Wirkung und Einsatzmöglichkeiten des Nitrifikationshemmstoffes Dicyandiamid

A. Amberger

Institut für Pflanzenernährung
Technische Universität München-Weihenstephan

Zusammenfassung

Unser derzeitiger Wissensstand über Wirkung und Einsatzmöglichkeiten des DCD läßt sich folgendermaßen zusammenfassen: Dicyandiamid ("Didin") hemmt den ersten Schritt der NH_4-Oxidation, verlangsamt also die Nitratbildung im Boden und verringert somit N-Verluste (durch Auswaschung bzw. Denitrifikation). Die bakteriostatische Wirkung des DCD auf Nitrosomonas spec. ist spezifisch und beruht vermutlich auf einer Hemmung der oxidativen Phosphorylierung in deren Stoffwechsel; andere Mikroorganismen werden in ihrer Aktivität nicht beeinflußt. Im tierischen Organismus wirkt DCD nicht toxisch (LD_{50} bei Ratten > 10 g DCD/kg Körpergewicht).

Der zunächst anorganische Abbau von DCD in Böden (Oberflächenkatalyse an Metalloxiden) zu Guanylharnstoff wird durch niedrige Temperaturen und hohe Bodenfeuchtigkeit verlangsamt. Die weitere (biologische) Umsetzung führt schließlich rückstandsfrei zu NO_3 (DCD ist damit ein langsam wirkender N-Dünger).

Das wasserlösliche DCD wird in geringem Umfang auch von der Pflanze aufgenommen. Dabei möglicherweise auftretende geringe Blattschäden können bei sachgemäßer Dosierung und Anwendung vermieden werden. Eine durch DCD betonte NH_4-Ernährung führt in der Pflanze zu Veränderungen hinsichtlich Wuchsform, Anionen/Kationenverhältnis, Eiweiß- und Säurestoffwechsel.

Günstige Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich für DCD mit organischen Düngern wie Gülle oder "Kartoffelfruchtwasser" (Mehrerträge der Folgefrucht). Kombinationsprodukte (Harnstoff/DCD bzw. Ammonsulfat/DCD) zeigten im Reisanbau (besonders hohe NO_3-Verluste!) sowie zu Getreide, Zuckerrüben und Kartoffeln besonders auf leichten (auswaschungsgefährdeten) Böden eine gute Wirkung neben arbeitswirtschaftlichen Vorteilen. Die Nitratgehalte von Gemüse und Futterpflanzen können durch DCD erheblich gesenkt werden.

Summary

Effects and applicability of dicyandiamide as a nitrification inhibitor

Our knowledge of effects and applicability of DCD can be summarized as follows:
Dicyandiamide ("Didin") inhibits the first step of NH_4 oxidation, thus retarding formation of nitrate in the soil and reducing losses of N (by leaching or denitrification). Bacteriostatical effects of DCD on Nitrosomonas spec. are specific and probably a result of inhibition of the oxydative phosphorylation in their metabolism; activity of other microorganisms is not affected. In animal systems, DCD is not toxic (LD_{50} for rats > 10 g DCD/kg body weight).

Decomposition of DCD in soils to guanylic urea is at first inorganic (surface catalysis on metal oxides) and impeded by low temperatures and high soil humidity. Subsequent biological breakdown finally results in NO_3 without further residues (DCD thus acts as a slow-release N fertilizer). Water soluble DCD is taken up by plants to some extent. Possible leaf damages can be avoided by proper dosing and application. NH_4-nutrition, emphasized by DCD causes changes in plant growth, anion /cation ratio and protein as well as acid metabolism.

Use of DCD is especially promising with manures like slurry or potato starch waste water (higher yields in subsequent

crops). Combination products (urea/DCD; ammonium sulfate/DCD) showed good effects and econimal advantages in rice cultivation (very high losses of NO_3) and with cereals, sugar beets, or potatoes on light and permeable soils. Nitrate contents of vegetables and forage crops can be considerably reduced by DCD.

Einleitung

Die Problematik der Stickstoffernährung unserer Kulturpflanzen liegt bekanntlich darin, daß diese nicht über das Enzym Nitrogenase verfügen und somit das große N-Reservoir der atmosphärischen Luft nicht direkt zu nutzen in der Lage sind. Auch die "Gen-Chirugie" - so faszinierend diese Forschungsrichtung zweifellos ist - wird uns in naher Zukunft mit Sicherheit nicht eine Implantation des Nitrogenase-Gens in die Wurzeln von Kulturpflanzen bescheren können.

Also sind diese in der Hauptsache nach wie vor auf die Zufuhr von "vorgefertigten" Stickstoffverbindungen angewiesen. Hier tut sich aber bereits eine weitere Problematik auf, insofern nämlich die Ausnutzungsrate der mineralischen, noch mehr aber der organischen N-Düngemittel, im ganzen gesehen doch recht unbefriedigend ist (70 - 30 % und noch weniger) - je nach Düngemittelform, Aufwandmenge, Anwendungszeitpunkt und Standortbedingungen aufgrund einer relativ hohen Verlustrate. Am verlustanfälligsten sind dabei die N-Formen Nitrat und NH_3, und zwar immer dann, wenn diese in höherer Konzentration längere Zeit im Boden vorliegen.

Diese Verluste können auftreten (vgl. AMBERGER, 1974) durch:

- Nitratauswaschung in das Grundwasser; das geschieht in unserem Klima vor allem in der vegetationsfreien Jahreszeit (ca. 40 - 100 kg N/ha·a).
- Denitrifikation unter zeitweilig anaeroben Bedingungen im Boden (z.B. Staunässe), vor allem während der Vegetationszeit. Dabei wird NO_3 bis zum N_2 reduziert; Zahlenangaben in der Literatur schwanken zwischen 30 und 80 kg N/ha·a je nach Standortbedingungen.
- NH_3-Verflüchtigung: diese Gefahr ist umso größer, je mehr das Gleichgewicht zwischen NH_4 und NH_3 nach rechts verschoben wird. Im Extremfall gilt das vor allem für die Oberflächenapplikation von Harnstoff oder Gülle auf kalkreichen Böden.
- Immobilisierung von Stickstoff durch Einbau in die Biomasse des Bodens bzw. durch NH_4-Fixierung in Tonmineralen. Zwar stellen diese letzteren Vorgänge zunächst noch keinen eigentlichen N-Verlust dar, sie haben aber eine geringere N-Ausnutzung der N-Dünger zur Folge und erhöhen die Gefahr später auftretender unkontrollierbarer Verluste.

