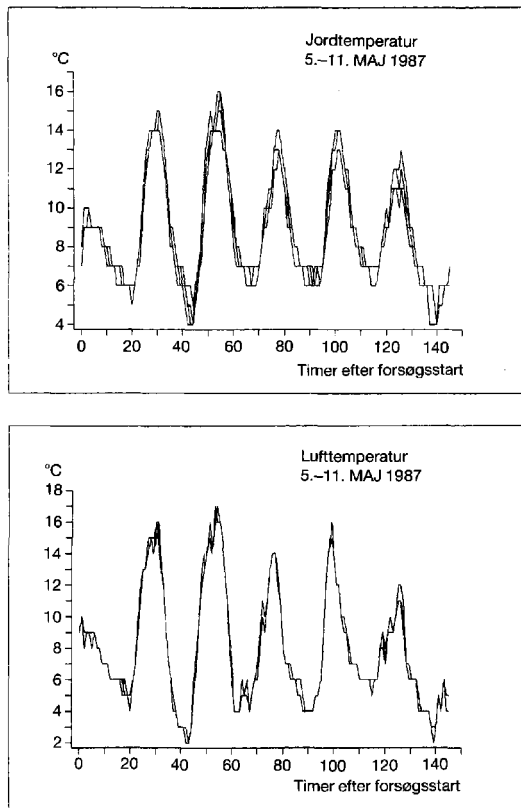


Fig. 5. Jordtemperatur (øverst) og lufttemperatur (nederst) målt i de fire vindtunneler i perioden 5.-11. maj 1987.

Soil (upper part) and air (lower part) temperature measured in the 4 wind tunnels during 5-11 maj 1987.

nærliggende klimastation (1,8 m højde). Med de her valgte lufthastigheder er luftskiftet i vindtunnelerne 30-40 gange pr. min. *Ryden* og *Lockyer* (27) fandt ved luftskifte mellem 4 og 17 gange pr. min. samme lufttemperatur i vindtunnel og udenfor.

Kalibrering og genfindelsesprocent

Resultater fra sammenligningen af ammoniakfordampningen fra gylle (udlagt i vindtunnel på plastfolie eller PVC bakker) bestemt med vindtunnelsystemet og ved analyse af ammoniakindholdet i gyllen før og efter forsøgsperioden er vist i tabel 2. Når tabet bestemt med vindtunnelsystemet udtrykkes som procent af tabet bestemt ved analyse af gylleprøver (differensmetoden) fås genfindelsesprocenten. Denne varierede i de 8 forsøg mellem 66 og 85 pct. (gennemsnit 74 pct., variationskoefficient CV 9,7 pct.). Idet det antages, at tabet bestemt ved differensmetoden angiver det absolutte ammoniaktab, er de efterfølgende bestemmelser af ammoniaktab med vindtunnelsystemet korrigeret med faktoren 100/74.

Ryden og *Lockyer* (27) har sammenlignet resultater for ammoniakfordampning fra urea bestemt ved en mikrometeorologisk massebalancemethode og ved anvendelse af et vindtunnelsystem. I perioder uden nedbør, og når lufthastigheden i vindtunnelerne løbende justeredes til den omgivende vindhastighed, blev der med de to metoder fundet overensstemmende ammoniaktab.

Ammoniakfordampning fra urea og urea-ammoniumnitrat

Middel-, maksimum- og minimumsværdier for luft og jordtemperatur i de forskellige forsøgsperioder er angivet i tabel 3. Desuden er medtaget den forud indstillede lufthastighed og variationer (minimum- og maksimum-værdier) for de efterfølgende aflæste timeværdier. Der registreredes nogen variation i lufthastigheden i løbet af forsøgsperioderne. Dette skyldes, at der med de 3-fasede axialmotorer ikke overførtes tilstrækkelig moment til ventilatorerne ved lave omdrejningstal, hvorfor lufthastigheden i vindtunnelen blev påvirket af den omgivende vindhastighed, især når den var høj i forhold til lufthastigheden i vindtunnelen. Motorerne er derfor senere udskiftet med 220 V jævnstrømsmotorer, hvis hastighedsregulering sikrer, at der overføres fuldt moment ved alle omdrejningstal.

