



International  
Fertilizer Industry  
Association



# **Nawozy stabilizowane: możliwość zwiększenia efektywności składników pokarmowych w rolnictwie**

M. E. Trenkel

International Fertilizer Industry Association (IFA)  
Paryż, Francja, 2010

## Spis treści

O książce i jej autorze	3
Skróty, akronimy i symbole	5
1. Definicja inhibitorów ureazy	11
2. Rozwój i produkcja inhibitorów ureazy	11
3. Charakterystyka i typy inhibitorów ureazy	12
3.1. Informacje ogólne	12
3.2. Typy inhibitorów ureazy, dostępne do stosowania	14
3.2.1. NBPT – N-(n-butylo)trójamid tiofosforowy - Agrotain <sup>R</sup>	14
3.2.2. Trójamidy N-fenylofosforowe (2-NPT)	20
3.2.3. Hydrochinon (HQ)	21
3.2.4. Fosforoamid fenylu (PPD/PPDA)	21
4. Zalety i wady inhibitorów ureazy	22
4.1. Zalety	22
4.2. Wady	22
5. Opcje stosowania inhibitorów ureazy	24
6. Aspekty środowiskowe stosowania inhibitorów ureazy	26
7. Zużycie i ekonomika inhibitorów ureazy	28
7.1. Zużycie	28
7.2. Koszty i korzyści związane ze stosowaniem inhibitorów ureazy	28
8. Legislacja i rejestracja	30
9. Badania naukowe nad inhibitorami nitryfikacji i ureazy	31
Dodatek. Producenci i dystrybutorzy inhibitorów ureazy	34
Bibliografia	35

# O książce i jej autorze

## O książce

Książka ta jest poprawioną wersją publikacji IFA pt. „Zwiększenie efektywności wykorzystania nawozów: nawozy o kontrolowanym uwalnianiu składników oraz nawozy stabilizowane w rolnictwie”, tego samego autora, która została opublikowana w 1997 roku. Przeznaczona jest ona do wykorzystania przez przemysł nawozowy, działaczy gospodarczych, kształtujących politykę rolną i naukowców. Głównymi zadaniami tej publikacji są:

- Przedstawienie aktualnego stanu wiedzy naukowej na temat zagadnień, związanych z rozwojem, produkcją oraz stosowaniem nawozów o spowolnionym i sterowanym uwalnianiu składników oraz nawozów stabilizowanych;
- Wyjaśnienie ważnej roli nawozów wolno działających o kontrolowanym stopniu uwalniania składników i nawozów stabilizowanych w poprawie stopnia efektywności wykorzystania substancji odżywczych;
- Przedstawienie dostępnych obecnie produktów nawozowych o spowolnionym i sterowanym działaniu oraz stabilizowanych;
- Ocena aktualnego rynku i perspektyw dla nawozów o spowolnionym i kontrolowanym działaniu oraz stabilizowanych; a także
- Omówienie ram politycznych i prawnych niezbędnych dla maksymalizacji korzyści wynikających ze stosowania nawozów o spowolnionym i kontrolowanym uwalnianiu składników oraz nawozów stabilizowanych.

Książka ta stanowi wkład w starania IFA w promowanie nawożenia poprzez stosowanie właściwych produktów we właściwych dawkach, o właściwym czasie i we właściwym miejscu (IFA, 2009).

**Niniejsze tłumaczenie obejmuje tylko te fragmenty książki, które traktują o inhibitorach ureazy oraz nawozach azotowych stabilizowanych, zawierających inhibitory ureazy.**

## O autorze

Martin Trenkel jest niemieckim naukowcem. Posiada doktorat z zakresu rolnictwa, uzyskany na uniwersytecie Christiana Albrechta w Kilonii, zajmując się głównie zagadnieniami odżywiania roślin i gleboznawstwa.

Martin Trenkel rozpoczął pracę w BASF Aktiengesellschaft w roku 1955, jako doradca rolniczy na zagranicę. Często podróżował, doradzając i wykładając na Bliskim Wschodzie, w Ameryce Łacińskiej, Afryce, Europie i na Dalekim Wschodzie. Od roku 1962 do 1968 pracował w Urugwaju w Wydziale Rolniczym BASF, koordynując usługi rolnicze BASF w Ameryce Łacińskiej (w zakresie nawozów i środków ochrony roślin). W roku 1991 przeszedł na emeryturę, jako dyrektor Wydziału Nawozowego BASF.

Martin Trenkel pełnił także funkcje:

- Przewodniczącego Podkomisji Technicznej FAO/Komitetu Doradczego Przemysłu Nawozowego (FIAC) w Rzymie;
- Przewodniczącego grupy roboczej „ad hoc” FIAC w zakresie marketingu i finansowania branży nawozowej w Rzymie;
- Przewodniczącego Komitetu Technicznego Centre d’Etude de L’Azote w Zurychu;
- Wiceprzewodniczącego Komitetu Rolniczego IFA w Paryżu.

Od roku 1991 Martin Trenkel był, między innymi, konsultantem Organizacji Żywności i Rolnictwa Narodów Zjednoczonych (FAO), Europejskiego Stowarzyszenia Producentów Nawozów (EFMA) oraz Niemieckiej Fundacji na rzecz Rozwoju Międzynarodowego (DSE).

# Skróty, akronimy i symbole

(użyte w książce)

## Skróty

AI	Wskaźnik aktywności
AM	2-amino-4-chloro-6-metylopiramidyna
AS	Siarczan amonowy
ASN	Siarczan azotan amonowy
ATP	Trójfosforan adenozyiny
ATS	Tiosiarczan amonowy
BMP	Najlepsza praktyka zarządzania
CAN	Azotan wapniowo-amonowy
CDU	Cyklo- dwumocznik (produkt kondensacji mocznika i aldehydu octowego)
CEC	Zdolność wymiany kationowej
CLMP	4-chloro-3-metylopirazol
CMP	1-karbamyl-3-metylopirazol
CRF	Nawóz o kontrolowanym uwalnianiu składników
CRN	Azot uwalniany w sposób kontrolowany
CRU	Mocznik uwalniany w sposób kontrolowany
CWI	Nierozpuszczalny w zimnej wodzie
CWS	Rozpuszczalny w zimnej wodzie
DAT	Dni po przesadzeniu
DCD	Dwucyjanodwuamid
DMPP	Fosforan 3,4-dwumetylopirazolu
DMTU	Dwumetyleno trój mocznik
ED	Projekt efektywności
ESN	„Ekologicznie elegancki azot”
EVA	Octan etylenowo winylowy
FBMP	Najlepsza praktyka zarządzania nawozami
GHG	Gaz cieplarniany
HQ	Hydrochinon
HWI	Nierozpuszczalny w gorącej wodzie
HWS	Rozpuszczalny w gorącej wodzie
IBDU	Dwumocznik izobutyldienu
MDU	Dwumocznik metylenu
3-MP	3-metylopirazol
NBPT	N-(n-butyl) trójamid tiofosforowy
NICU	Mocznik powlekany ekstraktem z drzewa Neem/Nimin
NK	Nawóz azotowo-potasowy
NP	Nawóz azotowo-fosforowy

NPK	Nawóz azotowo-fosforowo-potasowy
2-NPT	N-(2-nitrofenylo) trójamid kwasu fosforowego
NUE	Efektywność stosowania substancji odżywczej
PAPR	Fosforyt częściowo zakwaszony
PCF	Nawóz powlekany polimerem lub żywicą
PCU	Mocznik powlekany polimerem lub żywicą
PE	Polietylen
POCU	Mocznik powlekany poliolefiną
PPD/PPDA	Fenylo fosforo dwuamid
PSCF	Nawóz powlekany polimerem i siarką
PSCU	Mocznik powlekany polimerem i siarką
SCF	Nawóz powlekany siarką
SCU	Mocznik powlekany siarką
SNF	Stabilizowany nawóz azotowy
SRF	Nawóz o powolnym uwalnianiu składników
TZ	1H-1,2,4-triazol
UAN	Roztwór saletrzano-mocznikowy (RSM)
UF	Żywica formaldehydowo-mocznikowa

## Akronimy

AAPFCO	Stowarzyszenie Amrykańskich Urzędów Kontroli Żywności Pochodzenia Roślinnego
CEN	Europejski Komitet Normalizacyjny
EPA	Agencja Ochrony Środowiska (USA)
EU	Unia Europejska
FAO	Organizacja Żywności i Rolnictwa Narodów Zjednoczonych
IFA	Międzynarodowe Stowarzyszenie Przemysłu Nawozowego
IFDC	Międzynarodowe Centrum Rozwoju Nawozowego
IPI	Międzynarodowy Instytut Soli Potasowej
IRRI	Międzynarodowy Instytut Badania Ryżu
JMAFF	Japońskie Ministerstwo Rolnictwa, Leśnictwa i Rybołówstwa
REACH	Rejestracja, Ocena, Autoryzacja i Ograniczenia Chemikaliów
TVA	Władze Tennessee Valley

## Symbole

Al	Glin
B	Bor
C	Węgiel
Ca	Wapń
CaCO <sub>3</sub>	Węglan wapniowy
CaSO <sub>4</sub>	Siarczan wapniowy
CH <sub>4</sub>	Metan
Cl	Chlor
Cu	Miedź
Fe	Żelazo
H <sup>+</sup>	Proton
HCO <sub>3</sub>	Wodorowęglan
H <sub>2</sub> O	Woda
K	Potas
KCl	Chlorek potasowy (także sól potasowa lub MOP)
K <sub>2</sub> O	Tlenek potasu
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Siarczan potasowy (także SOP)
Mg	Magnez
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Azot
NH <sub>3</sub>	Amoniak
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Jon amonowy
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Azotyn
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Azotan
N <sub>2</sub>	Azot gazowy
NO <sub>x</sub>	Tlenki azotu
N <sub>2</sub> O	Podtlenek azotu
O <sub>2</sub>	Tlen gazowy
P	Fosfor
S	Siarka
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Siarczan
Zn	Cynk

# Wprowadzenie

Przemysł nawozowy stoi wobec ciągłego wyzwania, jakim jest udoskonalanie produktów celem zwiększania efektywności ich stosowania, szczególnie nawozów azotowych, a także minimalizowania ewentualnego niekorzystnego ich oddziaływania na środowisko naturalne. Osiąga się to bądź poprzez ulepszenie nawozów, będących dotychczas w użyciu, bądź też poprzez opracowywanie nowych, specyficznych typów nawozów (Maene, 1995; Trenkel *et al.*, 1998)

Doskonalenie nawozów, będących już w użyciu, dokonywane jest poprzez odpowiednie zaprojektowanie produktu (Broeckel i Hahn, 2004). Charakter produktu zdeterminowany jest jego właściwościami fizycznymi i chemicznymi, bezpieczeństwem środowiskowym, a także wytrzymałością mechaniczną, higrometrią i temperaturą. W przypadku nawozów stałych, projektowanie nowego produktu skierowane jest głównie na poprawę właściwości związanych z magazynowaniem i transportem (redukcja powstawania pyłu oraz skłonności do zbrylania/higroskopijności).

Osiągnięcie wzrostu efektywności stosowania mineralnych<sup>1</sup> nawozów azotowych (N) nie jest łatwe, gdyż rośliny pobierają normalnie azot w formie jonów azotanowego lub amonowego, poprzez korzenie, z roztworu gleby. Jednak N amonowy, w przeciwieństwie do N azotanowego<sup>2</sup> może być zatrzymany w strukturze gleby, tak więc gleba i rośliny konkurują o N amonowy, obecny już w glebie, lub zaaplikowany (Amberger, 1996). Ta konkurencja dla azotu, z wyjątkiem N azotanowego, stanowi główny problem w przypadku dozowania go jako nawozu mineralnego w celu odżywiania roślin. Jedynie pewna część azotu jest lub może być pobierana przez rośliny dla ich wzrostu.

## **Określenia i obliczenia dotyczące efektywności stosowania azotu (IFA, 2007)**

**Współczynnik produktywności** (kg produktu/kg zastosowanego N): plon na jednostkę użytego N.

**Wydajność agronomiczna** (kg wzrostu produkcji/kg zastosowanego N): wzrost plonu na jednostkę zastosowanego N.

**Efektywność odzysku** ((uprawa nawożona N – uprawa nienawożona N)/ zastosowany N): wzrost plonu w wyniku pobierania N na jednostkę zastosowanego N, zwykle dla pierwszego zastosowania plonu i zazwyczaj wyrażana w procentach lub jako część.

**Efektywność usunięcia** (N w uprawie/zastosowany N): N usunięty przez zebraną porcję plonu na jednostkę zastosowanego N, zazwyczaj wyrażana w procentach lub jako część.

**Efektywność fizjologiczna** (kg wzrostu produktu/kg N w nawozie pobrane):wzrost plonu na jednostkę pobranego N z nawoz.

<sup>1</sup> N stosowany jest na świecie głównie w postaci mocznika, który z chemicznego punktu widzenia nie jest związkiem mineralnym, lecz organicznym. Jednak FAO, tradycyjnie kwalifikuje go jako „nawóz mineralny” w swoich publikacjach, a szczególnie statystykach. W tym opracowaniu stosowana jest terminologia FAO.



<sup>2</sup> N azotanowy nie jest adsorbowany przez cząstki gleby, lecz występuje jako roztwór w glebie, dlatego też może być pobierany przez rośliny, ale także podatny na wypłukiwanie. Jedynie gleby wulkaniczne, np. gleby trumao, wykazują wysoką zdolność adsorpcji anionów, w tym azotanów (Amberger, 2008b)

Z praktycznego punktu widzenia, efektywność stosowania składników odżywczych (NUE) może być określona jako ilość składników odżywczych pobrana z gleby przez rośliny w określonym czasie w porównaniu do ilości składników odżywczych dostępnych w glebie, lub dostarczonych przez nawożenie w tym samym okresie czasu. Poprawa NUE w rolnictwie była istotnym zagadnieniem przez dekady (Dobermann, 2005), i wiele nowych technologii zostało rozwiniętych w ostatnich latach, dla osiągnięcia tego celu. Rodzaje nawozów oraz ich właściwe stosowanie w rolnictwie będzie coraz ściślej monitorowane w celu poprawy globalnego bilansu azotu, zarówno w perspektywie krótko-, jak i długoterminowej.

