

# **FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK**

des Arbeitskreises Forschung und Lehre  
der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG)

237

Andreas Walter

## **Untersuchungen an Werkzeugen für die Direkteinbringung von Flüssigmist in Grünland**

Dissertation

Hohenheim 1993



Institut für Agrartechnik  
Lehrstuhl Grundlagen der Landtechnik  
Universität Hohenheim  
Prof. Dr.-Ing. H. D. Kutzbach

# **Untersuchungen an Werkzeugen für die Direkteinbringung von Flüssigmist in Grünland**

Dissertation  
zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Agrarwissenschaften  
der Fakultät IV - Agrarwissenschaften II  
Agrarökonomie, Agrartechnik und Tierproduktion

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. agr. Andreas Walter**  
Stuttgart

Hohenheim 1993

Die vorliegende Arbeit wurde am 01.06.1993 von der Fakultät IV  
- Agrarwissenschaften II, Agrarökonomie, Agrartechnik und  
Tierproduktion - der Universität Hohenheim als Dissertation  
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften  
angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung : 24.08.1993  
Dekan : Prof. Dr.-Ing. A. Stoppel  
Berichterstatter, 1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach  
Mitberichterstatter, 2. Prüfer: Prof. Dr. K. Köller  
3. Prüfer: Prof. Dr. T. Jungbluth

© 1993 im Selbstverlag

ISSN 0931-6264 D100

Bezugsquelle: Institut für Agrartechnik  
Universität Hohenheim  
Garbenstr. 9  
70599 Stuttgart

Alle Rechte, auch die der Übersetzung und des Nachdruckes sowie jede  
Art der photomechanischen Wiedergabe, auch auszugsweise, bleiben  
vorbehalten.

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Grundlagen der Landtechnik des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim in den Jahren 1991 - 1993. Die Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des von der DFG geförderten Sonderforschungsbereiches 183 "Umweltgerechte Nutzung von Agrarlandschaften" durchgeführt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. H. D. Kutzbach für die Anregung zu dieser Arbeit, deren wissenschaftliche Betreuung sowie für die mir zugestandene Selbständigkeit in der Bearbeitung des Projekts.

Herrn Prof. Dr. K. Köller danke ich für die Übernahme des Mitberichts und Herrn Prof. Dr. T. Jungbluth für die Mitprüfertätigkeit.

Allen Mitarbeitern des Instituts für Agrartechnik, in Werkstatt, Meßtechnik und Zeichenbüro, sowie den studentischen Hilfskräften, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, sei an dieser Stelle ebenso gedankt wie den Firmen, die durch ihre Unterstützung die Forschungsarbeit ermöglichten.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Kollegen für die gute Zusammenarbeit und manch wertvollen Hinweis für die Arbeit bedanken. Besonders Herrn Dipl.-Ing. agr. Roland Falk sei für die reibungslose Zusammenarbeit innerhalb des Forschungsprojekts gedankt.

Hohenheim, im September 1993

Andreas Walter



	<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
	Formelzeichen	7
1	Einleitung	9
2	Problemstellung und Lösungsansatz	11
3	Verfahren der Gülleinjektion auf Grünland	18
3.1	Tiefinjektion	18
3.2	Flachinjektion	20
3.3	Einfachinjektion	21
4	Bisherige Untersuchungen zur Direkteinbringung von Flüssigmist	23
4.1	Untersuchungen in Nordamerika	23
4.2	Untersuchungen in Deutschland	24
4.3	Spezielle Untersuchungen auf Grünland in Europa	27
5	Theoretische Grundlagen	34
5.1	Kräfte am Injektionswerkzeug	34
5.2	Ausbringbare Flüssigmistmenge	38
5.3	Zugleistungsbedarf eines Flüssigmistinjektors für Grünland	40
6	Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung	44
6.1	Kraftmeßeinrichtung	46
6.1.1	Kalibrierung der Kraftmeßeinrichtung	48
6.2	Messung der ausgebrachten Flüssigmistmenge	53
6.2.1	Kalibrierung der Flüssigmistpumpe	54
6.3	Messung der Arbeitstiefe	55
6.3.1	Kalibrierung des Ultraschallsensors	56
6.4	Messung der Fahrgeschwindigkeit	57
6.5	Meßwerterfassung	58
6.6	Untersuchte Injektoren	59
6.7	Versuchsstandorte	61
6.8	Versuchsdurchführung	62

7	Versuchsergebnisse	63
7.1	Kräfte am Injektor	63
7.1.1	Einfluß der Bauart und der Arbeitstiefe	63
7.1.2	Einfluß der Bodenfeuchte	70
7.1.3	Einfluß der Fahrgeschwindigkeit	75
7.2	Ausbringbare Flüssigmistmenge	78
7.3	Spezifischer Zugkraftbedarf	82
7.4	Ergebnisse zur Arbeitsqualität	84
8	Ausblick	90
9	Zusammenfassung	92
10	Literatur	95



**Formelzeichen**

A	m <sup>2</sup>	Querschnittsfläche eines Injektions- schlitzes
a	m	Hebelarm
AS <sub>m</sub>	-	Ausgangssignal Momentenkanal
AS <sub>x</sub>	-	Ausgangssignal Längskraftkanal
AS <sub>y</sub>	-	Ausgangssignal Normalkraftkanal
b	m	Arbeitsbreite des gesamten Injektors
b <sub>s</sub>	m	Breite eines Injektionsschaars
d	cm	Arbeitstiefe
F <sub>A</sub>	N	Kraft durch das Aufdrücken des Injektions- schlitzes
F <sub>Ax</sub>	N	Horizontale Komponente von F <sub>A</sub>
F <sub>D</sub>	N	Gewichtskraft der Andruckscheibe
F <sub>DN</sub>	N	Normalkraft auf die Andruckscheibe
F <sub>G</sub>	N	Gewichtskraft
F <sub>Rad</sub>	N	Radialkraft
F <sub>Res</sub>	N	Bodenkraft
F <sub>RI</sub>	N	Reibkraft am Injektionswerkzeug
F <sub>RR</sub>	N	Rollwiderstandskraft
F <sub>Sx</sub>	N	Horizontale Komponente der Schnittkraft
F <sub>Sy</sub>	N	Vertikale Komponente der Schnittkraft
F <sub>Tan</sub>	N	Tangentialkraft
F <sub>x</sub>	N	Längskraft
F <sub>xSp</sub>	N/m	Spezifischer Zugkraftbedarf
F <sub>y</sub>	N	Normalkraft
g	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
K <sub>N</sub>	kg/m <sup>3</sup>	Stickstoffgehalt
k	-	Liefergradkennzahl
k <sub>m</sub>	-	Regressionsfaktor Moment
k <sub>x</sub>	-	Regressionsfaktor Längskraft
k <sub>xm</sub>	-	Regressionsfaktor Längskraft bei Momenten- belastung
k <sub>xy</sub>	-	Regressionsfaktor Längskraft bei Normal- kraftbelastung
k <sub>y</sub>	-	Regressionsfaktor Normalkraft

$K_{yx}$	-	Regressionsfaktor Normalkraft bei Längskraftbelastung
M	Nm	Drehmoment
m	kg	Masse
$n_p$	$\text{min}^{-1}$	Pumpendrehzahl
$P_x$	W	Zugleistungsbedarf
Q	$\text{m}^3/\text{ha}$	Ausbringmenge
$Q_N$	$\text{kg}/\text{ha}$	Stickstoffgabe
$Q_{\text{theor}}$	$\text{m}^3/\text{ha}$	Theoretisch mögliche Ausbringmenge
$r^2$	-	Bestimmtheitsmaß
s	m	Abstand zwischen Ultraschallsensor und Reflexionsebene
$\Delta t$	min	Zeitdauer
U	%	Feuchtegehalt
$\dot{V}$	$\ell/\text{min}$	Fördermenge
$V_{\text{Sp}}$	$\ell / (\text{m} \cdot \text{cm})$	Spezifische Ausbringmenge
$V_{\text{Sp theor}}$	$\ell / (\text{m} \cdot \text{cm})$	Theoretische spezifische Ausbringmenge
$V_{\text{theor}}$	$\ell$	Theoretisches Fördervolumen pro Umdrehung
$V_F$	m/s	Fahrgeschwindigkeit
w	m	Reihenabstand
$\alpha$	°	Winkel der Bodenkraft
$\delta$	°	Winkel zwischen den Scheibensechen
$\varepsilon$	%	Dehnung
$\rho$	$\text{kg}/\ell$	Dichte
$\varphi_{\text{Rad}}$	°	Lage des Spannungsknotens bei Belastung mit Radialkraft
$\varphi_{\text{Tan}}$	°	Lage des Spannungsknotens bei Belastung mit Tangentialkraft

## Abkürzungen

TS Trockensubstanz

## 1 EINLEITUNG

Die in den letzten Jahrzehnten aufgetretene ökonomische Notwendigkeit zur Rationalisierung in der Tierhaltung führte zu betriebs- und arbeitswirtschaftlich optimierten Stallsystemen. Vielfach war mit dieser Entwicklung die Umstellung von der Fest- zur Flüssigmistung verbunden.

Die Geruchsfreisetzung bei der Ausbringung von Flüssigmist auf landwirtschaftlich genutzten Flächen führte in steigendem Maße zu Beschwerden seitens einer auch im ländlichen Raum zunehmend städtisch geprägten Bevölkerung. Die ständig wachsende Sensibilität weiter Bevölkerungskreise für den Umweltschutz brachte die Güllewirtschaft weiter in Verruf. Die Nitratauswaschung aus landwirtschaftlichen Kulturböden in das Grundwasser, das vielerorts der Trinkwassergewinnung dient, wird der Düngung mit Flüssigmist angelastet. Die Ammoniakemissionen, die größtenteils von der Gülleausbringung ausgehen, sind beteiligt an der Bodenversauerung, der Eutrophierung von Oberflächengewässern und nährstoffarmen Ökosystemen und an der Ausbreitung neuartiger Waldschäden.

Eine sofortige Einarbeitung des ausgebrachten Flüssigmistes in den Boden kann die genannten Probleme zumindest teilweise entschärfen. Auf Grünland ist dies bisher nicht möglich gewesen. Aber gerade Gebiete mit einem hohen Grünlandanteil, wie beispielsweise das Allgäu, erhalten eine wachsende Bedeutung als Naherholungsgebiete und Ferienregionen.

Moderne Ausbringverfahren für Gülle auf Grünland bringen den Flüssigmist in schmalen Streifen in die Wurzelzone der Grünlandnarbe ein [1]. Diese Gülleinjektion verspricht auch auf Grünland eine geruchsfreie Flüssigmistausbringung ohne Emissionen von Ammoniak. Die Düngewirkung der Gülle wird nicht durch gasförmige Stickstoffverluste geschmälert, so daß sie einen hochwertigen organischen Mehrnährstoffdünger darstellt,

der den Einsatz von Handelsdünger und damit die Kosten senken kann.

Unbekannt sind bisher günstige konstruktive Formen von Flüssigmistinjektoren, der erforderliche Zugleistungsbedarf, sowie der Zusammenhang zwischen Konstruktion und Zugkraftbedarf von Injektoren. Diese Kenntnisse sind notwendig, um praxistaugliche Gülleinjektoren für die Landwirtschaft herstellen zu können. Nur ein Ausbringverfahren, das zuverlässig und problemlos handhabbar ist, kann sich in der Praxis durchsetzen und kann so die Grundlage für einen verantwortungsvollen Einsatz von wirtschaftseigenem Dünger sein.

## 2 PROBLEMSTELLUNG UND LÖSUNGSANSATZ

Flüssigmist ist ein Gemisch aus Kot, Harn, Einstreu- und Futterresten sowie Wasser. In dieser Arbeit wird, dem allgemeinen Sprachgebrauch folgend, der Begriff Gülle synonym zu dem Begriff Flüssigmist gebraucht. Die Zusammensetzung der Bestandteile und ihr mengenmäßiger Anteil bestimmen die Eigenschaften der Gülle. Bei der Ausbringung der Gülle sind in erster Linie die Fließfähigkeit sowie die Ausbringmenge, die sich nach dem Gehalt an Pflanzennährstoffen richtet, entscheidend. Die Fließigenschaften der Gülle hängen maßgebend von der Tierart und dem Trockensubstanz- sowie Schleimstoffgehalt ab. Zudem bleibt das Fließverhalten nicht konstant, da Flüssigmist als plastischer Stoff mit ausgeprägter Thixotropie ein quasiplastisches Fließverhalten aufweist [2]. Der kolloidale Charakter der Gülle bewirkt, daß sie im Ruhezustand gelartig erstarrt und sich bei Bewegung solartig verflüssigt.

Der Gehalt an Pflanzennährstoffen richtet sich nach der Tierart, der Fütterung und der Zusammensetzung der Gülle. Üblicherweise wird er angegeben, indem die Nährstoffmasse in kg auf das Flüssigmistvolumen in m<sup>3</sup> bezogen wird. Eine massebezogene Umrechnung kann vorgenommen werden, da Gülle bei natürlichen Trockenmassegehalten eine Dichte von 1020 bis 1080 kg/m<sup>3</sup> aufweist [3]. Die Bedeutung des Flüssigmistes als wertvoller wirtschaftseigener Mehrnährstoffdünger kann aus **Tabelle 1** entnommen werden.

Beim Stickstoffgehalt ist zusätzlich die Stickstoffform von Bedeutung. Wichtig ist der schnell verfügbare Ammoniumstickstoff (NH<sub>4</sub>). Sein Anteil richtet sich nach Tierart und Trockenmassegehalt. Für überschlägige Berechnungen kann man annehmen, daß etwa die Hälfte des Gesamtstickstoffes als Ammonium vorliegt.

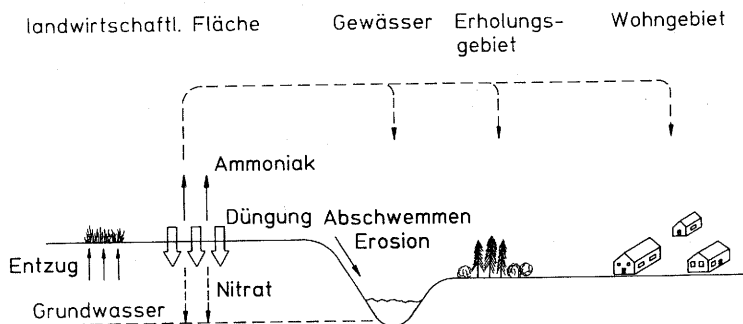
Tierart	TS %	N kg/m <sup>3</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/m <sup>3</sup>	K <sub>2</sub> O kg/m <sup>3</sup>	CaO kg/m <sup>3</sup>	MgO kg/m <sup>3</sup>
Rind	5	2,3	1,2	2,8	1,3	0,4
	10	4,6	2,4	5,6	2,5	0,7
	15	6,9	3,6	8,4	3,9	1,1
Schwein	3,5	2,9	1,9	1,7	1,8	0,6
	7	5,7	3,9	3,3	3,7	1,2
	10,5	8,6	5,8	5,0	5,5	1,8
Huhn	7	4,9	4,1	2,4	8,7	0,9
	14	9,8	8,3	4,8	17,3	1,7
	21	14,7	12,4	7,3	26,0	2,6

**Tabelle 1:** Nährstoffgehalte unterschiedlicher Güllen, nach [4].

Die Ausbringung von Flüssigmist schließt eine Vielzahl möglicher negativer Einwirkungen auf die Umwelt ein (**Bild 1**). Sie treten insbesondere dann auf, wenn die Nährstoffzufuhr durch Gülledüngung den Nährstoffentzug durch den Pflanzenbestand übersteigt.

Bei einer unsachgemäßen Ausbringung von Gülle besteht die Gefahr der Verunreinigung von Grundwasser und Oberflächengewässern. Das Grundwasser, das vielerorts zu Trinkwasser aufbereitet wird, ist durch die Auswaschung von Nitrat aus landwirtschaftlich genutzten Böden gefährdet. Darüberhinaus ist eine Erhöhung der Keimgehalte sowie eine Geruchs- und Geschmacksverschlechterung möglich [3]. Überhöhte Güllegaben führen auch unter Grünland zu zunehmenden Stickstoffauswaschungen. Sie sind jedoch wesentlich geringer als unter Ackerland. Die maximale auf Dauergrünland ausbringbare Flüssigmistgabe wird nicht von den Auswaschungsverlusten bestimmt, da zuvor der Pflanzenbestand entartet [6]. Oberflächengewässer sind durch Grundwas-

seraustritt oder direktes Einschwemmen von Gülle gefährdet. Ein Abfließen oberflächlich ausgebrachten Flüssigmistes tritt dann auf, wenn bei ausreichender Hangneigung das Wasseraufnahmevermögen des Bodens überschritten wird. Gelangt Gülle in Oberflächengewässer, ist der Fischbestand von einer Ammoniakvergiftung bedroht. Der Phosphatgehalt des Flüssigmistes führt zu einem vermehrten Pflanzenwachstum, was dem Wasser in letzter Konsequenz ebenso Sauerstoff entzieht, wie der mikrobielle Abbau der organischen Substanz aus der Gülle.



Mögliche

Schäden : —Verätzungen—

Gefahren : —Verbreitung pathogener Keime—

—Eutrophierung—

Belästigungen :

— Gerüche —

**Bild 1:** Gülleausbringung und mögliche Einwirkungen auf die Umwelt, verändert nach [5].

Krankheiten und Parasiten stellen eine ernsthafte Bedrohung intensiver und spezialisierter Tierhaltungsbetriebe dar. Infizierte landwirtschaftliche Nutztiere scheiden Krankheitserreger mit Harn, Kot und Körpersekreten aus. Bei der Lagerung von Flüssigmist werden nur Temperaturen von 8 bis 12 °C erreicht [7], so daß insbesondere bei Rinderflüssigmist keine Selbstentseuchung möglich ist [3]. Eine oberflächige Gülleausbringung auf Weiden und auf Wiesen, die zur Grünfütterung

geschnitten werden, ist aus hygienischen Gründen bedenklich. Das Risiko der geschlossenen Infektionskette kann nur durch möglichst lange Sperrfristen gemindert werden.