Table 2. Fordampningstab af ammoniak fra gylle bestemt med vindtunnelsystem og ved analyse af ammoniakindhold i delprøve udtaget før og efter forsøgsperiode (differensmetode). Gyllen blev udlagt i PVC bakker eller på plastfolie. Genfindelsesprocenten er tab bestemt ved vindtunnelsystem udtrykt som procent af tab ved differensmetode. *Volatilization loss of ammonia from animal slurry determined with the wind tunnel system and by analysing for ammonia content in subsamples collected before and after the experimental period (difference method). The slurry was exposed on PVC trays or foil. Recovery is the loss determined with the wind tunnel system expressed as a percentage of the loss determined by the difference method.*

Forsøgsperiode, time <i>Experimental period, hours</i>	Ammoniaktab, g N <i>Ammonia loss, g N</i>		Genfindelse, pct. <i>Recovery, %</i>
	Vindtunnel <i>Wind tunnel</i>	Differensmetode <i>Difference method</i>	
24	2,02	2,37	85
24	2,19	2,85	77
24	2,35	2,85	82
48	3,01	4,02	75
48	2,94	4,06	72
48	5,95	8,89	67
48	5,52	8,37	66
48	5,97	8,93	67
Gns. <i>Mean</i>			74 (CV 9,7 pct.)

Table 3. Middelværdier for luft- og jordtemperaturer samt indstillet lufthastighed (aflæst maksimum- og minimumværdier i parentes).

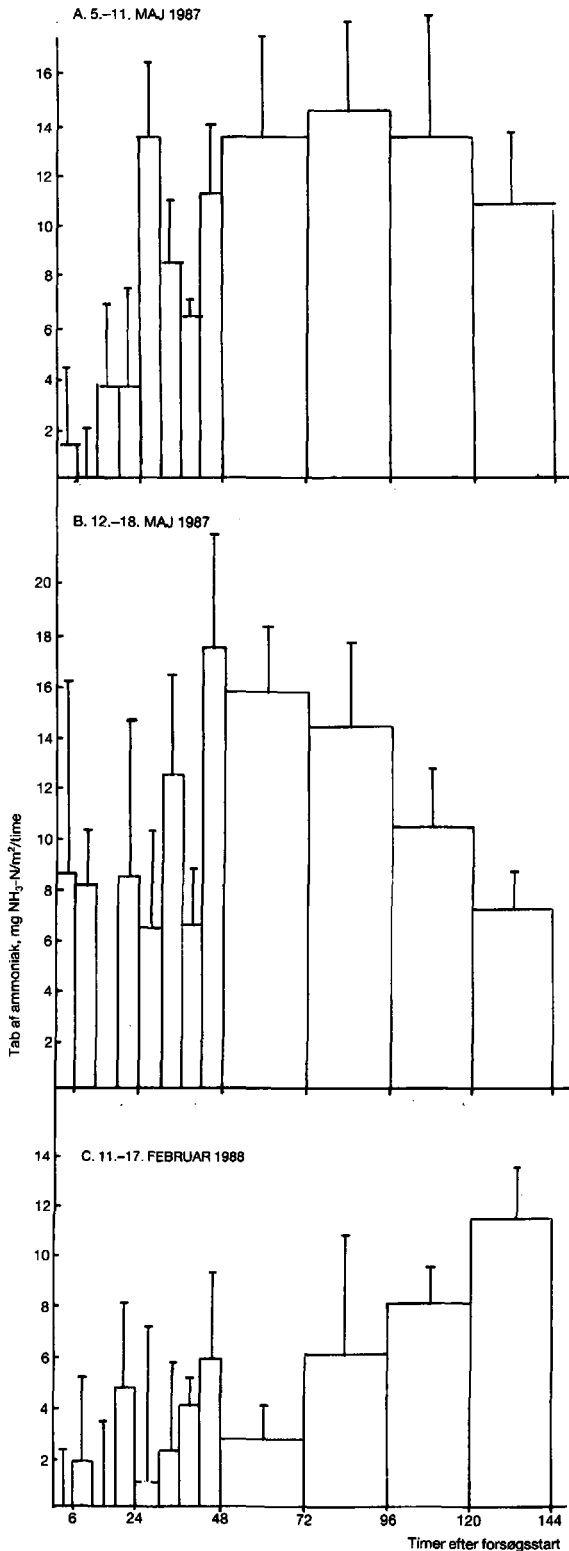
Average air and soil temperature during the experiment and humidity of the surface before beginning of an experiment and adjusted wind speed (in brackets during experiments).