Najważniejszym zadaniem w przyszłości będzie dalsza poprawa NUE, a ściślej, efektywności stosowania N (Grant, 2005), ponieważ istotna część zastosowanego azotu w nawozie jest tracona w ciągu roku aplikacji. Finck (1992) podaje następujące wskaźniki poboru składników odżywczych z nawozów mineralnych:

- Wskaźnik wykorzystania N z nawozów mineralnych wynosi ok. 50-60% w pierwszym roku.
- Wskaźnik wykorzystania P z nawozów mineralnych wynosi 10-25% (średnio 15%) w pierwszym roku. Kolejne 1-2% będą pobierane w ciągu następujących dekad.
- Wskaźnik wykorzystania K z nawozów mineralnych wynosi ok. 50-60% w pierwszym roku.

Ponieważ znaczna część zastosowanego w nawozach azotu jest tracona w ciągu roku nawożenia, aplikacja N oraz zarządzanie uprawą musi być właściwie ustawione celem maksymalizacji poziomu NUE. Będzie to jednak wymagało przyjęcia rozwiązań promujących wzrost NUE w skali polowej, z naciskiem na technologie, które pozwolą osiągnąć większą zgodność między zapotrzebowaniem upraw a podażą azotu ze wszystkich źródeł – w tym z nawozów, wsadu organicznego oraz zawartego w glebie N (Cassman *et al.*, 2002, Dobermann, 2005).

Praktyki rolnicze, a szczególnie metody nawożenia, muszą mieć na celu wspomaganie upraw w konkurencyjnym systemie gleba – rośliny, osiągając w tym samym najwyższą możliwą efektywność przyswajania składników odżywczych. Wspomaganie to zawiera:

- Promowanie wzrostu korzeni poprzez poprawę struktury gleby (dobra aeracja gleby, magazynowanie i dostarczanie wody), odczyn gleby (wapnowanie), zawartość humusu, zdolność magazynowania rozpuszczalnych składników odżywczych i ich przemieszczania się (Amberger, 1996, 2006; Finck, 1992).
- Wykonywanie analiz gleby i roślin pod kątem substancji odżywczych a także stały monitoring wzrostu i rozwoju upraw (Sturm *et al.*, 1994).
- Dawkowanie ilości składników odżywczych, odpowiadających tak precyzyjnie, jak to możliwe potrzebom upraw i warunkom wzrostu. Można to osiągnąć poprzez wybór najbardziej właściwego typu i dawki nawozu mineralnego z substancjami odżywczymi oraz najbardziej odpowiedniej techniki aplikacji (na przykład umiejscowienie nawozów lub aplikacja pasmowa w strefie korzenia, aplikacja podzielona, czy tak zwane „karmienie łyżeczką”).

Podjęcie kroków celem zmniejszenia możliwych strat substancji odżywczych do

- środowiska (Shaviv, 1993). Imobilizacja, denitryfikacja, ulatnianie się amoniaku oraz

wyplukiwanie dotyczą szczególnie azotu.

Przemysł nawozowy podjął wyzwanie do rozwoju specjalnych typów nawozów, które zapobiegają, a przynajmniej sprzyjają obniżeniu tego typu stratom (Joly, 1993). Te specjalne typy nawozów mogą być wyszczególnione jako:

- Nawozy dolistne;
- Nawozy o spowolnionym i kontrolowanym uwalnianiu składników (powlekane/w kapsułkach), uwalniające składniki odżywcze w czasie ponad kilku miesięcy;
- Nawozy stabilizowane (nawozy połączone z inhibitorami nityfikacji i ureazy), opóźniające bądź to nityfikację jonu amonowego, bądź amonifikację mocznika.

Efektywność wykorzystania substancji odżywczych mogłaby być istotnie poprawiona poprzez stosowanie oprysku dolistnego, gdyż nie występuje wówczas immobilizacja ani wyplukiwanie z gleby. Jednak przy stosowaniu oprysku dolistnego niezbędne jest przeprowadzenie kilku aplikacji, ponieważ jedynie ograniczona ilość substancji odżywczych może być dostarczona w trakcie jednej aplikacji, z uwagi na możliwość spalenia liści i związany z tym problem stężenia. W praktyce, niemożliwe jest ekonomiczne dostarczanie wszystkich niezbędnych substancji odżywczych przez liście roślin (Amberger, 1996).

Innym możliwym sposobem poprawy efektywności wykorzystania substancji odżywczych jest stosowanie tak zwanych „inteligentnych nawozów mineralnych”, szczególnie nawozów azotowych, które uwalniają zawarte substancje odżywcze stosownie do wymagań roślin, tj. stosowanie nawozów o spowolnionym i kontrolowanym uwalnianiu substancji odżywczych, lub „stabilizowanych” nawozów azotowych, które „wstrzymują” substancje odżywcze do czasu, gdy rośliny właśnie ich potrzebują.

Shoji i Gandeza (1992) uważają, że doskonały nawóz powinien mieć jako minimum następujące trzy cechy:

- Pojedyncza aplikacja powinna dostarczyć wystarczającą ilość substancji odżywczych od początku do końca sezonu wzrostu, aby zapewnić zapotrzebowanie roślin dla optymalnego wzrostu;
- Maksymalny odsetek odzysku aby uzyskać największy zwrot nakładów; oraz
- Minimalny niekorzystny wpływ na glebę, wodę i środowisko atmosferyczne.

Nawozy o spowolnionym, a szczególnie kontrolowanym uwalnianiu składników i nawozy „stabilizowane” spełniają w znaczącym stopniu te wymagania stawiane idealnemu nawozowi. Mocznik powlekany poliolefiną (POCU) pod ryż o esowatym uwalnianiu (po raz pierwszy wyprodukowany przez Chissoasahi) umożliwił zastosowanie pojedynczej aplikacji oraz umiejscowionego dozowania (Fujita i Shoji, 1999; Shoji i Takahashi, 1999).

Chociaż nawozy o spowolnionym i kontrolowanym uwalnianiu oraz nawozy stabilizowane mogą przyczynić się do poprawy NUE i zminimalizowania negatywnych efektów środowiskowych, to należy pamiętać, że błędy w gospodarowaniu polem i uprawami nie mogą być naprawione poprzez stosowanie tych specjalnych rodzajów nawozów. Powinny być one zawsze częścią „dobrych praktyk rolniczych” lub „najlepszych praktyk zarządzania (BMP)”.

# 1. Definicja inhibitorów ureazy

Inhibitory ureazy zapobiegają, lub tłumią na pewien okres czasu przemianę azotu amidowego w moczniku do wodorotlenku amonowego i amoniaku poprzez hydrolityczne działanie enzymu ureazy. Przez spowolnienie stopnia, w jakim mocznik hydrolizowany jest w glebie, straty ulatniania się amoniaku do atmosfery (jak i dalsze straty wynikające z wypłukiwania jonu azotanowego) są zredukowane, bądź uniknięte. Stąd efektywność mocznika oraz nawozów azotowych zawierających mocznik (np. roztwór saletrzano – mocznikowy) jest podwyższona, a wszelki negatywny wpływ na środowisko, związany z ich stosowaniem jest zmniejszony.

# 2. Rozwój i produkcja inhibitorów ureazy

Tysiące związków chemicznych określono jako inhibitory ureazy w glebie (Kiss i Simihaian, 2002). Jednak tylko niewielka ilość spośród wielu przebadanych związków spełnia konieczne wymagania nietoksyczności, skuteczności przy niskich stężeniach, stabilności oraz kompatybilności z mocznikiem (zarówno stałym, jak i roztworem), a także degradowanym w glebie i niedrogim. Mogą one być klasyfikowane zgodnie z ich strukturą oraz zakładaną interakcją z enzymem ureaza (Watson, 2000, 2005).

Zaproponowano cztery główne klasy inhibitorów ureazy:

- związki wchodzące w interakcję z grupami sulfhydrylowymi (reagenty sulfhydrylowe),
- hydroksamaty,
- chemikalia chroniące uprawy rolnicze, i
- analogi strukturalne mocznika i związki spokrewnione.

N-(n-butylo) trójamid tiofosforowy (NBPT), fenylofosforodwuamidek (PPD/PPDA) oraz hydrochinon są prawdopodobnie najdokładniej przebadanymi inhibitorami ureazy (Kiss i Simihaian, 2002). Naukowe badania oraz testy praktyczne przeprowadzono także z N-(2-nitrofenylo) trójamidem kwasu fosforowego (2-NPT) oraz tiosiarczanem amonowym (ATS). Związki fosforoorganiczne są analogami strukturalnymi mocznika i jednymi z najbardziej skutecznych inhibitorów aktywności ureazy, poprzez blokowanie aktywnych miejsc enzymu (Watson, 2005).

Spośród producentów inhibitorów ureazy na świecie, obecnie patenty posiadają: Agrotain International (pierwotnie udzielony firmie Freeport McMoRan Resource Partners i IMC-Agrico) oraz SKW Piesteritz. Kolejne badania nad wieloma związkami, skutkujące aplikacjami patentowymi nowych inhibitorów ureazy prowadzone są głównie w Niemczech, Indiach i Stanach Zjednoczonych.

## 3. Charakterystyka i typy inhibitorów ureazy

### 3.1. Informacje ogólne

Stosowanie inhibitorów ureazy powinno stanowić część najlepszych praktyk zarządzania nawożeniem (FBMPs), podobnie jak stosowanie inhibitorów nityfikacji. W światowym rolnictwie, mocznik jest najszerzej stosowanym nawozem N, szczególnie w tropikach. Spośród całkowitego światowego zużycia, wynoszącego 100,9 milionów ton (Mt) azotu w sezonie 2007/2008, około 53,9 Mt (około 53,4%) stanowił azot amidowy w formie mocznika (nie licząc RSM i innych produktów nawozowych, zawierających azot amidowy) (IFA, 2010). To podkreśla potrzebę zarządzania mocznikiem w sposób możliwie najbardziej efektywny.

Mocznik nie jest „optymalnym nawozem”, jeśli chodzi o odżywanie roślin azotem, w porównaniu z azotanem wapniowo-amonowym (CAN), azotanem amonowym (AN)<sup>1</sup> i innymi, jak siarczano-azotan amonowy (ASN). Posiada jednak wiele zalet jeśli chodzi o koszty, transport i przechowanie oraz aplikację. Czołowa pozycja mocznika na światowym rynku nawozów azotowych wynika z niskich kosztów jego produkcji oraz wysokiej zawartości azotu (46% N), również koszty związane z magazynowaniem i transportem są stosunkowo niskie. Ponadto, nie występuje ryzyko pożaru, lub wybuchu. Jednak jego rozpuszczalność powoduje pewien stopień higroskopijności. Cecha ta jest przydatna w produkowaniu nawozów kompleksowych, jak i w aplikacji w formie perełkowej (prills), granulowanej, w roztworze, lub powlekanego.

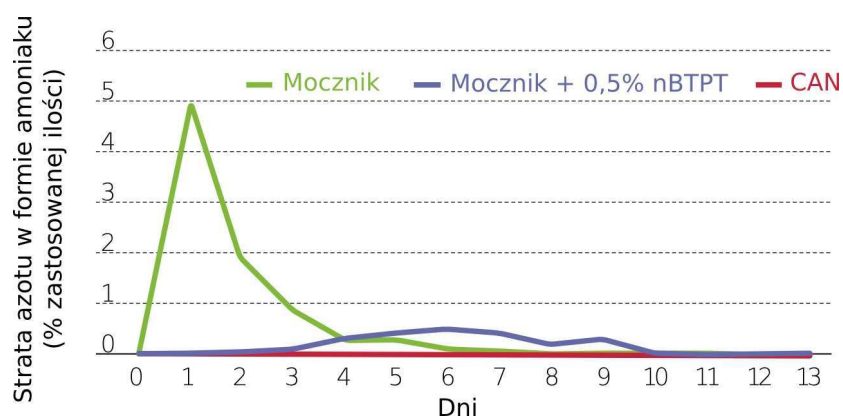
Główną wadę mocznika jako nawozu azotowego stanowią duże straty azotu w formie amoniaku (NH<sub>3</sub>). Wyrażone w procentach w stosunku do zaaplikowanego N, straty te mogą sięgać od 20% (Bundy, 2001), 21% (Basten *et al.*, 2005) aż do 47% (Watson, 2005), albo od 15 do 60% (Cantarella *et al.*, 2005). Na użytkach zielonych straty te mogą sięgać 50% i więcej ilości zastosowanego amoniaku (Amberger, 1996). Straty amoniaku występują przy pH powyżej 7,0. Przy zaaplikowaniu mocznika (albo odchodów/moczu) w wyniku hydrolizy powstaje środowisko alkaliczne, gdy nawóz (lub obornik) styka się z glebą. Dlatego więc tego typu straty azotu z zaaplikowanego mocznika powstaną, gdy nawozy, zawierające mocznik zastosowane zostaną powierzchniowo i nie będą związane bezpośrednio po aplikacji. Bundy (2001) wymienia czynniki odpowiedzialne za te straty:

- brak deszczu lub irygacji po aplikacji,
- pozostałości uprawy na powierzchni gleby,
- wysokie temperatury,
- wysokie pH gleby,
- mała ilość gliny i materii organicznej w glebie (niska zdolność wymiany kationowej),
- aplikacja mocznika do początkowo mokrej gleby, a następnie susza.