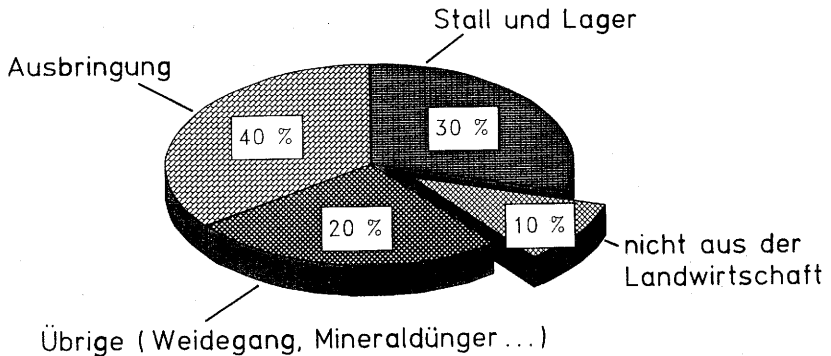
Oberflächige Gülleausbringung auf Grünland führt darüber hinaus zu einer Verschmutzung des aufwachsenden Futters. Dicke Güllekrusten vermindern die Assimilationsleistung der Pflanzen, was zu einem verminderten Wachstum führt. Auf Weideflächen geht die Futterraufnahme der Tiere zurück, da das Gras an Schmackhaftigkeit verliert. Die Futterschmutzung kann sich sogar noch bei der Gärfutterbereitung nachteilig in der Qualität des Silofutters niederschlagen [8]. Die Ausbringung einer Gülle mit hohem Ammoniumgehalt bei sommerlicher Hitze führt zu einer Verätzung des Pflanzenbestandes und nachfolgendem vermindertem Wachstum. Überhöhte Güllemengen verändern die Zusammensetzung des Grünlandbestandes. In dieser sogenannten Gülleflora werden wertvolle Futtergräser von unerwünschten Kräutern zurückgedrängt.

Die unangenehmsten Geruchsbelästigungen, die von Tierhaltungsbetrieben ausgehen, entstehen bei der Ausbringung von Flüssigmist. Die Geruchsfahnen von begüllten Feldern können in Einzelfällen bis zu einer Entfernung von 4 km wahrgenommen werden [9]. Für die auch im ländlichen Raum zunehmend städtisch geprägte Bevölkerung sind die Geruchsbelästigungen ein ständiger Stein des Anstoßes. Das führt dazu, daß siedlungsnahe Parzellen gar nicht mehr oder nur bei bestimmten Windverhältnissen begüllt werden können.

Der im Flüssigmist enthaltene Ammoniumstickstoff kann in Form von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) gasförmig entweichen. Diese Ammoniakemissionen senken zum einen die Düngewirkung der Gülle und wirken sich andererseits negativ auf die Umwelt aus. Eine Mitbeteiligung von Ammoniak an komplexen Umweltproblemen, wie neuartige Waldschäden, Bodenversauerung und Eutrophierung von Gewässern und nährstoffarmen Ökosystemen, konnte nachgewiesen werden [10, 11]. 90 % der in der Bundesrepublik auf jährlich



750 000 t geschätzten Ammoniakemissionen stammen aus der Landwirtschaft [12, 13]. Hohe  $\text{NH}_3$ -Verluste treten im Stall und bei der Güllelagerung auf (Bild 2). Untersuchungen in diesem Bereich haben gezeigt, daß durch geeignete Stallsysteme [14] und abgedeckte Güllebehälter [15] eine deutliche Emissionsreduktion möglich ist. Solche Maßnahmen führen bei der Ausbringung zu einer höheren Nährstoffkonzentration im Flüssigmist. Dadurch steigt der Emissionsdruck bei der Gülleaushbringung weiter an, obwohl hier bereits jetzt die Hauptquelle der Ammoniakemission liegt. Daraus entstehen wachsende Anforderungen an die Ausbringtechnik für Flüssigmist hinsichtlich der Vermeidung gasförmiger Stickstoffemissionen.



**Bild 2:** Anteile der wichtigsten Bereiche an den jährlichen Ammoniakemissionen von 750 000 t  $\text{NH}_3$  in der Bundesrepublik, geändert nach [12, 13].

Die Emissionsproblematik (Geruch und  $\text{NH}_3$ ) ist auf Grünland besonders stark ausgeprägt. Die ausgebrachte Gülle bildet hier einen dünnen Film auf der sehr großen Pflanzenoberfläche. Durch die große Kontaktfläche zur Umgebungsluft wird die Freisetzung leicht flüchtiger Gülleinhaltsstoffe begünstigt. Zur Reduzierung der Emissionen wurde bisher empfohlen, die Gülleausbringung nur unter Witterungsbedingungen vorzunehmen, die geringere Emissionsraten erwarten lassen. Da das Emissions-

geschehen über mehrere Tage hinweg abläuft, ist es möglich, daß sich das Wetter in dieser Zeit grundlegend ändert. Darüberhinaus sind die Termine für die Gülleausfuhr im Grünlandbetrieb sehr eingeschränkt, so daß sich dadurch keine sichere und für die Landwirtschaft praktikable Reduktion der Emissionen erreichen läßt.

Erfahrungen aus dem Ackerbau zeigen, daß eine Einarbeitung der ausgebrachten Gülle das Emissionsgeschehen radikal unterbindet. Die leicht flüchtigen Gülleinhaltsstoffe werden von den Bodenkolloiden sorbiert und nicht an die Atmosphäre abgegeben. Die Einarbeitung ausgebrachter Gülle auf Grünland ist schwierig, da sie während der Vegetationsperiode einer Flächenkultur vorgenommen werden muß. Möglich ist das nur mit einer Direkteinbringung von Flüssigmist, das heißt die Ausbringung der Gülle und das Einbringen in den Boden erfolgen zeitgleich.

Eine solche Gülleinjektion kann die Ammoniakemission nachhaltig und zuverlässig senken. Dadurch läßt sich die Stickstoffzufuhr über den Flüssigmist relativ genau bestimmen. Die organische Düngung kann voll in den Düngeplan des Betriebes aufgenommen werden. Eine zusätzliche mineralische Düngung kann unterbleiben oder zumindest reduziert werden. Neben einer verbesserten Düngewirkung der Gülle durch Einbringen eines ammoniumreichen organischen Düngers in die Wurzelzone des Grünlandbestandes ist es denkbar, daß die Gülleinjektion auch weitere Probleme der oberflächigen Gülleausbringung auf Grünland mindern kann.

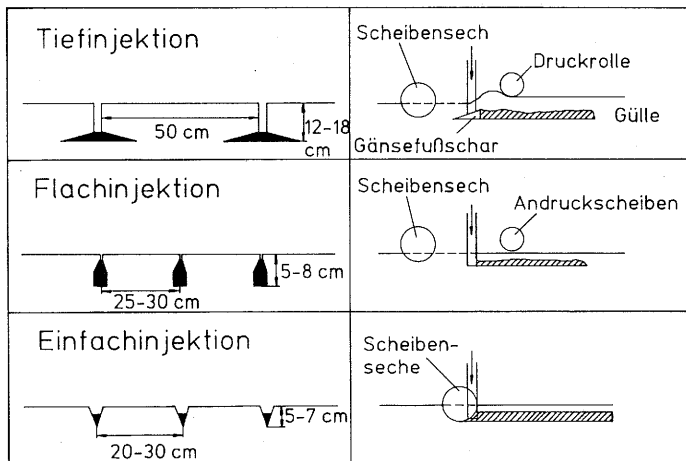
Wie das Ammoniak können auch die Geruchsstoffe aus der Gülle nicht in die Umgebungsluft übertreten, so daß mit der Gülleinjektion eine geruchsfreie Flüssigmistausbringung möglich wird. Die ausgebrachte Gülle kommt nicht mehr in direkten Kontakt mit dem aufwachsenden Grünfutter. So lassen sich ein Verätzen oder Ersticken des Pflanzenbestandes unter einer Güllekruste vermeiden. Die Futterschmutzung ist erheblich redu-

ziert, die Schmachhaftigkeit des Grünfutters bleibt unbeeinträchtigt. Das ermöglicht eine Gülleausfuhr auch auf Weideflächen, zumal auch Krankheitserreger aus dem Flüssigmist nicht auf das Futter gelangen. Auch auf die Nitratproblematik, die durch überhöhte Güllegaben ausgelöst wird, kann die Gülleinjektion einen indirekten Einfluß haben. Bei einer ordnungsgemäßen Injektion sind der Ausbringmenge technische Grenzen gesetzt. Mehr als 35 m<sup>3</sup>/ha Flüssigmist lassen sich mit neu entwickelten Injektionsverfahren nicht ausbringen. Die geruchsfreie Gülleausbringung erlaubt eine Flüssigmistausfuhr auf siedlungsnahen Flächen und Weideflächen. Das bewirkt, daß die im Betrieb anfallende Güllemenge auf eine größere Fläche verteilt wird, wodurch die flächenbezogene Ausbringmenge sinkt.

Neben diesen für eine Direkteinbringung von Flüssigmist in Grünland günstigen Aspekten, gibt es eine Reihe offener Fragen. Die Auswirkung eines langjährigen Einsatzes der Gülleinjektion auf den Zustand und die botanische Zusammensetzung der Grünlandnarbe ist bislang nicht geklärt. Gleiches gilt für den Schlepperleistungsbedarf, der für die Gülleinjektion erforderlich ist. Die vorliegende Arbeit soll, durch Untersuchung der am Injektor wirkenden Kräfte und der sie beeinflussenden Faktoren, einen Beitrag zur Beantwortung dieser Frage leisten und die technischen Verfahrensdaten der Gülleinjektion auf Grünland ermitteln.

### 3 VERFAHREN DER GÜLLEINJEKTION AUF GRÜNLAND

Für das direkte Einbringen von Flüssigmist in die Grünlandnarbe stehen drei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. In Bild 3 sind die Verfahren mit ihren wichtigsten Kenngrößen schematisch dargestellt.



**Bild 3:** Schematische Darstellung der Verfahren zur Direkteinbringung von Flüssigmist in Grünland.

Unabhängig vom Verfahren muß bei einer ordnungsgemäßen Gülleinjektion sichergestellt sein, daß unter keinen Umständen Flüssigmist auf die Grünlandoberfläche gelangt. Dazu ist einerseits die Einstellung der Ausbringmenge den Erfordernissen anzupassen, andererseits sind konstruktive Vorkehrungen zu treffen, die beim Ausheben der Maschine oder eines einzelnen Injektionsschares das Auslaufen der Gülle verhindern.

#### 3.1 Tiefinjektion

Die Tiefinjektion stellt das älteste Verfahren für das Einarbeiten von Gülle in die Grünlandnarbe dar. Die Bauform des

Injektors ähnelt einem Güllegrubber für Ackerland noch stark. Mit einem Scheibensech wird das Wurzelgeflecht der Grasnarbe durchschnitten. In diesem Schnitt wird ein relativ schmaler Werkzeugträger geführt, an dessen unterem Ende ein etwa 20 cm breites Gänsefußschar montiert ist. Das Gänsefußschar hebt den Boden um ca. 40 mm an. Die dabei auf den Boden wirkenden Kräfte bewirken eine Krümelung des Bodens. Das dabei neu entstehende Porenvolumen wird von der aus dem hohlen Werkzeugträger fließenden Gülle angefüllt. Eine Druckrolle mit einstellbarem Anpreßdruck schließt den Injektionsschlitz, ebnet die Grünlandoberfläche ein und preßt die abgeschnittene obere Bodenschicht wieder auf den Unterboden.

Die Arbeitstiefe für dieses Verfahren liegt im Bereich von 12 bis 30 cm. Aufgrund des relativ hohen Zugkraftbedarfes sind aber nur Arbeitstiefen bis 20 cm praktikabel. Der Reihenabstand der Injektionsschare beträgt etwa 50 cm. Die Ausbringmengen liegen unter diesen Gegebenheiten im Bereich von 50 bis 60 m<sup>3</sup>/ha. Die Ammoniakemissionen sind sehr gering. Je nach Arbeitsqualität und Witterung gehen 0 bis 5 % des Ammoniumstickstoffes in der Gülle in Form von Ammoniak verloren [16].

Das Verfahren der Tiefinjektion ermöglicht, bei optimaler Arbeitsqualität, eine emissionsfreie Ausbringung von Gülle. Das gilt sowohl für Ammoniak- als auch für Geruchsemissionen. Ein spezieller Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Arbeitsweise und Breite der Gänsefußschare: die dadurch bewirkte Lockerung des Bodens kann, besonders auf verfestigtem Dauergrünland, den Luft- und Wasserhaushalt des Standortes nachhaltig verbessern. Dennoch ist dieses Verfahren insgesamt kritisch zu bewerten, da es erhebliche Nachteile aufweist. Die erforderlichen Zugkräfte für einen Tiefinjektor sind erheblich und begrenzen den Einsatz der Maschine vor allem unter feuchten Bodenbedingungen. Dabei kann der Schlupf an den Antriebsrädern des Schleppers so groß werden, daß die Grünlandnarbe abgeschert wird. Unter trockenen Bedingungen entstehen durch den horizontalen Schnitt des Gänsefußschares Probleme. Der

kapillare Aufstieg von Feuchtigkeit aus dem Unterboden in die Wurzelzone wird dadurch unterbunden. Der Boden um den Injektionsschlitz trocknet daher rascher ab, wodurch sich der Injektionsschlitz wieder öffnet, was eine weitere Austrocknung begünstigt. Die Tiefinjektion birgt die Gefahr der Ausbringung von stark überhöhten Güllemengen ohne direkt bemerkbare negative Auswirkungen. Die exakte Dosierung und Verteilung pflanzenbaulich sinnvoller und ökologisch verträglicher Ausbringmengen ist dagegen schwierig. Die Grünlandoberfläche wird durch die Bodenbearbeitung unter der Grasnarbe uneben, und die Narbenbeschädigungen können erheblich sein.

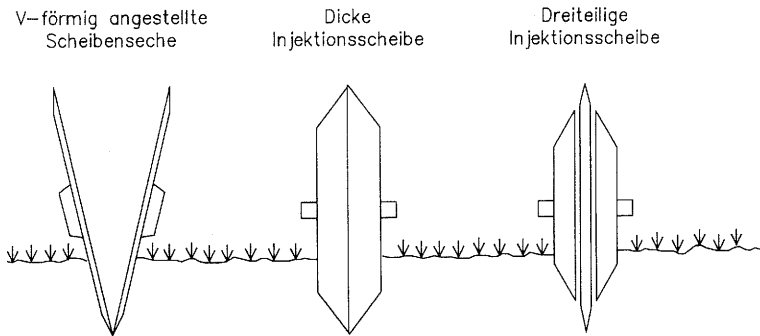
### 3.2 Flachinjektion

Dieses Verfahren wurde aus der Tiefinjektion entwickelt. Die Zielsetzung lag dabei in erster Linie auf der Reduzierung der Nachteile. Auch hier wird mit einem Scheibensech die Grünlandnarbe durchschnitten. Dieser Schnitt wird durch ein stromlinienförmiges Schar zu einem Injektionsschlitz erweitert, der mit der auszubringenden Gülle angefüllt wird. Anschließend wird der Injektionsschlitz mit V-förmig angestellten Andruckscheiben wieder geschlossen.

Ausgehend von dieser Bauform wurden Injektionswerkzeuge entwickelt, die die Funktionsbereiche Durchschneiden der Grünlandnarbe und Ausformen des Injektionsschlitzes kombinieren. Zu diesem Zweck werden dicke Injektionsscheiben oder dreigeteilte Injektionsscheiben eingesetzt (Bild 4).

Die Arbeitstiefe beträgt bei der Flachinjektion 5 bis 8 cm. Die Injektionsschlitz sind bis zu 3 cm breit und verlaufen im Abstand von 25 bis 30 cm. Unter diesen Gegebenheiten lassen sich 20 bis 35 m<sup>3</sup> Gülle pro Hektar ausbringen, wobei nur etwa 5 % des Ammoniumstickstoffgehaltes in Form von Ammoniak verloren gehen [16].

Das Verfahren der Flachinjektion weist bezüglich der Emissionen die gleichen Merkmale auf wie die Tiefinjektion. Es ist ihm aber noch in mehrerer Hinsicht überlegen. Die Gefahr des Vertrocknens des Grases entlang der Injektionsschlitzte ist stark reduziert, da kein horizontaler Schnitt durch den Boden geführt wird. Die Bauform der Injektionsschare und die geringe Arbeitstiefe lassen einen deutlich verringerten Zugkraftbedarf erwarten. Die Querverteilung der Gülle ist durch den geringeren Reihenabstand besser, und es können keine überhöhten Güllemengen beseitigt werden. Probleme ergeben sich eventuell durch die Schließeinrichtung. Sie muß exakt eingestellt und ausgerichtet werden, damit die ausgebrachte Gülle nicht wieder aus dem Injektionsschlitz herausgepreßt wird.



**Bild 4:** Werkzeuge zum gleichzeitigen Durchschneiden der Grünlandnarbe und Ausformen des Injektionsschlitzes.

### 3.3 Einfachinjektion

Einfachinjektoren entsprechen in ihrem Grundaufbau den Flachinjektoren. Im Unterschied zu diesen haben sie aber keine Schließeinrichtungen. Als Injektionswerkzeuge werden Scheibensech mit stromlinienförmigem Schar, V-förmig angestellte Scheibenseche, dicke Injektionsscheiben, dreiteilige Injektionsscheiben (Bild 4), sowie feststehende Messerseche einge-

setzt. Die Injektionsschlitze müssen schmal und sauber geschnitten sein, damit sie rasch und vollständig zuwachsen können.

Die Verfahrenskennwerte entsprechen im wesentlichen denen der Flachinjektion. Der Reihenabstand kann durch die fehlende Schließeinrichtung bis auf 20 cm gesenkt werden. Durch die sehr schmalen Injektionsschlitze liegen die Güllemengen, die ausgebracht werden können, im Bereich von 15 bis 30 m<sup>3</sup>/ha. Die Emissionen sind aufgrund der offenstehenden Schlitze höher als bei den anderen Injektionsverfahren. So gehen je nach Arbeitsqualität und Witterung 2 bis 15 % des Ammoniumstickstoffes aus der Gülle in Form von Ammoniak verloren [16].

Beim Verfahren der Einfachinjektion bleiben die Injektionsschlitze offen. Um ein Austrocknen des Bodens zu verhindern, müssen die Schlitze möglichst schmal sein. Unmittelbar nach der Ausbringung bleibt die Gülle zunächst noch in den Schlitzen stehen. Die Zeitdauer, bis sie vollständig versickert ist, ist abhängig von Bodenfeuchte und Ausbringmenge. Während dieser Zeit sind Ammoniak- und Geruchsemissionen nicht vollständig zu vermeiden.