Forsøgs- periode <i>Experimental period</i>	Tunnel nr. <i>Tunnel no.</i>	Luft temp. °C <i>Air temp. °C</i>			Jord temp. °C <i>Soil temp. °C</i>			Lufthastighed m/sek. ¹⁾ <i>Wind speed m/sec.</i>	Jordens fugtighed ved periodens begyndelse <i>Soil humidity at the start of the period</i>
		middel <i>mean</i>	maks. <i>max.</i>	min. <i>min.</i>	middel <i>mean</i>	maks. <i>max.</i>	min. <i>min.</i>		
5.-11. maj 87	1	8,1	17,0	2,0	9,0	16,0	4,0	4,5 (3,6-5,0)	Tør ²⁾ <i>Dry</i>
	2	7,9	16,0	2,0	8,7	15,0	4,0		
	3	8,1	17,0	2,0	8,8	14,0	4,0		
12.-18. maj 87	1	6,5	12,0	2,0	6,9	10,0	5,0	4,5 (3,8-4,9)	Fugtig <i>Humid</i>
	2	6,4	12,0	2,0	7,2	11,0	5,0		
	3	6,5	12,0	3,0	7,1	10,0	5,0		
17.-23. juni 87	1	8,5	14,0	3,0	9,1	12,0	7,0	4,3 (2,8-4,9)	Tør <i>Dry</i>
	2	8,6	14,0	3,0	9,5	13,0	7,0		
	3	8,5	14,0	3,0	9,3	13,0	7,0		
11.-17. feb. 87		2,8 ³⁾	5	0,8				6,4 (4,8-7,4)	Fugtig <i>Humid</i>
17.-23. feb. 88		2,9	4,9	0,2				6,5 (5,3-6,9)	Fugtig <i>Humid</i>
24. feb.-1. marts 88		0,0	2,7	1,6				5,5 (4,8-6,7)	Fugtig <i>Humid</i>
2.-8. marts 88		1,3	2,9	1,0				5,5 (3,7-6,2)	Fugtig <i>Humid</i>

¹⁾ Indstillet lufthastighed i metalrørtunnel. Min. og maks. hastighed registreret i måleperioden anført i parentes.

²⁾ Fugtig, hvis det har regnet samme dag eller dagen før ellers tør.

³⁾ For målinger efter 11. feb. 1988 er anvendt temperaturdata fra nærliggende engelsk vejrhytte (1,8 m højde).



På grund af svigt af datalogger er lufttemperaturen for forsøgene gennemført februar/marts 1988 taget fra klimastation. Som nævnt ovenfor blev der ved de her benyttede lufthastigheder fundet god overensstemmelse mellem lufttemperaturer målt i vindtunneler og ved klimastation.

Standard-afvigelsen på værdier fra ammoniakfordampning fra urea var 20–30 pct. af middelværdien (fig. 6). Variationen antages primært at hidrøre fra forskelle i hydrolysehastigheden af urea som følge af forskelle i krystallernes kontakt med jord og planter, og fra forskelle i fugtighedsforhold.

I de første 12 timer efter forsøgsstart var ammoniakfordampningen ofte lav, hvorfor ammoniakindholdet i luften fra de gødede arealer kun afveg lidt fra indholdet i luften fra den ubehandlede tunnel. Derfor kan variationen på disse målinger være betydelig. I vinterperioden fandtes ofte lave indhold af ammoniak i luften.