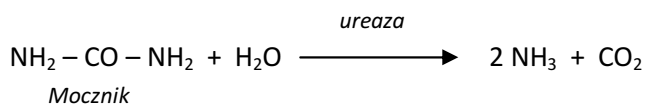
<sup>1</sup> *Kombinacja 50/50 jonów azotanowego i amonowego generalnie stanowi optimum przy odżywianiu roślin azotem*

Jeżeli mocznik lub RSM nie zostanie związany w glebie poprzez opady deszczu lub nawodnienie w ciągu 72 godzin od zaaplikowania (szczególnie bez nawodnienia, lub przy minimalnym nawodnieniu), należy się spodziewać znacznej straty. Jeżeli nie będzie opadów deszczu w ciągu pięciu dni od zaaplikowania mocznika, należy oczekiwać znacznych strat. Jeżeli przynajmniej niewielkie opady deszczu wystąpią po aplikacji – zwłaszcza wiosną – straty amoniaku ulegną istotnemu zmniejszeniu. Strata amoniaku z zaaplikowanego mocznika powstanie także, gdy mocznik będzie zastosowany na nawodnione pole ryżowe (Watson, 2000). Straty amoniaku z zastosowanego mocznika stanowią nie tylko wymierną, ekonomiczną stratę dla rolnika; amoniak wyemitowany do atmosfery powróci z deszczem na ląd i wodę, powodując zakwaszenie i eutrofizację.

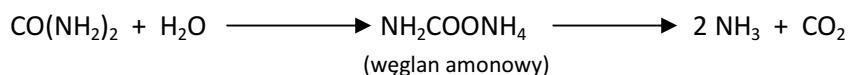
**Wykres 1. Dzielne straty azotu w postaci amoniaku (zaczepnięto z Watson, 2005).**



Chociaż rośliny mogą pobierać i asymilować mocznik bezpośrednio (Watson i Miller, 1996) w krótkim czasie po aplikacji, większa jego część rozpuszcza się w wodzie zawartej w glebie i jest następnie hydrolizowana. Azot amidowy, zaaplikowany do gleby jako mocznik, RSM lub w nawozie NPK, przekształcany jest stosunkowo szybko (w ciągu kilku dni) w amoniak, CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O wskutek obecnego w glebie bakteryjnego enzymu ureazy (Amberger, 1996, 2006). W pierwszej fazie mocznik przekształcany jest w nietrwały węglan amonowy, a następnie w amoniak.



Pełne równanie ma postać:



Aktywność ureazy rośnie wraz ze wzrostem temperatury, stąd hydroliza przebiega całkowicie w ciągu dziesięciu dni w temperaturze 5<sup>o</sup> C, a w ciągu dwóch dni w temperaturze 30<sup>o</sup> C (Vilsmeier i Amberger, 1980). Szybkość hydrolizy związana jest także ściśle z materią organiczną, azotem całkowitym oraz zdolnością wymiany kationowej gleby (CEC), rosnąc wraz ze wzrostem tych czynników.

Przekształcenie to ma dwie negatywne cechy:

- Prowadzi do – czasem bardzo znacznej – straty ulatniania się amoniaku, jeśli mocznik aplikowany jest powierzchniowo – „zjawisko powierzchniowe” (Amberger, 1996; Grant *et al.*, 1996b, Watson *et al.*, 1994a). Tego typu straty amoniaku wystąpią szczególnie na glebach o niskiej zdolności sorpcyjnej, bez szaty roślinnej i o wysokim pH. Długotrwałe susze przy wysokiej temperaturze także sprzyjają stratom amoniaku.
- Może spowodować dotkliwe uszkodzenie sadzonek i kiełkowania przez amoniak i jon azotowy ( $\text{NO}_2$ ) (Watson i Miller, 1996), jeśli ilość mocznika, umieszczonego tuż przy nasionach jest zbyt duża (Grant *et al.*, 1996a). Protonizacja amoniaku do jonu amonowego prowadzi do nieznacznego wzrostu pH ( $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$ ) (Amberger, 2008b).

Wprowadzenie inhibitora ureazy do mocznika, lub nawozu, zawierającego mocznik zapobiegnie, lub opóźni od 7 do 14 dni przekształcenie azotu amidowego w azot amonowy. Jest to szczególnie korzystne na glebach, na których straty amoniaku z zaaplikowanego mocznika są znaczne, na glebach, gdzie inkorporacja mocznika do gleby jest utrudniona, lub niemożliwa, gdy mocznik nie przenika do gleby wskutek suszy oraz gdy, w konsekwencji, nagromadzona jest materia organiczna (Watson, 2005).

Ważnym i stosunkowo nowym polem zastosowania inhibitorów ureazy stają się farmy bydła oraz mleczne, gdzie odchody bydłace stanowią główne źródło emisji amoniaku (Leinker *et al.*, 2005; Varel *et al.*, 1999). Zazwyczaj 60 do 80% azotu z odchodów ulega stracie, bądź wskutek wypłukiwania azotanu, bądź też ulatniania się amoniaku. Ulatnianie się amoniaku, pochodzącego z odchodów bydłacych, bądź świńskich, przyczynia się do powstawania nieprzyjemnego zapachu, wywiera niekorzystny wpływ na środowisko oraz stanowi stratę cennych substancji odżywczych (Amberger, 1996, Watson, 2005). Wykazano, że inhibitory ureazy (NBPT i inne) opóźniają hydrolizę mocznika zawartego w szlamie, moczu, czy odchodach bydłacych, co powoduje redukcję emisji amoniaku z zabudowań i urządzeń inwentarskich i poprawia stosunek N:P z punktu widzenia wzrostu roślin (Varel *et al.*, 1999).

Zastosowanie inhibitorów ureazy, dodanych do mocznika lub RSM zwiększa efektywność tych nawozów i zmniejsza ulatnianie się amoniaku w przypadkach powierzchniowego ich stosowania na gruntach uprawnych, użytkach zielonych i nawodnionych polach ryżowych (Byrnes *et al.*, 1995) oraz zmniejsza toksyczność mocznika wobec nasion (Kincheloe i Sutton, 1996). Inhibitory ureazy umożliwiają rolnikom większą elastyczność w prowadzeniu aplikacji mocznika lub RSM prowadząca do minimalizacji strat ulatniania. Dają one także więcej możliwości związanych z wyborem okresu aplikowania azotu. Nie ma dotychczas inhibitorów ureazy, które byłyby równie łatwe w przechowywaniu i transporcie, jak granulowane nawozy (Weber *et al.*, 2004b). Aktualnie, jedyny na rynku inhibitor ureazy, Agrotain, dostępny jest jako ciecz, lub w formie suchej.

## 3.2. Typy inhibitorów ureazy, dostępne do stosowania

### 3.2.1. NBPT – N-(n-butylo)trójamid tiofosforowy - Agrotain<sup>R</sup>

NBPT jest pochodną butylową trójamidu tiofosforowego. Poza hydrochinonem w Chinach oraz bardzo ograniczonemu stosowaniu ekstraktów z drzewa neem w Indiach, NBPT jest jedynym obecnie

inhibitorem ureazy, liczącym się ze względu na dostępność na rynku i praktyczną wartość dla rolnictwa. Sprzedawany pod nazwą handlową Agrotain<sup>R</sup>, NBPT był początkowo wprowadzony na rynek przez IMC-Agrico w Stanach Zjednoczonych w roku 1996. W 2000 roku, Lange-Stegmann Co. zakupiła akcje i licencje Agrotain i stworzyła oddzielną firmę, Agrotain International, celem rozwoju marketingu Agrotain na świecie. Produkt Agrotain został zarejestrowany w wielu krajach, tj. w Kanadzie, Stanach Zjednoczonych, Brazylii, Australii, Wielkiej Brytanii i Unii Europejskiej i jest dostępny w ponad 70 krajach, w których Agrotain International posiada licencję, lub sprzedał technologię. Licencjonowanymi partnerami są Fertipar Fertilizantes do Parana w Brazylii, Incitec Pivot w Australii, Summit-Quinphos w Nowej Zelandii, Philom Bios w Kanadzie oraz Keytrade Polska w Europie Środkowej.

Agrotain jest bezwodnym, ciekłym preparatem NBPT. Może być on dodawany do stopu mocznika przed granulacją, наносzony na powierzchnie granulek w procesie ciągłym, lub szarżowym, jak też dodawany do RSM. Szczegółowe, zaktualizowane informacje odnośnie dozowania, instrukcji mieszania oraz stosowania zawarte są Poradniku Informacyjnym Produktu, bądź dostępne na stronie internetowej Agrotain International.

NBPT jest związkem nietoksycznym, a jego doustne LD<sub>50</sub> (przeciętna dawka śmiertelna) zawiera się w zakresie 1000 - 4000 mg/kg. Testy Ames (mutacja genów komórkowych i uszkodzenie chromosomów ssaków) w obydwu przypadkach były negatywne (Wilkinson, 1996). Produkt uzyskał zezwolenie EPA. Jest on zarejestrowany jako substancja TSCA (Ustawa o Kontroli Substancji Toksycznych). Jest także zarejestrowany jako „nawóz EC” zgodnie z prawodawstwem Unii Europejskiej, a także zarejestrowany jest w kilku innych krajach. NBPT może być – podobnie jak mocznik – także bezpośrednio pobierany przez rośliny (Watson i Miller, 1996).

Przy stosowaniu NBPT nie stwierdzono występowania ryzyka dla zdrowia lub środowiska. Żadne szczególne środki ostrożności ani ostrzeżenia w przypadku NBPT nie są wymagane, jakkolwiek podstawowe procedury bezpieczeństwa odnośnie magazynowania i transportu oraz stosowania nawozów powinny być zawsze przestrzegane. Działanie NBPT skierowane jest wyłącznie na enzym w glebie, nie wywołując efektu toksycznego, czy też statycznego wobec mikroorganizmów (wewnętrzne dokumenty rejestracyjne Agrotain International).

NBPT podlega rozkładowi do tworzących go pierwiastków: N, P, S, C i H (Byrnes *et al.*, 1989b), i nie ma dowodów na żaden długoterminowy niekorzystny wpływ na produkcję

trawy przy powtarzanych aplikacjach mocznika zawierającego NBPT, jak również nie stwierdzono obniżenia jego skuteczności w przypadku powtarzanego stosowania na tej samej glebie (Watson *et al.*, 1998).

NBPT ewidentnie wykazał swoją zdolność do spowolnienia aktywności enzymu ureazy (Gardner, 1995; Marking, 1995). Jego spowalniające ureazę działanie w glebie związane jest z działaniem jego grup funkcyjnych, z podobieństwem tlenowym, N-(n-butyl) trójamiidu fosforowego (Phongpanet *al.*, 1995). Zapobiega on stratom N wskutek czasowej inhibicji aktywności ureazy (Gardner, 1995; Marking, 1995). Spowalniając katalizowaną przez ureazę przemianę mocznika do amonu, minimalizuje straty amoniaku, daje czas na absorpcję lub rozproszenie form azotu w glebie. Obniżenie ulatniania się amoniaku, wywołanego ureazą, może sięgać od 55 do ponad 99% (Watson *et al.*, 1994a), przy typowej redukcji w zakresie od 75 do 80% w warunkach polowych. NBPT zapewnia

największą korzyść agronomiczną wówczas, gdy nawozy na bazie mocznika są aplikowane powierzchniowo, ponieważ straty amoniaku są istotnie obniżone, co stwarza możliwości zredukowania operacji czaso- i kosztochłonnych. Na przykład, prace irygacyjne, niezbędne dla zapewnienia inkorporacji mocznika, nie muszą być przeprowadzone, dzięki czemu oszczędza się czas i paliwo. NBPT może być stosowany przedsejwnie, pogłównie, lub dolistnie. Ilość stosowanego Agrotain zawiera się pomiędzy 400 a 1100 ppm NBPT; właściwa ilość ustalana jest dla konkretnej uprawy i w oparciu o lokalne warunki. Mocznik, zawierający NBPT w zalecanej ilości spowalnia działanie enzymu ureazy, bez względu na ilość zastosowanego mocznika. W przypadku nawozów mieszanych (blends) mocznik powinien być połączony z inhibitorem przed zmieszaniem z innymi nawozami. Poradnik Informacyjny Produktu, przygotowany przez Agrotain International, dostarcza szczegóły i zalecenia odnośnie stosowania mocznika i RSM.

Według Watsona *et al.* (2008) okres półtrwania NBPT wynosi około sześciu miesięcy dla mocznika obrobionego powierzchniowo i ponad rok w przypadku dodatku NBPT do stopu mocznika przed granulacją. Inni badacze stwierdzili krótsze okresy półtrwania (Kincheloe, 1997b), zależnie od warunków, szczególnie temperatury. Obecnie w praktyce Agrotain stosowany jest głównie powierzchniowo, na granulki mocznika, tuż przed jego wysiewem, dlatego okres półtrwania NBPT nie wpływa ujemnie na wartość użytkową

W przypadku, gdy duża ilość mocznika jest wprowadzona do gleby, mocznik znajdujący się tuż przy nasionach wpływa niekorzystnie na ich kiełkowanie i powoduje spalenie końcówek liści wskutek nadmiernego stężenia amoniaku. Można temu zapobiec, stosując inhibitor ureazy (Malhi *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 1995). Watson i Miller (1996) stwierdzili, że chociaż mocznik z dodatkiem NBPT, wpływającego na aktywność ureazy powodował w pewnym stopniu palenie końcówek liści, to było to zjawisko przejściowe i krótkotrwałe.

W przypadku stałego mocznika, NBPT może być dodane przed lub po granulacji. Można zadozować Agrotain bezpośrednio do stopu mocznika przed granulacją, otrzymując homogeniczny rozkład w całej objętości stałej granulki. Można także powlekać stały mocznik przed, lub w trakcie operacji mieszania (szarżowego, lub ciągłego). Ocieranie się o siebie granulek mocznika w trakcie operacji mieszania powoduje równomierny rozkład NBPT na powierzchni wszystkich granulek. Taka „samodystrybucja” NBPT w procesie mieszania zapobiega potrzebie indywidualnego powlekania każdej granulki. Ciekła formuła produktu Agrotain nie zawiera wody, tak więc właściwości mocznika, związane z magazynowaniem i transportem nie są pogorszone wskutek powlekania. Nie ma różnicy w działaniu NBPT, zdyspergowanego wewnątrz, bądź naniesionego na powierzchnię granulek.