Nitrifikationshemmstoffe haben nun die Eigenschaft, den Vorgang der Ammoniumoxidation über eine bestimmte Zeit hinweg zu hemmen und auf diese Weise die vom Nitrat ausgehenden Verlustmöglichkeiten - Auswaschung und Denitrifikation - zu verringern.

Seit mehr als 6 Jahren laufen an meinem Institut intensive Forschungsarbeiten über die Wirkung und die Einsatzmöglichkeiten des Nitrifikationshemmstoffes Dicyandiamid; diese Ergebnisse sollen wie folgt zusammenfassend dargelegt werden.

I. Grundlagen der Wirkung des Dicyandiamids

1. Wirkungsmechanismus

Dicyandiamid (DCD), das Dimerisationsprodukt des Cyanamids, ist eine sehr reaktionsfähige Verbindung (Nitril- und Imino-Gruppe), die im granulierten Kalkstickstoff etwa 10 % vom Gesamt-N ausmacht (Abb. 1).

Es hemmt spezifisch die Tätigkeit von Nitrosomonas-Bakterien und damit den ersten Schritt der NH_4-Oxidation bis zum Nitrit (Abb. 2), dagegen wird Nitrobacter davon nicht tangiert.

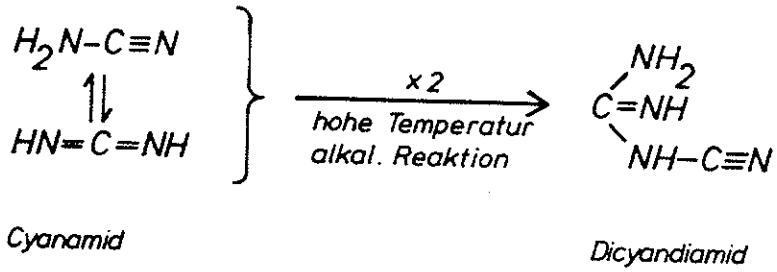


Abb. 1: Bildung von Dicyandiamid

Fig. 1: Formation of dicyandiamide

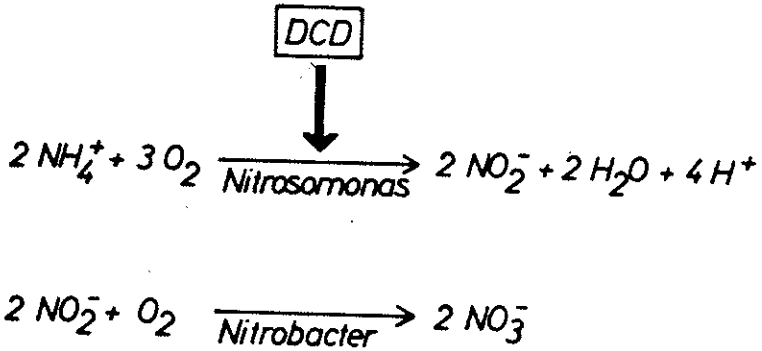


Abb. 2: Wirkung von DCD auf die Nitrifikation

Fig. 2: Effect of DCD on nitrification

Auf diese Weise kommt es über eine gewisse Zeit hinweg zu einer NH_4-Akkumulation im Boden. In einem Modellversuch mit ^{15}N-Ammonsulfatsalpeter wurde durch Zusatz von DCD die Nitrifikation im Zeitraum von 63 Tagen erheblich verlangsamt und damit die Gefahr der Nitratauswaschung bzw. Denitrifikation verringert (Abb. 3).

(in % der N-Zugabe nach 63 Tagen)

Ansatz: 100 g Boden (uL) pH 6.5
20 mg ^{15}N als AS bzw. ASS ± 2 mg DCD-N
14 °C, 50 % WK

DCD-Zusatz	AS		ASS	
	NH_4-N	NO_3-N	NH_4-N	NO_3-N
- DCD	1	89	1	92
+ DCD	75	10	55	33

Abb. 3: Umsatz von ^{15}N-markiertem Ammonsulfat (AS) und Ammonsulfatsalpeter (ASS) mit Zusatz von DCD

Fig. 3: Turnover of ^{15}N-ammonium sulfate (AS) and ammonium-sulfa-nitrate (ASS) combined with DCD

Diese Gefahr ist insbesondere gegeben bei Herbstausbringung von Gülle, wenn einerseits eine produktive Ausnutzung des Gülle-N aufgrund fehlenden oder sehr geringen Pflanzenwachstums kaum möglich und damit andererseits die Nitratauswaschung besonders hoch ist (AMBERGER, GUTSER und VILSMEIER, 1982a; Abb. 4). Denitrifikationsverluste treten insbesondere dann auf, wenn unter günstigen aeroben Bedingungen zunächst viel Nitrat im Boden gebildet worden ist und dieses dann bei höherer Temperatur und hohem Angebot an biologisch leicht umsetzbaren Kohlenstoffverbindungen von denitrifizierenden Bakterien als Sauerstoffquelle genutzt und dabei zu N_2 reduziert wird.

(Amberger, Gutser und Vilsmeier, 1982)

Ansatz: 7 kg ulS, pH 6.5 + 1.23 g Gülle-N ≙ ca. 670 mg NH_4-N, Aufstellung im Freien (22.8.78 - 27.4.79)

Gülle	mg NO_3-N/Gefäß DCD -	+
August	564	478
September	434	269
Oktober	264	83
März	347	242

Abb. 4: Nitratauswaschung nach Gülledüngung unter dem Einfluß von DCD

Fig. 4: Leaching of nitrate after slurry application as affected by DCD

Im Modellversuch wurde durch Zugabe von DCD während der aeroben Phase (42 Tage) aber nur etwa die Hälfte von ^{15}N-Harnstoff (Ha) nitrifiziert (AMBERGER und VILSMEIER, 1982; VILSMEIER und AMBERGER, 1982a; Abb. 5); in der folgenden anaeroben Phase konnten ohne DCD insgesamt nur mehr 38 % Ha-N gefunden werden, und zwar vornehmlich in der Fraktion Rest-N (d.h. also, nach Umsatz mit dem Boden). Mit DCD waren dagegen noch insgesamt 61 % N vorhanden, also um mehr als 20 % (absolut) bzw. 35 % (relativ) gegenüber ohne DCD.