Alt andet lige er ammoniakfordampningen fra hydrolyseret urea en funktion af pH. Fordampningen begynder, når ureakrystallerne i tilstedeværelse af vand hydrolyseres til NH₃ og CO₂, og der dannes NH₄ og HCO₃. Dette medfører, at pH stiger. Ved fordampningen afgives imidlertid protoner, og pH falder, hvorved CO₂ fordampes under forbrug af de frigjorte protoner. I denne fase sker der en samtidig fordampning af CO₂ og NH₃ med det resultat, at pH holdes konstant. Når den dannede CO₂ er fordampet, vil den fortsatte fordampning af NH₃ medføre faldende pH. Sluttiligt bliver pH så lavt i jordoverfladen, at fordampningen af ammoniak stort set ophører (14, 29).

Fig. 6A viser et sådant forløb. Fordampningshastigheden er lav i starten, men stiger efter et døgn for derefter at være konstant. Efter 5 døgn ses et begyndende fald i fordampningen.

Fig. 6. Fordampning af ammoniak fra urea (10 g N/m²). I de tre undersøgelser blev urea udbragt: A. d. 5. maj 1987 (kl. 10.15) på 30 cm høj vinterhvede; B. d. 12. maj 1987 (kl. 10.15) på 35 cm høj vinterhvede; og C. d. 11. februar 1988 (kl. 13.30) på <10 cm høj vinterrug. Forsøget påbegyndt d. 12. maj blev vandet med 10 mm efter 24 timer. Lodrette pinde angiver 1 s.d. (n = 3). Volatilization of ammonia from urea (10 g N/m²) applied on A. 5 May 1987 (10,15) to winterwheat (plant height 30 cm), B. 12 May 1987 (10,15) to winterwheat (plant height 35 cm) and C. 11 February 1988 (13,30) to winterrye (plant height <10 cm). The experiment initiated on 12 May was irrigated with 10 mm after 24 hours. Bars indicate 1 s.d. (n = 3).

Når urea blev udbragt på tør jord og ikke blev udsat for nedbør (fig. 6A), var ammoniakfordampningen lav ved forsøgets start, sammenholdt med forsøg under lignende temperaturforhold, men hvor jord og planter ved forsøgets start var fugtige (fig. 6B). Tilsvarende sammenhæng mellem overfladens fugtighed og ammoniakfordampning fra urea er vist af *Milchunas et al.* (25) og *Hoult og McGarity* (11). *McInnes et al.* (22) fandt, at den begrænsede ammoniakfordampning fra tør jord skyldes en hæmning af hydrolysen af urea. I forsøget d. 5. maj (fig. 6A) var luftfugtigheden høj i døgnene efter forsøgets start, hvilket formentlig har igangsat hydrolysen af urea og dermed også fordampningen af ammoniak.

Hydrolysen af urea og fordampningen af ammoniak påvirkes også af temperatur (10). Den største fordampningshastighed optræder derfor på et senere tidspunkt ved udbringning om vinteren end ved udbringning om sommeren. Ligele-

des vil fordampningen begynde at aftage på et senere tidspunkt efter udbringning om vinteren sammenlignet med sommerudbringning (fig. 6C).

I nogle forsøg (fig. 6A og 6C) var der en tendens til døgnvariation i ammoniakfordampningen, idet de største fordampningshastigheder registreredes midt på dagen, hvor temperaturen var betydeligt højere end om natten. Om vinteren var fordampningen generelt lav (fig. 7 og 8). I forsøget påbegyndt d. 2. marts 1988 kunne der ikke registreres fordampning af ammoniak fra urea og UAN.