W przypadku ciekłych kompozycji mocznika, jak RSM, NBPT jest po prostu dodawane do roztworu bezpośrednio przed aplikacją. Magazynowanie RSM z dodatkiem NBPT przez dłuższy czas (kilka dni) nie jest zalecane, gdyż produkt może ulegać rozkładowi w obecności wody.

Mocznik stabilizowany NBPT może być stosowany jako prosty nawóz azotowy w postaci stałej, lub ciekłej. Inkorporacja nie jest konieczna nawet w przypadku gleby alkalicznej, może on być także zastosowany przy drugim i trzecim wysiewie na uprawy zbożowe na lekkich glebach piaszczystych a także na użytkach zielonych w późniejszym okresie wzrostu. Badania gleb, przy użyciu szerokiego zakresu typów gleb wykazały, że skuteczność NBPT w obniżaniu ulatniania amoniaku była największa w przypadku gleb o wysokim pH oraz niskiej pojemności buforowej (NBPT rozkłada się szybciej w kwaśnych glebach) (Watson *et al.*, 1994b). Jako, że największe straty amoniaku powstają przy



stosowaniu mocznika bez inhibitora na glebach alkalicznych, NBPT wyraźnie wykazuje znaczny potencjał do poprawienia skuteczności mocznika na łąkach. Ponadto, nie ma dowodów na jakiegokolwiek długotrwałe niekorzystne efekty w produkcji trawy w wyniku powtarzalnego stosowania mocznika z dodatkiem NBPT w okresie ponad trzech lat, jak i żadnego wskazania, że jego skuteczność obniżania strat amoniaku ulega zmniejszeniu wskutek powtarzalnego stosowania na tej samej glebie (Watson *et al.*, 1998).

Produkty firmy Agrotain International do stosowania w rolnictwie obejmują:

- Agrotain – produkt ciekły, bezwodny,
- Agrotain Dry – suchy koncentrat,
- Agrotain Plus – suchy koncentrat,
- Super U – mocznik granulowany zawierający Agrotain Plus.

Agrotain Plus jest suchym koncentratem, zawierającym inhibitor ureazy NBPT plus inhibitor nityfikacji DCD, łatwo miesza się z RSM i jest kompatybilny z większością herbicydów oraz środków powierzchniowo czynnych. Zmniejsza zarówno straty ulatniania amoniaku, jak i straty azotu wskutek denityfikacji i wypłukiwania. Zapewnia lepsze działanie pro środowiskowe poprzez obniżoną emisję podtlenku azotu ( $N_2O$ ) oraz mniejsze wypłukiwanie azotanów do wód gruntowych. Jest on sformułowany jako suchy, stabilizowany koncentrat N do zastosowania w nawozie RSM (28, 30 lub 32%).

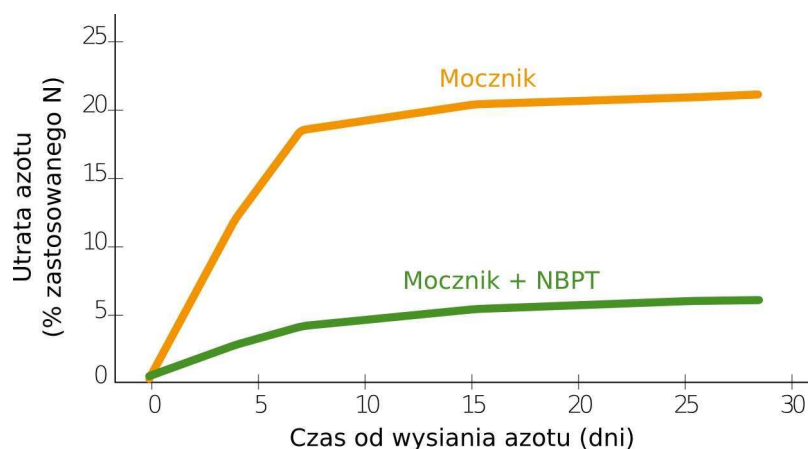
Super U jest mocznikiem granulowanym, zawierającym inhibitor ureazy NBPT plus inhibitor nityfikacji DCD. Super U klasyfikowany jest oficjalnie jako stabilizowany nawóz azotowy.

**Na zdjęciu: Wysiew granulek mocznika powlekanych Agrotain. Inhibitory nie wywołują mechanicznej abrazji, co jest zaletą w przypadku wysiewu o dużej przepustowości (Agrotain International, Wade, 2008).**



Wyniki 50 badań polowych, przeprowadzonych w latach 2002 – 2004 we Francji, Niemczech, Włoszech, Hiszpanii i Wielkiej Brytanii, na uprawach pszenicy ozimej i kukurydzy, testujących NBPT potwierdziły zwiększoną skuteczność stosowania azotu. Optymalna koncentracja NBPT dla uzyskania maksymalnej efektywności dla większości warunków wzrostu na różnych glebach i dla różnych upraw w Europie zawiera się pomiędzy 0,04% a 0,1% NBPT (Basten *et al.*, 2005). Średnio, w 21 próbach polowych przeprowadzonych przez Yara w Niemczech zastosowano azot na pszenicę ozimą w dawce 190 kg/ha, podzielonej na dwie, lub trzy aplikacje; lepsza dostępność N w moczniku + NBPT zwiększyła plony o 2% oraz zawartość protein. Ogólnie rzecz ujmując, efektywność zużycia azotu pochodzącego z mocznika + NBPT była o 7% wyższa w porównaniu do mocznika bez inhibitora (Basten *et al.*, 2005).

**Wykres 2. Redukcja ulatniania się azotu** (Zaczerpnięte od Basten *et al.*, 2005).



Obniżone straty amoniaku i zmniejszona toksyczność pochodząca od amoniaku powodują zwiększenie plonu oraz poprawę jakości zbioru, jeśli porównać zastosowanie mocznika a inhibitorem do mocznika bez dodatku inhibitora. W Brazylii, plon na tropikalnych użytkach zielonych wzrósł o 15%. Cantarella *et al.* (2005) oszacował redukcję ulatniania się amoniaku w Brazylii na poziomie 30 do 90% w przypadku dodatku NBPT do mocznika.

Tabela 1. pokazuje, że zbiory zbóż, uzyskane przy nawożeniu mocznikiem były istotnie niższe od tych, uzyskanych przy stosowaniu mocznika, powlekanego NBPT czy też nawożonych AN. średnie plony ze wszystkich pól wynosiły 7,3 t/ha; dodatek NBPT do mocznika zwiększył plony zbóż o 0,35 t/ha w porównaniu do stosowania samego mocznika. Wzrost plonu przy zastosowaniu saletry amonowej wyniósł odpowiednio 0,47 t/ha. Badania pokazują, że NBPT może być opcją prowadzącą do zmniejszenia strat amoniaku i wzrostu plonów zbóż przy stosowaniu mocznika w produkcji kukurydzy w strefach podzwrotnikowych Brazylii.

**Tabela 1.** Straty amoniaku w wyniku ulatniania się przy powierzchniowym stosowaniu mocznika oraz redukcja strat, wyrażona w procentach, wskutek dodatku NBPT. Wyniki ośmiu eksperymentów polowych na glebach, pokrytych pozostałościami roślin (zaczepnięte od Cantarella, 2005).

Uprawa/Lokalizacja	Ulatnianie się amoniaku (Redukcja wyrażona w procentach w porównaniu do mocznika)	
	Mocznik	Mocznik + NBPT
	% zastosowanego N	
Kukurydza Mococa	45	24 (47)
Kukurydza Rib. Preto	37	5 (85)
Kukurydza Mococa	64	22 (65)
Kukurydza Pindorama	48	34 (29)
Pastwisko 1	18	6 (69)
Pastwisko 2	51	22 (56)
Pastwisko 3	18	3 (83)
Pastwisko 4	18	2 (89)
Średnia	37	15 (60)

**Tabela 2.** Straty amoniaku w wyniku ulatniania się przy powierzchniowym stosowaniu mocznika oraz redukcja strat, wyrażona procentach, wskutek dodatku NBPT. Wyniki eksperymentów polowych na glebach, pokrytych pozostałościami roślin (Cantarella, 2008).

Lokalizacja	Miesiąc	Przeważające warunki pogodowe	Straty NH <sub>3</sub> od			% redukcja dzięki NBPT
			AN lub AS	% zastosowanego N		
				Mocznik	Mocznik-NBPT	
Rib. Preto	czer.	sucho	0,3	15,2	11,2	26
Araras II sierp.	sucho		0,4	16,4	13,4	18
Iracemapolis	wrz.	sucho	0,2	25,4	15,2	40
Araraquara	paźd.	sucho	0,2	25,1	21,3	15
Araras	list.	deszcz	0,1	11,2	7,2	36
Jaboticabal	list.	int. deszcz	0,1	1,1	0,8	-
Pirassununga	gru.	deszcz	0,1	7,2	1,6	78
Średnio			0,2	16,8	11,7	30

Inne wyniki badań Cantarella *et al.* (2009) pokazują wielkość plonu przy dodatku Agrotain do mocznika w porównaniu do mocznika bez inhibitora oraz saletry amonowej jako nielotnego standardu.

**Tabela 3.** Plon kukurydzy z siedmiu prób polowych przy nawożeniu azotem w Brazylii, Nawozy były side-dressed, stosowane powierzchniowo (Cantarella *et al.*, 2009).

Źródło azotu	Wielkość plonu <sup>1</sup> kg/ha	Wzrost wielkości plonu
Mocznik	7054a	-
Mocznik + NBPT	7405b	351
Saletra amonowa	7526b	472

<sup>1</sup>Srednie oznaczone tą samą literą nie różnią się (Tukey,  $p \leq 0,05$ )

Poprawa działania mocznika jest ważna w związku z nowymi technikami produkcji rolnej. Palenie pól trzciny cukrowej może uprościć żniwa i prace polowe, ale jest to coraz częściej zakazane na dużych obszarach Brazylii. Duże ilości pozostałości na powierzchni pól (9 do 15 t/ha suchej masy) często utrudnia prace polowe i sprzyja powierzchniowej aplikacji nawozów, takich, jak mocznik, jednocześnie także przyczynia się do potencjalnych strat przez ulatnianie. Cantarella *et al.* (2009) w oparciu o sześć badań polowych wykazał, że mocznik powlekany NBPT może zmniejszyć straty ulatniania średnio o 30%. Dalsze badania nad dawkami NBPT oraz okresami nawożenia mogą być użyteczne w osiągnięciu dalszego ograniczenia ulatniania amoniaku oraz poprawy wielkości plonów w tej praktyce produkcji.

Zalecenia stosowania nawozów z mocznikiem, zawierających NBPT powinny opierać się na rekomendowanych ilościach azotu dla poszczególnych upraw oraz na najlepszych praktykach zarządzania nawożeniem (FBMPs). Jako że rolnicy stale przedawkowują mocznik celem pokrycia strat ulatniania, NBPT może umożliwić obniżenie stosowanych dawek.

### 3.2.2. Trójamidy N-fenylfosforowe (2-NPT)

Inhibitor ureazy 2-NPT poddany jest procedurom rejestracyjnym w Unii Europejskiej, po uzyskaniu przez SKW Piesteritz rejestracji w Niemczech. Schuster *et al.* (2007) przeprowadził 25 prób polowych, stosując 2-NPT w uprawach zbóż ozimych w latach 2005 i 2006, w różnych miejscach, na różnych typach gleb i warunków wzrostu. Mocznik z dodatkiem 2-NPT porównywany był z mocznikiem bez dodatków oraz z azotanem amonowo-wapniowym (CAN). Mierzono wyniki przyswajania azotu, efektywności odzysku azotu, efektywności stosowania azotu, zawartości prostych protein oraz wielkości plonów. Statystycznie istotny wzrost poboru azotu przez zboża przy stosowaniu mocznika z dodatkiem 2-NPT w porównaniu z mocznikiem bez dodatków zaobserwowano w 10 na 13 prób (2005) i w 11 na 12 prób (2006). Chociaż zawartość prostych protein wzrosła od 0,5 do 2,3% w 21 na 25 prób, wzrost wielkości plonów zaobserwowano w jedynie trzech próbach w roku 2005 i czterech próbach w 2006 roku. Wyniki wskazują na wysoką efektywność biologiczną 2-NPT, stosowanego w niskich stężeniach: 0,05 – 0,10% w stosunku do N i 0,023 – 0,046 w stosunku do mocznika, a także możliwe pośrednie wskazanie obniżonych strat amoniaku.

### 3.2.3. Hydrochinon (HQ)

Hydrochinon (1,4-dwuhydroksybenzol) znany jest jako inhibitor ureazy od 1933 roku (Quastel, 1933), a zostało to potwierdzone przez Conrada (1940).

Wadą hydrochinonu jest jego oczywista toksyczność, przy  $LD_{50}$  w zakresie od 300 do 1300 mg/kg masy ciała, oraz sklasyfikowanie go jako substancji mutagennej i kancerogennej. Kolejną jego wadą jest negatywny wpływ na kiełkowanie. Wczesne badania efektu inhibitowania ureazy przez hydrochinon, prowadzone przez Bremnera i Douglasa (1971, 1973), kontynuowane były przez Bremnera i Krogmeiera (1990), którzy testowali hydrochinon w dawkach 2,5 mg/kg gleby; badania wykazały znaczny negatywny wpływ hydrochinonu na kiełkowanie nasion kukurydzy i pszenicy. Kiss i Simihaian (2002) przeprowadzili wszechstronne badania nad hydrochinonem, jako inhibitorem ureazy. Podkreślili, że duże ilości hydrochinonu stosowane są w Chinach, gdzie zaleca się stosowanie go w połączeniu z DCD (Xu *et al.*, 2000). Xu *et al.* (2005b) stwierdził na podstawie badań doniczkowych, że mocznik z dodatkiem DCD lub DCD + HQ może poprawić wzrost upraw i zredukować straty azotu w postaci podtlenku azotu na plantacjach ryżu. Khanif i Husin (1992) nie stwierdzili znaczących efektów hydrochinonu na bezpośrednio wysianym lub przesadzonym ryżu w porównaniu do mocznika + DCD. Mocznik z dodatkiem hydrochinonu nie wykazywał żadnego znaczącego wpływu na wielkość plonu, pobieranie azotu, czy efektywność stosowania azotu. Hydrochinon jest produktem światłoczułym, co też trzeba brać pod uwagę, stosując mocznik z dodatkiem hydrochinonu.