## 4 BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN ZUR DIREKTEINBRINGUNG VON FLÜSSIGMIST

### 4.1 Untersuchungen in Nordamerika

Viele der angesprochenen Probleme bei der Ausbringung von Flüssigmist lassen sich vermeiden oder doch stark reduzieren, wenn die Gülle in den Boden eingearbeitet wird. Die Idee der Direkteinbringung von Flüssigmist in den Boden ist an sich nicht neu. ROBERTSON [17] zeigte einen pferdegezogenen Gülleinjektor aus einer Patentschrift von 1869. Hier wurde der Flüssigmist beim Pflügen in die geräumte Furche ausgebracht, so daß die Gülle beim Ziehen der folgenden Furche unter dem Erdbalken begraben wurde. An diesem plow-furrow-cover-Verfahren wurde noch in den 60er Jahren dieses Jahrhunderts in den Vereinigten Staaten gearbeitet [18]. Das Verfahren blieb aber aufgrund der wendenden Bodenbearbeitung auf Ackerstandorte beschränkt. In den 70er Jahren wurden Injektoren entwickelt, die auf Grubbern basierten. Dabei lag der Verwendungszweck noch auf der Ausbringung großer Güllemengen ohne Geruchsbelästigung und ästhetische Umweltbelastung [19]. Die Tiefinjektoren wurden zum Teil mit Scheibensechen zum Durchschneiden eines Bewuchses versehen [20], was prinzipiell einen Einsatz dieser Maschinen auf Grünland ermöglichte.

1978 erschien bereits eine Veröffentlichung, die sich mit der konstruktiven Gestaltung eines Werkzeuges für die Tiefinjektion befaßt. NEGI et al. [21] forderten, daß die Gülle in der obersten Bodenschicht gut mit der Erde vermischt werden soll. Der Injektor hat die Aufgabe, ein ausreichend großes Porenvolumen zu schaffen, das mit Gülle angefüllt werden kann. Aus den mit Prototypen gewonnenen Versuchsergebnissen wurden folgende Forderungen an die konstruktive Gestaltung eines Injektionswerkzeuges abgeleitet:

- Der Injektor sollte möglichst flach und breit arbeiten. Dadurch wird der Zugkraftbedarf gesenkt und die Gülle

kann in der Wurzelzone des Pflanzenbestandes aerob abgebaut werden.

- Der Werkzeugträger soll möglichst schmal sein und starr befestigt werden. Dadurch wird die vorgegebene Arbeitstiefe besser eingehalten.
- Die Zugkraft für ein Injektionswerkzeug beträgt 1,5 bis 6 kN bei einer Arbeitstiefe von 10 bis 15 cm.

ROSS et al. [22] untersuchten die Wasserqualität des Oberflächenabflusses von begülten Acker- und Grünlandflächen. Nach der Ausbringung von 86 m<sup>3</sup>/ha Rindergülle wurden die hängigen Parzellen stark beregnet und das an der Oberfläche abfließende Wasser aufgefangen. Der chemische Sauerstoffbedarf des Oberflächenabflusses war bei der Injektion, unabhängig von der Arbeitstiefe, 72 mal geringer als bei oberflächiger Gülleausbringung.

#### **4.2 Untersuchungen in Deutschland**

Die Ergebnisse der frühen Forschungsarbeiten in Nordamerika fanden in Deutschland wenig Resonanz, da hier die Notwendigkeit der Ausbringung sehr hoher Güllemengen praktisch nicht gegeben war. TRAULSEN [23] faßte die damaligen Entwicklungen erstmals zusammen und unterschied Gänsefußschare, häufelkörperförmige und grubberförmige Drillschare, sowie den Pflug als Injektor. Alle Werkzeuge eigneten sich nur zum Ausbringen großer Flüssigmistgaben, bis 448 m<sup>3</sup>/ha, auf geeignetem Ackerland. Der zusätzliche Leistungsbedarf wurde pauschal mit 20 bis 30 PS angegeben. In die Wirtschaftlichkeitsberechnung gingen nur die zusätzlich entstehenden Kosten ein, so daß die Ausbringkosten gegenüber dem herkömmlichen Verfahren geringfügig höher lagen. Dennoch wurde die Zukunft des Gülledrills, vor allem in Reihenkulturen, positiv beurteilt.

FORSTER [24] beschrieb noch im gleichen Jahr das Gülleindrillen als Möglichkeit zur geruchsfreien Gülleausbringung. Bei

der Anwendung des Verfahrens ergab sich ein beträchtlicher Kostenvorteil gegenüber der oberflächigen Ausbringung, da der Düngewert höher angesetzt wurde. Eine Anwendung des Verfahrens auf Wiesen wurde ausgeschlossen.

KRAUSE [25] hielt dagegen das Injektionsverfahren mit sech-, zinken- und grubberartigen Werkzeugen auf Grünland für anwendbar. Die unvermeidlichen Geruchsbelästigungen und Stickstoffverluste konnten so in erträglichen Grenzen gehalten werden.

KRAUSE und ZACH [26] machten eine breite Anwendung des Verfahrens von der Schlagkraft abhängig. Der erhöhte Leistungsbedarf für das Direkteinbringen von Flüssigmist wurde in erster Linie von der zusätzlich erforderlichen Zugkraft verursacht. Die höhere Förderleistung der Güllepumpe durch zusätzliche Strömungsverluste in Verteiler und Zuführungsrohren konnte durch entsprechende Auslegung der Bauteile gering gehalten werden.

Zusammenfassend wurden dem Injektionsverfahren folgende Mängel zugeschrieben [27]:

- Durch die Ablage der Gülle in Rillen oder Kanälen entsteht eine starke Konzentration im Boden.
- Die Gefahr der Auswaschung in das Grundwasser und der Oberflächenerosion ist noch relativ hoch.
- Der biochemische Abbau erfolgt nur langsam.
- Es besteht die Gefahr einer örtlichen Überdüngung.

Abhilfe schafft hier nur die gleichmäßige Durchmischung der Gülle mit dem Boden wozu herkömmlich Bodenbearbeitungsgeräte wie Grubber oder Fräse gut geeignet sind. Dadurch wird aber ein Einsatz während der Vegetationszeit, sowie auf Grünland, ausgeschlossen.

Auch ZEISIG und LANGENEGGER [28] führten Untersuchungen zur Geruchsbeseitigung bei der Gülleausbringung durch. Für die Versuche wurden ein handelsüblicher Grubber mit Gülleauslauf-

rohren sowie ein starrer Injektor mit Zustreichern eingesetzt. Die Ausbringung von Flüssigmist war dann geruchfrei, wenn Arbeitstiefe und Ausbringmenge so aufeinander abgestimmt waren, daß keine Gülle an der Bodenoberfläche zurückblieb. Zur Vermeidung von Geruchsemissionen genügte teilweise schon eine stärkere Staubschicht auf dem Güllestrang. Wegen der Bodenunebenheiten waren Arbeitstiefen bis 4 cm nicht praktikabel. Die Abhängigkeiten von Ausbringmenge und Arbeitstiefe sowie von Zugkraft und Arbeitstiefe wurden für mehrere Böden und Geschwindigkeiten dargestellt. Der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit auf den Zugkraftbedarf war gering, der Grubber wies aber, vor allem bei größeren Arbeitstiefen, niedrigere Zugkraftwerte auf als der Injektor. Einem Einsatz der Geräte auf Grünland stand nichts entgegen, wenn Scheibenseche zum Vorschneiden verwendet wurden, und wenn die Grasnarben fest verwurzelt und nicht verfilzt waren. Beim Praxiseinsatz auf Grünland wurden aber beträchtliche Probleme gesehen [29].

Mitte der 70er Jahre fanden Artikel über den Gülledrill Eingang in die Zeitschriften für die landwirtschaftliche Praxis [30, 31, 32]. Das Thema wurde aktuell, weil Beschwerden seitens der Bevölkerung über die Geruchsbelästigung bei der Gülleausbringung zunahmen und daraufhin örtlich bereits Einarbeitungsvorschriften erlassen wurden. Auch wenn eine prinzipielle Verwendbarkeit der Geräte auf Grünland bejaht wurde, wurde das Verfahren insgesamt äußerst kritisch bewertet.

Die Ablehnung der Direkteinbringung von Flüssigmist durch die Landwirte führte dazu, daß dieses Verfahren im weiteren keine Beachtung mehr fand. Auch in Arbeiten, die sich mit einem umweltfreundlichen Gülleeinsatz beschäftigten, wurde der Gülledrill nur auf Ackerland und nur bei Vorliegen von schwerwiegenden betrieblichen Gründen empfohlen.

Die Weiterentwicklung der Tiefinjektion hin zur Flach- und Einfachinjektion vollzog sich vornehmlich in den Niederlanden.

Erst Anfang der 90er Jahre erschienen in Deutschland Veröffentlichungen, die diese neuen Entwicklungen vorstellten. Den Verfahren wurde eine in Zukunft wachsende Bedeutung prognostiziert [33], und zur Verhinderung von Ammoniakverlusten wurde der Gülledrill auf Grünland im Sommer sogar empfohlen [34]. Die anfängliche Skepsis gegenüber der Gülleinjektion, die aus den mit der Tiefinjektion gemachten Erfahrungen herrührt, ist einem kritischen Interesse gewichen. Dazu tragen Maschinenvorfürungen, Pilotprojekte der Ministerien und Forschungsarbeiten nicht unerheblich bei.

#### **4.3 Spezielle Untersuchungen auf Grünland in Europa**

Untersuchungen über die Auswirkung der Tiefinjektion von Gülle oder Klärschlamm auch auf Grünland wurden europaweit durchgeführt. In Schweden wurde die Geruchsbelästigung durch die Gülleausbringung ermittelt [35]. Die Direkteinbringung des Flüssigmistes unterdrückt die unangenehmen Gerüche vollständig. Die Stickstoffausnutzung ist gegenüber der oberflächlich ausgebrachten Gülle erhöht. Die Schlagkraft des Injektionsverfahrens ist nur halb so groß, da die geringe Arbeitsbreite nicht durch höhere Fahrgeschwindigkeiten kompensiert werden kann.

In Dänemark wurde festgestellt [36], daß die Direkteinbringung von Flüssigmist den Trockenmasseertrag um 8 bis 30 % verringert. Verantwortlich dafür sind die Narbenbeschädigungen, die von Bodenart, Bodenzustand, Reihenabstand, Häufigkeit der Injektion und von der Gestaltung der Injektionswerkzeuge abhängig sind. Beobachtungen über mehrere Jahre zeigten, daß das Wetter und damit der Bodenzustand zur Zeit der Injektion der entscheidende Einflußfaktor auf das Ausmaß der Narbenschäden ist. Für das Injektionsverfahren wurde allgemein eine höhere Schlagkraft, ein geringer Zugkraftbedarf sowie eine Minimierung der Narbenschäden gefordert.

Ähnliche Versuche in Finnland [37] zeigten, daß die generell schlechte Düngewirkung von Gülle auf Grünland durch die Tiefinjektion verbessert werden kann. Die höhere Stickstoffverwertung war besonders auf Standorten mit leichten Böden ausgeprägt. Allerdings mögen auch die hier geringen Narbenverletzungen mit zu dem erhöhten Ertrag geführt haben. Die Futterqualität des Grünlandaufwuchses wurde durch das Injektionsverfahren deutlich verbessert.

Zu einem entsprechenden Ergebnis kam eine britische Studie, die das Verhalten von Milchkühen auf begüllten Weiden untersucht [38]. Während die Varianten Tiefinjektion und Handelsdünger keinen Einfluß auf das Tierverhalten zeigten, nahm die Futterraufnahme der Rinder 9 Wochen nach oberflächiger Gülleausbringung um 30 % ab, und die Tiere zeigten ein insgesamt unruhigeres Verhalten. Diese Beobachtungen schlugen sich allerdings in der Milchleistung nicht nieder. Bei den Beobachtungen der Auswirkung der Tiefinjektion auf das Grünland wurde festgestellt, daß der Pflanzenbestand an den Kanten der Injektionsschlitze gewisse Absterbeerscheinungen zeigt. Die Bodenoberfläche wird unebener und der Reihenabstand von 60 cm führte zu einem streifigen Grünlandaufwuchs.

Eine weitere Untersuchung über die Düngewirkung injizierter Gülle auf Grünland stammt aus Irland [39]. Die Tiefinjektion mit anschließendem Walzen führte zwar zu höheren Erträgen als die herkömmliche Ausbringmethode, der Effekt war aber statistisch nicht signifikant. Beim auf 30 cm halbierten Reihenabstand und einer Güllegabe von 50 t/ha war der Ertrag signifikant höher als bei der oberflächigen Ausbringung. Die Injektion der Gülle bereitete auch auf steinigten Böden keine Probleme. Schwierigkeiten gab es bei der Ausbringung von kleinen Güllemengen (25 m<sup>3</sup>/ha), da hierbei die Fahrgeschwindigkeit sehr hoch gewählt werden mußte. Der Leistungsbedarf für ein einzelnes Injektionswerkzeug wurde auf über 5 kW geschätzt.

Das britische Water Research Centre führte eingehende Untersuchungen zur Tiefinjektion von Gülle und Klärschlamm auf landwirtschaftlich genutzten Flächen durch. Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt [40]:

- Flügelschare verbessern die Querverteilung der Gülle und erlauben ein flaches Arbeiten. Dadurch verringert sich, bei gleicher Ausbringmenge, der Zugkraftbedarf um 50 % gegenüber einem schmalen Schar mit entsprechend größerer Arbeitstiefe.
- Eine Gülleinjektion im Frühjahr führt zu Ertragseinbußen durch Narbenbeschädigungen entlang der Schlitze und durch streifigen Grünlandaufwuchs.
- Injektion der Gülle im Herbst ermöglicht ein erneutes Anwachsen eventuell entwurzelter Pflanzen.
- Ein Reihenabstand von 65 cm ist am günstigsten. Nur bei der Frühjahrsausbringung in schwere Böden sollte ein engerer Reihenabstand gewählt werden.
- Klärschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt von 6,6 % kann noch in Höhe von 140 m<sup>3</sup>/ha ausgebracht werden, wenn die Flächen maximal 12° Gefälle aufweisen. Bei dünnflüssigeren Schlämmen muß die Ausbringmenge ab 6° Hangneigung verringert werden, um ein Abfließen zu verhindern.
- Die Arbeitsqualität der Injektoren ist abhängig von Bodenzustand und Bewuchs. Günstig ist ein frischer Boden, wie er zwischen Herbst und Frühling häufig anzutreffen ist.

WARNER und GODWIN [41] untersuchten den Einfluß des Anstellwinkels des Werkzeugträgers und vibrierender Injektoren auf den Zugkraftbedarf. Dabei zeigte sich, daß mit der Vergrößerung des Winkels zwischen Bodenoberfläche und Werkzeugträger die Grünlandoberfläche zwar ebener bleibt, der Zugkraftbedarf aber zunimmt. Bei Winkeln größer als 100° können Probleme beim Einziehen in den Boden und beim Einhalten der Arbeitstiefe auftreten. Das Einleiten von Vibrationen in das Injektions-

schar senkt den Zugkraftbedarf lediglich bei trockenen, festen Böden. Unter diesen Bedingungen sind jedoch schwere Narbenschäden zu erwarten. Hier können größere Arbeitstiefen zu leicht erhöhten Erträgen führen, da die Bodenstruktur in der Wurzelzone weniger gestört wird. Ein Anwalzen der Grünlandflächen nach der Injektion führte zu einem besseren Aufwuchs unmittelbar um den Injektionsschlitz.

Das Hauptaugenmerk der weiteren Forschungsarbeiten lag auf der Verringerung der Probleme bei der Tiefinjektion unter trockenen Bodenbedingungen. Durch geeignete Gestaltung der Injektionswerkzeuge sollten sowohl die Beeinträchtigung der Bodenoberfläche reduziert, als auch das Schließen des Injektionsschlitzes verbessert werden [42]. Die Grünlandoberfläche blieb ebener, wenn die geflügelten Injektionsschare keine ausgeprägte Spitze aufwiesen. Zwischen verschiedenen gestalteten Flügelprofilen (alle 30 cm breit) war im Hinblick auf die Ebenheit der Bodenoberfläche kein deutlicher Unterschied zu erkennen. Der Injektionsschlitz muß möglichst vollständig geschlossen werden, um eine ebene Grünlandoberfläche zu erhalten und um das Austrocknen des Bodens um den Schlitz zu verhindern. Die dazu eingesetzten Druckrollen müssen so weit hinter dem Injektionsschar angeordnet sein, daß die abgeschnittene und angehobene Grasnarbe vor dem Anwalzen in ihre Ausgangslage zurückfallen kann. Für einen zufriedenstellenden Arbeitseffekt sollen die Andruckrollen ein Gewicht von 500 N auf sandigen und 1000 N auf tonigen Böden aufweisen. Die Gestaltung der Druckrollen war bei ausreichender Ballastierung nur von untergeordneter Bedeutung.

In den Niederlanden wird seit Anfang der 70er Jahre auf dem Gebiet der Direkteinbringung von Flüssigmist gearbeitet. Die ursprüngliche Zielsetzung war die Reduktion der Geruchsbelästigungen durch die Gülleausbringung. Es wurden Versuche mit 8, 18 und 28 cm breiten Scharen auf Ackerland durchgeführt. Die Eignung der Maschinen für Grünland wurde geprüft.



Allgemeine Aussagen waren damals noch nicht möglich, obwohl die ersten Ergebnisse vielversprechend waren [43].

Umfangreiche Untersuchungen zur Gülleinjektion auf Acker- und Grünland führten zu folgenden Erkenntnissen [44]: Bei gleicher Arbeitstiefe ließ sich auf Grünland weniger Gülle ausbringen als auf Ackerland. Mit abnehmender Werkzeugbreite wurde der Unterschied aber geringer. Der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit auf den Zugkraftbedarf war auf Grünland geringer als auf Ackerland und nahm mit schwerer werdenden Böden weiter ab. Die Zunahme des Zugkraftbedarfes mit der Arbeitstiefe war auf Grünland stärker als auf Ackerland und auf schweren Böden stärker als auf leichten. Die Arbeitstiefen bei dieser Untersuchung lagen zwischen 10 und 30 cm. Eine Varianzanalyse der Zugkrafteergebnisse auf Grünland zeigte, daß die Arbeitstiefe den stärksten Einfluß auf den Zugkraftbedarf hat. Auf leichten Böden ist zusätzlich ein geringer Einfluß von Fahrgeschwindigkeit und Anstellwinkel feststellbar, während diese Faktoren auf schweren Böden von der Restvarianz erheblich überschritten werden.