Vanding af arealer tilført urea kan fremme hydrolysen af urea, såfremt lokaliteten er tør. Derved kan fordampningen af ammoniak også fremmes i forhold til uvandede arealer. I denne undersøgelse blev de fleste forsøg gennemført under forhold, hvor jord og luft var fugtige ved forsøgsstart (tabel 3). Vanding ved forsøgsstart (fig. 7 og

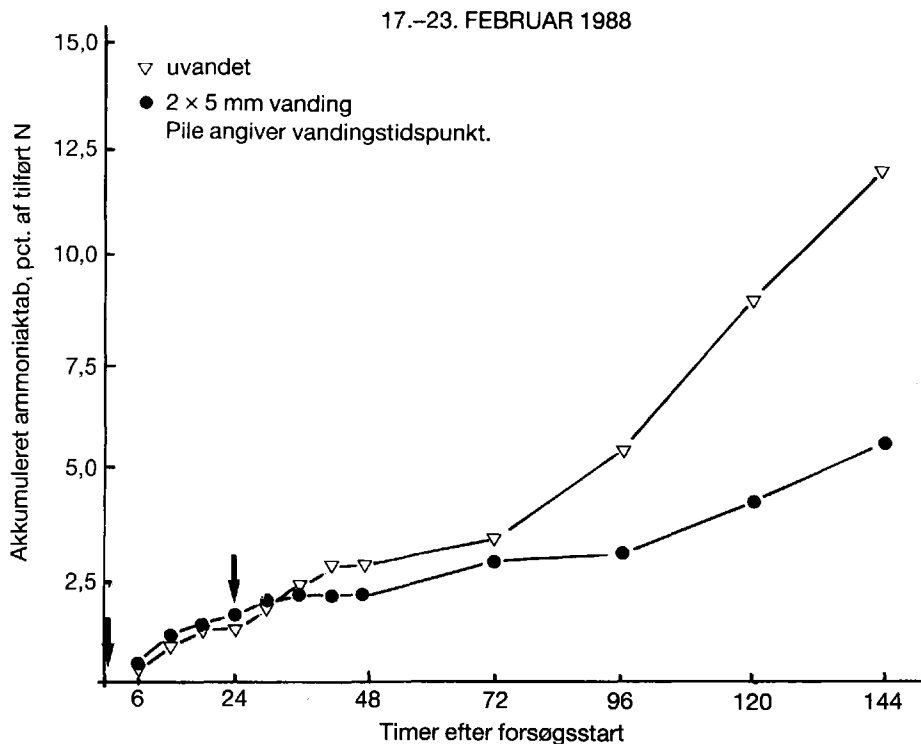


Fig. 7. Akkumuleret ammoniaktab fra urea (10 g N/m^2) udbragt d. 17. februar 1988 (kl. 14.50) på vinterrug (10 cm høj).

Cumulated loss of ammonia from urea (10 g N/m^2) applied on 17 february 1988 (14,50) to winterrye (plant height, <10 cm).

9) har derfor næppe øget hastigheden af urea-hydrolysen og på den vis næppe påvirket fordampningen af ammoniak i forhold til uvandet.

Vanding kan imidlertid påvirke fordampningen af ammoniak ved, at urea og ammoniak/ammonium vaskes ned i jorden, hvorved fordampning mindskes (fig. 7 og 9). Ved de her anvendte vandingsmængder på 5 og 10 mm (fig. 7, 8 og 9) blev fordampningen nedsat, men vandingsmængden har ikke været tilstrækkelig til at bringe fordampningen til ophør.

Efter vanding med mindre vandmængder kan fordampningen fortsætte, idet der ved en efterfølgende udtørring fortsat vil kunne finde fordampning af ammoniak sted, fordi nedvaskningen har været ubetydelig. (8, 19). *Bouwmeester et al.* (2) og *Ferguson et al.* (6) fandt, at fordampningen af ammoniak fra urea ophørte ved nedbørs- eller vandingsmængder på over 20 mm.

Den akkumulerede fordampning af ammoniak fra urea efter 6 døgn var af samme størrelse, uanset om der blev vandet med 10 mm efter et døgn, eller vandingen blev gennemført ad to gange med 5 mm ved forsøgets start og 5 mm efter et døgn

(fig. 9). Der var kun mindre forskelle i temperaturen i de pågældende forsøg.

