

Stickstoffreduzierung in Schweinegülle durch aerobe biologische Aufbereitung

Dr. sc. agr. H. Kühl, Universität Rostock, Sektion Tierproduktion

1. Einleitung

Die industriemäßige Tierproduktion, vor allem die Schweineproduktion in Großanlagen, ist mit einem konzentrierten Anfall von Abprodukten verbunden. Diese Abprodukte enthalten erhebliche Mengen an Pflanzennährstoffen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die großen Stickstoffmengen, die sich in ihnen befinden. Sie können in vielen Fällen wegen fehlender Verwertungsflächen und unzureichender Lagerungsmöglichkeiten nicht sinnvoll genutzt werden. Dadurch wird das vielzitierte Gülleproblem in Territorien mit hoher Tierkonzentration auch zu einem Problem von Stickstoffüberschüssen, verbunden mit umfangreichen Gefahren für die Umwelt, vor allem für die Wasservorräte. Sowohl international als auch national werden verstärkt Bemühungen zur Lösung dieser Stickstoffproblematik unternommen. Dabei werden verschiedene Verfahren untersucht, mit denen eine Stickstoffreduzierung in den Abprodukten der Tierproduktion erreicht werden soll. Die Bemühungen richten

sich besonders darauf, den in der flüssigen Phase der Gülle enthaltenen Ammoniumstickstoff zu reduzieren, weil von dieser Stickstoffkomponente bei einem Überangebot die größten Gefährdungen ausgehen.

2. Untersuchungsbedingungen

Die Ergebnisse zur Stickstoffreduzierung wurden in einer biologischen Aufbereitungsanlage des VEG Tierzucht Losten, Kreis Wismar, unter Produktionsbedingungen ermittelt. Mit dieser Anlage wurde Gülleflüssigkeit nach dem Belebtschlammverfahren aufbereitet. Das Schema dieser Aufbereitungsanlage ist im Bild 1 dargestellt. Tafel 1 enthält einen Überblick über die Substrat- und Prozeßparameter. Nach den Prozeßparametern, besonders aufgrund der geringen Schlammbelastung, besteht nach den Erfahrungen der Aufbereitung kommunaler Abwässer die Möglichkeit, durch den Aufbereitungsprozeß einen Reinheitsgrad der Gülleflüssigkeit von über 90 % und eine Mineralisierung des Belebtschlammes zu erreichen [1]. Gleichzeitig ist bei diesen Belastungsverhältnissen eine Oxydation des Stickstoffs zu erwarten [2].

Der Prozeßablauf bei der biologischen Aufbereitung wies folgende charakteristische Merkmale auf:

- Der Aufbereitungsprozeß war durch eine hohe Überschussschlammproduktion von 1,7 kg je kg BSB₅-Abbau gekennzeichnet.
- Die Schlammvolumina (SV₃₀) in den Belebungsbecken wiesen in über 50 % aller Messungen Werte um 900 ml/l auf, ohne daß eine Schlammrückführung erfolgte.
- Die Anordnung der Belebungsbecken hintereinander führte zu einer Spezialisierung der Belebtschlämme in den Becken, so daß im ersten Belebungsbecken ein weitgehender Abbau der organischen Substanz erfolgte, während im zweiten Belebungsbecken die Nitrifizierung des Ammoniumstickstoffs vor sich ging.
- Die Belebungsbecken waren ständig mit einer unterschiedlich strukturierten Schaumschicht bedeckt, deren Mächtigkeit gelegentlich 1 m betrug.
- Bei dem in den Schlammabscheidern erreichten Eindickungsgrad des Überschussschlammes betrug der Überschussschlamm-anfall über 50 % des Zulaufs.

3. Ergebnisse der Stickstoffreduzierung

Da mit der Stickstoffreduzierung durch die biologische Gülleaufbereitung das Ziel verfolgt wird, die landwirtschaftlich genutzten Verwertungsflächen zu entlasten und eine Gefährdung der Umwelt zu vermeiden, werden die Ergebnisse hierzu unter diesen Aspekten betrachtet. Die Stickstoffreduzierung war dabei im wesentlichen auf zwei Wegen möglich:

- Nitrifizierung des Ammoniumstickstoffs in der Gülleflüssigkeit zu Nitrit und Nitrat und anschließende Denitrifizierung dieses oxydierten Stickstoffs

Hierbei wird der Stickstoff in molekularer Form an die Atmosphäre abgegeben, so

daß es sich bei diesem Vorgang im Hinblick auf die genannte landwirtschaftliche Zielstellung um eine Stickstoffeliminierung handelt.