Weiteren Auftrieb erhielten die Injektionsverfahren durch Forschungsergebnisse, die die schlechte Düngewirkung von Gülle dadurch erklären, daß Ammoniumstickstoff in Form von Ammoniak aus der Gülle entweicht. KOLENBRANDER [45] zeigte, daß durch das direkte Einbringen des Flüssigmistes in das Grünland die Ammoniakverluste sehr stark zurückgehen. Die Stickstoffausnutzung und damit der Düngewert der injizierten Gülle ist erhöht.

Weitere Arbeiten konzentrierten sich ausschließlich auf die Gülleinjektion in Grünland. Es wurden 20 cm breite Gänsefußschare mit 50 cm Reihenabstand als Injektionswerkzeuge eingesetzt. Die Arbeitstiefe lag, mit Ausnahme von sehr hohen Ausbringmengen, bei 17 cm. Diese Maschinen waren für den Einsatz in der praktischen Landwirtschaft geeignet. Die Verfahrenskennwerte entsprachen im wesentlichen bereits denen des

in Kap. 3 vorgestellten Tiefinjektionsverfahrens. Problematisch waren noch die zu häufig auftretenden Verstopfungen in den Gülleleitungen, die sehr ungleiche Querverteilung des Flüssigmistes und die noch zu hohen Schäden an der Grasnarbe. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen konnten diese Mängel weitestgehend ausgeschaltet werden [46].

Auch wenn hiermit praxisreife Maschinen für die Gülleinjektion zur Verfügung standen, blieben die prinzipiellen Nachteile der Tiefinjektion bestehen. Die bereits angesprochene Weiterentwicklung zur Flach- bzw. Einfachinjektion erfolgte 1989 binnen kürzester Zeit [47]. In diese Zeit fiel in den Niederlanden auch die politische Vorgabe, den Ammoniakausstoß drastisch zu reduzieren. Durch gesetzliche Auflagen werden immer mehr Landwirte dazu verpflichtet, ihren Flüssigmist mit einem Injektionsverfahren auszubringen bzw. ausbringen zu lassen. Ein landesweites Demonstrationsprojekt wurde gestartet. Es wurden Maschinenvorfürungen organisiert, da eine Vielzahl von Herstellern auf den neu geschaffenen Markt für Gülleinjektoren drängte. Die Ausbildung und Beratung wurde stark intensiviert, was auch eine große Anzahl von Veröffentlichungen in der niederländischen Literatur mit sich brachte. Dennoch sollen an dieser Stelle nur die wichtigsten Ergebnisse aus dem Abschlußbericht des Demonstrationsprojektes angeführt werden [48]. Es zeigte sich, daß mit dem Einfachinjektionsverfahren im Mittel eine Schlagkraft von 25 m<sup>3</sup>/h erreicht wird. Die Ausbringkosten betragen rund 6,50 DM/m<sup>3</sup>. Die am Projekt beteiligten Landwirte verglichen die Einfachinjektion mit der bisherigen, oberflächigen Gülleausbringung. Hierzu wurden 70 Betriebe auf den unterschiedlichsten Standorten ausgewählt. Über 75 % der Betriebsleiter konstatierten eine bessere Düngewirkung der Gülle. Der Ertrag wird immerhin noch von 60 % der Landwirte besser beurteilt. 41 % beobachteten eine höhere Narbenbeschädigung. Hier sind aber sehr starke Abhängigkeiten von der Bodenart festzustellen. Die Mehrzahl der Betriebe auf Sandböden behauptet, daß die Narbenschäden sogar geringer seien. Insgesamt wird die Einfachinjektion gut beurteilt,

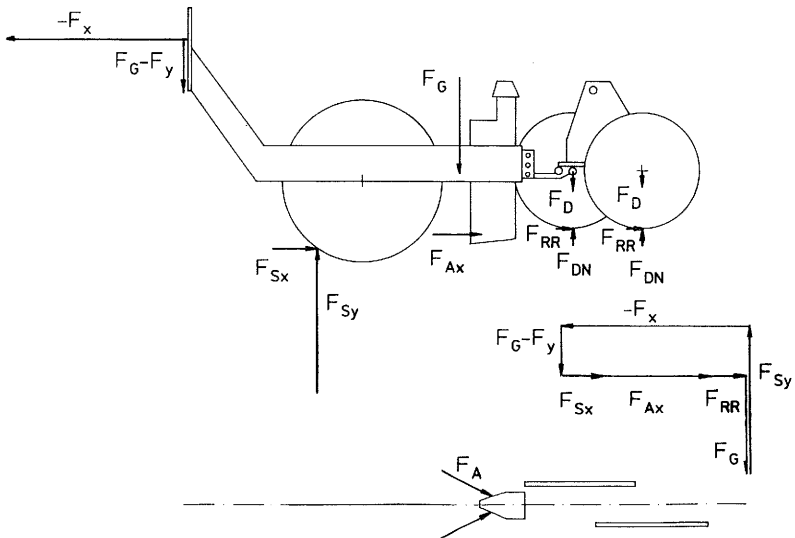
wobei die Kosten je zur Hälfte als vertretbar und als zu hoch beurteilt werden. Das hohe Maschinengewicht und die daraus resultierenden hohen Bodendrücke können besonders auf den Vorwänden leichter Standorte zu Problemen führen.

## 5 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

### 5.1 Kräfte am Injektionswerkzeug

An Injektoren für Gülle in Grünland wirken eine Vielzahl von Einzelkräften, überwiegend Reib- und Schnittkräfte. Die Höhe der Schnittkräfte ist abhängig vom Keilwinkel der Schneide, der Zügigkeit des Schnittes sowie der Dichte der Grünlandnarbe und ihres Wurzelgeflechts. Die Reibkräfte werden von der Materialpaarung Injektor - Boden bestimmt.

In der Aufsicht der Lagepläne (Bild 5 bis 8) sind nur die Kräfte durch das Aufdrücken des Injektionsschlitzes eingezeichnet, da dies die einzigen Kräfte mit seitlich gerichteten Komponenten sind. Für einen Flachinjektor mit Scheibensech und stromlinienförmigem Injektionsschar (Injektor A) ergibt sich der Kräfteplan aus Bild 5.



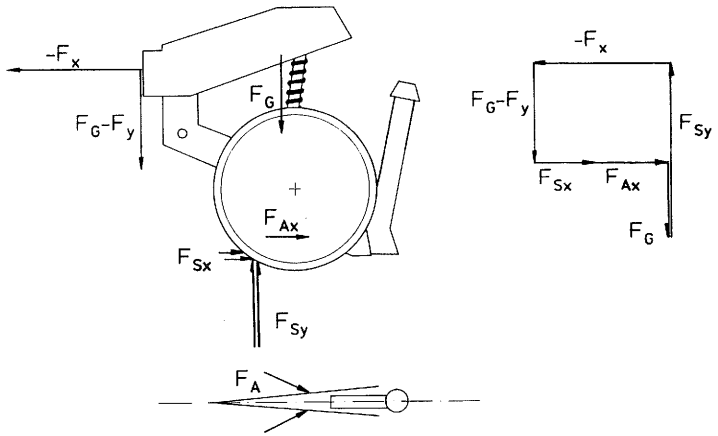
**Bild 5:** Kräfte an einem Flachinjektor mit Scheibensech und stromlinienförmigem Injektionsschar (Injektor A).

Am Scheibensech wirkt die Schnittkraft zum Durchschneiden der Grasnarbe. Die Zügigkeit des Schnittes, die sich aus dem Verhältnis von tangentialer zu normaler Schnittgeschwindigkeit ergibt, ist bei einer Arbeitstiefe von 0 unendlich groß, fällt aber mit zunehmender Arbeitstiefe. Das Minimum der Zügigkeit liegt bei einer Arbeitstiefe, die gleich dem Radius des Scheibenseches ist. Wird vereinfachend angenommen, daß die Umfangsgeschwindigkeit des Seches gleich der Vorfahrtsgeschwindigkeit ist, so beträgt die Zügigkeit noch 1. Am Injektionsschar wirken die Kräfte durch das Aufdrücken des Injektionsschlitzes. Bei homogenem Bodenzustand heben sich die seitlich wirkenden Komponenten gegenseitig auf, so daß der Injektor frei von Seitenkräften ist. Die am Injektionsschar auftretenden Reibkräfte sind in der Kraft durch das Aufdrücken des Bodens enthalten. Die Schließeinrichtung verursacht Rollwiderstandskräfte, deren Höhe von der Anstellung der Andruckscheiben, sowie ihrer Feder- oder Gewichtsbelastung und den Eigenschaften der Grünlandoberfläche abhängig ist.

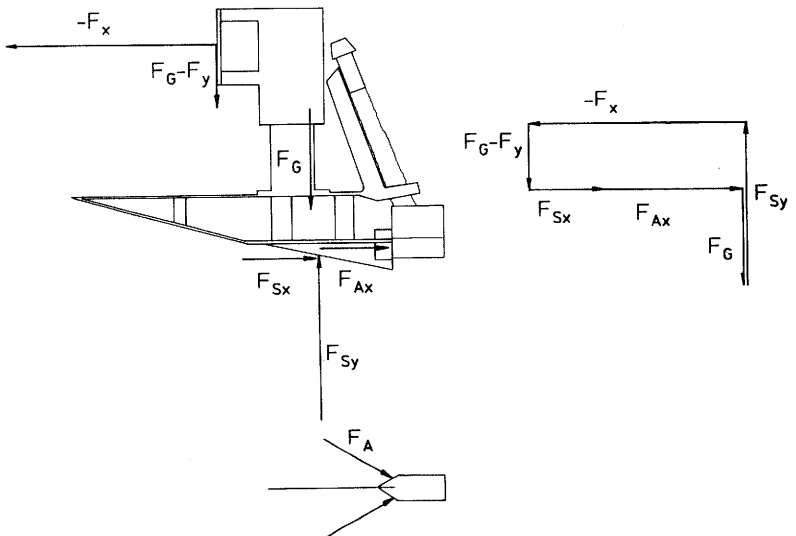
An einem Flachinjektor mit dicker Injektionsscheibe (Injektor B, **Bild 6**) sind die Schnittkräfte aufgrund des großen Keilwinkels der Schneide höher als im vorigen Fall. Die Kräfte beim Aufdrücken des Injektionsschlitzes wirken ebenfalls direkt an der Injektionsscheibe. Am Gülleauslauf treten bei entsprechend großer Arbeitstiefe Reibkräfte auf. Bezüglich der Zügigkeit des Schnittes und der Kräfte an der Schließeinrichtung ergeben sich keine Unterschiede zum Flachinjektor A.

An einem Einfachinjektor aus zwei V-förmig angestellten Scheibensechen (Injektor C, **Bild 7**) wirken an jedem Sech Schnittkräfte. Auch in diesem Fall fällt die Zügigkeit mit zunehmender Arbeitstiefe analog zu den Flachinjektoren ab. An jedem Sech wirkt zudem eine Kraft durch das Aufdrücken des Injektionsschlitzes, wobei aber auch hier der gesamte Injektor bei homogenem Bodenzustand seitenkraftfrei bleibt. Die Reibkräfte zwischen den Sechen und dem Boden sind ebenfalls in der Kraft durch das Aufdrücken des Bodens enthalten.





**Bild 7:** Kräfte an einem Einfachinjektor mit zwei V-förmig angestellten Scheibensechen (Injektor C).



**Bild 8:** Kräfte an einem Einfachinjektor mit feststehendem Messersech (Injektor D).

## 5.2 Ausbringbare Flüssigmistmenge

Die Güllemenge, die mit einem Gülleinjektor auf Grünland ausgebracht werden kann, richtet sich nach dem Fassungsvermögen der Injektionsschlitzte. Dieses wird wiederum von der Tiefe und der Querschnittsfläche des Schlitzes bestimmt. Die Querschnittsfläche  $A$  des Injektionsschlitzes kann aus den geometrischen Abmessungen des Injektionswerkzeuges berechnet werden. So ergibt sich mit dem Reihenabstand  $w$  die theoretische Ausbringungsmenge  $Q_{theor}$ .

$$Q_{theor} = \frac{10000 \cdot A}{w} \quad \begin{array}{l} Q_{theor} \text{ [m}^3\text{/ha]} \\ A \text{ [m}^2\text{]} \\ w \text{ [m]} \end{array} \quad (1)$$

Diese Gleichung ist nur dann uneingeschränkt gültig, wenn sich der Boden absolut plastisch verhält. In der Praxis verhält sich der Boden aber zumindest teilweise auch elastisch, so daß die tatsächlich mögliche Ausbringung geringer als die theoretisch bestimmte ist, weil sich der Injektionsschlitz etwas schließt.

Die Querschnittsfläche des Injektionsschlitzes ist zum einen von der Tiefe, zum anderen von den Abmessungen des Injektors abhängig. Um verschiedene Injektoren hinsichtlich der maximal möglichen Ausbringung beurteilen zu können, wird die spezifische Ausbringungsmenge  $V_{sp}$  bestimmt. Diese Größe gibt an, welches Volumen an Flüssigmist mit einem bestimmten Injektor in einen Injektionsschlitz von einem Meter Länge je Zentimeter Arbeitstiefe eingebracht werden kann.

Für ein einfaches Injektionsschar, das einen rechteckigen Injektionsschlitz mit der Breite  $b_s$  ausformt, ergibt sich die theoretische spezifische Ausbringungsmenge  $V_{sp \text{ theor}}$ .

$$V_{sp \text{ theor}} = 10 \cdot b_s \quad \begin{array}{l} V_{sp \text{ theor}} \text{ [l / (m \cdot cm)]} \\ b_s \text{ [m]} \end{array} \quad (2)$$

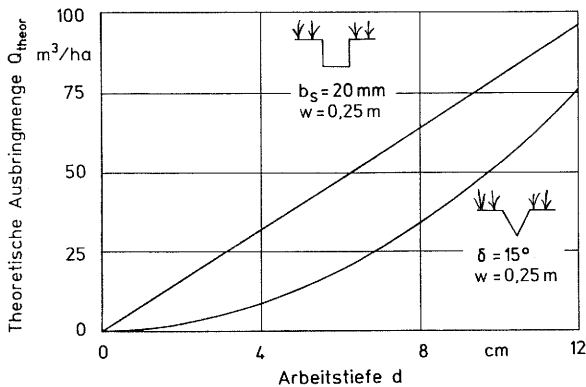


Zusammen mit dem Reihenabstand  $w$  und der Arbeitstiefe  $d$  kann aus diesem Wert für den jeweiligen Injektor die theoretisch maximal mögliche Ausbringung  $Q_{\text{theor}}$  errechnet werden.

$$Q_{\text{theor}} = \frac{10 \cdot V_{\text{Sp theor}} \cdot d}{w} \quad \begin{array}{l} Q_{\text{theor}} \text{ [m}^3/\text{ha]} \\ V_{\text{Sp theor}} \text{ [l/(m} \cdot \text{cm)]} \\ d \text{ [cm]} \\ w \text{ [m]} \end{array} \quad (3)$$

Steht ein praktischer Wert für die spezifische Ausbringung zur Verfügung, indem beispielsweise die tatsächliche Breite des Injektionsschlitzes anstatt der Breite des Injektionschares in Gl. (2) eingesetzt wird, so kann die tatsächliche maximal mögliche Ausbringung errechnet werden.

Dieser lineare Zusammenhang zwischen Arbeitstiefe und Ausbringung ist bei einem Injektionsschlitz, wie ihn zwei V-förmig angestellte Scheibenseche im Boden ausformen, nicht mehr gegeben (Bild 9).



**Bild 9:** Abhängigkeit der theoretischen Ausbringung von der Arbeitstiefe für unterschiedlich geformte Injektionsschlitzte.

Daher läßt sich in diesem Fall keine theoretische spezifische Ausbringung angeben. Die Querschnittsfläche des

Injektionsschlitzes stellt ein auf der Spitze stehendes gleichschenkliges Dreieck dar. Schließen die Seche einen Winkel  $\delta$  ein, so läßt sich die Querschnittsfläche A des Injektionsschlitzes berechnen. Mit dem Reihenabstand  $w$  und der Arbeitstiefe  $d$  läßt sich dann für diesen Fall die theoretisch maximal mögliche Ausbringung  $Q_{\text{theor}}$  aus Gl. 1 berechnen.

$$Q_{\text{theor}} = \frac{d^2 \cdot \tan\left(\frac{\delta}{2}\right)}{w} \quad \begin{array}{l} Q_{\text{theor}} \text{ [m}^3\text{/ha]} \\ d \text{ [cm]} \\ w \text{ [m]} \end{array} \quad (4)$$

### 5.3 Zugleistungsbedarf eines Flüssigmistinjektors für Grünland

Von besonderer Bedeutung für den praktischen Einsatz des Injektionsverfahrens ist der Zugleistungsbedarf, der für das Ziehen des Injektors zusätzlich aufgebracht werden muß. Dieser Zugleistungsbedarf ist von vielen Faktoren abhängig. Als Ausgangsgrößen für die Berechnung sollen der Stickstoffgehalt  $K_N$  der Gülle und die gewünschte Stickstoffgabe  $Q_N$  zur Verfügung stehen. Aus diesen Größen läßt sich die erforderliche Ausbringung  $Q$  berechnen.

$$Q = \frac{Q_N}{K_N} \quad (5)$$

Kennt man die mit einem Injektor erreichbare spezifische Ausbringung  $V_{sp}$ , so läßt sich daraus die Arbeitstiefe  $d$  bestimmen.

$$d = \frac{Q \cdot w}{10 \cdot V_{sp}} \quad \begin{array}{l} d \text{ [cm]} \\ Q \text{ [m}^3\text{/ha]} \\ w \text{ [m]} \\ V_{sp} \text{ [l/(m*cm)]} \end{array} \quad (6)$$

Die Arbeitstiefe ist die bestimmende Größe für die erforderliche Zugkraft. Der Zugkraftwert  $F_x$  für die berechnete Arbeitstiefe kann dem Ergebnisteil, Kap. 7, entnommen werden. Zusammen mit der Gesamtarbeitsbreite  $b$  des Injektors und dem Rei-

henabstand  $w$  läßt sich daraus der Zugleistungsbedarf  $P_x$  herleiten. Da die Fahrgeschwindigkeit  $v_F$  nicht auf die Höhe der Zugkraft einwirkt, vgl. Kap. 7, läßt sich der Zugleistungsbedarf angeben.

$$P_x = \frac{v_F \cdot b \cdot F_x}{w} \quad (7)$$

Dieser Leistungsbedarf gibt nur die für das Ziehen des Injektors aufzuwendende Leistung an. Für die erforderliche Schlepperleistung müssen zusätzlich die Leistungsansprüche der Pumpe und des Verteilers, der Leistungsbedarf zum Ziehen des Faßwagens, der Eigenleistungsbedarf des Schleppers und eine Sicherheitsreserve berücksichtigt werden.