Was nun den Mechanismus dieser Hemmung anlangt, so gingen wir von der Hypothese aus, daß die Nitril-Gruppe des Dicyandiamids mit funktionellen Sulfhydril-Gruppen bzw. Schwermetallen von Atmungsenzymen reagiert und eventuell Metallchelate gebildet werden, wodurch es zu einer Hemmung der oxidativen Phosphorylierung im Stoffwechsel von Nitrosomonas europea und letztlich zu einer Entkoppelung von Atmung und Energieübertragung kommt (s. dazu ZACHERL und AMBERGER, in diesem Band).

(Vilsmeier und Amberger, 1982)

Ansatz: 100 g Boden + 20 mg Ha-N ± 2 mg DCD-N, 60% d.v. WK, 14°C

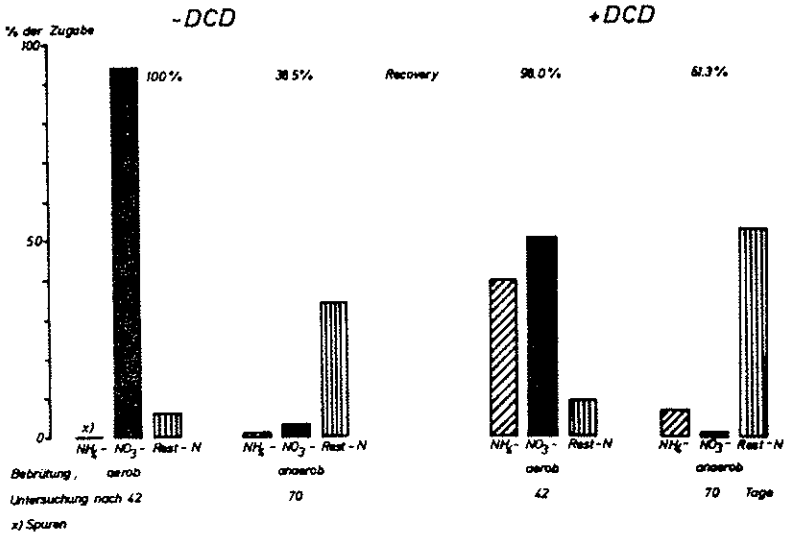


Abb. 5: Denitrifikation aus ^{15}N-Harnstoff unter Zusatz von DCD

Fig. 5: Denitrification from ^{15}N-urea with DCD

Diese Wirkung ist bakteriostatisch (nicht bakterizid, s. dazu DOMSCH, in diesem Band) und hält solange an, wie eine gewisse DCD-Konzentration im Boden vorhanden ist (in der Regel 60 - 80 Tage). Metabolite wirken dagegen nicht nitrifikationshemmend! Die Wirkung von DCD ist streng spezifisch auf die Nitrosomonas-Gruppe ($NH_4 \longrightarrow NO_2$) beschränkt. Die nicht N-bindenden und insbesondere C-heterotrophen Mikroorganismen, die vor allem für die sogenannte "biologische Aktivität" des Bodens verantwortlich sind, werden durch DCD nicht beeinträchtigt.

Wählt man die Aktivität einiger bekannter Bodenenzyme als mögliche Parameter der Bodenfruchtbarkeit, so zeigt sich (BOSCH und AMBERGER, 1983, Abb. 6), daß bei jährlicher Zufuhr von Kalkstickstoff (mit 10 % DCD am Gesamt-N!) in einem

ca. 50-jährigen Feldversuch nahezu alle untersuchten Enzymaktivitäten jeweils im Herbst sogar eindeutig höher lagen als in den Vergleichsparzellen. Aufgrund der laufenden Zufuhr von basisch hoch wirksamem Kalkstickstoff liegen dort nämlich die pH-Werte nahe dem pH-Optimum der untersuchten Enzyme. Eine Beeinträchtigung der biologischen Aktivität durch langjährige regelmäßige DCD-Applikation kann somit ausgeschlossen werden.

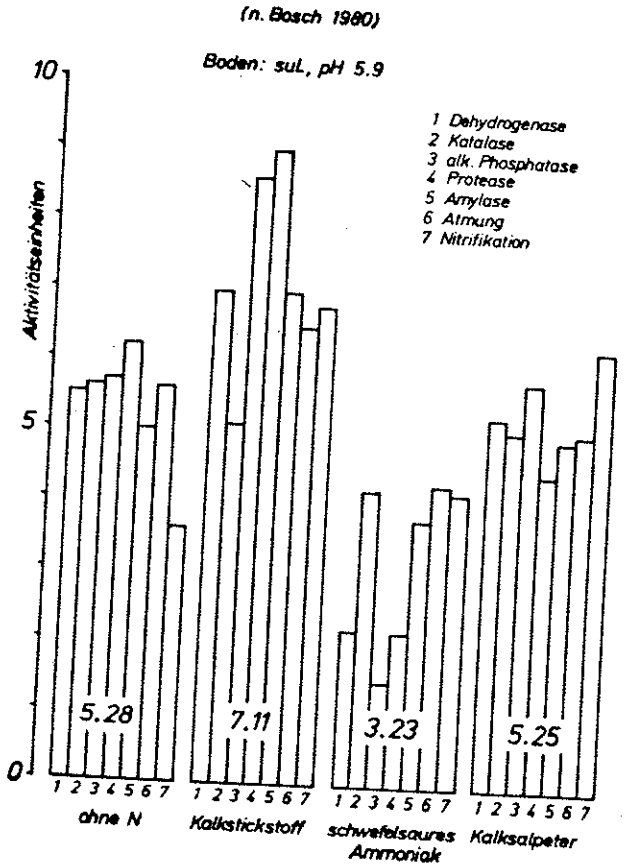


Abb. 6: Enzymaktivitäten in Abhängigkeit von der Düngung

Fig. 6: Enzyme activities as related to fertilizer application

2. Abbau des Dicyandiamids im Boden

Die nitrifikationshemmende Wirkung bleibt also auf eine bestimmte DCD-Konzentration im Boden beschränkt. Damit gewinnt die Frage nach der Mineralisation des DCD besondere Bedeutung. Ein anfänglich vermuteter mikrobieller Abbau (von anderen Hemmstoffen her bekannt), konnte nicht bestätigt werden. Dagegen steht heute fest, daß der erste Schritt eine katalytische Anlagerung von Wasser an das DCD in Gegenwart von oberflächenaktiven Metalloxiden ist und damit zu Guanylharnstoff führt (Abb. 7).