Fordampningen fra UAN (urea-ammonium-nitrat) var lavere end fra urea (fig. 8). Tilstedeværelsen af nitrat i UAN-gødningen medfører, at pH falder til lavere niveauer som følge af salpetersyre-dannelsen (1, 14), og carbonat-afgasningen får mindre betydning. Endelig blev UAN tilført som væske i modsætning til urea, der fandtes på fast form. Kvælstofindholdet i UAN fordeler sig i forholdet 2:1:1 mellem henholdsvis urea, ammonium og nitrat.

Ved udbringning af urea i februar/marts var tabet af ammoniak ved fordampning på 3 pct. til 10 pct. af den tilførte N-mængde, når gødningen ikke udsattes for nedbør. Vanding med mere end 5 mm de første døgn efter udbringning kan begrænse fordampningen. Temperaturen har betydning for ammoniaktabets størrelse, idet både hydrolysen og fordampningen af ammoniak øges ved stigende temperatur. I maj/juni målt ammoniaktab på 20 til 30 pct. af N-indholdet i den tilførte urea, såfremt nedbøren var mindre end 10 mm inden for de første døgn.

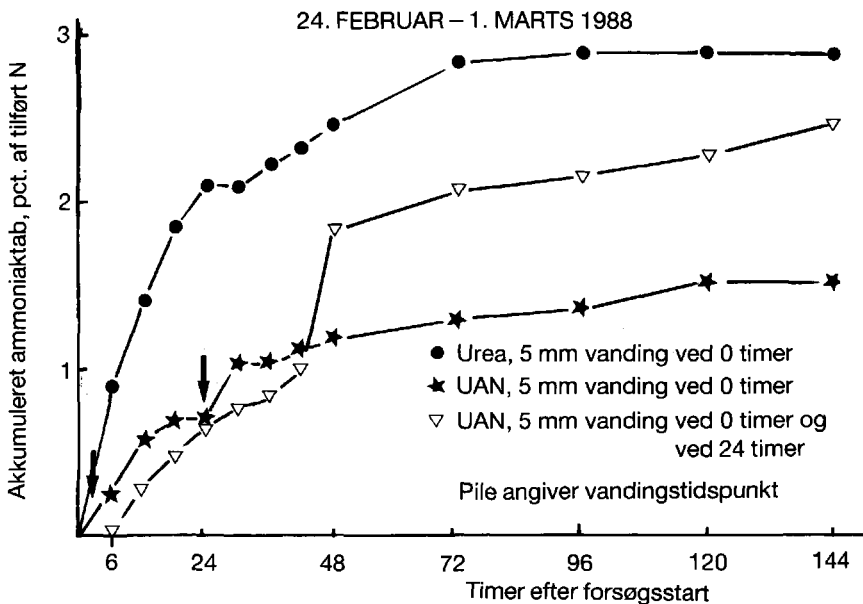


Fig. 8. Akkumuleret ammoniaktab fra urea (10 g N/m^2) og ureaammoniumnitrat ($3,8 \text{ g N/m}^2$) udbragt d. 24. februar 1988 (kl. 12.55) på vinterrug (<10 cm høj).

Cumulated loss of ammonia from urea (10 g N/m^2) and urea-ammonium-nitrate ($3,8 \text{ g N/m}^2$) applied on 24 February 1988 (12,55) to winterrye (plant height, <10 cm).