- Abgabe von Ammoniak an die Atmosphäre

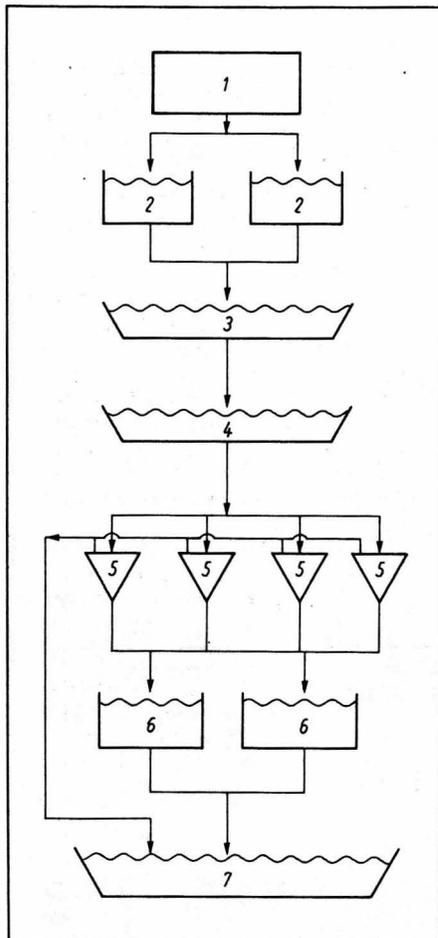
Hierbei handelt es sich zwar um eine Stickstoffreduzierung in der Gülleflüssigkeit, jedoch ist es keine Reduzierung im Sinne der genannten Zielstellung. Da Ammoniak in Wasser gut löslich ist, wird er in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen in unterschiedlicher Entfernung vom Entstehungsort wieder als Nährstoff in den Boden gelangen und dort wirksam. Bei dieser Art von Stickstoffreduzierung erfolgt also keine Entlastung der Umwelt im eigentlichen Sinne, obwohl Verwertungsflächen, die im Bereich der Tierproduktionsanlage genutzt werden, eine Stickstoffentlastung aufweisen können.

Bei dem Prozeß der Gülleaufbereitung sollte die Stickstoffreduzierung demzufolge darauf gerichtet sein, auf dem zuerst aufgeführten Wege eine Stickstoffeliminierung herbeizuführen, um durch die Abgabe von molekularem Stickstoff an die Atmosphäre Folgebelastrungen für die Umwelt zu vermeiden.

Die biologische Aufbereitung der Gülleflüssigkeit führte bei der Realisierung des Aufbereitungszieles zu Veränderungen bei den Anteilen der N-Fraktion (Tafel 2). Der Ammoniumstickstoff, der im Zulauf den überwiegenden Anteil des Gesamtstickstoffs ausmacht, wird beim Aufbereitungsprozeß durch die Bildung von Biomasse zu einem Teil in organisch gebundenen Stickstoff überführt. Dadurch sank der Anteil des Ammoniumstickstoffs am Gesamtstickstoff im ersten Belebungsbecken auf weniger als 50 % ab. Durch die Nitrifizierung des verfügbaren Ammoniumstickstoffs im zweiten Belebungsbecken verringerte sich dessen Anteil am Gesamtstickstoff weiter. Außerdem entstanden bei einem annähernd gleichbleibenden Anteil an organisch gebundenem Stickstoff größere Anteile an oxydiertem Stickstoff. Mit diesem oxydierten Stickstoff ist die Voraussetzung für die Stickstoffeliminierung und die damit verbundene Abgabe von molekularem Stickstoff an die Atmosphäre geschaffen worden.

Diese Vorgänge, besonders die Festlegung des Stickstoffs in organischer Substanz, begrenzen in diesem Prozeß die Möglichkeiten der Stickstoffeliminierung auf dem erstgenannten Wege. Da der organisch gebundene Stickstoff nicht für die Nitrifizierung zur Verfügung steht, kann in den Belebungsbecken im günstigsten Fall weniger als die Hälfte derjenigen Stickstoffmenge nitrifiziert werden, die mit der Gülleflüssigkeit der Aufbereitungsanlage zugeführt wird. Wenn eine weitere Nitrifizierung unter Einbeziehung des organisch gebundenen Stickstoffs erfolgen soll, muß dieser vorher ammonifiziert werden. Dieser Prozeß ist unter den beschriebenen Bedingungen für den Aufbereitungsprozeß in den Belebungsbecken allerdings nicht mit vertretbarem Aufwand möglich. Dabei