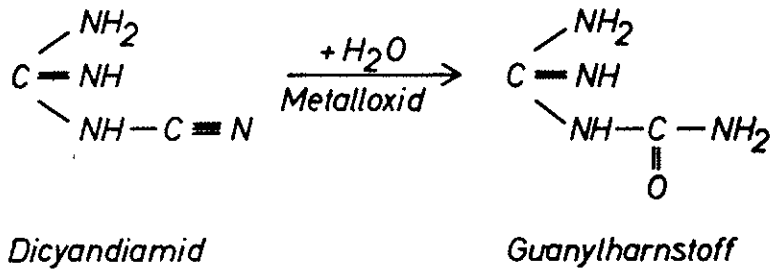


Abb. 7: Abbau von DCD zu Guanylharnstoff

Fig. 7: Decomposition of DCD to guanylic urea

Im Ansatz mit geglühtem Quarzsand und Wasser bleibt DCD über Monate hinweg unverändert (AMBERGER und VILSMEIER, 1979a, Abb. 8). Nach Zugabe von 0.5 g frisch gefälltem Fe-Oxid setzt aber ein rascher Umsatz (nach 10 Tagen bereits 2/3) zu Guanylharnstoff (Gu-Ha) ein. Dieser Reaktionsschritt verläuft also abiologisch und ist abhängig von verschiedenen Faktoren:

Je niedriger die Temperatur, umso länger ist DCD nachweisbar und wirksam (VILSMEIER, 1980, Abb. 9). Der Einfluß der Bodenfeuchte ist dagegen unter normalen ackerbaulichen Bedingungen relativ gering; unter anaeroben Bedingungen (Wasserüberstau) verläuft der Abbau aber deutlich langsamer.

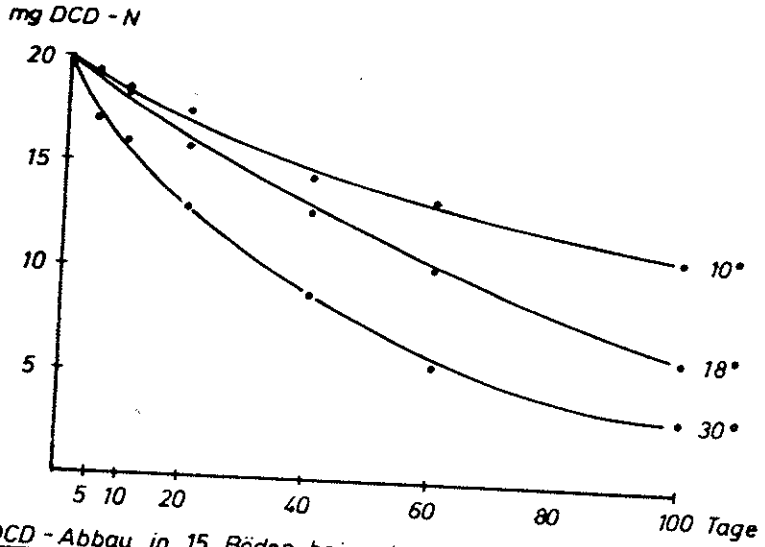
(Amberger und Vilsmeier, 1979)

Ansatz: 100 g Quarzsand + 20 mg DCD-N + 0.5 g Metalloxid, 5 % d. v. WK, 18° C, Untersuchung nach 10 Tagen

Zusatz	mg N/Ansatz DCD	Guha
Kontrolle	20	0
Fernhydrit	6	14
$MnO(OH)_2$	10	10

Abb. 8: DCD-Abbau in Quarzsand

Fig. 8: DCD decomposition in quartz sand



DCD-Abbau in 15 Böden bei unterschiedlicher Temp. (Sinz 1982)

Bebrütungstemp. in °C	5	10	15	20
2mg DCD-N / 100g Boden sind vollst abgebaut n. Wochen	26	10	6	4

Abb. 9: DCD-Abbau im Boden in Abhängigkeit von der Temperatur

Fig. 9: DCD turnover in soils as related to temperature

Die nitrifikationshemmende Wirkung hält umso länger an, je höher die DCD-Konzentration in einer bestimmten Bodenschicht ist (VILSMEIER, 1981, Abb. 10).

(Vilsmeier 1981)

Untersuchung nach Tagen	1 ≙ 15kg DCD/ha	2 ≙ 30kg DCD/ha
40	10	10
60	40	25
80	70	55

Abb. 10: DCD-Abbau in Abhängigkeit von der Konzentration (in % der Zugabe, 14°C)

Fig. 10: Metabolized DCD as related to concentration (in % of added, 14°C)

Das Ziel weiterer Versuche am Institut ist es, diesen ersten Abbauschritt zum Gu-Ha zu verlangsamen durch Zusatz von Substanzen, die Sorptionsplätze an den katalytisch wirksamen Metalloxiden abdecken (z.B. Phosphat, Borat, Silikat) bzw. mit Metalloxiden Komplexe bilden und damit deren katalytische Aktivität verringern (s. dazu VILSMEIER, in diesem Band). Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß der DCD-Abbau in einigen von uns untersuchten tropischen Böden des humiden Klimas bei hoher Temperatur und hohen Gehalten an organischer Substanz wesentlich langsamer verläuft als erwartet, wahrscheinlich bedingt durch eine solche Inaktivierung der Metalloxide durch organische Substanzen.

Die weiteren Abbauschritte, vom Gu-Ha ausgehend, dürften nach unseren heutigen Kenntnissen vornehmlich biologischer Natur sein (Abb. 11). Diesen kommt keine nitrifikationshemmende Wirkung zu, sie interessieren daher in diesem Zusam-

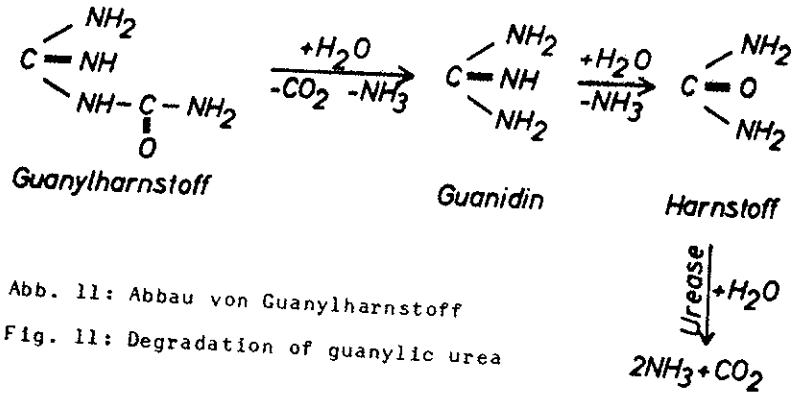


Abb. 11: Abbau von Guanylharnstoff

Fig. 11: Degradation of guanylic urea

menhang nur sekundär. Jedoch geht daraus hervor, daß DCD (mit 67 % N) nach der vollständigen Mineralisation auch als ein langsam wirkender N-Dünger anzusehen ist. Schematisch betrachtet ergibt sich damit folgendes Bild für den DCD-Abbau (VILSMEIER, 1981, Abb. 12).