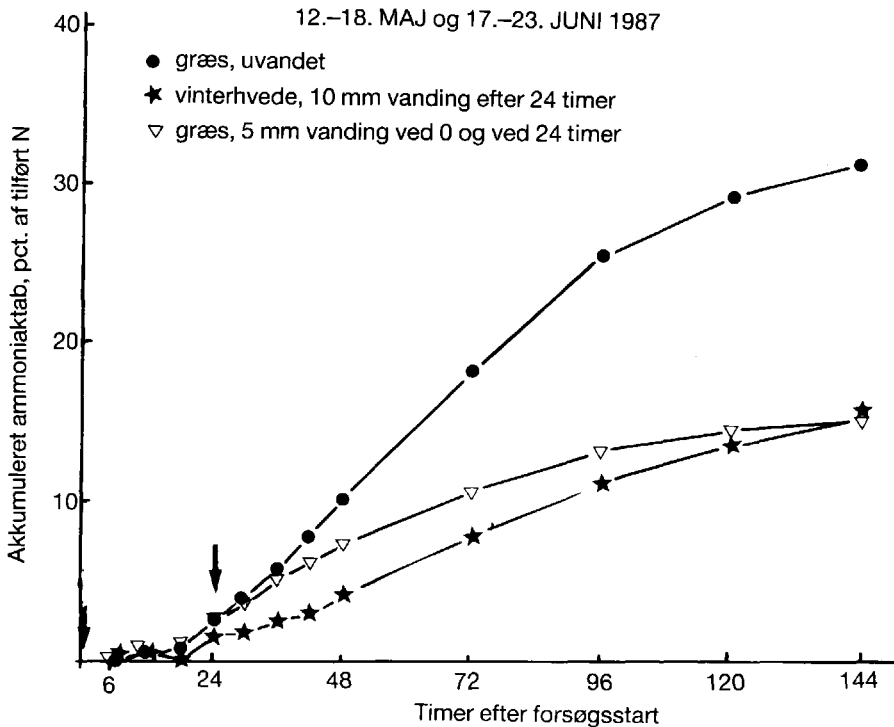


Fig. 9. Akkumuleret ammoniaktab fra urea udbragt d. 12. maj 1987 (kl. 10.15) med 10 g N/m² til vinterhvede (35 cm høj) og d. 17. juni 1987 (kl. 10.50) med 15 g N/m² til græs efter slæt.
Cumulated loss of ammonia from urea applied 12 May (10,15) to winter wheat (plant height, 35 cm) at a rate of 10 g N/m² and on 17 June 1987 (10,50) to cut grass at a rate of 15 g N/m².

Erkendtlighed

Forsøgsteknisk Værksted, Årslev, har medvirket ved opbygning af vindtunnelsystemet, og Kirsten Vang har varetaget den tekniske gennemførelse af forsøgene.

Litteratur

- Black, A. S.; Sherlock, R. R.; Smith, N. P.; Cameron, K. C. & Goh, K. M. 1985. Effects of form of nitrogen, season and urea application rate on ammonia volatilization from pastures. *N. Z. J. Agric. Res.* 28, 469-474.
- Bouwmeester, R. J. B.; Vlek, P. L. G. & Stumpe, J. M. 1985. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 376-381.
- Buijsmann, E.; Maas, J. F. M. & Asman, W. A. H. 1986. Anthropogenic NH₃ emission in Europe. *Atm. Environ.* 21, 1009-1022.
- Christensen, B. T. 1986. Ammonia volatilization loss from surface applied animal manure. I A. Dam Kofoed et al. (eds): *Efficient Land Use of Sludge and Manure*. Elsevier Applied Publishers, London & New York, 193-203.
- Crooke, W. M. & Simpson, W. E. 1971. Determination of ammonium in Kjeldahl digests of crops by an automated procedure., *J. Sci. Food. Agric.* 22, 9-10.
- Ferguson, R. B.; McInnes, K. J.; Kissel, D. E. & Kanemasu, E. T. 1988. A comparison of methods of estimating ammonia volatilization in the field. *Fert. Res.* 15, 55-69.
- Ferm, M.; Areskoug, H.; Hanssen, J. E.; Hilbert, G. & Lättilä, H. 1988. Field intercomparison of measurement techniques for total NH₄⁺ and total NO₃⁻ in ambient air. *Atmos. Environ.* 22, 2275-2281.