Bild 1. Schema der biologischen Gülleaufbereitungsanlage im VEG Tierzucht Losten; 1 Vorstapelbehälter, 2 Dosierbehälter, 3, 4 Belebungsbecken, 5 Schlammabscheider, 6 Behälter zur Schlammeindickung und -lagerung, 7 Speicherbecken für aufbereitete Gülleflüssigkeit



Tafel 1. Ausgewählte Substrat- und Prozeßparameter in verschiedenen Prozeßabschnitten der biologischen Gülleaufbereitung

Merkmal		Zulauf	1. Belebungsbecken	2. Belebungsbecken
BSB ₅	kg/m ³	6,1	—	—
CSV _{Cr}	kg/m ³	8,7	—	—
Trockenmassegehalt	%	0,9	1,2	1,0
pH	—	7,0	8,2	7,5
ST _R	kg/m ³	—	6,2	6,0
BSB ₅ -Belastung	kg/d	—	7331	—
Raumbeschickung	m ³ /m ³ · d	—	0,09	—
Raumbelastung	kg/m ³ · d	—	0,56	—
Schlammbelastung	kg/kg · d	—	0,05	—
Verweilzeit	d	—	11	—

wäre besonders der für den Sauerstoffeintrag in das Substrat notwendige Energieaufwand erheblich.

Der Umfang der Stickstoffreduzierung und -eliminierung war in den einzelnen Abschnitten des Aufbereitungsprozesses unterschiedlich (Tafel 3). Im ersten Belebungsbecken erfolgte die Stickstoffreduzierung wahrscheinlich durch eine Ammoniakemission, da in diesem Belebungsbecken kein oxydierter Stickstoff nachgewiesen werden konnte und durch die hohe organische Belastung des Substrats auch keine günstigen Bedingungen für eine Stickstoffeliminierung über die Nitrifikation vorhanden waren.

Im zweiten Belebungsbecken war die höchste Stickstoffreduzierung im Vergleich zu allen übrigen Prozeßabschnitten zu verzeichnen. Dabei kann davon ausgegangen werden, daß es sich um eine Kombination von Stickstoffreduzierung durch die Ammoniakemission und Stickstoffeliminierung über die Nitrifikation und die anschließende Denitrifikation handelte. Die Ammoniakemission hat hierbei mit großer Wahrscheinlichkeit den gleichen Umfang wie im ersten Belebungsbecken, weil die Bedingungen hierfür in beiden Belebungsbecken vergleichbar waren (Oberfläche des Beckens, pH-Wert u. a.). Die Stickstoffeliminierung in den Schlammabscheidern ist infolge der verhältnismäßig kurzen Verweilzeit des Substrats in diesem Anlagenteil gering. Hier erfolgte die Denitrifizierung eines Teils des im zweiten Becken gebildeten Stickstoffs. Durch den Denitrifikationsvorgang wurde die Funktionsfähigkeit der Schlammabscheider allerdings negativ beeinflusst, da durch die aufsteigenden Gasblasen das Schlammabsetzen behindert wurde.

Während der Lagerung der Aufbereitungsprodukte in den Speichern für aufbereitete Gülleflüssigkeit und Überschussschlamm wurde dann der restliche in den Substraten enthaltene oxydierte Stickstoff denitrifiziert.

Tafel 3. Stickstoffreduzierung im Substrat in den Anlagenteilen der Gülleaufbereitungsanlage

Prozeßabschnitt	N-Gehalt	N-Reduzierung	bezogen	kumulativ
	kg/m ³	im Prozeßabschnitt	auf den N-Gehalt im Zulauf	%
	kg/m ³	kg/m ³	%	%
Zulauf	1,378	—	—	—
1. Belebungsbecken	1,302	0,076	5,5	5,5
2. Belebungsbecken	1,014	0,288	20,9	26,4
Schlammabscheider	0,984	0,030	2,2	28,6
Speicher für aufbereitete Gülleflüssigkeit	0,154	0,086	6,2	34,8
Speicher für Überschussschlamm	0,636	0,108	7,8	42,6

Tafel 2. Anteile der N-Fractionen in den Substraten bei der biologischen Gülleaufbereitung