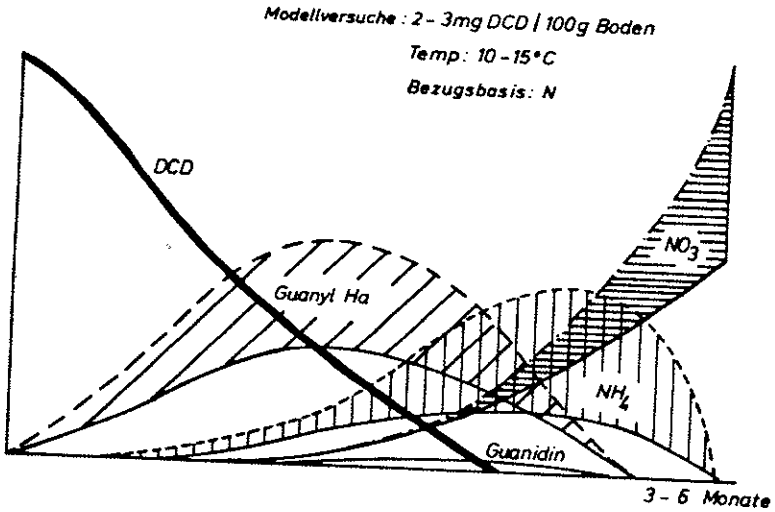


Abb. 12: Mineralisierung von DCD unter aeroben Bedingungen

Fig. 12: Mineralization of DCD under aerobic conditions

Erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist - insbesondere im Hinblick auf spätere Einsatzmöglichkeiten -, daß der mikrobielle Harnstoffabbau durch das Enzym Urease weder durch DCD noch durch dessen Metabolite beeinflußt wird (AMBERGER und VILSMEIER, 1979 b).

3. Toxikologische Aspekte

Wenn es darum geht, Bodenhilfsstoffe einzusetzen, dann ist heute die Frage nach etwaigen Rückständen in hohem Maße relevant. Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, daß bei DCD-Anwendung tatsächlich keine Rückstandsprobleme auftreten, denn es wird nach 2 - 3 Monaten völlig mineralisiert zu NH_3 bzw. NO_3 und CO_2.

Was die "Giftigkeit" dieses Hemmstoffes anlangt, so liegt die LD_{50} (ein bekannter Parameter dafür) bei 10 g DCD/kg Körpergewicht; sie beträgt damit mehr als das dreifache von Kochsalz (3 g/kg Körpergewicht). Demnach wird DCD in die Gruppe der "nicht toxischen" Substanzen eingeordnet (TNO 1977).

4. Aufnahme des DCD und Wirkung auf den pflanzlichen Stoffwechsel

DCD ist gut wasserlöslich; sein Molekulargewicht nicht sehr viel höher als das des Harnstoffs. Es wird daher ähnlich wie dieser und andere niedermolekulare organische Substanzen als Molekül aufgenommen und in der Pflanze mit dem Transpirationsstrom passiv transportiert. Darauf beruht letztlich auch die Wirkung des unkrautbekämpfenden Cyanamids im Kalkstickstoff.

Bietet man nun Kulturpflanzen DCD in Nährlösungskultur oder Keimpflanzenversuchen in höherer Konzentration an, dann ist DCD im Sproß nachweisbar; häufig treten Nekrosen an den Blattspitzen und -rändern auf. Unter bestimmten klimatischen Bedingungen (Gewächshaus) konnten wir bereits vor Jahren in den Guttationstropfen stark guttierender Pflanzen (Mais) DCD nachweisen bzw. sogar kleine DCD-Kristalle an den Blattspitzen feststellen (s. auch VILSMEIER, in diesem Band). In der Praxis sind solche Schäden bei sachgemäßer

Anwendung von DCD bedeutungslos und ohne Einfluß auf den Ertrag. Daraus ergibt sich jedoch als wichtige Konsequenz, DCD unter Berücksichtigung der klimatischen und pedologischen Gegebenheiten hinsichtlich Applikationsform, -menge und -zeitpunkt stets so einzusetzen, daß es möglichst lange als Nitrifikationshemmstoff im Boden wirkt und möglichst wenig von den Kulturpflanzen aufgenommen wird; diese freilich weisen eine unterschiedliche Empfindlichkeit gegen DCD auf.

(Vilsmeier + Amberger, 1978)

Wochen nach DCD-Applikation	NO_3 - N % i. Fri. S. DCD zugemischt		
	Kontrolle	10 ppm	20 ppm
6 (Schossen)	4.49	1.81	1.14
10 (Blüte)	0.05	0.05	0.05

Abb. 13: Nitratgehalt von Weizen (Gefäßversuch)

Fig. 13: Nitrate contents of wheat plants (pot trial)

Was die Wirkung auf Nährstoffaufnahme und Stoffwechsel der Pflanze anlangt, so führt die Nitrifikationshemmung durch DCD im Boden konsequenterweise über einen gewissen Zeitraum hinweg zu einem höheren NH_4-, aber geringerem NO_3-Angebot und folglich auch zu geringeren Nitratgehalten in jungen Pflanzen (VILSMEIER und AMBERGER, 1978, Abb. 13). Die Problematik hoher Nitrat- und Oxalsäuregehalte in Blattgemüse und Blumenkohl sowie die sich daraus ergebenden vielfältigen Bestrebungen, den Nitratgehalt in diesen Nahrungs- bzw. Futterpflanzen zu senken (Gemüse für Babynahrung, Grenzwert: 250 mg Nitrat/1000 g Fri.S.) sind bekannt; siehe dazu auch

H. EHRENSTEIN und AMBERGER, in diesem Band. Daß dies durch Einsatz von DCD möglich ist, zeigen Versuche von KICK und MASSEN (1973, Abb. 14). Ähnliches gilt für Futterpflanzen (vor allem Grünraps) (Toleranzwert: 0.5 % Nitrat i.d. TS). Die Schwierigkeit im Zwischenfruchtanbau besteht bekanntlich darin, daß die Vegetationszeit dieser Pflanzen sehr kurz und die Wachstumsbedingungen zunehmend ungünstiger werden (Licht, Temperatur). Damit sind entsprechende Mengen Stickstoff für ein rasches Anfangswachstum notwendig; dieser kann jedoch auch gefahrlos in Form von Ammonium angeboten werden.