### 3.2.4. Fosforoamid fenylu (PPD/PPDA)

Przeprowadzono ograniczoną ilość badań nad PPD, i nie ma produktu, dostępnego do praktycznego zastosowania.

## 4. Zalety i wady inhibitorów ureazy

### 4.1. Zalety

Inhibitory ureazy redukują straty amoniaku do atmosfery w wyniku emisji przy pogłównym zastosowaniu mocznika (Watson, 2005), szczególnie, gdy praktykowana jest niepełna orka (Bayrakli i Gezgin, 1996; Wang *et al.*, 1991a, 1991b, 1994). Straty amoniaku do atmosfery mogą być gromadzone w ziemi i w wodzie, powodując eutrofizację i zakwaszenie. Wraz z inhibitorami nityfikacji, inhibitory ureazy – poprzez opóźnienie powstawania amoniaku i dalszej jego nityfikacji – mogą zredukować zawartość azotanów w roślinach i poprawiać jakość odżywczą warzyw i roślin pastewnych.

Gdy mocznik jest wprowadzony do gleby, zazwyczaj hydrolizowany jest dosyć szybko. Jednak rośliny mogą pobierać mocznik przez korzenie jako neutralną cząsteczkę. W takim przypadku, hydroliza przebiega wewnątrz korzenia (soja), lub wewnątrz kielbków (kukurydza) (Hartel, 1977). Zastosowanie inhibitorów ureazy zwiększa dostępność mocznika przez dłuższy okres; bezpośrednie pobieranie mocznika może być ważne ponieważ może prowadzić do wzrostu ilości amoniaku w roślinie. Może to skutkować powstawaniem większej ilości podstawowych aminokwasów, głównie argininy, prekursora poliamid, tak zwanych „wtórnych pośłańców” (Amberger, 2008b). Według Sattelmachera i Gerendasa (1999) zakłada się, że fitohormony, podobnie jak poliamidy odgrywają szczególną rolę w stymulacji wzrostu wywołanej jonem amonowym. Według Marschnera (1986), odżywianie jonem amonowym aktywuje zmodyfikowaną argininą ścieżkę zmian z większym wzrostem ilości poliamin.

Oprócz strat amoniaku z mocznika wysiewanego na uprawy i trawę, istotnym źródłem emisji amoniaku jest bydło. Ledgard (2001) odkrył duże straty azotu z płam moczu na pastwiskach z powodu ulatniania się amoniaku. Inhibitory ureazy mogą ograniczyć straty amoniaku z płam moczu i odchodów oraz zrzutów ścieków z mleczarni, co jest najważniejsze w krajach o dużych powierzchniach pastwisk. Leinker *et al.* (2005) badał efekt stosowania inhibitorów nityfikacji na podłogi mleczarni, w celu ograniczenia strat amoniaku.

Ponieważ zakumulowanie amoniaku zwiększa pH gleby, mocznik może spowodować uszkodzenie sadzonek, spowalniać kiełkowanie (Watson, 2005) oraz powodować spalenie końcówek liści (Edmeades, 2004; Watson i Miller, 1996). Inhibitory ureazy redukują tego typu uszkodzenia, powstające, gdy ilość mocznika, lub zawierającego mocznik nawozu jest w bezpośrednim sąsiedztwie nasion zbyt duża (Grant *et al.*, 1996a; Malhi *et al.*, 2003);

Xiaobin *et al.*, 1994). Watson i Miller (1996) odkryli, że NBPT może powodować nieznaczne przypieczenie końcówek liści. Efekt ten jest jednak przejściowy i krótkotrwały.

### 4.2. Wady

Wzrost wielkości plonu jest niewielki, jeśli mocznik wraz z inhibitorem ureazy zastosowany jest na glebach, bardzo bogatych w azot (Edmeades, 2004). Są też pewne dowody na to, że kombinacja mocznika z inhibitorem może mieć działanie fitotoksyczne, np. przypieczenie końcówek liści (Bremner

i Krogmeier, 1990; Watson, 2005; Watson i Miller, 1996). Nie jest wyjaśnione, czy jest to bezpośredni, lub pośredni wpływ mocznika, czy jest to efekt przejściowy oraz czy występuje on wyłącznie w sytuacji, gdy zastosowano dużą dawkę mocznika i inhibitora. Jednak korzyści wynikające ze stosowania NBPT – redukcja ulatniania amoniaku i wzrost plonów – znacznie przeważają jakkolwiek zauważoną nekrozę końcówek liści.

## 5. Opcje stosowania inhibitorów ureazy

Głównymi zaletami inhibitorów ureazy są:

- Znaczna redukcja strat ulatniania się amoniaku, skutkująca wzrostem dostępnego roślinom azotu w glebie;
- Poprawa efektywności wykorzystania azotu w postaci azotu amidowego;
- Zmniejszenie zakresu niszczenia sadzonek; oraz
- Zmniejszenie emisji tlenków azotu i podtlenku azotu.

Grant *et al.* (1996a) wymienił okoliczności, w jakich NBPT może zwiększyć plony poprzez redukcję strat ulatniania przy powierzchniowym stosowaniu mocznika, lub nawozów, zawierających mocznik. Ma to miejsce, gdy:

- nawożenie azotem limituje wielkość plonu jeśli NBPT nie jest stosowany, oraz
- straty ulatniania z zaaplikowanego azotu są wystarczająco duże, aby wpłynąć na wielkość plonu.

Grant *et al.* (1996a) sformułował wniosek, że „Maksymalne korzyści ze stosowania NBPT mogą być oczekiwane, gdy plon może być potencjalnie wysoki, poziom azotu w glebie jest niski, a warunki glebowe i środowiskowe sprzyjają dużym stratom ulatniania. Jako, że nie można skutecznie przewidzieć z dużym wyprzedzeniem, czy i kiedy warunki środowiskowe będą prowadziły do strat ulatniania, czy uszkodzenia sadzonek, stosowanie NBPT może

pomóc w zmniejszeniu ryzyka szkody, jeśli warunki pogodowe będą niekorzystne. To pomoże poprawić długoterminową ekonomikę produkcji roślinnej”.

Wyniki prób polowych w uprawie kukurydzy w różnych stanach USA przedstawiono w tabeli 4.

**Tabela 4.** Wpływ zastosowanego powierzchniowo nawozu mocznika z dodatkiem i bez dodatku NBPT na wielkość plonów kukurydzy (t/ha), w próbach w Kansas (Lamond *et al.*, 1993, 1994, dane niepublikowane)

Dawka N	Irrigated 1993		Osage Co 1993		N Farm 1994		Sandyland 1994	
	Mocznik	mocznik + NBPT	mocznik	mocznik + NBPT	mocznik	mocznik + NBPT	mocznik	mocznik + NBPT
0	5,08	5,08	1,25	1,25	3,07	3,07	8,97	8,97
67	5,39	6,93	2,76		4,26	4,64	10,91	11,97
135	7,52	8,65	2,76		5,27	6,65	11,91	12,04
202	8,03	8,90	3,89	4,45	6,21		12,29	12,41
Średnio	6,96		3,14		5,52		11,66	12,10
LSD <sup>1</sup> (0,05) średnio	0,69		0,56		0,75		NS	

<sup>1</sup> Odchylenie standardowe



Watson *et al.* (1994b) oraz Watson i Miller (1996) określili zakres stężeń NBPT(0,01, 0,05, 0,1, 0,25 i 0,50 % wagowego NBPT) w celu znalezienia optymalnego stopnia wchłaniania dla użytków zielonych w klimacie umiarkowanym w różnych warunkach środowiskowych. Wzrost stężenia inhibitora powodował spadek strat ulatniania zgodnie z prawem zmniejszającego się zysku.

NBPT był bardzo efektywny w niskich stężeniach w komorach o kontrolowanych warunkach środowiskowych (wykres 19), wykazując około 50% inhibicją przy stężeniu 0,01% (Watson, 2005). Większe ilości inhibitora są użyteczne w bardziej wymagających warunkach polowych oraz gdy pożądana jest zwiększona aktywność inhibicji ureazy. Jedynie w wysokich temperaturach NBPT jest mniej skuteczny (Carmona *et al.*, 1990).

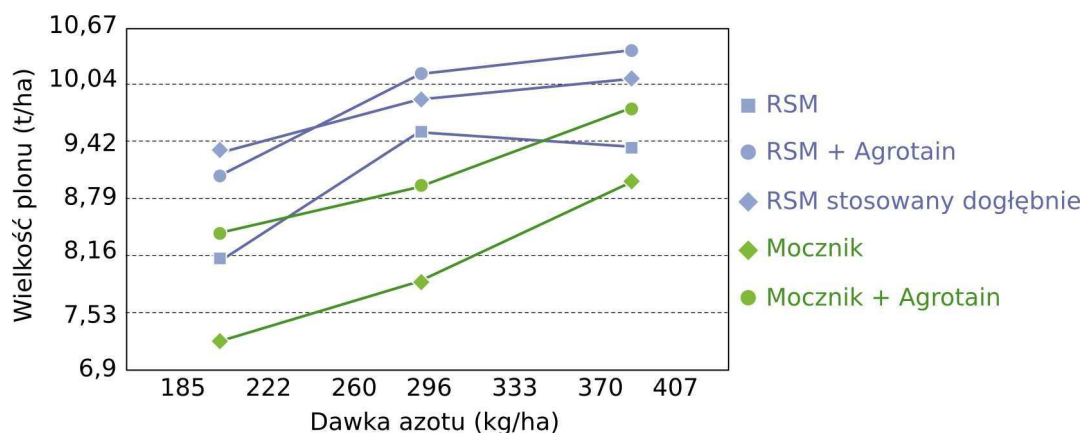
We Włoszech, Palazzo *et al.* (1995) studiowali efekt NBPT w okresie ponad trzech lat prowadząc eksperymenty polowe na uprawach kukurydzy. Stwierdzili, że dodatek NBPT skutkuje znacznym obniżeniem ulatniania się amoniaku.

NBPT okazuje się skuteczny w zmniejszaniu szkód powodowanych przez nawóz będący w kontakcie z nasionami, jeśli warunki są takie, że szkody mogą wystąpić (Xiaobin *et al.*, 1994). Wysokie stężenia amoniaku i azotynów (azot w postaci jonu  $\text{NO}_2^-$ ), będące wynikiem natychmiastowej hydrolizy mocznika, szkodzą kiełkowaniu nasion i wzrostowi sadzonek (Grant i Bailey, 1999; Wang *et al.*, 1995).

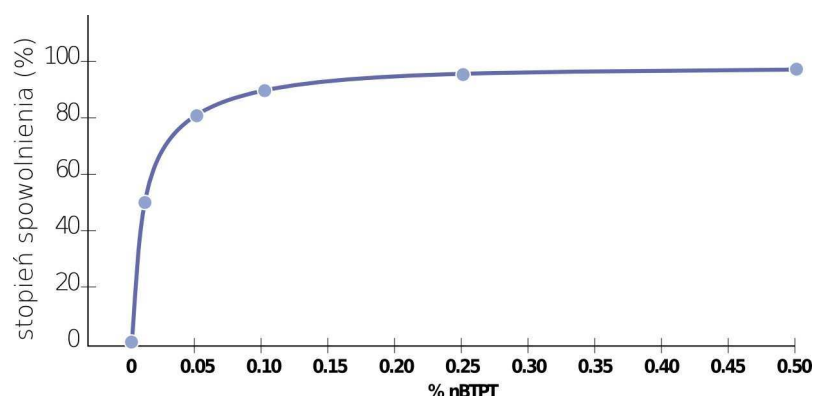
Całkowite zużycie azotu w latach 2007/08 w Zachodniej i Środkowej Europie osiągnęło wielkość 11,6 Mt azotu, głównie w postaci CAN, AN, ASN, AS oraz nawozów NP/NPK (IFA, 2010).

**Wykres 3. Wpływ Agrotain na plony kukurydzy (zaczepnięte od IMC-Agrico, 1996).** Agrotain spowodował wzrost plonów kukurydzy o około 630 kg/ha przy jego zastosowaniu z RSM i o około 940 kg/ha w przypadku stosowania z każdą z dawek mocznika. Wyniki odzwierciedlają badania, przeprowadzone w okresie braku deszczu w ciągu 72 godzin.

Dwuletnie badania Purdue University, Ind.



**Wykres 4. Wpływ różnych poziomów nBTPT (także NBPT) na wyrażone w procentach spowolnienie ulatniania się azotu w formie amoniaku (zaczepnięte od Watson, 2005)**



Z tej ilości, niemal 2 Mt stanowił mocznik oraz 1,2 Mt azotu jako RSM (z tego 0,6 Mt azotu amidowego) – to znaczy w sumie 2,6 Mt azotu amidowego, czyli 22% całkowitego azotu. Jeśli nastąpiłby duży wzrost zużycia nawozów azotowych zawierających azot amidowy wówczas wystąpiłby zarówno potencjał, jak i zapotrzebowanie na inhibitory ureazy w Europie Zachodniej. Nowym możliwym, dodatkowym zastosowaniem NBPT mogłaby być hodowla zwierząt, na użytkach zielonych i pastwiskach. Wtedy jednak, odrębna kompozycja NBPT od mocznika i RSM byłaby konieczna.