N-Fraktion	Zulauf	Substrat im 1. Belebungsbecken	Substrat im 2. Belebungsbecken	Ablauf	Überschussschlamm
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
NH ₄ ⁺ -N	0,991	0,614	0,266	0,232	0,236
N-org	0,387	0,688	0,549	0,117	0,899
NO ₂ ⁻ -N	—	—	0,110	0,106	0,125
NO ₃ ⁻ -N	—	—	0,089	0,089	0,070
N _{ges}	1,378	1,302	1,014	0,544	1,330

Insgesamt sind durch die Aufbereitung der Gülleflüssigkeit 42,6% des im Zulauf enthaltenen Stickstoffs aus diesem Medium entfernt worden. Dabei kann davon ausgegangen werden, daß von der im Zulauf enthaltenen Stickstoffmenge in den einzelnen Prozeßabschnitten bis zu 11% dieser Menge als Ammoniak in die Atmosphäre gelangten und rd. 31% als molekularer Stickstoff aus den Substraten eliminiert wurden. Dieses Verhältnis ist aus den Anteilen der verschiedenen Stickstoffverbindungen in den einzelnen Prozeßabschnitten abzuleiten. Darüber hinaus wurde durch den Aufbereitungsprozeß eine wesentliche Verringerung der Menge an Ammoniumstickstoff erreicht und damit die Gefährdung des Grundwassers vermindert. So befinden sich in den Aufbereitungsprodukten Überschussschlamm und aufbereitete Gülleflüssigkeit nur noch 23,6% der Menge an Ammoniumstickstoff, die in der Gülleflüssigkeit vorhanden war.

4. Bewertung der Verwertungseigenschaften der Aufbereitungsprodukte

Bei der Trennung des Substrats, das sich in den Belebungsbecken gebildet hat, entstanden mit dem Ablauf und dem Überschussschlamm zwei Aufbereitungsprodukte, die sich in ihrem Stickstoffgehalt und in der Stickstoffbindung und damit in ihren Verwertungseigenschaften wesentlich von dem Ausgangsprodukt unterscheiden.

In der aufbereiteten Gülleflüssigkeit (Ablauf) ist eine erheblich geringere Stickstoffkonzentration zu verzeichnen als in der zugeführten Gülleflüssigkeit (Tafel 2). Werden die Anteile an oxydiertem Stickstoff in der aufbereiteten Gülleflüssigkeit, die bei der anschließenden Lagerung denitrifiziert werden, verglichen, so sind die Anteile der Stickstoffverbindungen in ihr mit denjenigen im Zulauf vergleichbar. Demzufolge kann angenommen werden, daß die aufbereitete Gülleflüssigkeit bei der Verwertung in ihrer Wir-

kungsweise und ihren Nährstoffäquivalenten mit der Gülle vergleichbar ist. Allerdings ist wegen ihres erheblich verringerten Nährstoffgehalts der Bedarf an Verwertungsflächen geringer.

Anders sieht es dagegen bei der Stickstoffkonzentration und den Anteilen der Stickstoffverbindungen im Überschussschlamm aus. In diesem Aufbereitungsprodukt liegt der Stickstoff, ebenfalls bei Vernachlässigung der einer Denitrifikation unterliegenden oxydierten Stickstoffanteile, zu annähernd 80% in organischer Bindung vor. Dadurch ergibt sich im Überschussschlamm eine Relation der Stickstoffkomponenten, die mit derjenigen im Stallmist vergleichbar ist. Hieraus resultieren für die Verwertung des Überschussschlamms in der Pflanzenproduktion völlig andere Aspekte für die Düngewirkung als für die Verwertung der Gülle.

Bei einer weiteren Eindickung des Überschussschlamms während der Lagerung sind in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt auch Nährstoffkonzentrationen in ihm zu erreichen, die denjenigen im Stallmist nahekommen oder sie sogar übertreffen (Tafel 4). Allerdings verändert sich bei der Lagerung des Überschussschlamms die Relation der Stickstoffanteile durch weitere Abbauprozesse geringfügig, wobei jedoch der organisch gebundene Stickstoff den größten Anteil behält. Daher kann der Überschussschlamm wie Stallmist in die Maßnahmen zur organischen Düngung eingeordnet werden.