Düngung / Gefäß 1.5 g N als	NO_3	NO_3-N	Gesamt-Oxalsäure
$(NH_4)_2SO_4$	3.23	0.73	9.13
$(NH_4)_2SO_4$ + DCD	0.57	0.11	2.42
$NaNO_3$	5.17	1.16	9.60

Abb. 14: Einfluß von DCD auf Nitrat- und Oxalsäuregehalt von Spinat (% i. TS)

Fig. 14: Nitrate and oxalic acid contents in spinach as affected by DCD (% i. dr.m.)

Eine Senkung des Nitratgehaltes in Pflanzen durch Einsatz von DCD ist also im Prinzip möglich; es geht vielmehr darum, möglicherweise auftretende Blattschäden (vor allem an älteren Blättern) durch genaues Timing und exakte Dosierung so gering wie möglich zu halten.

Durch Betonung des NH_4-Angebotes in bestimmten Entwicklungsphasen (z.B. Getreide) werden aber auch die Wuchsform (NO_3: große und breite Blätter - NH_4: kleinere Pflanzen) und das Anionen/Kationen-Verhältnis der Pflanzen erheblich beeinflußt entsprechend den bekannten Aufnahmemechanismen. So sind bei NH_4-Ernährung die Gehalte an Phosphat, Chlorid und Silikat höher (mit möglicherweise günstiger Auswirkung gegen Pilzbefall), dagegen die K-, Ca-, und Mg-Gehalte nied-

riger. Auf diese Weise ergeben sich auch Änderungen im Eiweiß- und Säurestoffwechsel der Pflanzen (s. dazu auch EHRENSTEIN und AMBERGER, MOKRY und AMBERGER sowie JUNG, DRESSEL und HENJES, in diesem Band).

Interessante Versuchsergebnisse mit Getreide liegen darüber aus der Arbeitsgruppe Sommer und Poletschny vor, wonach durch eine gezielte NH_4-Ernährung zum Zeitpunkt der Kornausbildung (Kornfüllungsphase) eine verstärkte Eiweißeinlagerung erfolgen soll (SOMMER et al., 1976; SOMMER und POLETSCHNY, 1972).

Durch Betonung der NH_4-Aufnahme kommt es bekanntlich zu einer verstärkten Protonenabgabe der Pflanze und damit zeitweise zu einer pH-Absenkung im Rhizosphärenbereich. ROTHMEIER und AMBERGER (s. in diesem Band) konnten zeigen, daß auf diese Weise die Aufnahme von Zink aus schwerlöslichen Verbindungen verbessert wird. Ähnliches gilt für andere kationische Spurenelemente, wie Tastversuche gezeigt haben.

II. Einsatzmöglichkeiten des Dicyandiamids

Was nun die Einsatzmöglichkeiten des Dicyandiamids anlangt, so sei auf die Ergebnisse des "Didin-Fachsymposium" in Augsburg (1981) sowie auf in der Zwischenzeit publizierte Ergebnisse aus unserem Institut hingewiesen (AMBERGER und VILSMEIER, 1983; AMBERGER, GUTSER und VILSMEIER, 1982 a; AMBERGER, 1981 a; GUTSER, 1981; AMBERGER und GUTSER, 1979).

Die Zielvorstellungen und Applikationsmöglichkeiten (darauf wird auch in den folgenden Vorträgen noch eingegangen) sind dabei folgende:

1. Verringerung der N-Verluste durch Nitratauswaschung, insbesondere während der vegetationsfreien Zeit; damit Senkung der Nitratbelastung von Trinkwasser und Oberflächengewässern,

2. Verringerung der N-Verluste durch Denitrifikation, insbesondere während der Vegetationszeit (Staunässe, Reisanbau),

3. Verringerung des Nitratgehaltes von Gemüse und Futterpflanzen,
4. Betonung einer zeitweiligen Ammoniumernährung bestimmter Kulturpflanzen ⟶ Ertrag, Qualität,
5. Arbeitswirtschaftliche Vorteile durch Verringerung von N-Teilgaben, insbesondere auf sehr duchlässigen Böden.

Diese Zielvorstellungen können erreicht werden durch:

- Kombinationsprodukte von N-Düngemitteln (z.B. Harnstoff, Ammonsulfat) + DCD
  (Anteil ca. 10 % am Ges.N)
- neue Düngerformulierungen (Supergranula, Umhüllung)
- Zusatz von DCD zu organischen Abfallprodukten, z.B. Gülle, "Kartoffelfruchtwasser", Klärschlamm.

Dazu einige Erläuterungen und Beispiele:

1. Der Zusatz von DCD zu Gülle hat bereits breite Anwendung in der Praxis gefunden: bei mengenmäßig und zeitlich richtiger Ausbringung kann der Ammoniumstickstoff, der immerhin ca. 50 % des gesamten Güllestickstoffs ausmacht und normalerweise innerhalb von 2 - 3 Wochen nitrifiziert ist, während der vegetationsfreien Jahreszeit konserviert, damit vor der Auswaschung geschützt (AMBERGER und VILSMEIER, 1979 c, Abb. 15) und von der folgenden Frucht ausgenutzt werden (Abb. 16).