## 6. Aspekty środowiskowe stosowania inhibitorów ureazy

Ulatnianie się amoniaku w przypadku stosowania mocznika, lub nawozów, zawierających azot amidowy, a także z kałuż mocz na pastwiskach stanowi największy problem środowiskowy. Jednym z najbardziej obiecujących sposobów obniżenia strat amoniaku do atmosfery i zwiększenia efektywności stosowania mocznika jest użycie inhibitorów ureazy, opóźniających transformację mocznika do jonów amonowych. Wszystkie inhibitory ureazy o praktycznym znaczeniu zmniejszają straty amoniaku przy stosowaniu mocznika i nawozów zawierających mocznik, a NBPT (Agrotain), obecnie lider na rynku, jest bardzo efektywny przy niskich stężeniach. Dodanie NBPT do mocznika może redukować straty amoniaku nawet do 70% w porównaniu do zwykłego mocznika (Watson, 2005). Mimo, że większość badań polowych z użyciem NBPT w Stanach Zjednoczonych nastawiona była na wzrost plonów, straty amoniaku przy stosowaniu mocznika, lub nawozów, zawierających mocznik wynosiły od 5 do 25%. Inne badania wykazały straty na poziomie od 12 do 15%, a niektóre do 30% ilości zastosowanego azotu. Dodatek NBPT zmniejszył straty o 50 do 90%, a średnio o 70%. Chociaż redukcja ulatniania się amoniaku nie zawsze prowadzi do wzrostu plonów, a z pewnością nie na glebach, bogatych w azot (Hendrickson, 1992; Watson *et al.*, 1998), korzyści środowiskowe

pozostają. Dlatego, inhibitory ureazy stanowią potencjalnie użyteczne narzędzie do sterowania, lub redukcji strat związanych z wyłukiwaniem azotanów, jak i strat gazowych azotu z pól uprawnych i użytków zielonych oraz pastwisk (Singh *et al.*, 2004). Halvorson i Del Grosso (2010) zanotowali również istotną (51%) redukcję ulotu  $N_2O$  po zastosowaniu Super U (mocznik zawierający Agrotain Plus) na niezaoranych uprawach kukurydzy.

Schlesinger i Hartley (1992) oszacowali globalny bilans emisji amoniaku do atmosfery. W odniesieniu do emisji, pochodzącej z nawożenia, zestawienie ostatnio przeprowadzonych badań wskazuje, że utrata co najmniej 20% azotu pochodzącego z mocznika i 10% azotu z siarczanu amonowego występuje w krótkim okresie po wysiewie na glebach wyżynnych. Dentener i Crutzen (1994) zastosowali „trójwymiarowy model globalnego cyklu amoniaku” do określenia światowego rozkładu amoniaku i jonu amonowego, wyliczając udział ulatniania na poziomie 15% azotu z zastosowanego mocznika, 2% z saletry amonowej, 8% z siarczanu amonowego i 3% z pozostałych nawozów azotowych. Długoterminowe scenariusze w odniesieniu do emisji amoniaku, podtlenu azotu i metanu do atmosfery, pochodzących z odchodów zwierzęcych i nawożenia w krajach rozwijających się opracowane zostały przez Bouwmana (1995).

Koszty stosowania nawozów o lepszej skuteczności ponoszone są przez sektor rolniczy. Rolnicy oceniają wartość takich nawozów pod kątem wzrostu plonów i obniżenia kosztów produkcji (Grant, 2005). Jednak wzrost produkcji rolnej i ochrona środowiska są na ogół korzyścią zarówno dla rolnictwa, jak i społeczeństwa. W wielu społecznościach korzyści środowiskowe dla społeczeństwa nie są postrzegane jako wartość ekonomiczna, ale w przypadku, gdy są one istotne, część kosztów mogłaby być ponoszona przez społeczeństwo, w postaci środków motywacyjnych skierowanych na rozwój i doradztwo odnośnie nawozów o spowolnionym i kontrolowanym uwalnianiu oraz nawozów stabilizowanych, jak też na zachęcenie rolników do szerszego ich stosowania (Grant, 2005).

#### **Wartość środowiskowa i społeczna (Grant, 2005)**

##### **Korzyści środowiskowe dla społeczeństwa nie zawsze połączone są z korzyściami ekonomicznymi**

- Analiza cyklu życia mogłaby jaśniej zdefiniować wartość;
- Określenie kosztów i korzyści w całym systemie; w tym produkcji, emisji z gospodarstw, transportu i pozostałych wpływów.

##### **Wyjaśnienie wartości dla społeczeństwa**

- Bieżące koszty ponoszone przez przemysł rolniczy;
- Ogólne korzyści zarówno dla rolnictwa, jak i społeczeństwa; korzyści ekologiczne, bezpieczeństwo dostaw żywności, obniżone ceny żywności, poprawiona jakość żywności, zachowanie naturalnego ekosystemu, silna gospodarka rolna.
- Jeżeli korzyści dla społeczeństwa są znaczne, czy część kosztów powinna być ponoszona przez społeczeństwo ?
  - subsydia lub inne zachęty do zastosowania;
  - Wsparcie dla rozwoju i stosownych badań.

## 7. Zużycie i ekonomika inhibitorów ureazy

### 7.1. Zużycie

Jest tylko jeden główny producent (oraz kilka licencji w różnych częściach świata) inhibitorów ureazy, i nie ma danych odnośnie całkowitego światowego zużycia tych produktów.

### 7.2. Koszty i korzyści związane ze stosowaniem inhibitorów ureazy

Podobnie, jak w przypadku obliczeń ekonomicznych dla inhibitorów nityfikacji, obliczenie zwrotu inwestycji dla inhibitorów ureazy wymaga pewnych kluczowych danych (do równania o wielu niewiadomych). Takie dane kluczowe stanowią : dawkę zastosowanego mocznika, lub RSM, reakcja uprawy na azot, wartość uprawy (np. kukurydza wobec pszenicy, czy wobec ryżu), cena sprzedażna zboża oraz koszty związane ze stosowaniem inhibitora ureazy.

Wyniki prób polowych na uprawach kukurydzy i pszenicy, przeprowadzonych dla pomiaru wzrostu plonów w powiązaniu ze stosowaniem inhibitora ureazy NBPT (Agrotain) przedstawiono w tabeli 30.

**Tabela 5.** Wzrosty plonów kukurydzy i pszenicy, związane z dodatkiem Agrotain do mocznika, lub RSM (Agrotain, 2010).

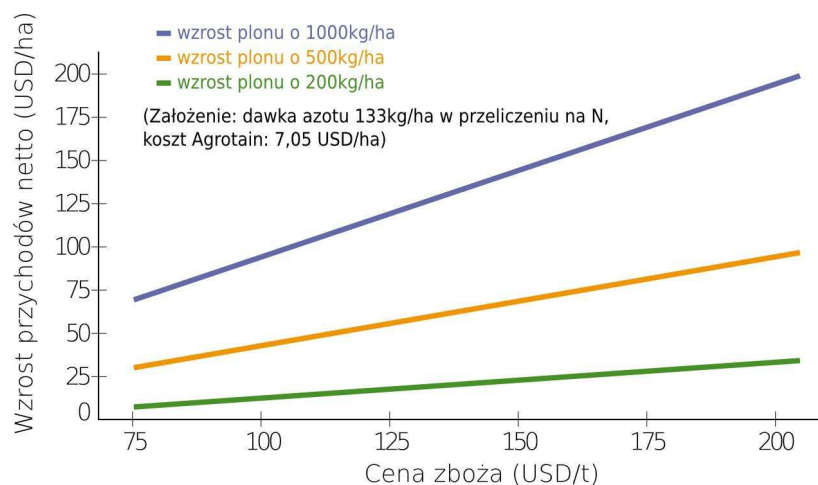
	Reakcja kukurydzy		Reakcja pszenicy	
	Mocznik + Agrotain	RSM + Agrotain	Mocznik + Agrotain	RSM + Agrotain
Ilość pól nawożonych azotem	408	167	64	19
Średnia dawka azotu kg N/ha	133	133	81	84
Wzr. plonu w porówn. do mocznika/RSM kg/ha	842	554	242	330
Średnia dawka azotu kg N/ha	220	220	139	139
Wzr. plonu w porówn. do mocznika/RSM kg/ha	841	552	242	330

Chociaż można tu obliczyć ekonomiczny zysk, to szczególne przykłady, takie, jak powyższy mają zastosowanie tylko dla szczególnych użytych danych wejściowych, gdyż wraz z ich zmianą ulegają istotnym zmianom.

Wykres 5 ukazuje bardziej uniwersalną ilustrację zysku ekonomicznego generalnie w przypadku zbóż. Ilustracja zakłada dawkę mocznika na poziomie 133 kg N/ha, koszt Agrotain na poziomie 53 USD na tonę mocznika i pokazuje trzy różne poziomy wzrostu plonów od 200 do 1000 kg/ha dzięki zastosowaniu Agrotain.

Celem zobrazowania, kropką na wykresie 5 zaznaczono przykładowy zysk finansowy w oparciu o cenę rynkową kukurydzy w Chicago Board of Trade z 1 stycznia 2010 roku i wzroście plonu dzięki Agrotain (842 kg/ha) z tabeli 30 wraz z innymi powyższymi danymi. W takim scenariuszu zysk netto wyniósł 134 USD/ha dzięki zastosowaniu Agrotain. Chociaż nawet niewielki wzrost plonu w ilości 200 kg/ha zapewnia dodatni wynik, istotne zyski mogą być osiągnięte przy większych wzrostach plonów dzięki stosowaniu mocznika z dodatkiem Agrotain, a także wyższych cenach zbóż.

Wykres 5. **Ekonomika nawożenia zbóż mocznikiem z dodatkiem Agrotain** (zaczepnięte od Wade, 2010)



Rolnicy wciąż stosują nadmiar od 13,5 do 18 kg/ha azotu (15 do 20 funtów N na akr) na niezaorane lub w niewielkim stopniu orane uprawy celem skompensowania możliwej utraty amoniaku; ta praktyka nie powinna być kontynuowana (jest to ekologicznie negatywne), a zamiast tego powinien być stosowany inhibitor ureazy. Powyższe obliczenia mogą być użyte jako model dla obliczeń uwzględniających aktualne ceny do określenia możliwego do uzyskania zysku netto, wynikającego ze stosowania mocznika lub RSM z dodatkiem NBPT/Agrotain.

## 8. Legislacja i rejestracja

Każdy nowy inhibitor ureazy, wprowadzany do obrotu w formie aktywnego składnika jako dodatek do mocznika przez dystrybutorów, lub rolników musi być poddany rejestracji jako substancja chemiczna. W przypadku stabilizowanych nawozów, np. mocznika, stabilizowanego dodatkiem inhibitora ureazy, rejestracja przebiega zgodnie z ustawodawstwem dotyczącym nawozów.

Według Komisji Europejskiej, „inhibitory ureazy mogą być zadowalającym rozwiązaniem” w przypadku nawozów azotowych, dla których inhibitory nitryfikacji mogą być nieskuteczne. Zaleca się dodatek inhibitora ureazy, takiego, jak NBPT, który został zarejestrowany przez Komisję Europejską w 2008 roku, na poziomie od minimum 0,09% do maksimum 0,20% w stosunku do całkowitego azotu w moczniku.

W Niemczech zarejestrowano N-(2-nitrofenylo)-trójamid kwasu fosforowego (2-NPT) w 2008 roku. Minimalny i maksymalny udział w stosunku do azotu amidowego to odpowiednio 0,04% i 0,15%.

Przepisy prawne, zgodnie z którymi inhibitory nitryfikacji i ureazy muszą być rejestrowane mają oczywiście znaczący wpływ na przyszłe prace badawcze i rozwój nowych inhibitorów nitryfikacji i ureazy ponieważ koszty z tym związane mogą być czynnikiem decydującym.

## 9. Badania naukowe nad inhibitorami nitryfikacji i ureazy

Kiss i Simihaian (2002) streścili prowadzone szeroko przez ponad dekadę badania nad inhibitorami ureazy. Podobny przegląd badań i rozwoju inhibitorów nitryfikacji dokonany został przez Subbarao *et al.* (2006).

Pożądaną są dalsze badania zależności pomiędzy inhibitorami nitryfikacji a powstawaniem metanu (Gutser, 1999a; Wozniak *et al.*, 1999), ponieważ wywierają one oczywisty wpływ na ulatnianie się metanu (Amberger, 2008b; Bouwman, 1995; Ottow *et al.*, 1999; Weiske *et al.*, 2001b, 2001c; Zerulla *et al.*, 2001a).

Potrzebne jest także zebranie danych na temat skutków stosowania inhibitorów nitryfikacji i ureazy w okresie kilku lat celem udowodnienia, że związki te nie wywierają niepożądanego wpływu na populację bakteryjną gleby (np. wzrost odporności) oraz na produktywność upraw (Suter *et al.*, 2006). Dalszych badań wymagają także czynniki, wpływające na degradację inhibitorów nitryfikacji i ureazy w glebie, takie, jak typ gleby, pH, zawartość humusu, temperatura i wilgotność (irygacja). Przydatne byłoby także

zbadanie efektywności inhibitorów nitryfikacji i ureazy przy powtarzalnym ich stosowaniu przez wiele lat. Trzyletnie badania, przeprowadzone w 15 różnych miejscach wykazały, że powtarzalne stosowanie NBPT nie zmniejszyło jego skuteczności spowalniania ulatniania się (Watson *et al.*, 1998). Efekt spowalniający ureazę, wykazywany przez NBPT związany jest z aktywnością jego pochodnej, analogu tlenowego, N-(n-butylo) trójamidu fosforowego (NBPTO), lecz dotychczas niewiele jest informacji na temat czynników biotycznych i abiotycznych (nieożywionych) mających wpływ na stopień konwersji do NBPTO oraz jego dalszą stabilność w glebie (Watson *et al.*, 2008).