5. Beurteilung der Ergebnisse

Durch die Aufbereitung der Gülleflüssigkeit konnten im Hinblick auf die Stickstoffproblematik zwei wesentliche Ergebnisse erreicht werden:

- Mit der Inkorporation von Stickstoff in organischer Substanz durch den Aufbereitungsprozeß konnten die Gefährdungen, die durch einen hohen Anteil an Ammoniumstickstoff in der Gülle entstehen kön-

Tafel 4. Nährstoffgehalt im Überschussschlamm in Abhängigkeit von seinem Trockenmassegehalt

Nährstoff	Nährstoffgehalt in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt in kg/t		
Trockenmasse	43,8	229,4	385,5
organische Trockenmasse	34,2	113,8	243,9
Gesamt-N	3,8	10,8	20,2
NH ₄ ⁺ -N	1,2	2,0	2,6
N-org	2,6	8,8	17,6
K	0,8	0,9	1,3
P	1,3	12,9	15,5

nen, erheblich verringert werden. Außerdem wird mit dem hohen Anteil an organisch gebundenem Stickstoff in den Aufbereitungsprodukten, besonders im Überschußschlamm, eine langsam wirkende und dadurch länger verfügbare Stickstoffquelle in den Boden eingebracht. Da die Intensität der Umsetzung des organisch gebundenen Stickstoffs im Boden außerdem temperaturabhängig ist, besteht die Gefahr von Stickstoffverlusten und damit die Gefährdung des Grundwassers nicht mehr in dem Maße wie bei Gülle, weil in der kalten, vegetationslosen Jahreszeit auch die Stickstoffumsetzung gering ist.

- Durch den beschriebenen Aufbereitungsprozeß konnte eine bedeutsame Stickstoffmenge reduziert werden, wobei der überwiegende Anteil des reduzierten Stickstoffs als molekularer Stickstoff eliminiert wurde.

Als Nachteil ist anzusehen, daß der Prozeß der Stickstoffeliminierung nicht so gesteuert werden konnte, wie es im Interesse einer hohen Effektivität des Prozesses wünschenswert gewesen wäre. Verbesserungen in dieser Hinsicht sind vorrangig durch solche Veränderungen der Prozeßführung zu erwarten, die eine direkte Einflußnahme auf die Nitrifikation ermöglichen (z. B. Erhöhung des Schlammalters u. a.). Allerdings dürfte die hohe Schlammabgabe bei diesem Verfahren der Gülleaufbereitung und die damit verbundene Festlegung des Stickstoffs in organischer Form die wesentliche Erhöhung einer effektiven Stickstoffeliminierung begrenzen.

6. Zusammenfassung

Die Stickstoffreduzierung in der Gülle durch aerobe biologische Aufbereitung wurde unter Produktionsbedingungen untersucht. Dabei zeigte sich, daß bei diesem Verfahren

eine erhebliche Schlammproduktion zu verzeichnen ist, die die Möglichkeit einer effektiven Stickstoffeliminierung begrenzt. Der Gesamtumfang der Stickstoffreduzierung betrug 42,6%, wobei der größte Teil dieser Menge umweltfreundlich als elementarer Stickstoff eliminiert wurde. Von ebenso großer Bedeutung wie die Stickstoffeliminierung ist die Festlegung des größten Anteils des in den Aufbereitungsprodukten verbleibenden Stickstoffs in organischer Bindung, weil dadurch eine potentielle Gefährdung des Grundwassers vermindert wird.

Literatur

- [1] Randolf, R.: Kanalisation und Abwasserbehandlung. Berlin: Verlag für Bauwesen 1974.
- [2] Uhlmann, D.: Hydrobiologie. Jena: Gustav-Fischer-Verlag 1982. A 5878

Landtechnische Dissertationen

Am 3. Juli 1989 verteidigte Dipl.-Ing. Gerhard Lüth an der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg seine Dissertation A zum Thema „Untersuchung einer Pflugfurchen erfassenden optischen Meßeinrichtung zur automatischen Lenkung mobiler landwirtschaftlicher Aggregate“

Gutachter:

Prof. Dr. sc. techn. L. Kollar, Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg
Dozent Dr. sc. techn. Michaelis, TU „Otto von Guericke“ Magdeburg
Dozent Dr. sc. techn. Franke, TH Ilmenau.