Aus Gleichung (7) ergibt sich, daß der Reihenabstand der Injektionswerkzeuge den Zugleistungsbedarf beeinflußt. Ein Injektor mit engem Reihenabstand kann flacher arbeiten, um die gleiche Nährstoffmenge auszubringen wie ein Injektor mit großem Reihenabstand. Zur näheren Betrachtung dieses Zusammenhanges soll die Abhängigkeit des spezifischen Zugkraftbedarfs  $F_{xSp}$ , das ist der auf die Gesamtarbeitsbreite des Injektors bezogene Zugkraftbedarf, vom Reihenabstand untersucht werden. Als Annahme für die Höhe der Längskraft  $F_x$  am Injektionswerkzeug und deren Abhängigkeit von der Arbeitstiefe  $d$  werden die Ergebnisse des Injektors A bei mittlerer Bodenfeuchte (Kap. 7) herangezogen. Diese Kraftannahme ergibt zusammen mit den Gleichungen (4) und (5) folgendes Ergebnis.

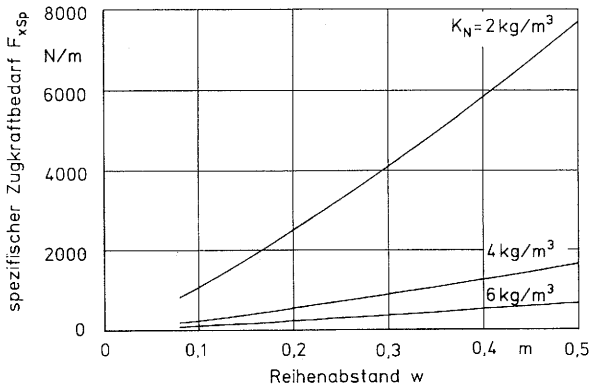
$$F_{xSp} = \frac{21,71 \cdot \left( \frac{Q_N \cdot w}{10 \cdot K_N \cdot V_{Sp}} \right)^{2,229}}{w} \quad (8)$$

$F_{xSp}$  [N/m]  
 $Q_N$  [kg/ha]  
 $w$  [m]  
 $K_N$  [kg/m<sup>3</sup>]  
 $V_{Sp}$  [l / (m · cm)]

Der Zugleistungsbedarf  $P_x$  läßt sich aus dem spezifischen Zugkraftbedarf  $F_{xSp}$  zusammen mit der Fahrgeschwindigkeit  $v_F$  und der Gesamtarbeitsbreite  $b$  des Injektors errechnen.

$$P_x = v_F \cdot b \cdot F_{xsp} \quad (9)$$

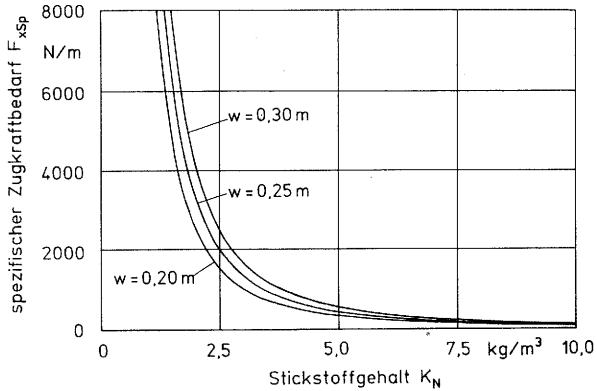
Stellt man anhand Gleichung 8 den Zusammenhang zwischen Reihenabstand und spezifischem Zugkraftbedarf her (Bild 10), so fallen folgende Aspekte auf. Je enger der Reihenabstand ist, um so geringer wird der spezifische Zugkraftbedarf. Der Reihenabstand kann aber aus konstruktiven Gründen nicht beliebig klein werden. Darüberhinaus steigt dadurch der Flächenanteil der Injektionsschlitze am Grünland. Das bewirkt zum einen eine Erhöhung der Narbenschäden, zum anderen aber möglicherweise auch eine Erhöhung der Freisetzung von Ammoniak. Hierzu fehlen aber noch exakte Messungen der Ammoniakfreisetzung bei der Injektion mit unterschiedlichen Reihenabständen. Zu große Reihenabstände bewirken neben einer ungleichförmigen Querverteilung der Nährstoffe auch überhöhte Zugkraftansprüche.



**Bild 10:** Spez. Zugkraftbedarf zur Ausbringung von 60 kg N/ha bei unterschiedlichen Reihenabständen mit einem Flachinjektor bei mittlerer Bodenfeuchte.

Für den praktischen Einsatz der Injektoren ist der Nährstoffgehalt der Gülle von großer Bedeutung. Sinkende Stickstoffkonzentrationen im Flüssigmist führen zu überproportional steigendem spezifischem Zugkraftbedarf (Bild 11). Bei geringem

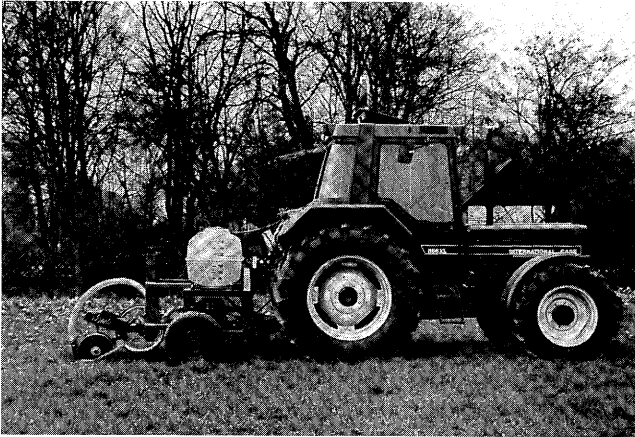
Nährstoffgehalt in der Gülle ist der spezifische Zugkraftbedarf darüberhinaus stark vom Reihenabstand abhängig. Daraus läßt sich ableiten, daß für die Gülleinjektion auf Grünland die Nährstoffkonzentration im Flüssigmist möglichst hoch sein muß. Dies gilt ganz besonders dann, wenn die Gülle mit Injektoren ausgebracht wird, die einen großen Reihenabstand aufweisen.



**Bild 11:** Spez. Zugkraftbedarf zur Ausbringung von 60 kg N/ha bei unterschiedlichem Stickstoffgehalt der Gülle mit einem Flachinjektor bei mittlerer Bodenfeuchte.

## 6 VERSUCHSEINRICHTUNG UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

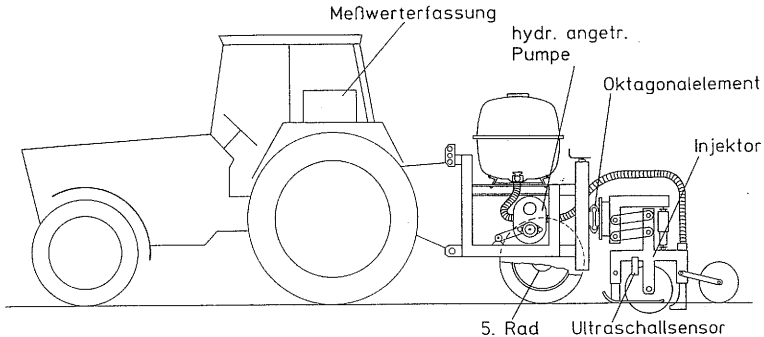
Für die Untersuchung von Gülleinjektoren auf Grünland wurde eine Meßeinrichtung entwickelt und gebaut, die an die 3-Punkt-Hydraulik eines Ackerschleppers gekoppelt wird (Bild 12 und 13). Daran kann jeweils ein einzelnes Injektionswerkzeug angebaut werden.



**Bild 12:** Versuchseinrichtung zur Untersuchung von Flüssigmistinjektoren für Grünland.

Die Meßeinrichtung besteht aus einem Rahmen mit starrer Achse, auf den ein Güllefaß mit 400 l Fassungsvermögen aufgebaut ist. Der Vorratsbehälter ist mittels einer Schlauchleitung mit der Güllepumpe verbunden. Ein 3-Wege-Kugelhahn in dieser Leitung erlaubt es, den Abfluß aus dem Güllefaß freizugeben oder zu verschließen. In der dritten Stellung saugt die Güllepumpe bei geschlossenem Faß Außenluft an. Durch diese Maßnahme kann beim Trockenlauf der Pumpe eine unzulässige Erwärmung des Pumpenkörpers vermieden werden. Als Güllepumpe wird eine Drehkolbenpumpe eingesetzt, die die Gülle dosiert zum Injektionswerkzeug fördert. Angetrieben wird die Pumpe durch einen Hydromotor, der vom Zugschlepper mit Hydraulikflüssigkeit versorgt wird.

In der Zuleitung zum Hydromotor ist ein 3-Wege-Stromregelventil angeordnet, so daß dem Ölmotor eine einstellbare, von Druckschwankungen unbeeinflusste Ölmenge zugeführt wird. Da das Schluckvolumen des Motors konstant ist, kann auf diese Weise die Drehzahl des Motors und damit die ausgebrachte Güllemenge, eingestellt und konstant gehalten werden. Am Zugschlepper ist dazu im einfachsten Fall nur ein einfachwirkendes Steuergerät erforderlich.



**Bild 13:** Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung.

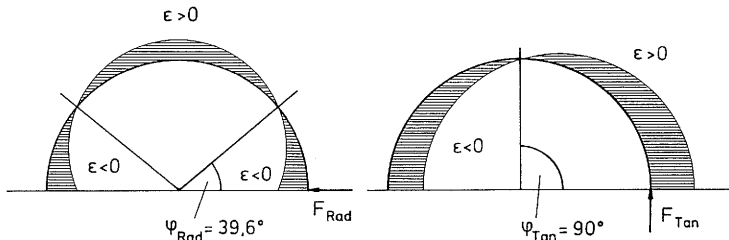
Die Messung der Kräfte auf das Injektionswerkzeug erfolgt mit einer Kraftmeßeinrichtung, an die jeweils ein einreihiger Grünlandinjektor angebaut werden kann. Zur Anpassung an die bei den einzelnen Injektoren unterschiedlichen Befestigungspunkte ist die gesamte, in einem Hubmast gelagerte Kraftmeßeinrichtung mit einer Gewindespindel bodenparallel in der Höhe verstellbar. Die Kraftmeßeinrichtung ist um 12,5 cm nach rechts aus der Mitte verschoben. Im Feldversuch entstehen dadurch bei einer Hin- und Rückfahrt in der selben Schlepperspur zwei Injektionsschlitze mit 25 cm Abstand. Über diese Schlitze kann ein Windtunnel zur Messung der Ammoniakemission [49] gesetzt werden.

Im linken Teil der Versuchseinrichtung ist ein parallelogrammgeführtes 5. Rad angeordnet, das zur schlupffreien Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit eingesetzt wird.

### 6.1 Kraftmeßeinrichtung

Für die Messung der Kraft auf ein Injektionswerkzeug wird ein Meßaufnehmer eingesetzt, der die Kraft in die beiden orthogonalen Komponenten Längskraft und Normalkraft zerlegt, ohne daß sich die beiden Komponenten gegenseitig beeinflussen. Darüberhinaus wird das von dem Injektionswerkzeug entwickelte Moment erfaßt. Für diese Aufgabe werden erweiterte Oktagonalelemente eingesetzt, wie sie von GODWIN [50] beschrieben wurden.

Das Meßprinzip der Oktagonalelemente beruht auf der Spannungsverteilung am Kreisring. Wird ein Kreisring mit einer Tangentialkraft beaufschlagt, so bildet sich ein Spannungsknoten bei  $\varphi_{\text{Tan}} = 90^\circ$ , bei Beaufschlagung mit einer Radialkraft liegt der Spannungsknoten bei  $\varphi_{\text{Rad}} = 39,6^\circ$  [51] (Bild 14). Greifen Tangential- und Radialkraft zugleich an, so werden die Dehnungen an den Spannungsknoten nur von einer Kraft, unabhängig von der anderen Kraft, bewirkt. Werden diese Dehnungen gemessen kann daraus die Größe der jeweiligen Kraft berechnet werden.



**Bild 14:** Spannungsverteilung am Kreisring bei Beaufschlagung mit Tangential- und Radialkräften.

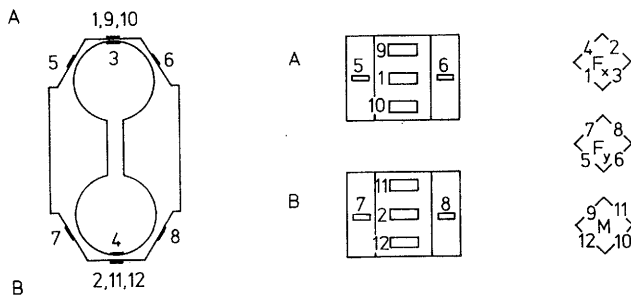
Dünnwandige Kreisringe eignen sich nur begrenzt für den Einbau in eine Meßeinrichtung. Oktagonalelemente weisen definierte Befestigungsflächen auf und sind daher für den praktischen Aufnehmerbau sehr viel besser geeignet. Die Befestigungs-



flächen sind erhöht, um auch bei einseitigen Kantenbelastungen durch außermittigen Kraftangriffspunkt eine sichere Entkoppelung der beiden Kraftrichtungen zu gewährleisten [50].

Die Lage der Spannungsknoten an diesen erweiterten Oktagonalelementen läßt sich theoretisch nicht exakt ermitteln. Experimentelle Untersuchungen zeigen unterschiedliche Ergebnisse bezüglich des Spannungsknotens bei Belastung mit Radialkräften. GODWIN [50] applizierte mehrere Dehnungsmeßstreifen (DMS) auf einem erweiterten Oktagonalelement in der Nähe des zu erwartenden Spannungsknotens und ermittelte den Nulldurchgang bei  $\varphi_{\text{Rad}} = 34^\circ$ . Eine Verformungs- und Spannungsanalyse mit der Finite-Elemente-Methode [52] ergab Werte von  $\varphi_{\text{Rad}} = 18^\circ$  bei Radialkraftbelastung und  $\varphi_{\text{Rad}} = 27^\circ$  bei Momentenbelastung. Da die Dehnungen mit Dehnungsmeßstreifen erfaßt werden, läßt sich durch eine exakt symmetrische Applikation der DMS in der Nähe der Spannungsknoten dennoch eine Entkoppelung der Meßwerte erreichen.

Die beiden in der Werkstatt des Instituts für Agrartechnik aus 42CrMo4 angefertigten erweiterten Oktagonalelemente wurden mit jeweils zwölf Dehnungsmeßstreifen versehen (Bild 15).



**Bild 15:** Applikation und Verschaltung der Dehnungsmeßstreifen auf den erweiterten Oktagonalelementen.

Die Lage der DMS wurde mit  $\varphi_{\text{Tan}} = 90^\circ$  und  $\varphi_{\text{Rad}} = 28^\circ$  gewählt. Die DMS setzen die Dehnung in eine proportionale Widerstandsänderung um. Jeweils vier DMS sind zu einer Wheatstone'schen Vollbrücke verschaltet, wodurch eine Temperaturkompensation erreicht wird. Durch das abwechselnde Aufeinanderfolgen eines bei Belastung gestauchten und eines gedehnten DMS in der Brücke wird eine große Empfindlichkeit des Ausgangssignals realisiert. Das Ausgangssignal der drei Meßbrücken ist den Größen Längskraft, Normalkraft und Moment proportional.

In der Versuchseinrichtung sind beide Oktagonalelemente an einen Träger angebaut, der in dem Hubmast gelagert ist. Auf der Injektorseite sind die Oktagonalelemente durch einen weiteren Träger verbunden, an dem der Gulleinjektor befestigt wird. Durch diese Anordnung der Meßelemente wirkt sich eine eventuelle außermittige Befestigung des Injektors nicht auf die Ergebnisse der Kraftmessung aus.

#### **6.1.1 Kalibrierung der Kraftmeßeinrichtung**

Zur Kalibrierung kann die gesamte Kraftmeßeinrichtung in komplett montiertem Zustand aus der Versuchseinrichtung ausgebaut werden. Dadurch entfällt eine Überprüfung der Kalibrierergebnisse in eingebautem Zustand, da beim Einbau nach der Kalibrierung keine Verschraubungen o.ä. an der Kraftmeßeinrichtung angezogen werden müssen.

Für die Kalibrierung wird die ausgebaute Kraftmeßeinrichtung an der Hubgabel eines Gabelstaplers befestigt. Auf eine, an zwei Zugseilen angehängte, Strebe können Ballastgewichte bekannter Masse aufgeschoben werden. Die Zugseile werden in eine Öse an der Kraftmeßeinrichtung eingehängt. Wird jetzt die Hubgabel des Staplers hochgefahren, so wird die Gewichtskraft der angehängten Massen an der Öse in die Kraftmeßeinrichtung eingeleitet.

Der Zusammenhang zwischen der angehängten Masse  $m$  und der eingeleiteten Kraft  $F_G$  ergibt sich aus der Erdbeschleunigung  $g$ .

$$F_G = m \cdot g \quad (10)$$

Je nach Ausrichtung der Kraftmeßeinrichtung auf der Hubgabel entspricht diese Gewichtskraft  $F_G$  einer Längs- oder Normalkraft auf die Kraftmeßeinrichtung im eingebauten Zustand.

Um eine eventuelle elastische Verformung der Hubgabeln kompensieren zu können, wird die Ausrichtung der Oktagonalelemente mit einer Wasserwaage überprüft. Falls erforderlich kann der Hubmast in der Neigung verstellt werden. Um auch Momente in die Kraftmeßeinrichtung einleiten zu können, wird die Öse an einen Hebelarm montiert, der auf die Strebe zwischen den Oktagonalelementen geklemmt wird.