Wraz ze zwiększonym stosowaniem inhibitorów nitryfikacji i spowolnioną przemianą jonów amonowych do azotanów, potrzeba większej ilości badań nad wpływem odżywiania roślin jonem amonowym na ich wzrost i fizjologię. Szczególnie należy zwrócić uwagę na pozytywny wpływ późnego odżywiania jonem amonowym (Gerendas i Sattelmacher, 1995). Istnieją wskazania, że zastąpienie trzech nawożeń azotem jedną aplikacją z inhibitorem nitryfikacji w przypadku pszenicy ozimej może skutkować niższą zawartością prostych protein w ziarnach. Dlatego wskazane jest prowadzenie badań przy użyciu nawozów na bazie saletry amonowej z inhibitorem nitryfikacji i bez niego, celem znalezienia sposobów osiągnięcia dużych plonów zbóż, z zadowalającym poziomem protein (Pasda *et al.*, 2001a i 2001b).

**Fakt absorpcji inhibitora nitryfikacji przez składniki gleby niekorzystnie wpływa na jego zdolność spowalniania nitryfikacji jonu amonowego.** Potrzebne są badania do określenia, które właściwości gleby są w tym procesie istotne, tak aby skrócony efekt spowalniania przez inhibitory nitryfikacji dał się przewidzieć (Barth *et al.*, 1999, 2001). Dalszych badań wymaga także efektywność inhibitorów nitryfikacji i ureazy w warunkach tropikalnych (Azam *et al.*, 2001).

Subbarao *et al.* (2006) wskazuje na potrzebę opracowania inhibitorów nityfikacji nowej generacji, szczególnie takich, które byłyby skuteczne, efektywne kosztowo i przydatne zarówno w warunkach tropikalnych, jak i w klimacie umiarkowanym, a także, o ile wyższe stężenia byłyby wymagane w warunkach tropikalnych (Watson, 2005). Przydatne byłoby uzyskanie bardziej szczegółowych informacji o sposobie działania inhibitorów nityfikacji i ureazy przy ich stosowaniu na nawodnione pola ryżowe.

W przypadku użytków zielonych, wymagane jest przeprowadzenie długoterminowych prób, celem określenia wpływu inhibitorów nityfikacji i ureazy przy ich powtarzalnym stosowaniu, na jakość gleby i wody, a także na zdrowie ludzi i zwierząt (Edmeades, 2004), w tym także wpływu na populację bakteryjną gleby, a szczególnie na bakterie utleniające jon amonowy (Varel *et al.*, 1999). Powstaje również pytanie, czy ciągłe stosowanie DCD (lub innych inhibitorów nityfikacji) nie wywoła odporności bakterii utleniających jon amonowy powodując brak efektywności DCD w dłuższym czasie, oraz czy nie spowoduje innych zmian w dynamice populacji bakteryjnej gleby. Chociaż nie wykryto mierzalnego poziomu DCD w mięśniach pasących się zwierząt, a zaledwie bardzo niewielki poziom DCD wykryto w mleku, potrzeba jest większej liczby badań nad wpływem DCD oraz innych inhibitorów nityfikacji na zwierzęta pasące się. Pożądane są także dalsze badania nad obniżeniem możliwości wpływu inhibitorów nityfikacji na emisję podtlenku azotu ze szlamów.

Odnosnie stosowania inhibitorów ureazy w Europie Zachodniej, ważne jest zdobycie pewności, że produkty te nie zwiększają ryzyka strat mocznika do wód powierzchniowych, ponieważ mogłyby to spowodować wzrost stężenia azotu amonowego powyżej standardów unijnych (Watson, 2005).

W końcu, istnieje potrzeba oszacowania korzyści ekonomicznych dla rolników, wynikających ze stosowania inhibitorów nityfikacji lub ureazy – stosunku wartość/koszt (VCR). Takie samo oszacowanie musi być przeprowadzone wobec oczekiwanych korzyści dla środowiska naturalnego i dla społeczeństwa. Grant (2005) twierdzi, że wciąż istnieje duża potrzeba prowadzenia badań, prowadzących do zdefiniowania i oszacowania zalet stosowania nawozów o spowolnionym i kontrolowanym działaniu oraz nawozów stabilizowanych. Ważne jest ilościowe określenie możliwego zmniejszenia ilości stosowanych nawozów w przypadku stosowania nawozów o spowolnionym i kontrolowanym uwalnianiu oraz nawozów stabilizowanych, dzięki czemu producenci (rolnicy) mogą odzyskać część kosztów, związanych z zakupem tych produktów poprzez stosowanie mniejszych ich ilości. Ważne będzie zidentyfikowanie możliwych korzyści, związanych ze zmniejszonym wyleganiem, zmniejszonym zakresem chorób, kontrolowanym dojrzewaniem, zwiększoną zawartością protein i pierwiastków śladowych, zmianami zawartości tłuszczu i jakości.

Chociaż możliwe korzyści dla rolnictwa i środowiska naturalnego, wynikające z chemicznego sterowania procesu nityfikacji znane są od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku, niewiele starań dołożono dla rozwoju kolejnych generacji inhibitorów nityfikacji (Subbarao *et al.*, 2006). Zasugerowali oni dalsze, intensywne badania nad rozwojem biologicznych inhibitorów nityfikacji (BNI), jako podstawowe zadanie dla uniwersytetów oraz oficjalnych ośrodków i instytucji badawczych.

Wdrażanie do praktyki inhibitorów nityfikacji i ureazy jest zdecydowanie bardziej trudne od rozwoju nowych technologii powlekania, czy nawozów powlekanych, lub kapsułkowanych. Producenci takich materiałów muszą brać pod uwagę koszty, związane z potrzebą badań (tzn. toksyczność wobec



szczurów, myszy itd., rozkład składnika aktywnego, rozkład i toksyczność produktów przemiany materii, badania pozostałości upraw), przeprowadzonych przed zabiegami o rejestrację jako pestycyd, jako nawóz, czy jako dodatek do gleby. Większość producentów nawozowych nie posiada ani odpowiedniego zaplecza badawczego, ani niezbędnych środków finansowych. Rentowność inhibitorów nitryfikacji i ureazy jest dla producentów zbyt niska, aby pokryć koszty działań badawczo – rozwojowych. Koszty i czas, zaangażowane w rozwój nowych, akceptowalnych inhibitorów nitryfikacji i ureazy są takie same, a nawet wyższe od kosztów rozwoju nowego środka ochrony roślin, podczas, gdy finansowy zysk, jakiego można oczekiwać, jest mniej więcej na poziomie tego, jaki uzyskuje się w przypadku konwencjonalnych nawozów. Jest więcej możliwości uzyskania akceptowalnego zwrotu z inwestycji w herbicydy, insektycydy, fungicydy oraz konwencjonalne nawozy, niż z inwestycji w rozwój inhibitorów nitryfikacji, lub ureazy. W związku z tym, są tylko trzy, lub cztery firmy na świecie, które rozwinęły obecnie produkcję inhibitorów nitryfikacji i ureazy, spełniających liczne wymagania związane z ich rejestracją, oraz praktycznym zastosowaniem. Firmy te koncentrują swoje wysiłki na promowaniu dokładnego, bezpiecznego i efektywnego stosowania swoich produktów.

Dalszy rozwój musi uwzględniać priorytet badań nad eko-efektywnością, czyli zharmonizowaniem ekonomiki i ekologii. Tylko przestrzeganie takiej eko-efektywności umożliwi zrównoważony rozwój (Saling *et al.*, 2003), czyli powinno się zapewnić wzrost produkcji upraw oraz ochronę środowiska, z korzyścią zarówno dla rolnictwa, jak i społeczeństwa w ogólności. Jeśli korzyści dla społeczeństwa będą znaczące, część kosztów powinna być przeniesiona na społeczeństwo, możliwie w postaci subsydiów bądź innych zachęt w celu wspierania badań rozwojowych i adaptacyjnych (Grant, 2005).

# Dodatek. Producenci i dystrybutorzy inhibitorów ureazy

## Inhibitory ureazy

---

### Stany Zjednoczone

---

Agrotain International	Inhibitor ureazy NBPT, dystrybuowany pod nazwą handlową Agrotain <sup>R</sup> „Agrotain Plus” jest suchą kompozycją NBPT i DCD przeznaczoną do RSM „Super U” jest powlekanym mocznikiem granulowanym, zawierającym NBPT I DCD
------------------------	--

---

### Europa Zachodnia

SKW Piesteritz	N-(2-nitrofenylo) trójamid kwasu fosforowego (2-NPT)
----------------	--

### Chiny

Hanfeng Evergreen	Hydrochinon (HQ)
-------------------	------------------

---

# Bibliografia

- Amberger, A. (1996): Pflanzenernährung (Plant Nutrition). 4<sup>th</sup> Edition. (German) Uni-Taschenbücher 846, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, Germany.
- Amberger, A. (2006): Soil Fertility and Plant Nutrition in the Tropics and Subtropics International Fertilizer Industry Association, Paris, France; International Potash Institute, Horgen, Switzerland.
- Amberger, A. (2008b): Personal communication.
- Azam, F., Benckiser, G., Müller, C. and Ottow, J.C.G. (2001): Release, movement and recovery of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP), ammonium, and nitrate from stabilized nitrogen fertilizer granules in a silty clay soil under laboratory conditions. *Biology and Fertility of Soils* 34, 118-125.
- Barth, G., v. Tucher, S. and Schmidhalter, U. (1999): Lässt sich die nitrifikationshemmende Wirkung von DMPP auf verschiedenen Böden prognostizieren? (German) VDLUFA-Kongressband 1999, *VDLUFA-Schriftenreihe* 52, 45-448.
- Barth, G., Tucher, S. von and Schmidhalter, U. (2001): Influence of soil parameters on the effect of 3,4-dimethylpyrazole-phosphate as a nitrification inhibitor. *Biology and Fertility of Soils* 34, 98-102.
- Basten, M., Brynildsen, P. and v. Belzen, R. (2005): Stabilized urea for enhanced nitrogen use efficiency. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Bayrakli, F. and Gezgin, S. (1996): Controlling ammonia volatilization from urea surface applied to sugar beet on a calcareous soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 27, 9-10.
- Bouwman, A.F. (1995): Long-term scenarios of livestock-crop-land use interactions for the assessment of environmental indicators in developing countries. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Bremner, J.M. and Douglas, L.A. (1971): Inhibition of urease activity in soils. *Soil Biology and Biochemistry* 3, 297-307.
- Bremner, J.M. and Douglas, L.A. (1973): Effects of some urease inhibitors on urease hydrolysis in soils. *Soil Science Society America Proceedings* 37, 225-226.
- Bremner, J.M. and Krogmeier, M.J. (1990): Effects of urease inhibitors on germination of seeds in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 21.
- Bröckel, U. and Hahn, C. (2004): Product design of solid fertilizers. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(A11), 1453-1457.
- Bundy, L.G. (2001): Managing Urea-Containing Fertilizers. 2001 Area Fertilizer Dealer Meetings, University of Wisconsin-Madison.
- Byrnes, B.H., Vilsmeier, K., Austin, E. and Amberger, A. (1989b): Degradation of the Urease Inhibitor Phenyl Phosphorodiamidate in Solutions and Floodwaters. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 37.
- Byrnes, B.H., Freney, J.R. and Ahmad, N. [eds] (1995): Recent developments on the use of urease inhibitors in the tropics. *Fertilizer Research* 42(1/3).
- Cantarella, H., Quaggio, J.A., Gallo, P.B., Bolonhezi, D., Rossetto, R., Martins, J.L.M., Paulino, V.J. and Alcantara, P.B. (2005): Ammonia losses of NBPT-treated urea under Brazilian soil conditions. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Cantarella, H., Bolonhezi, D., Gallo, P.B., Martins, A.L.M., and Marcelino, R. (2009): Ammonia volatilization and yield of maize with urea treated with urease inhibitor. 16<sup>th</sup> Nitrogen Workshop, Turin, Italy.
- Carmona, G., Christiansen, C.B. and Byrnes, B.H. (1990): Temperature and low concentration effects of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (nBTPT) on ammonia volatilisation from urea. *Soil Biology & Biochemistry* 22, 933-937.
- Cassman, K.G., Dobermann, A. and Walters, D.T. (2002): Agroecosystems, nitrogen use efficiency, and nitrogen management. *Ambio* 31, 32-40.
- Conrad, J.P. (1940): The nature of the catalyst causing the hydrolysis of urea in soils. *Soil Science* 50, 119-134.