Schwerpunkte der Aufgabenstellung waren die optische Erfassung von Pflugfurchen, die perspektivisch multivalente Nutzbarkeit der Lösung und der Einsatz hochintegrierter Mikrorechner für die Informationsverarbeitung. Dazu wurden anhand verfügbarer Kennwerte zur Remission an Bodenoberflächen sowie der auf das Meßobjekt einfallenden Lichtstrahlung prinzipielle Schlüsse auf das Meßverfahren gezogen. Der realisierte und erprobte Sensor enthält eine CCD-Zeile L 133 C als Meßwandler und einen programmierbaren Meßrechner (UB 882/U 2716). Die

multivalente Nutzbarkeit wird durch eine anwenderspezifische Software gesichert. Bei der Erprobung der Sensor-Hardware wurden die geforderten Kennwerte erreicht und die Vorgaben für die Sensor-Software zur Erfassung von Pflugfurchen zur automatischen Lenkung mobiler landwirtschaftlicher Aggregate ermittelt. Die Erprobung am Versuchstraktor ZT 323 unter Praxisbedingungen bestätigte die funktionelle Eignung des Sensors. Im Ergebnis der Versuchsauswertung wurden Schlußfolgerungen zur Verbesserung des Sensors formuliert.

Am 7. Juli 1989 verteidigte Dipl.-Ing. Heinz Linkert an der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg seine Dissertation A zum Thema „Beitrag zum maschinellen Dosieren von Blumenkohl aus Haufwerken“

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. J. Leuschner, Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg
Prof. Dr. sc. techn. P. Jakob, Humboldt-Universität Berlin
Dr.-Ing. H. Kubitz.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein optimales Arbeitsprinzip zum gutschonenden und energiesparenden Dosieren von Blumenkohl aus Haufwerken zu finden.

Zur Lösungsfindung wurde folgender Weg

beschritten:

- Analyse des Standes der Technik
- Untersuchungen zu Kräften im Haufwerk und zu ausgewählten Haufwerks- und Stoffkenngrößen von Blumenkohl
- Simulation möglicher Haufwerkszusammensetzungen in Abhängigkeit vom Ernteverfahren
- Auffinden des optimalen Dosierprinzips mit Hilfe eines konstruktionssystematischen Variantenvergleichs
- Bewerten der Arbeitsergebnisse anhand bekannter Kriterien (Dosiergenauigkeit und -gleichmäßigkeit, Belegung der Förderbänder).

Die gefundene Lösung (Gutstromteiler)

wurde patentiert.

Das Blumenkohlaufwerk wird mit Hilfe des Gutstromteilers hinreichend genau halbiert, wobei die Dosiergenauigkeitswerte unabhängig von Haufwerks- und Stoffkenngrößen sowie Betriebsparametern sind.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Dosiergleichmäßigkeit zeigten, daß diese durch aktive Arbeitselemente (Egalisiererelemente) verbessert werden muß. Ein signifikanter Zusammenhang besteht nur zur Schichthöhe auf dem Zuführband.

Weiterhin existiert Signifikanz zwischen der Schichthöhe auf dem Zuführband bzw. der Querrförderbandgeschwindigkeit und der Belegung der Förderbänder.

Am 14. Juni 1990 verteidigte Dipl.-Ing. Gabriela Krüger an der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg ihre Dissertation A zum Thema

„Untersuchungen zum Einsatz stahlsubstituierender Materialien zur Nutzungsdauererhöhung von Standausrüstungen in Tierproduktionsanlagen“

Gutachter:

Prof. Dr. sc. techn. D. Rössel, Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg
Prof. Dr.-Ing. E. Rast, Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg

Dozent Dr.-Ing. B. Lüpfer, Humboldt-Universität Berlin.

Die Aufgabenstellung leitete sich aus der volkswirtschaftlichen Notwendigkeit ab, die Betriebsdauer landtechnischer Anlagen zu verlängern und die Zuverlässigkeit der Ausrüstungen zu erhöhen. Vergleichende Schadensanalysen ermittelten eine Grenznutzungsdauer von 6 bis 10 Jahren für Standausrüstungen. Hauptschadensarten sind Korrosion und Verschleiß im Fußbodenbereich von Stützelementen. Nach Analysen verschiedener einsetzbarer Substitutionsmaterialien und vertiefenden Untersuchungen

zum chemischen Verhalten ausgewählter Bau- und Werkstoffe im Wechseltauchversuch ergab sich der Sonderbaustoff Feinkornbeton als Vorzugsvariante. Aus diesem werden zwei haltungstechnische Elemente entwickelt. Die Trennung der Gewerke Bau und Ausrüstung und der lösbare Verbund der Elemente untereinander wurden durch diese Lösung realisiert. Belastungsmessungen und statische Berechnungen waren die Grundlage für die Dimensionierung. Ein Material- und Kostenvergleich mit der bestehenden Technik weist die möglichen Einsparungen je Rekonstruktionsmaßnahme aus.