8. *Freney, J. R.; Simpson, J. R. & Denmead, O. T.* 1981. Ammonia volatilization. *Ecol. Bull.* 33, 291-302.
9. *Hansen, F.* 1927. Staldgødningsundersøgelser I. *Tidsskr. Planteavl* 33, 753-780.
10. *Harper, L. A.; Catchpoole, V. R.; Davies, R. & Weir, K. L.* 1983. Ammonia volatilization: Soil, plant, and microclimate effects on diurnal and seasonal fluctuations. *Agron. J.* 75, 212-218.
11. *Hoult, E. H. & McGarity, J. W.* 1987. The influence of sward mass, defoliation and watering on ammonia volatilization losses from an Italian ryegrass sward topdressed with urea. *Fert. Res.* 13, 199-207.
12. *Iversen, K.* 1932. Kvælstoftabet ved staldgødningsudbringning 1925-1930. *Tidsskr. Planteavl* 38, 1-74.
13. *Iversen, K.* 1934/35. Fordampningstab ved ajlens udbringning 1928-33. *Tidsskr. Planteavl* 40, 169-234.
14. *Jensen, S. T.* 1928. Undersøgelser over ammoniakfordampning i forbindelse med kvælstoftab ved udbringning af naturlige gødninger. I. Ajle. *Tidsskr. Planteavl* 34, 117-147.
15. *Jørgensen, V.* 1978. Luftens og nedbørens kemiske sammensætning i danske landområder. *Tidsskr. Planteavl* 82, 633-656.
16. *Krom, D. K.* 1980. Spectrophotometric determination of ammonia: a study of a modified Berthelot reaction using salicylate and dichloroisocyanate. *Analyst* 105, 305-316.
17. *Larsen, K. E. & Keller, P.* 1985a. Nedfældning af kvæggylle til byg og bederoer. *Tidsskr. Planteavl* 89, 11-17.
18. *Larsen, K. E. & Keller, P.* 1985b. Nedfældning af kvæggylle til græs. *Tidsskr. Planteavl* 89, 19-24.
19. *Lauer, D. A.; Bouldin D. R. & Klausner, S. D.* 1976. Ammonia volatilization from dairy manure spread on the soil surface. *J. Environ. Qual.* 5, 134-141.
20. *Lindhard, J.* 1954. Undersøgelser over tabet af ammoniakkvælstof fra gødningsprøver udtaget i koldstalden. *Tidsskr. Planteavl* 57, 108-120.
21. *Lockyer, D. R.* 1984. A system for the measurement in the field of losses of ammonia through volatilization. *J. Sci. Food Agric.* 35, 837-848.
22. *McInnes, K. J.; Ferguson, R. B.; Kissel, D. E. & Kanemasu, E. T.* 1986. Ammonia loss from applications of urea-ammonium nitrate solution to straw residue. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 969-974.
23. *Meeus-Verdinne, K.; Scokart, P. O. & Guns, M.* 1985. L'ammoniac emis par les dechets animaux et la pollution atmospherique. *Rev. Agric.* 38, 239-251.
24. *Meincke, J.* 1985. Kvæggylle til majs i vækstperioden. *Tidsskr. Planteavl* 89, 25-29.
25. *Milchunas, D. G.; Parton, W. J.; Bigelow, D. S. & Schimel, D. S.* 1988. Factors influencing ammonia volatilization from urea in soils of the shortgrass steppe. *J. Atmos. Chem.* 6, 323-340.
26. *Miljøstyrelsen* 1984. NPO-redegørelsen. Bilag 6. Beregning af ammoniakfordampning fra naturgødning i Danmark. *Miljøstyrelsen, København DK*, 201-205.
27. *Ryden, J. C. & Lockyer, D. R.* 1985. Evaluation of a system of wind tunnels for field studies of ammonia loss from grassland through volatilization. *J. Sci. Food Agric.* 36, 781-788.
28. *Searle, P. L.* 1984. The Berthelot or indophenol reaction and its use in the analytical chemistry of nitrogen. *Analyst* 109, 549-568.
29. *Sherlock, R. R. & Goh, K. M.* 1985. Dynamics of ammonia volatilization from simulated urine patches and aqueous urea applied to pasture. II. Theoretical derivation of a simplified model. *Fer. Res.* 6, 3-22.
30. *Söderlund, R. & Svensson, B. H.* 1976. The global nitrogen cycle. *Ecol. Bull.* 22, 23-73.

Manuskript modtaget den 26. maj 1989.