- Dentener, F.J. and Crutzen, P.C. (1994): A Three-dimensional Model of the Global Ammonia Cycle. *Journal of Atmospheric Chemistry* 19, 331-369.
- Dobermann, A. (2005): Nitrogen use efficiency – state of the art. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Edmeades, D.C. (2004): Nitrification and Urease Inhibitors – A Review of the National and International Literature on their Effects on Nitrate Leaching, Greenhouse Gas Emissions and Ammonia Volatilisation from Temperate Legume-Based Pastoral Systems. Environment Waikato Technical Report 2004/22.
- Finck, A. (1992): 'Fertilizers and their efficient use'. In: *World Fertilizer Use Manual*.
- Fujita, T. and Shoji, S. (1999): Kinds and properties of Meister fertilizers. In: *Meister controlled release fertilizer – Properties and Utilization*. Shoji, S. (ed). Konno Printing Company Ltd. Sendai, Japan. pp. 13-34.
- Gardner, D. Editor (1995): Fertilizer Additive Stops Nitrogen Loss. *Ag Retailer*, Nov. 1995.
- Gerendás, J. and Sattelmacher, B. (1995): Einfluß des Ammoniumangebotes auf Wachstum, Mineralstoff- und Polyamingehalt junger Maispflanzen. (German) *Z. für Pflanzenernähr Bodenkunde*, 158:299-305.
- Grant, C. (2005): Policy aspects related to the use of enhanced-efficiency fertilizers: Viewpoint of the scientific community. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Grant, C.A. and Bailey, L.D. (1999): Effect of seed-placed urea fertilizer and N-(n-Butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) on emergence and grain yield of barley. *Canadian Journal of Plant Science* 79.
- Grant, C.A., Ferguson, R., Lamond, R., Schlegel, A. and Thomas, W. (1996a): Use of Urease Inhibitors in the Great Plains. Proceedings Great Plains Soil Fertility Conference, Denver, Colorado.
- Grant, C.A., Jia, S., Brown, K. R. and Bailey, L.D. (1996b): Volatile losses of NH<sub>3</sub> from surface-applied urea and urea ammonium nitrate with and without the urease inhibitors NBPT or ammonium thiosulphate. *Canadian Journal of Soil Science* 76(3).
- Gutser, R. (1999a): Langzeitwirkung nitrifikationsgehemmter Stickstoffdünger im Lysimeterversuch (1982-1998). (German) *VDLUFA Schriftenreihe* 52, 465-468.
- Halvorson, A.D. and Del Grosso, St.J. (2010): The effect of Enhanced-Efficiency Fertilizers on Nitrous Oxide Emissions from Various Cropping Systems. IFA International Conference on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Miami. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Hartel, H. (1977): Wirkung einer Harnstoffernährung auf Harnstoffumsatz und N-Stoffwechsel von Soja und Mais. (German) – Dissertation – Research Thesis. Institut für Pflanzenernährung der TU München Weihenstephan.
- Hendrickson, L.L. (1992): Corn yield response to the urease inhibitor NBPT: five years summary. *Journal of Production Agriculture* 5, 131-137.
- IFA (2010): IFADATA Statistics – Production, imports, exports and consumption data for nitrogen, phosphate and potash 1973/74 to 2007/2008. International Fertilizer Industry Association, Paris, France. ([www.fertilizer.org/ifa/Home-Page/STATISTICS](http://www.fertilizer.org/ifa/Home-Page/STATISTICS))
- IMC-Agrico (1996): AGROTAIN urease inhibitor.
- Joly, C. (1993): Mineral fertilizers: plant nutrient content, formulation and efficiency. In: *Integrated Plant Nutrition Systems*. Dudal, R. and Roy, R.N. (eds), FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 12, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Khanif, Y.M. and Husin, A. (1992): Improvement of fertilizer N recovery of rice by dicyandiamide and hydroquinone. Proceedings: International Symposium on Paddy Soils Nanjing, PR China. Academia Sinica, Beijing.
- Kincheloe, S. (1997b): The manufacture, agronomics and marketing of Agrotain.
- IFA Agro-Economics Committee Conference: 'Plant Nutrition in 2000', Tours, International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Kincheloe, S. and Sutton, A.R. (1996): The manufacture, agronomics and marketing of Agrotain. Book of Abstracts, 212th ACS National Meeting. American Chemical Society, Washington, D.C.
- Kiss, S. and Simihaian, M. (2002): Improving Efficiency of Urea Fertilizers by Inhibition of Soil Urease Activity. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

- Ledgard, S.F. (2001): Nitrogen cycling in low input legume-based agriculture, with emphasis on legume/grass pastures. *Plant and Soil* 228, 43-59.
- Leinker, M., Reinhardt-Hanisch, A., Hartung, E. and von Borell, E. (2005): Reducing Ammonia Emissions by Using Urease Inhibitors. *Landtechnik* 6.
- Maene, L.M. (1995): Changing Perception of Fertilizer Worldwide. Fertilizer Industry Round Table, Oct. 1995.
- Malhi, S.S., Oliver, E., Mayerle, G., Kruger, G. and Gill, K.S. (2003): Improving effectiveness of seed row-placed urea with urease inhibitor and polymer coating for durum wheat and canola. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34,1709-1727.
- Marking, S. (1995): No Need to Sweat Urea Losses Anymore. Urease inhibitor delays nitrogen volatilization. *Soybean Digest*, Nov. 1995.
- Marschner, H. (1986): Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London.
- Ottow, J.C.G., Weiske, A. and Benckiser, G. (1999): Einfluß des neuen Nitrifikationshemmstoffes 3,4-dimethylpyrazolophosphat (DMPP) im Vergleich zu Dicyandiamid (DCD) auf die N<sub>2</sub>O- und CH<sub>4</sub>-Emissionen nach wiederholter Anwendung in Feldversuchen. (German) In: *Düngen mit einer neuen Technologie*, 51-55. BASF Aktiengesellschaft, Agrarzentrum Limburgerhof.
- Pasda, G., Hähndel, R. and Zerulla, W. (2001a): The new nitrification inhibitor DMPP (ENTEC) – Effects on yield and quality of agricultural crops. In: *Plant Nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems*. W.J. Horst et al. (eds.) 758-759.
- Pasda, G., Hähndel, R. and Zerulla, W. (2001b): Effect of fertilizers with the new nitrification inhibitor DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) on yield and quality of agricultural and horticultural crops. *Biology and Fertility of Soils* 34, 85-97.
- Palazzo, D., Capotorti, G., Montemurro, F., Sunseri, F. and Vanadia, S. (1995): Applicazione di un inibitore dell'ureasi per la riduzione della volatilizzazione di ammoniaca e l'aumento della produzione in mais (*Zea mays* L.). (Italian). (Application of urease inhibitor to reduce volatilization of ammonia and increase maize (*Zea mays*L.) yield). *Rivista di Agronomia*, 29(2).
- Phongpan, S., Freney, J.R., Keerthisinghe, D.G. and Chaiwanakupt, P. (1995): Use of phenylphosphorodiamidate and N-(n-butyl)thiophosphorictriamide to reduce ammonia loss and increase grain yield following application of urea to flooded rice. *Fertilizer Research* 41(1), 59-66.
- Quastel, J.H. (1933): The action of polyhydric phenols on urease; the influence of thiol compounds. *Biochemical Journal* 27, 1116-1122.
- Saling, P., Pasda, G., Zerulla, W. and Wissemeier, A.H. (2005): Eco-Efficiency of the nitrification inhibitor DMPP. Poster IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt. International fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Sattelmacher, B. and Gerendás, J. (1999): Auswirkungen einer Ammonium betonten Ernährung auf Wachstum und Physiologie der Pflanze. (German) In: *Düngen mit einer neuen Technologie*, 21-27. BASF Aktiengesellschaft, Agrarzentrum Limburgerhof.
- Schlesinger, W.H. and Hartley, A.E. (1992): A global budget for NH<sub>3</sub>. *Biogeochemistry* 15. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Schuster, C., Wozniak, H. and Niclas, H.J. (2007): Erhöhung von N-Entzug und Dünger- N-Ausnutzung bei Harnstoff-Düngung mit einem neuen Ureaseinhibitor. (German) *Pflanzenbauwissenschaften*, 11 (Sonderheft), S. 22-XXX, Eugen Ulmer KG.
- Shaviv, A. (1993): Controlled supply of fertilizers for increasing use efficiency and reducing environmental damage. In: *Optimization of Plant Nutrition*. Fragoso, M.A.C. and Van Beusichem, M.L. (eds). pp 651-656.
- Shoji, S. and Gandeza, A.T. (1992): Controlled release fertilizers with polyolefin resin coating. Kanno Printing Co. Ltd. Sendai, Japan.
- Shoji, S. and Takahashi, C. (1999): Innovative fertilization methods. In: *Meister controlled release fertilizer – Properties and utilisation*. Shoji, S. (ed). Konno Printing Company Ltd. Sendai, Japan.
- Singh, J., Saggar, S. and Bolan, N.S. (2004): Mitigating gaseous losses from pasture soil with urease and nitrification inhibitors. Super Soil – The Regional Institute, New Zealand.

- Sturm, H., Buchner, A. and Zerulla, W. (1994): Gezielter düngen. Integriert – wirtschaftlich – umweltgerecht. (German) (Directed Fertilizer Use – Integrated – Economically – Environmentally sound). Verlags Union Agrar, DLG-Verlags- GmbH, Frankfurt am Main, Germany.
- Subbarao, G.V., Sahrawat, K.L., Berry, W.L., Nakahara, K., Ishikawa, T., Watanabe, T., Suenaga, K., Rondon, M. and Rao, I.M. (2006): Scope and Strategies for Regulation of Nitrification in Agricultural Systems – Challenges and Opportunities. *Critical Reviews in Plant Sciences* 25, 302-335.
- Suri, I.K. (1995): Coating of urea with neem. *Fertiliser News*. 40(8).
- Suter, H., Eckard, R. and Edis, R. (2006): A review of Nitrification Inhibitors and Other Nitrogen Cycle Modifiers in New Zealand Pastoral Agriculture. Report prepared for NZ Pastoral Greenhouse Gas Research Consortium 06/UM/01.
- Trenkel, M.E., Wichmann, W. and Kummer, K.F. (1988): New Challenges for the World Fertilizer Industry with Regard to Agriculture. IFA Agro-Economics Committee, Monte Carlo.
- Varel, V.H., Nienaber, J.A. and Freetly, H.C. (1999): Conservation in cattle feedlot waste with urease inhibitors. *Journal of Animal Science* 77 (5).
- Vilsmeier, K. and Amberger, A. (1980): Umsetzung von Cyanamid, Harnstoff und Ammonsulfat in Abhängigkeit von Temperatur und Bodenfeuchtigkeit. (German) *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 143, 47-54.
- Wade, B. (2008 and 2010) Agrotain International: Personal communication.
- Wang, Z.P., Cleemput, O. van, Demeyer, P. and Baert, L. (1991a): Effect of urease inhibitors on urea hydrolysis and ammonia volatilization. *Biology and Fertility of Soils* 11 (1), 43-47.
- Wang, Z.P., Li, L.T., Cleemput, O. van and Baert, L. (1991b): Effect of urease inhibitors on denitrification in soil. *Soil Use and Management* 7 (4), 230-233.
- Wang, Z.P., Cleemput, O. van and Baert, L. (1994): Movement of urea and its hydrolysis products as influenced by moisture content and urease inhibitors. *Biology and Fertility of Soils* 22 (1/20).
- Wang, X.B., Xin, J.F., Grant, C.A. and Bailey, L.D. (1995): Effects of placement of urea with the urease inhibitor on seedling emergence, N uptake and dry matter yield of wheat. *Canadian Journal of Plant Science* 75, 449-452.
- Watson, C.J. (2000): Urease activity and inhibition – principles and practice. Proceedings 454, International Fertiliser Society, York, UK. pp 40.
- Watson, C.J. (2005): Urease inhibitors. IFA International Workshop on Enhanced- Efficiency Fertilizers, Frankfurt. International Fertilizer Industry Association, Paris, France..
- Watson, C.J. and Miller, H. (1996): Short-term effects of urea amended with the urease inhibitor N-(n-butyl)thiophosphoric triamide on perennial ryegrass. *Plant and Soil* 184, 33-45.
- Watson, C.J., Miller, H., Poland, P., Kilpatrick, D.J., Allen, M. D.B., Garrett, M.K. and Christianson, C.B. (1994a): Soil properties and the ability of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (nBTPT) to reduce ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Biology & Biochemistry* 26 (9), 1165-1171.
- Watson, C.J., Poland, P., Miller, H., Allen, M.D.B., Garrett, M. K. and Christianson, C. B. (1994b): Agronomic assessment and <sup>15</sup>N recovery of urea amended with the urease inhibitor nBTPT (N-(n.butyl)thiophosphoric triamide) for temperate grassland. *Plant and Soil* 161,167-177.
- Watson, C.J., Poland, P. and Allen, M.D.B. (1998): The efficacy of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide for improving the efficiency of urea fertiliser utilisations on temperate grassland. *Grass and Forage Science* 53, 137-145.
- Watson, C.J., Akhonzada, N.A., Hamilton, J.T.G. and Matthews, D.I. (2008): Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Use and Management*.
- Weber, A., Gutser, R. and Schmidhalter, U. (2004b): Effect of New Urease Inhibitors on Gaseous N Emissions (NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O) Following Surface Application to Arable Soil. In: A. Weiske: Greenhouse Gas Emissions from Agriculture – Mitigation Options and Strategies, Proceedings, International Conference, February 10-12, 2004, Leipzig, Germany, pp. 271-272.
- Weiske, A., Benckiser, G. and Ottow, J.C.G. (2001b): The new nitrification inhibitor DMPP – effects on gaseous emissions (N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) from soil under field conditions. In: *Plant Nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems*. W.J. Horst et al. (eds.) 766–767.

- Weiske, A., Benckiser, G. and Ottow, J.C.G. (2001c): Effect of the new inhibitor DMPP in comparison to DCD on nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions and methane (CH<sub>4</sub>) oxidation during 3 years of repeated applications in field experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60, 57-64.
- Wilkinson, C.F. (1996): N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT, Agrotain): A Summary of its Chemistry, Toxicology, Ecotoxicology and Environmental Fate. IMC-Agrico Company, Mundelein, IL.
- Wozniak, H., Michel, H.J. and Fuchs, M. (1999): Nitrification inhibitors for economically efficient and environmentally friendly nitrogen fertilization. In: *Proceedings of the IFA Agricultural Conference on Managing Plant Nutrition*, Barcelona. International Fertilizer Industry Association, Paris, France. pp 182-194.
- Xiaobin, W., Jingfeng, X., Grant, C.A. and Bailey, L.D. (1994): Effects of placement of urea with a urease inhibitor on seedling emergence, N uptake and dry matter yield of wheat. *Canadian Journal of Soil Science*, November 1994, 449-452.
- Xu, Xingkai, Zhou, Likai, Van Cleemput, O. and Wang, Zijian (2000): Fate of urea-<sup>15</sup>N in a soil-wheat system as influenced by urease inhibitor hydroquinone and nitrification inhibitor dicyandiamide. *Plant and Soil*, 220 (1-2).
- Xu, Xingkai, Boeckx, P., Van Cleemput, O. and Kazuyuki, I. (2005b): Mineral nitrogen in a rhizosphere soil in standing water during rice (*Oriza sativa* L.) growth: effect of hydroquinone and dicyandiamide. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 109,107-117.
- Zerulla, W., Barth, Th., Dressel, J., Erhardt, K., Horchler von, Locquenghien, K., Pasda, G., Rädle, M. and Wissemeier, A.H. (2001a): 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) – a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. *Biology and Fertility of Soils* 34, 79-84