Bei jedem Versuch wird zunächst ein Meßwert bei unbelasteter Kraftmeßeinrichtung aufgenommen. Indem immer mehr Ballastgewichte angehängt werden, wird die Belastung bis zu einem Maximum gesteigert und durch Abnehmen der Massen wieder auf Null reduziert. Eine durch steigende und fallende Belastung bedingte Hysteresebildung ist den Ergebnissen nicht zu entnehmen, da die Kraftmeßeinrichtung zum An- bzw. Abhängen der Ballastgewichte zwischen zwei Messungen immer entlastet wird.

Bei jeder Belastung wird an allen sechs Meßkanälen ein Mittelwert über 250 Einzelmessungen gebildet. Die Einzelwerte werden innerhalb eines Zeitraumes von 2,5 s zu beliebigen Zeitpunkten registriert, um eventuelle Einflüsse durch Schwingungen des Systems auszuschalten.

In der beschriebenen Vorgehensweise wurden 12 Kalibrierdurchgänge vorgenommen (**Tabelle 2**). Die Ergebnisse der Kalibrierversuche sind in den **Bildern 16 bis 18** zu sehen. Auf das Aufbringen einer reinen Längskraft (**Bild 16**) reagieren nicht nur die Längskraftmeßkanäle, sondern auch die Kanäle für die

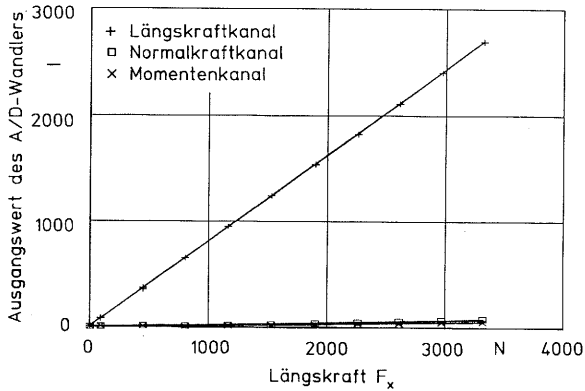
Messung der Normalkraft und des Moments. Dieses Verhalten wird als Übersprechen des Meßkanals bezeichnet. Es beruht auf Inhomogenitäten im Material des Meßaufnehmers, auf Fertigungstoleranzen sowie auf kleinsten Ungenauigkeiten bei der Applikation der Dehnungsmeßstreifen.

Nr.	Belastung	Position	Hebelarm
1	$F_x$	Mittig	0
2	$F_x$	0,10 m , + z <sup>1)</sup>	0
3	$F_x$	0,10 m , - z	0
4	$F_y$ (/ M)	Mittig	(0,095 m)
5	$F_y$ (/ M)	0,10 m , + z	(0,095 m)
6	$F_y$ (/ M)	0,10 m , - z	(0,095 m)
7	$F_x$ / M	Mittig	0,35 m
8	$F_x$ / M	Mittig	0,70 m
9	$F_y$ / M	Mittig	(0,095 m) + 0,70 m
10	$F_y$ / M	Mittig	(0,095 m) + 0,35 m
11	$F_x$ / $F_y$ (/ M)	Mittig	(0,095 m)
12	$F_x$ / $F_y$ (/ M)	Mittig	(0,095 m)

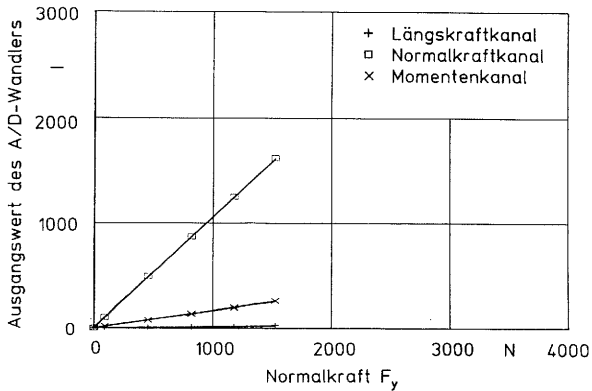
**Tabelle 2:** Kalibrierplan für die Kraftmeßeinrichtung, <sup>1)</sup>um 0,1 m aus der Mitte in positive z-Richtung verschoben.

Das Übersprechen des Normalkraftkanals auf den Momentenkanal läßt sich nicht ermitteln, da die Normalkraft immer außerhalb der Mitte der Oktagonalelemente angreift und somit ein Moment auf die Meßfeder bewirkt (Bild 17). Die Ausgangssignale des Momentenkanals bei Belastung mit Normalkraft sind somit nicht als Übersprechen zu deuten, sondern sie stellen das durch die Normalkraft verursachte Moment dar.

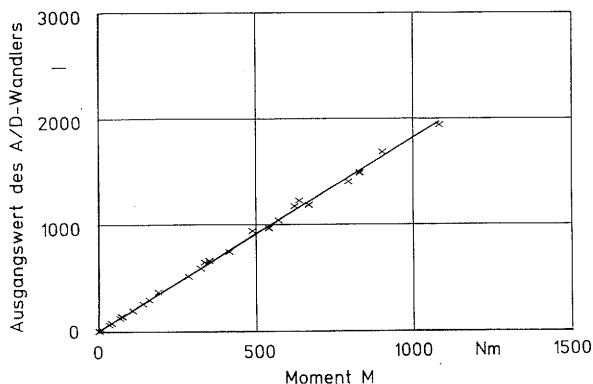
Aufgrund dieser Tatsache ist auch das Übersprechen des Momentenkanals auf Normal- und Längskraftkanal nicht zu erfassen, da diese Kräfte jeweils die Ursache des Moments darstellen (**Bild 18**).



**Bild 16:** Ergebnis der Kalibrierung der Kraftmeßeinrichtung mit Längskräften.



**Bild 17:** Ergebnis der Kalibrierung der Kraftmeßeinrichtung mit Normalkräften.



**Bild 18:** Ergebnis der Kalibrierung der Kraftmeßeinrichtung mit Momenten.

Insgesamt ist das Übersprechen sehr gering. Der lineare Zusammenhang zwischen Ausgangssignal der Meßbrücke und einwirkender Kraft ist sehr deutlich ( $r^2 > 0,99$ ). Der Einfluß des Angriffspunktes der Kraft auf das Meßergebnis ist vernachlässigbar klein.

Die Regressionskoeffizienten der Kalibriergeraden sind in **Tabelle 3** aufgelistet. Mit Hilfe dieser Faktoren läßt sich das Kalibrierverhalten der Kraftmeßeinrichtung in drei Gleichungen darstellen, in denen das Übersprechverhalten des Meßaufnehmers rechnerisch eliminiert wird.

$$\begin{aligned} AS_x &= F_x \cdot k_x + F_y \cdot k_{yx} \\ AS_y &= F_y \cdot k_y + F_x \cdot k_{xy} \\ AS_m &= M \cdot k_m + F_x \cdot k_{xm} \end{aligned} \tag{11}$$

Die im Versuch zu bestimmenden Größen Längskraft  $F_x$ , Normalkraft  $F_y$  und Moment  $M$  ergeben sich durch Lösung des Gleichungssystems.

$$\begin{aligned}
 F_x &= \frac{AS_x \cdot k_y - AS_y \cdot k_{yx}}{k_x \cdot k_y - k_{xy} \cdot k_{yx}} \\
 F_y &= \frac{AS_x \cdot k_{xy} - AS_y \cdot k_x}{k_{xy} \cdot k_{yx} - k_x \cdot k_y} \\
 M &= \frac{AS_m - k_{xm} \left( \frac{AS_x \cdot k_y - AS_y \cdot k_{yx}}{k_x \cdot k_y - k_{xy} \cdot k_{yx}} \right)}{k_m}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Koeffizient		$r^2$
$k_x$	0,812	> 0,999
$k_y$	1,056	> 0,999
$k_m$	1,825	> 0,998
$k_{xy}$	0,020	> 0,96
$k_{xm}$	0,014	> 0,98
$k_{yx}$	0,011	> 0,80

**Tabelle 3:** Aus den Kalibrierversuchen gewonnene Regressionsfaktoren.

## 6.2 Messung der ausgebrachten Flüssigmistmenge

Die sehr starre Förderkennlinie einer Drehkolbenpumpe erlaubt es, die Fördermenge  $\dot{V}$  aus der Pumpendrehzahl  $n_p$  zu bestimmen.

$$\dot{V} = V_{theor} \cdot n_p \tag{13}$$

Dabei besteht bei kleinen Drehzahlen und hohen Drücken die Gefahr, daß die errechneten Fördermengen zu groß sind, wes-

halb als Korrekturfaktor die Liefergradkennzahl  $k$  eingeführt ist.

$$\dot{V} = V_{theor} \cdot n_p \cdot k \quad (14)$$

Üblicherweise stehen Werte für die Liefergradkennzahl in Abhängigkeit von Druck und Pumpendrehzahl aus Herstellerangaben zur Verfügung.

Da die Liefergradkennzahl darüber hinaus von den Einbaubedingungen und den strömungstechnischen Gegebenheiten des Leitungssystems abhängig ist und diese Bedingungen an der Versuchseinrichtung günstig sind, können bessere Werte für die Liefergradkennzahl erwartet werden, als sie den Herstellerangaben zu entnehmen sind. Aus diesem Grunde wurde die Güllepumpe kalibriert.

Die Pumpendrehzahl als entscheidende Meßgröße wird mit einem inkrementalen Drehimpulsgeber erfaßt. Der Antrieb des Gebers erfolgt über einen Zahnriementrieb, der die Drehzahl der Pumpenwelle im Verhältnis 1:2 ins Schnelle übersetzt. Pro Umdrehung der Pumpe werden 720 Impulse abgegeben.

### 6.2.1 Kalibrierung der Flüssigistpumpe

Die Kalibrierversuche zur Ermittlung des tatsächlichen Zusammenhangs zwischen Pumpendrehzahl und Fördermenge wurden mit Wasser durchgeführt. Bei einer fest eingestellten Pumpendrehzahl wurde der Förderstrom für eine bestimmte Zeitdauer in einem Behälter aufgefangen. Durch Wiegen des Behälterinhaltes kann aus der Masse  $m$ , bei bekannter Dichte  $\rho$  und unter Berücksichtigung der Zeitdauer  $\Delta t$ , die Fördermenge  $\dot{V}$  berechnet werden.

$$\dot{V} = \frac{m}{\rho \cdot \Delta t} \quad (15)$$



Es wurden bei einer Drehzahleinstellung jeweils drei unabhängige Messungen der Fördermenge durchgeführt. Bild 19 zeigt den dabei ermittelten Zusammenhang zwischen Fördermenge und Pumpendrehzahl.

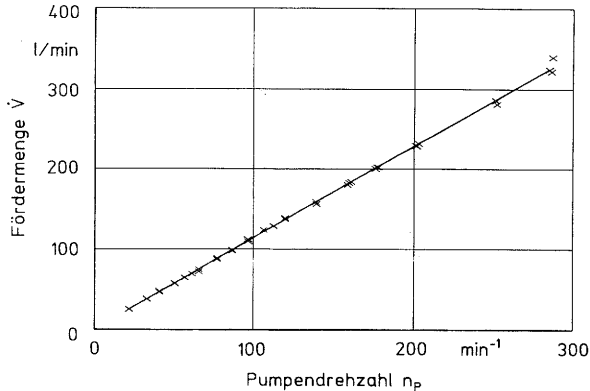


Bild 19: Ergebnis der Kalibrierung der Flüssigmistpumpe.

Der lineare Zusammenhang über den gesamten Drehzahlbereich ist deutlich zu erkennen. Eine Regressionsanalyse ergibt ein hochsignifikantes Bestimmtheitsmaß ( $r^2 > 0,999$ ). Die Gleichung der Regressionsgeraden für die Abhängigkeit der Fördermenge  $\dot{V}$  von der Pumpendrehzahl  $n_p$  lautet für die in der Meßeinrichtung eingesetzte Pumpe:

$$\dot{V} = 1,14 \cdot n_p - 0,19 \quad \begin{array}{l} \dot{V} [\ell/\text{min}] \\ n_p [\text{min}^{-1}] \end{array} \quad (16)$$

### 6.3 Messung der Arbeitstiefe

Die Messung der Arbeitstiefe erfolgt mit einem Ultraschallabstandssensor. Dieses berührungslose Meßverfahren bietet durch seinen kompakten Aufbau den Vorteil, daß es ohne großen Aufwand am einen Injektor abgenommen und am anderen Injektor

angebaut werden kann. Das Fehlen beweglicher Teile führt zu einer für Feldversuche tauglichen Robustheit.

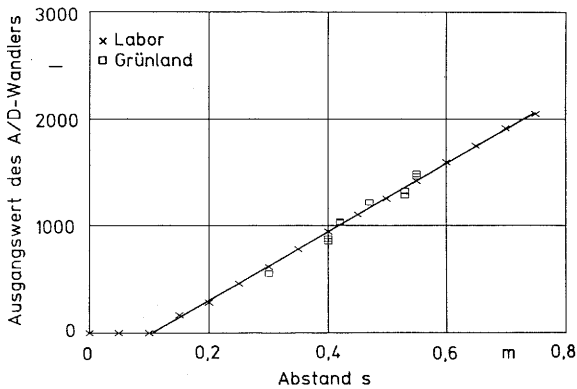
Der Ultraschallsensor sendet einen Ultraschallimpuls aus und empfängt das von der Bodenoberfläche reflektierte Echo. Aus der Laufzeit des Ultraschallsignals kann bei bekannter Schallgeschwindigkeit der Abstand zwischen Sender/Empfänger und der reflektierenden Oberfläche berechnet werden. Da die Schallgeschwindigkeit in Luft temperaturabhängig ist, wird bei der Auswertung eine Temperaturkompensation vorgenommen. Die Auswertelektronik stellt ein analoges, abstandsproportionales Ausgangssignal zur Verfügung. Eine Beeinflussung des Meßergebnisses durch Verwehen der Schallkeule ist bei den im Versuch üblichen Fahrgeschwindigkeiten, auch bei normal windigem Wetter, nicht zu erwarten.

### 6.3.1 Kalibrierung des Ultraschallsensors

In einer ersten Kalibrierreihe wurde im Labor der Einfluß der Versorgungsspannung des Ultraschallsensors auf sein Ausgangssignal untersucht. Dies war erforderlich, da der Ultraschallsensor im Versuch von der nicht immer konstanten Bordspannung des Schleppers versorgt wird. Es zeigte sich, daß Versorgungsspannungen zwischen 11 und 16 V gleiche Ausgangssignale bewirken, wenn der Meßabstand im Bereich zwischen 15 und 60 cm liegt. Hier war ein deutlicher linearer Zusammenhang ( $r^2 > 0,999$ ) zwischen Ausgangssignal und gemessenem Abstand feststellbar (**Bild 20**).

In weiteren Meßreihen wurde im Feldversuch der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit sowie verschiedener Fahrbahnen untersucht. Auf der Betonfahrbahn waren die Verhältnisse nahezu gleich denen im Labor. Die Fahrgeschwindigkeit zeigte hier nur einen minimalen Einfluß auf das Meßergebnis. Auf Grünland ist die Reflexionsfläche sehr inhomogen. Das liegt an der stochastischen Anordnung und Gestalt von Pflanzenteilen sowie an der

Unebenheit der Bodenoberfläche. Um mit dem Ultraschallsensor den Abstand zu einer Grünlandfläche sicher bestimmen zu können, ist eine Vorwärtsbewegung des Sensors erforderlich. Da die Lage der Reflexionsebene, die zwischen der Bodenoberfläche und den Blattspitzen liegt, nicht genau bekannt ist, muß vor dem Versuch eine Referenzmessung durchgeführt werden. Dabei wird der Sensor in konstanter Höhe über die Grünlandfläche geführt und das zugehörige Ausgangssignal erfaßt. Mit diesem Wert und der im Laborversuch ermittelten Steigung der Regressionsgeraden läßt sich im Feldversuch aus dem Sensorsignal die momentane Arbeitstiefe errechnen.



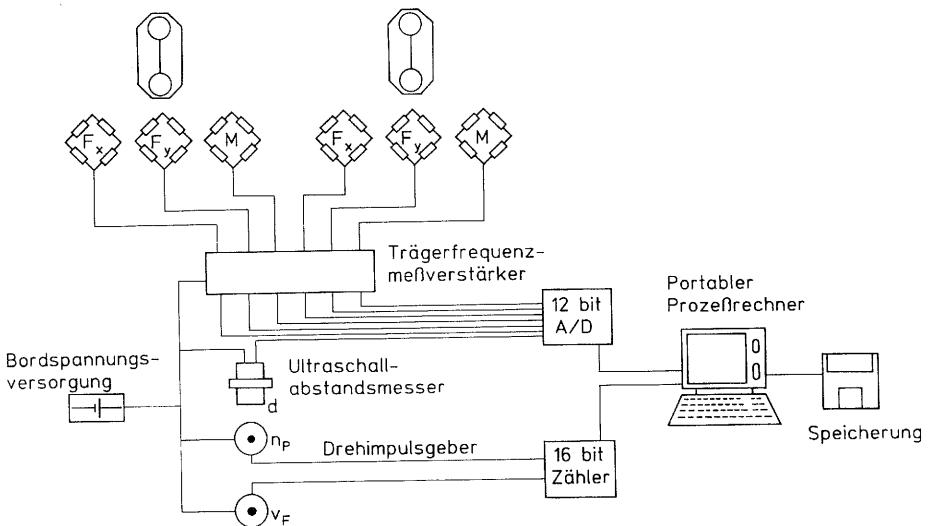
**Bild 20:** Ausgangssignal des Ultraschallsensors bei der Abstandsmessung im Labor und auf Grünland.

#### 6.4 Messung der Fahrgeschwindigkeit

Die Fahrgeschwindigkeit des Schleppers mit der Versuchseinrichtung wird im Versuch mit einem 5. Rad gemessen. An einem praktisch schlupffrei mitlaufenden Rad von etwa 60 cm Durchmesser sitzt ein inkrementaler Drehimpulsgeber, der pro Radumdrehung 1000 Impulse abgibt.