(Amberger u. Vilsmeier 1979)

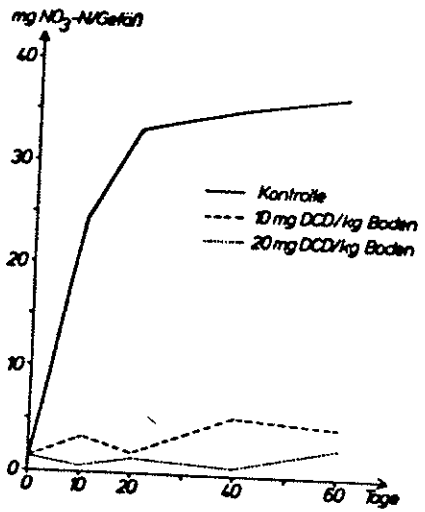


Abb. 15: Hemmung der Nitrifikation von Rindergülle durch DCD im Brutversuch im Boden (14°C)

Fig. 15: Inhibition of nitrification from cattle slurry by DCD in incubation trials with soil (14°C)

Feldversuch - Gülle: ca 290 kg Ges.-N/ha

	November		Februar	
	-DCD	+DCD	-DCD	+DCD
Ertrag (dt FrS./ha)	169	303	268	286
N-Entzug (kg/ha)	63	111	88	95

Abb. 16: Wirkung von Rindergülle-N zu Silomais ± DCD

Fig. 16: Effect of slurry-N ± DCD on silage maize

Die Dauer der Hemmung der Nitrifikation wird durch niedrige Temperaturen verlängert (AMBERGER und VILSMEIER, 1979 c, Abb. 17).

Ansatz: 400 g Boden + 10 g Gülle ≈ 75 m^3 Gülle/ha
+ 10 ppm DCD ≈ 30 kg Didin/ha

Tage nach DCD-Anwendung	NO_3-N im Ansatz 14°C Kontrolle	14°C + DCD	8°C Kontrolle	8°C + DCD
20	22	4	15	1
40	21	6	18	3
60	20	11	19	3

Abb. 17: Nitrifikationshemmende Wirkung von DCD zu Rindergülle

Fig. 17: Effect of DCD on nitrification of cattle slurry-N

Entscheidend für den Erfolg der Didinanwendung sind: eine gute Abstimmung bzw. Kombination der Gülleausbringung hinsichtlich Menge und Zeit mit anderen agrotechnischen Maßnahmen, vor allem Gründüngung und Strohdüngung, sowie eine sofortige Einarbeitung der Gülle zur Vermeidung von Ammoniakverlusten. N_{min}-Untersuchungen und Mehrerträge der Folgefrucht bestätigen diese Zielsetzung.

2. Bekanntlich gehen jährlich große Mengen an Nitrat durch Auswaschung verloren, teils aus der natürlichen Mineralisation, teils aus der nur schwer kontrollierbaren organischen Düngung. Dagegen bringt die in der Regel im Frühjahr zur aufwachsenden Frucht applizierte anorganische Düngung in dieser Hinsicht kaum Probleme. Die natürliche Mineralisation durch DCD-Einsatz allein zu kontrollieren, dürfte, von wenigen Ausnahmen abgesehen, we-

nig aussichtsreich sein, wohl aber ist es möglich, durch kombinierte agrotechnische Maßnahmen (Nutzung, Fruchtfolge, Düngung etc.) und flankierenden DCD-Einsatz den Nitrataustrag in das Grundwasser zu verringern. Unter diesem Aspekt führen wir derzeit eine Pilot-Studie in einem Trinkwassereinzugsbereich durch. Solche Ergebnisse müssen aber nur auf den jeweiligen Standort beschränkt und mit Vorsicht interpretiert, keineswegs aber generalisiert werden.

3. In ähnliche Richtung zielen derzeit bereits laufende Versuche, praktikable Düngungssysteme zu erarbeiten, um die großen Mengen an löslichem Stickstoff im sogenannten "Kartoffelfruchtwasser" der Stärkefabriken durch Kombination mit DCD sinnvoll zu nutzen unter möglichst geringer Belastung des Grundwassers (erste Ergebnisse dazu: AMBERGER und GUTSER, in diesem Band).

4. Die Problematik im Reisanbau (low land rice) besteht u.a. darin, daß aufgrund alternierender Austrocknung und Überflutung des Bodens vor bzw. während der Vegetationszeit je nach Standortbedingungen hohe Nitrat- und N_2-Verluste auftreten. Für Harnstoff/DCD-bzw. Ammonsulfat/DCD-Kombinationsprodukte ergibt sich in dieser Hinsicht ein breites Feld der Anwendung (AMBERGER und GUTSER, 1978).

5. Versuche mit DCD-Kombinationsprodukten laufen derzeit auch zu Gemüse mit dem Ziel einer Verringerung des Nitratgehaltes (s. EHRENSTEIN und AMBERGER, in diesem Band).

6. Über die Möglichkeit des Einsatzes von DCD zu Klärschlamm haben KICK und POLETSCHNY (1981) auf dem "Didin-Symposium" berichtet.

7. Umfangreiche Versuche laufen bei uns derzeit zum Einsatz von Harnstoff/DCD-bzw. Ammonsulfat/DCD-Produkten zu Getreide und Zuckerrüben. Dabei geht es sowohl um gewisse arbeitswirtschaftliche Vorteile (geringere Anzahl von N-Teilgaben, z.B. zu Getreide) bei gleichen oder möglicherweise sogar höheren Erträgen (Abb. 18) als auch um bessere Qualität unter besonderer Berücksichtigung der Gesundheit (Pilzbefall etc.) der Kulturpflanzen.

(Löß - Braunerde)

Düngung kg N/ha Stadium				Kornertrag dt/ha (14 % Wasser)
Veget. Beginn	F-G	G-H	N	
Σ 80	–	–	–	60
Σ 140	30 (KAS)	–	50 (KAS)	75
Σ 140	–	80 (ASS/DCD)	–	76

$\Sigma N_{Bod.} + N_{Düng.}$

Abb. 18: Ammonsulfatsalpeter (ASS/DCD) zu Winterweizen

Fig. 18: Ammonium sulfa-nitrate (ASS/DCD) applied to winter wheat

8. Als erfolgversprechend hat sich ferner der Einsatz von DCD-Kombinationsprodukten zu Kartoffeln auf sehr leichten Böden (z.B. Humuskarbonatböden) erwiesen, wo selbst während der Vegetationszeit noch erhebliche Nitratauswaschungen auftreten können (Abb. 19; s. auch MUNZERT, in diesem Band).

Ausgehend von den bekannten Problemen der Applikation und Ausnutzung der N-Dünger stellt der Einsatz des Nitrifikationshemmstoffs Dicyandiamid damit eine Möglichkeit dar, die Effizienz der N-Düngung zu erhöhen und die N-Verluste zu senken unter gleichzeitiger Verringerung der Nitratbelastung des Grundwassers sowie des Nitratgehaltes der Pflanzen.