## 6.5 Meßwerterfassung

Die Ausgangssignale aller Meßwertgeber werden zentral in der Fahrerkabine des Zugschleppers erfaßt. Alle Meßwertgeber und Registriergeräte werden über die Bordspannungsanlage des Schleppers mit Betriebsspannung versorgt. Eine Übersicht über die Meßanordnung gibt **Bild 21**. Die Meßbrücken der DMS auf den erweiterten Oktagonalelementen werden von einem 6-Kanal-Trägerfrequenzmeßverstärker mit einer konstanten Speisespannung versorgt. Der Meßverstärker übernimmt gleichzeitig die Aufbereitung der Brückenausgangsspannungen und deren Umwandlung in ein analoges Spannungssignal.



**Bild 21:** Schematische Darstellung der Meßanordnung.

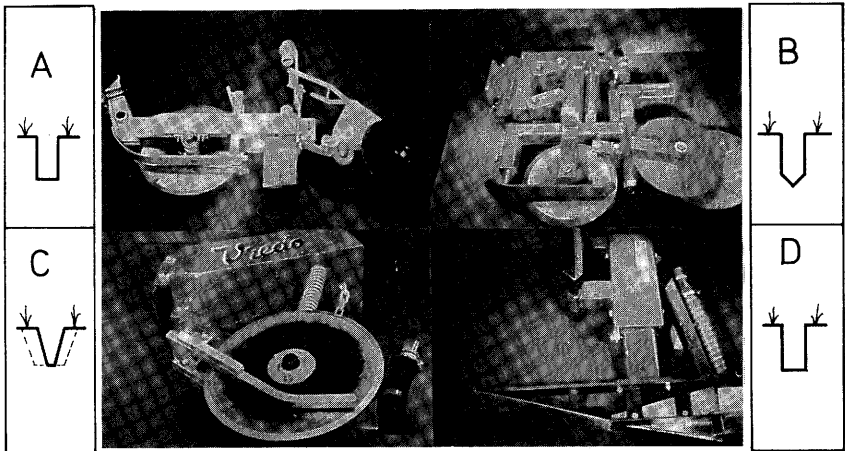
Für die Erfassung der Meßwerte wird ein portabler Prozeßrechner eingesetzt. Die analogen Signale des Trägerfrequenzmeßverstärkers sowie des Ultraschallsensors werden zeitlich nacheinander von einem 12-bit A/D-Wandler digitalisiert. Die Abtastrate für jeden Kanal liegt bei 100 Hz. Die Signale von den beiden Impulsgebern werden von zwei 16-bit Zählerbau-

steinen erfaßt. Für jeweils eine Sekunde wird die Anzahl der Impulse gezählt.

Während des Versuches werden die Meßwerte in den Arbeitsspeicher des Rechners gelesen. Nach Beendigung des Versuches werden die Werte in physikalische Größen umgewandelt und auf Massenspeichern abgelegt. Auf dem Grafikbildschirm kann eine sofortige Kontrolle der Meßergebnisse vorgenommen werden.

### 6.6 Untersuchte Injektoren

Für die Versuche wurden von verschiedenen Herstellern<sup>1</sup> vier einreihige GÜlleinjektoren zur Verfügung gestellt (Bild 22).



**Bild 22:** Untersuchte Injektoren und Form des Injektionsschlitzes.

<sup>1</sup> Den Firmen Jako Landbouwmachines B.V., Kootwijkerbroek, Landmaschinenfabrik Köckerling GmbH & Co. KG, Verl, Louis Nagel B.V., Nijmegen und Vredo B.V., Dodewaard sei an dieser Stelle für die Überlassung der Injektoren gedankt.

Es handelt sich dabei um zwei Einfach- und zwei Flachinjektoren, wobei an beiden Flachinjektoren die Schließeinrichtung leicht zu demontieren ist, so daß sie auch als Einfachinjektoren eingesetzt werden können.

Injektor A repräsentiert die ursprüngliche Bauweise eines Flachinjektors. Ein Scheibensech mit 40 cm Durchmesser durchschneidet die Grünlandnarbe, ein 27 mm breites, hohles Scharformt den Injektionsschlitz aus und bringt die Gülle ein. Als Schließeinrichtung dienen zwei V-förmig angestellte, hintereinander versetzte Scheiben mit abgerundeten Außenkanten. Der Durchmesser dieser Andruckscheiben beträgt 30 cm. Der Anpreßdruck ist nicht einstellbar und resultiert allein aus dem Gewicht der Scheiben. Während der Versuche war das Scheibensech so eingestellt, daß es 3 cm tiefer schneidet als das Injektionsschar. Für die Messung der Kräfte war es erforderlich, die höhen- und längenverstellbare Schleifkufe am Scheibensech zu entfernen.

Bei Injektor B ist das Durchschneiden der Grünlandnarbe mit dem Ausformen des Injektionsschlitzes kombiniert. Dazu dient eine 25 mm starke Injektionsscheibe, die am Umfang in einem Winkel von  $49^\circ$  spitz zuläuft. Der Durchmesser der Scheibe beträgt 34 cm. Die Gülle wird über ein Fallrohr mit einer Auslauftülle aus Gummi in den Schlitz geleitet. Die Schließeinrichtung entspricht im prinzipiellen Aufbau der des Injektors A. Die Scheiben mit 34 cm Durchmesser haben keine abgerundeten Außenkanten. Sie wirken nur über das Eigengewicht, sind aber etwas schwerer als bei Injektor A. Während der Messung der Kräfte am Injektor war es erforderlich, die höhenverstellbare Schleifkufe an der Injektionsscheibe abzunehmen.

Der Einfachinjektor C besteht aus zwei Scheibensechen mit 41 cm Durchmesser. Diese sind im Winkel von  $7^\circ$  V-förmig gegeneinander gestellt. Während des Einsatzes befindet sich der Berührungspunkt beider Scheiben etwa in Höhe der Bodenoberfläche. Die Gülle wird aus einer Gummitülle abgegeben, die

hinter einem Werkzeug zum Räumen des Injektionsschlitzes angeordnet ist. Die gesamte Injektionseinheit kann sich, gegen den Druck einer Schraubenfeder, um ihren Befestigungspunkt am Rahmen drehen. Bei dieser Höhenbewegung bleibt die Bodenparallelität nicht erhalten. Daher wurde die schmale Schleifkufe bei Arbeitstiefen von mehr als 6 cm entfernt. Da sie in diesem Fall nicht mehr bodenparallel ausgerichtet ist, ist sie zum einen wirkungslos, zum anderen beschädigt sie mit ihrem vorderen Teil die Grünlandnarbe.

Injektor D weist überhaupt keine sich drehenden Bauteile auf. Das Durchschneiden der Grünlandnarbe erfolgt mit einem feststehenden Messersech. Durch den spitzen Anstellwinkel von  $16^\circ$  wird ein stark ziehender Schnitt ermöglicht. Übermäßigem Verschleiß wird durch eine Auftragsschweißung auf der Schneide begegnet. Der Schnitt wird durch den Gülleauslauf auf 27 mm Breite erweitert. Die Injektionseinheit ist gegen eine Schraubenfeder bodenparallel höhenbeweglich. Bei diesem Injektor ist die Arbeitstiefe konstruktiv fest auf 5,5 cm eingestellt. Das Messersech schneidet 1,5 cm tiefer ein. Wenn mit dem Injektor flacher gearbeitet werden soll, liegt die Schleifkufe nicht mehr auf der Bodenoberfläche auf, und die Bodenanpassung über den Federmechanismus ist nicht mehr möglich.

## **6.7 Versuchsstandorte**

Die Versuche wurden in den Jahren 1991 und 1992 auf vier Dauergrünlandstandorten in Stuttgart-Hohenheim durchgeführt. Es handelt sich um ein typisches Wirtschaftsgrünland, wie es sich bei dreimaliger Schnittnutzung unter den gegebenen klimatischen Bedingungen ausbildet [53]. Die Jahresmitteltemperatur in Hohenheim, 407 m über NN, beträgt  $8,8^\circ\text{C}$ , die jährlichen Niederschläge belaufen sich auf 697 mm [54]. Die Grünlandnarben sind teilweise durch Lückigkeit bzw. hohen Krautanteil gekennzeichnet.

Die Versuchsstandorte, alle auf Lehm Boden, unterscheiden sich in ihren Eigenschaften nur unwesentlich voneinander. Es handelt sich um mittel- bis tiefgründige, gut durchwurzelbare Parabraunerden aus Löß über Sandstein [55].

### **6.8 Versuchsdurchführung**

Die am Injektionswerkzeug wirkenden Kräfte wurden in jeweils 20 s dauernden Einzelversuchen erfaßt. Während des Versuches wurde entweder die Arbeitstiefe oder die Fahrgeschwindigkeit erhöht. Jeder Einzelversuch wurde dreifach wiederholt, um den Einfluß lokaler Schwankungen im Bodenzustand gering zu halten.

Die ausbringbare Güllemenge wurde in Einzelversuchen mit einer Versuchsdauer von einer Minute bestimmt. Während des Versuches konnten Pumpendrehzahl und Arbeitstiefe variiert werden. Die maximale Ausbringmenge wurde bestimmt als die Ausbringmenge, bei der die Gülle gerade noch nicht aus dem Injektionsschlitz überläuft. Das Austreten der Gülle aus dem Schlitz wurde visuell erfaßt und während der Meßwerterfassung digital markiert. Jeder Versuch wurde dreifach wiederholt.

Während aller Versuche wurde die Arbeitsweise des Injektionswerkzeugs beobachtet. Daraus wurde zusammen mit der mehrwöchigen Beobachtung der Injektionsschlitze die Arbeitsqualität bestimmt.

Zur Ermittlung der Bodenfeuchte wurden während der Versuche an mehreren über das Versuchsfeld verteilten Stellen Bodenproben entnommen. Die Proben wurden an möglichst unbewachsenen Stellen bis in eine Tiefe von 6 cm gezogen. Nach Ermittlung ihrer Masse wurden die Bodenproben bei 105 °C 24 h lang getrocknet und erneut gewogen. Der Feuchtegehalt  $U$  der Bodenprobe ergibt sich aus dem prozentualen Verhältnis von Masseverlust zu Frischmasse.



## **7      VERSUCHSERGEBNISSE**

### **7.1   Kräfte am Injektor**

Mit allen Injektoren wurden auf allen Versuchsstandorten, bei unterschiedlichen Bodenfeuchten, Messungen der angreifenden Kräfte durchgeführt.

Die gemessenen Längskräfte müssen als Zugkräfte zum Ziehen des Injektors aufgebracht werden und von den Schlepperantriebsrädern an der Grünlandnarbe abgestützt werden. Die gemessenen Normalkräfte entsprechen der Kraft, mit der auf den Injektor gedrückt werden muß, damit er die eingestellte Arbeitstiefe einhält. In der Praxis bringen das Eigengewicht des Injektors und die Hydraulik des Hubmastes, in der der Injektor am Faßwagen angebaut ist, diese Kräfte auf. Dazu ist auch ein ausreichendes Gewicht des Wagens erforderlich, so daß diese Kräfte abgestützt werden können, ohne daß die Räder des Gülletankwagens vom Boden abheben.

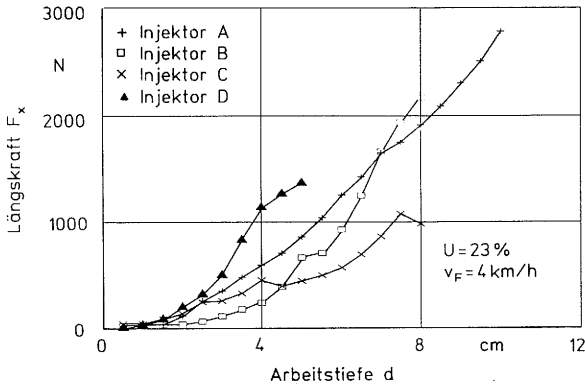
Bei den Messungen zeigte sich, daß das Ausbringen von Gülle oder Wasser keinen Einfluß auf die Höhe der am Injektor wirkenden Kräfte hat. Ebenso war der Zugkraftbedarf für die Schließeinrichtung im Feldversuch nicht zu ermitteln, da die durch die Schließeinrichtung verursachte Längskraft kleiner ist als die Schwankungen in der Längskraft des Injektors.

Bei den starren Injektoren A und B wurde zur Messung der Kräfte am Injektionswerkzeug die Schleifkufe demontiert, da sonst die auf der Schleifkufe abgestützten Kräfte die gemessene Normalkraft verfälschen.

#### **7.1.1      Einfluß der Bauart und der Arbeitstiefe**

Die Arbeitstiefe ist maßgeblich für die Höhe der am Injektor angreifenden Kräfte verantwortlich. Die Längskräfte steigen

mit zunehmender Arbeitstiefe deutlich an (**Bild 23**), wobei der konstruktive Aufbau des Injektors die Höhe der Längskraft stark beeinflusst.

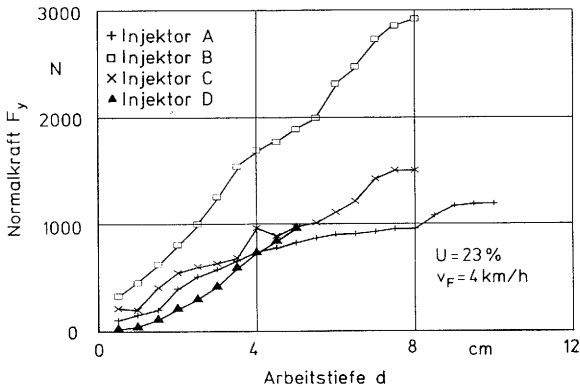


**Bild 23:** Abhängigkeit der Längskraft an den Injektoren von der Arbeitstiefe.

Arbeitstiefen von weniger als 4 cm sind für den praktischen Einsatz der Injektoren ohne Bedeutung, da durch die Unebenheit der Grünlandoberflächen keine ordnungsgemäße Flüssigmistinjektion möglich ist. Betrachtet man diesen Bereich in **Bild 23** dennoch, so erkennt man, daß Injektor B hier deutlich niedrigere Längskräfte verursacht als die übrigen Injektoren. Das liegt daran, daß die dicke Injektionsscheibe zunächst nur eine Rinne in die Grünlandoberfläche drückt, ohne die Grasnarbe zu durchschneiden. Die Längskräfte bleiben so lange niedrig, bis der Injektor in den Boden eindringt. Dabei steigen die Längskräfte sehr rasch an. Bei Injektor C ist zu beobachten, daß die Längskräfte bis zu einer Arbeitstiefe von 4 cm stärker ansteigen als bei größeren Arbeitstiefen. Dieser Effekt kann dadurch bewirkt sein, daß bis zu dieser Tiefe die Hauptwurzelzone des Grünlandes durchschnitten wird und die Schnittkräfte bei dieser Bauart einen hohen Anteil an der Längskraft haben. Dies trifft auch für den Injektor D zu, und auch hier kann ein flacherer Anstieg der Zugkraft bei Arbeitstiefen größer als

4 cm festgestellt werden. Die auftretenden Längskräfte sind am Injektor D am höchsten und am Injektor C am niedrigsten. Die an den Injektoren A und B wirkenden Längskräfte liegen dazwischen und sind etwa gleich hoch. Diese Abfolge ist in den Ergebnissen sämtlicher Versuche zu beobachten. Arbeitstiefen von mehr als 8 cm sollten im praktischen Einsatz keine Rolle spielen, so daß 2 kN als maximale für ein Injektionsschar erforderliche Zugkraft gelten können.

Der Verlauf der Normalkräfte ist in Bild 24 zu sehen. Auch die Normalkräfte steigen mit zunehmender Arbeitstiefe stetig an. Typisch für alle Versuche sind auch hier die Unterschiede zwischen den einzelnen Injektorbauarten.



**Bild 24:** Abhängigkeit der Normalkraft an den Injektoren von der Arbeitstiefe.

Die Injektoren A und D verursachen die geringsten Normalkräfte, wobei die Werte für den Injektor D steil ansteigen, und bei der konstruktiv bestimmten maximalen Arbeitstiefe von 5,5 cm bereits Normalkräfte erreicht werden, wie sie auch an Injektor C wirken. Die Normalkraft am Injektor A steigt nur sehr langsam mit der Arbeitstiefe an, während die am Injektor B wirkenden Normalkräfte sehr stark von der Arbeitstiefe bestimmt werden. Die dicke Injektionsscheibe hat ein starkes

Bestreben aus dem Boden herauszulaufen. Das macht ein exaktes Einhalten der Arbeitstiefe, besonders auf wechselnden Böden, schwierig.

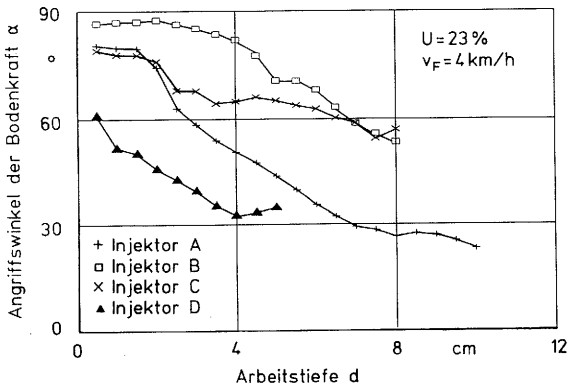
Aus der Kenntnis der Längs- und Normalkraft kann die Höhe der resultierenden Bodenkraft bestimmt werden.

$$F_{Res} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (17)$$

Auch der Winkel unter dem diese Bodenkraft angreift kann berechnet werden.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{F_y}{F_x}\right) \quad (18)$$

Dieser Angriffswinkel der resultierenden Bodenkraft ist für die einzelnen Injektoren in **Bild 25** aufgezeichnet. Aus dieser Darstellung kann das Verhältnis von am Injektor wirkender Längs- und Normalkraft entnommen werden. Ein Winkel von 90° ergibt sich beim alleinigen Vorhandensein einer Normalkraft, während Wirklinien reiner Längskräfte im Winkel von 0° verlaufen.



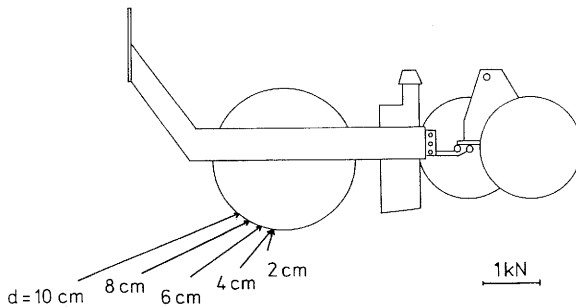
**Bild 25:** Winkel der Bodenkraft an den Injektoren.