(Rendzina östlich v. München)

Aufteilung: ASS in 4 Gaben
ASS/DCD in 3 Gaben

Düngung		dt FrS/ha	dt Stärke/ha
ohne N		215	41
200 N	ASS	325	55
	ASS/DCD	354	58
240 N	ASS	326	55
	ASS/DCD	347	56
280 N	ASS	333	54
	ASS/DCD	351	57

Abb. 19: Ammonsulfatsalpeter (ASS/DCD) zu Kartoffeln

Fig. 19: Ammonium sulfa-nitrate (ASS/DCD) applied to potatoes

Literatur

AMBERGER, A., 1974: Dynamik des Stickstoffs im Boden im Hinblick auf Festlegung und Auswaschung. Wasser- u. Abwasserforschung, Jahrgang 7, Nr.1, 14-18

AMBERGER, A., 1981: Einsatz und Ausnutzung von N-Düngemitteln. Bayer. Landw. Jb. 58, Sh. 1, 80-88

AMBERGER, A., 1981 a: Dicyandiamid ("Didin") als Nitrifikationshemmstoff. Bayer. Landw. Jb. 58, H. 7, 845-853

AMBERGER, A., GUTSER, R., 1978: Umsatz und Wirkung von Harnstoff-Dicyandiamid- sowie Ammonsulfat-Dicyandiamid-Produkten zu Weidelgras und Reis. Z. Pflanzenern. u. Bodenkde. 141, 167-179

AMBERGER, A., GUTSER, R., 1979: Zur N-Wirkung von Rindergülle mit Dicyandiamidzusatz zu Weidelgras. Z. Acker- u. Pflanzenbau 148, 198-204

AMBERGER, A., GUTSER, R., VILSMEIER, K., 1982: N-Wirkung von Rindergülle unter Zusatz von Dicyandiamid bzw. Stroh in Gefäß- und Lysimeterversuchen. Z. Pflanzenern. u. Bodenkde. 145, H. 4, 337-346

AMBERGER, A., GUTSER, R., VILSMEIER, K., 1982 a: N-Wirkung von Rindergülle bzw. Jauche mit Dicyandiamid in Feldversuchen. Z. Pflanzenern. u. Bodenkde. 145, H. 4, 315-324

AMBERGER, A., VILSMEIER, K., 1979 a: Dicyandiamidabbau in Quarzsand und Böden. Z. Pflanzenern. u. Bodenkde. 142, H. 6, 778-785

AMBERGER, A., VILSMEIER, K., 1979 b: Versuche zur Wirkung von Cyanamid, Dicyandiamid, Guanylharnstoff, Guanidin und Nitrit auf die Ureaseaktivität. Landw. Forsch. 32, H. 4, 409-415

AMBERGER, A., VILSMEIER, K., 1979 c: Hemmung der Nitrifikation des Güllestickstoffs durch Dicyandiamid. Z. Acker- u. Pflanzenbau 148, 239-246

AMBERGER, A., VILSMEIER, K., 1982: Umsatz von ^{15}N-Harnstoff und ^{15}N-Ammonsulfatsalpeter mit Zusatz von Dicyandiamid unter aeroben Bedingungen im Boden. Z.f. Pflanzenern. u. Bodenkde. 145, H. 6, 550-556

AMBERGER, A., VILSMEIER, K., 1983: Stickstoffbilanz von ^{15}N-Harnstoff bzw. ^{15}N-Ammonsulfatsalpeter mit Dicyandiamid in Gefäßversuchen zu Grünhafer und Sommerweizen. Z. Pflanzenern. u. Bodenkde. 146, H. 4, 438-448

BOSCH, M., AMBERGER, A., 1983: Einfluß langjähriger Düngung mit verschiedenen N-Formen auf pH-Wert, Humusfraktionen, biologische Aktivität und Stickstoffdynamik einer Ackerbraunerde. Z. Pflanzenern. u. Bodenkde. 146, H. 6, 714-724

Fachsymposium über den N-Stabilisator SKW-Didin für Flüssigmist, SKW- Trostberg, Augsburg, 22.10.81, Sonderdruck aus "Bayer. Landw. Jahrbuch" Heft 7/81

GUTSER, R., 1981: Gefäß- und Feldversuche zur N-Wirkung von Gülle mit Dicyandiamid ("Didin"). Bayer. Landw. Jb. 58, H. 7, 872-879

KICK, H., MASSEN, G.G., 1973: Der Einfluß von Dicyandiamid und N-Serve in Verbindung mit Ammonsulfat auf Nitrat und Oxalsäuregehalt von Spinat. Z. Pflanzenern. u. Bodenkde. 135, 220-225

KICK, H., POLETSCHNY, H., 1981: Die Nitrifikationshemmung bei Düngung mit Abwasserklärschlämmen. Fachsymposium über den N-Stabilisator SKW-Didin für Flüssigmist, SKW Trostberg, Augsburg

SOMMER, K., METZ, M., ROSSIG, K., 1976: N zu Weizen als Ammonium mit Ammonium-Nitrifiziden I: Ertragsbildung bei Weizen. Landw. Forsch. 29, 2, 132-147

SOMMER, K., METZ, M., ROSSIG, K., 1976: N zu Weizen als Ammonium mit Ammonium-Nitrifiziden II: Proteingehalte, Proteinfraktion und Backfähigkeit. Landw. Forsch. 29, 2, 161-169

SOMMER, K., POLETSCHNY, H., 1972: N-Serve und Simazin bei Ammonium- und Nitraternährung von Weizen. Landw. Forsch. 25, 203-215

TNO, 1977: Determination of the acute oral toxicity of Dicyandiamide EH in rats. Centraal Instituut voor Voedingsonderzoek, Holland

VILSMEIER, K., 1980: Dicyandiamidabbau im Boden in Abhängigkeit von der Temperatur. Z. Pflanzenern. u. Bodenkde. 143, H. 1, 113-118

VILSMEIER, K., 1981: Modellversuche zur nitrifikationshemmenden Wirkung von Dicyandiamid ("Didin"). Bayer. Landw. Jb. 58, H. 7, 853-857

VILSMEIER, K., AMBERGER, A., 1978: Modell- und Gefäßversuche zur nitrifikationshemmenden Wirkung von Dicyandiamid. Landw. Forsch. 32, Sh. 35, Kongressb./VDLUFA/Augsburg, 243-248

VILSMEIER, K., AMBERGER, A., 1982: Umsatz von ^{15}N-Harnstoff und ^{15}N-Ammonsulfatsalpeter mit Zusatz von Dicyandiamid unter anaeroben Bedingungen im Boden. Z. Pflanzenern. u. Bodenkde. 145, H. 6, 557-560