Da neben der Längs- und der Normalkraft auch das Moment um die Querachse erfaßt wird, kann der senkrechte Abstand der Wirklinie der resultierenden Bodenkraft vom Oktagonalelement berechnet werden.

$$a = \frac{M}{F_{Res}} \quad (19)$$

Wird die somit nach Richtung, Betrag und Abstand vom Oktagonalelement bekannte resultierende Bodenkraft in einen Lageplan des Injektors eingezeichnet, so ergibt sich der Angriffspunkt der Kraft am Injektor. Dies wird für die unterschiedlichen Injektorbauarten in den **Bildern 26 bis 29** gezeigt.

In **Bild 26** ist Injektor A und die an ihm angreifende Bodenkraft bei verschiedenen Arbeitstiefen eingezeichnet.

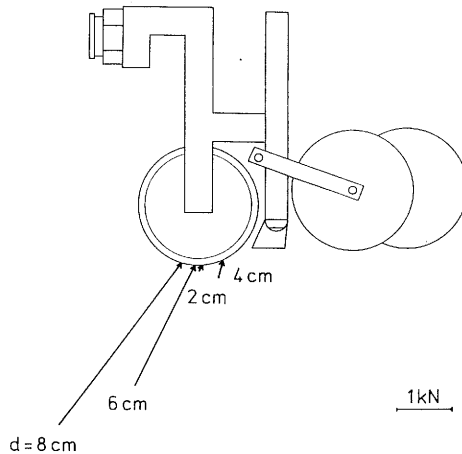


**Bild 26:** Verlauf der resultierenden Bodenkraft am Injektor A,  $U = 23 \%$ ,  $v_F = 4$  km/h.

Die Vergrößerung der Arbeitstiefe führt erwartungsgemäß zu einer deutlichen Erhöhung der Bodenkraft. Den flacher werdenden Wirklinien ist zu entnehmen, daß der Anteil der Längskraft dabei überproportional zunimmt. Der Angriffspunkt der resultierenden Bodenkraft verschiebt sich mit zunehmender Arbeitstiefe am Umfang des Scheibensechses nach vorn. Die Wirklinien der Kräfte liegen hinter dem Mittelpunkt des Scheibensechses. Das deutet darauf hin, daß Längskräfte an Injektionsschar und

Schließeinrichtung angreifen, da sonst die Wirklinien, nach der Theorie des starren Rades, durch den Mittelpunkt des Scheibensechses verlaufen müßten.

In **Bild 27** ist der gleiche Sachverhalt für den Injektor B dargestellt.

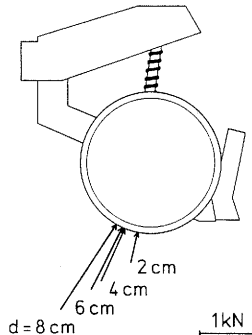


**Bild 27:** Verlauf der resultierenden Bodenkraft am Injektor B,  $U = 23 \%$ ,  $v_F = 4 \text{ km/h}$ .

Der Angriffspunkt der Bodenkraft wandert hier bis zu einer Tiefe von etwa  $3 \text{ cm}$  am Umfang der Injektionsscheibe nach hinten um sich danach, wie bei Injektor A, nach vorn zu verschieben. Dieses Verhalten kann mit der unsicheren Arbeitsweise des Injektors bei sehr flachen Arbeitstiefen erklärt werden, da es bei trockeneren Bodenbedingungen weniger ausgeprägt ist. Sobald der Injektor die Grünlandnarbe korrekt durchschneidet, steigt die Bodenkraft sehr stark an. Auch noch bei großen Arbeitstiefen verläuft ihre Wirklinie sehr steil, da bei diesem Injektor auch die Normalkraft mit der Arbeitstiefe stark zunimmt. Die Wirklinien rücken hier im Vergleich zu Injektor A näher an den Mittelpunkt der Injektionsscheibe heran, liegen aber noch dahinter. Das bedeutet, daß hier der überwiegende

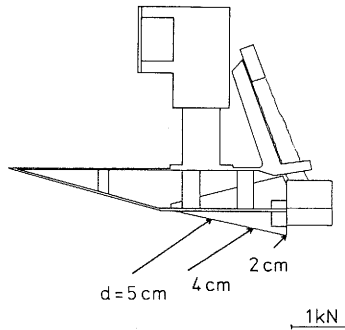
Teil der Längskraft an der Injektionsscheibe wirkt und die Längskräfte an GÜlleauslauf und Schließeinrichtung dagegen gering sind.

Auch am Injektor C (Bild 28) verschiebt sich der Angriffspunkt der resultierenden Bodenkraft mit zunehmender Arbeitstiefe am Umfang der Scheibenseche nach vorn. Der Winkel unter dem die Kraft angreift wird nur wenig flacher, da die Normalkräfte an diesem Injektor mit zunehmender Arbeitstiefe stark ansteigen. Die Wirklinien liegen nur knapp hinter dem Mittelpunkt der Scheibenseche, da hier lediglich die Kraft durch das Aufdrücken des Injektionsschlitzes eine Verschiebung der Wirklinien bewirken kann.



**Bild 28:** Verlauf der resultierenden Bodenkraft am Injektor C,  
 $U = 23\%$ ,  $v_F = 4\text{ km/h}$ .

Der Angriffspunkt der resultierenden Bodenkraft am Injektor D (Bild 29) verschiebt sich mit zunehmender Arbeitstiefe entlang der Schneide des Messerseches nach vorne. Dabei ändert sich der Winkel unter dem die Kraft angreift nicht allzu stark.



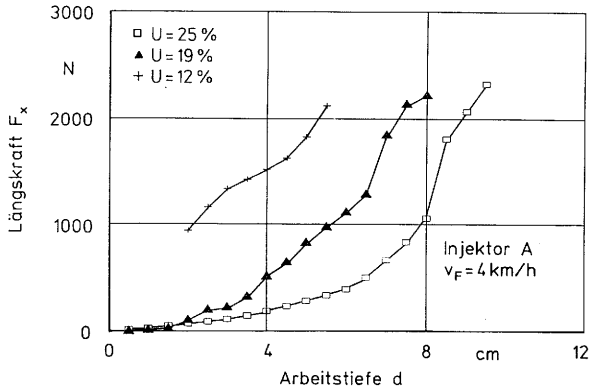
**Bild 29:** Verlauf der resultierenden Bodenkraft am Injektor D,  
 $U = 23 \%$ ,  $v_F = 4 \text{ km/h}$ .

### 7.1.2 Einfluß der Bodenfeuchte

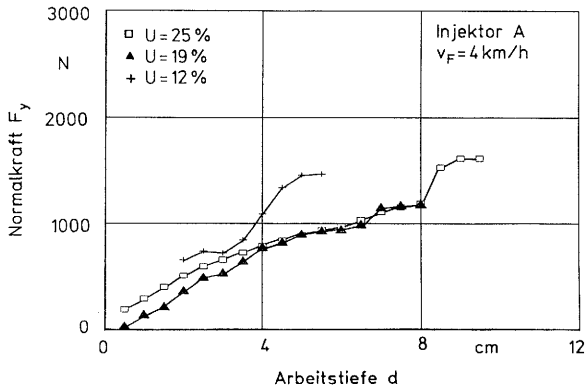
Die Versuche konnten jeweils in der Zeitspanne zwischen Räumung der Grünlandfläche und dem einsetzenden Wachstum des nachfolgenden Aufwuchses erfolgen. Diese Zeitspannen waren bei wüchsigem Wetter sehr kurz. Die Bodenfeuchte lag in den meisten Fällen zwischen 20 und 23 %. Im zeitigen Frühjahr 1992 stiegen die Feuchtegehalte der obersten Bodenschicht nach Niederschlägen bis auf 28 % an. Im sehr trockenen Frühsommer konnten jedoch auch Versuche bei Bodenfeuchten bis zu 12 % durchgeführt werden. Zu diesen extremen Bodenfeuchten ist anzumerken, daß sie für den praktischen Einsatz von Gülleinjektoren auf Grünland keine Bedeutung haben. Bei einer Bodenfeuchte von 28 % waren die Schäden an der Grünlandnarbe durch das Befahren mit der Versuchseinrichtung so hoch, daß nur einige wenige Versuche möglich waren. Bodenfeuchten von 12 % sind derart gering, daß keine vernünftige Gülleinjektion möglich ist, vgl. Kap. 7.4. Die Injektoren drangen kaum in den extrem verhärteten Boden ein, so daß sich zum Teil nur unzureichende Arbeitstiefen ergaben.



Die am Injektor A wirkende Längskraft ist von der Bodenfeuchte deutlich abhängig (Bild 30). Je feuchter der Boden ist, desto leichtzügiger ist der Injektor. Die Normalkräfte werden hingegen nur unwesentlich von der Bodenfeuchte beeinflusst (Bild 31). Lediglich bei den sehr trockenen Bodenbedingungen sind die Normalkräfte erhöht. Unter diesen Umständen lag die maximal erreichbare Arbeitstiefe bei 6 cm.

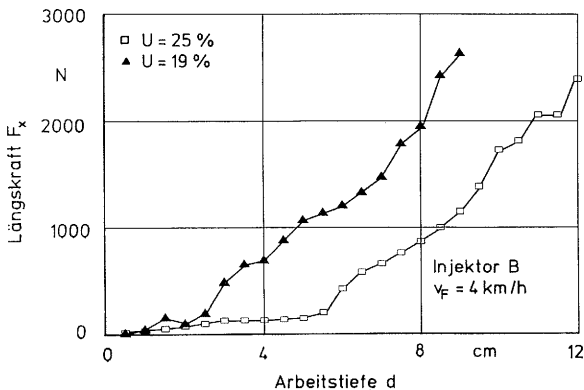


**Bild 30:** Längskraft am Injektor A bei unterschiedlichen Bodenfeuchtegehalten.

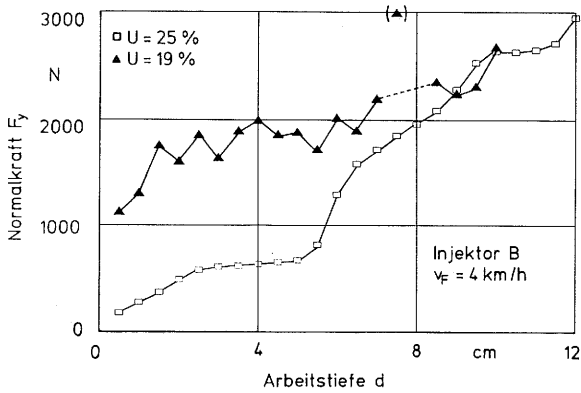


**Bild 31:** Normalkraft am Injektor A bei unterschiedlichen Bodenfeuchtegehalten.

Der Injektor B konnte in der Versuchsreihe mit einer Bodenfeuchte von 12 % nicht eingesetzt werden. Die abgeschätzte Höhe der auftretenden Bodenkraft ließen die Gefahr von irreparablen Schäden an der Meßeinrichtung zu groß werden. Aber auch Bodenfeuchten von 19 % führten bereits zu einer Erhöhung der Längskräfte (**Bild 32**). Die dicke Injektionsscheibe dringt unter diesen Bedingungen jedoch besser in den Boden ein. Bei der hohen Bodenfeuchte wird durch die Injektionsscheibe eine Kerbe in den sehr plastischen Boden gedrückt. Das Wurzelgeflecht der Grasnarbe weist eine so hohe Elastizität auf, daß die Grasnarbe nicht eingeschnitten wird. Sobald der Injektor das Wurzelgeflecht durchschneidet und einen Injektionsschlitz in den Boden legt, steigen die Längskräfte stark an. Auch am Verlauf der Normalkraft läßt sich dieser Sachverhalt feststellen (**Bild 33**). Die Normalkraft erreicht zuerst einen Wert mit dem zwar der Boden verformt, nicht jedoch die Grasnarbe durchschnitten werden kann. In trockenem Boden schwankt die am Injektor wirkende Normalkraft stark. Dies wird durch den unruhigen Lauf des Injektors im Boden verursacht. Die Normalkräfte sind bei kleinen Arbeitstiefen stark erhöht, während sie sich bei den größten Arbeitstiefen kaum mehr von den bei hoher Bodenfeuchte wirkenden Normalkräften unterscheiden.

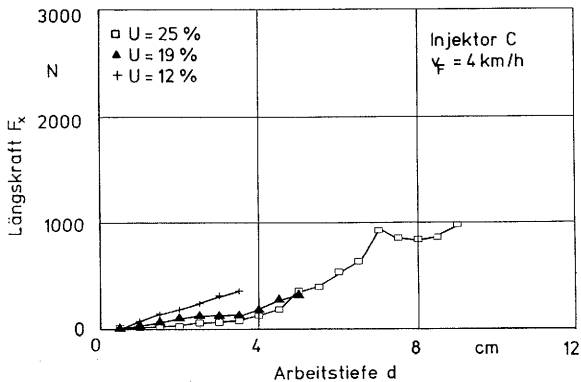


**Bild 32:** Längskraft am Injektor B bei unterschiedlichen Bodenfeuchtegehalten.

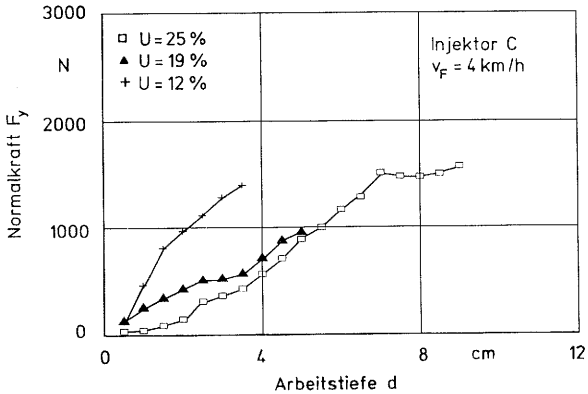


**Bild 33:** Normalkraft am Injektor B bei unterschiedlichen Bodenfeuchtegehalten.

Die Längskräfte am Injektor C sind nur unwesentlich von der Bodenfeuchte abhängig (Bild 34). Nur auf dem sehr trockenen Boden sind sie leicht erhöht, was aber ohne praktische Bedeutung ist, da hier Arbeitstiefen von 4 cm nicht erreichbar waren. Injektor C reagiert mit der Normalkraft auf die Bodenfeuchte (Bild 35). Eine Verringerung der Bodenfeuchte führt zu einem deutlichen Anwachsen der Normalkräfte.

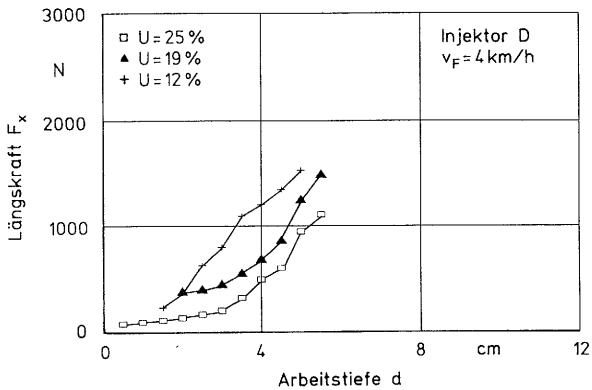


**Bild 34:** Längskraft am Injektor C bei unterschiedlichen Bodenfeuchtegehalten.

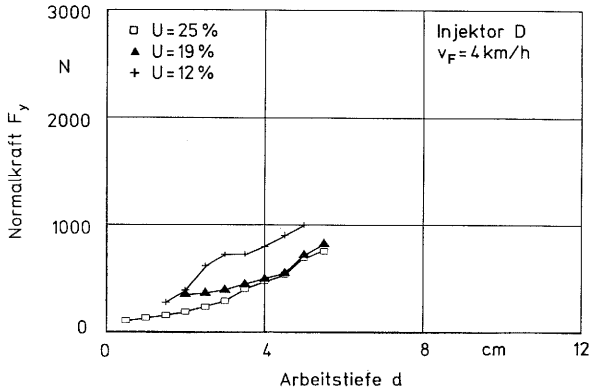


**Bild 35:** Normalkraft am Injektor C bei unterschiedlichen Bodenfeuchtegehalten.

Auch die am Injektor D wirkenden Kräfte sind von der Bodenfeuchte abhängig. Dies gilt insbesondere für die Längskräfte (Bild 36). Bei den Normalkräften ist der Effekt dagegen kaum ausgeprägt (Bild 37). Hier führen nur extrem trockene Bodenbedingungen zu einem spürbaren Ansteigen der Normalkräfte.



**Bild 36:** Längskraft am Injektor D bei unterschiedlichen Bodenfeuchtegehalten.



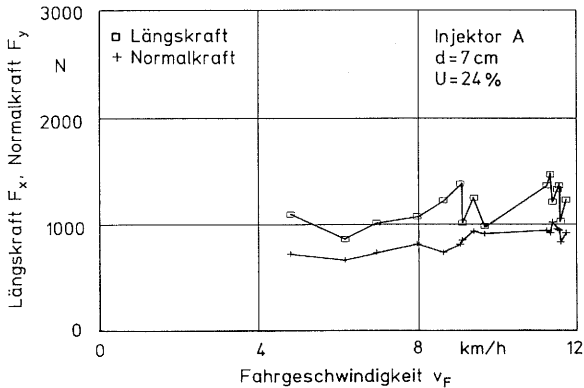
**Bild 37:** Normalkraft am Injektor D bei unterschiedlichen Bodenfeuchtegehalten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Bodenfeuchte einen Einfluß auf den Kraftbedarf für die Gülleinjektion hat. Hohe Bodenfeuchten versprechen geringere Kräfte als trockene Bodenzustände. Wie stark dieser Einfluß überhaupt zum Tragen kommt und wie stark er sich auf den Zugkraftbedarf auswirkt, ist sehr stark vom konstruktiven Aufbau des Injektors abhängig. Darüber hinaus spielt die Bodenfeuchte auch für die Arbeitsqualität der Injektion eine entscheidende Rolle, vgl. Kap. 7.4, was für den praktischen Einsatz sehr entscheidend ist, zumal hier aufgrund arbeitswirtschaftlicher Gesichtspunkte eine Änderung der Bodenfeuchte nicht abgewartet werden kann.

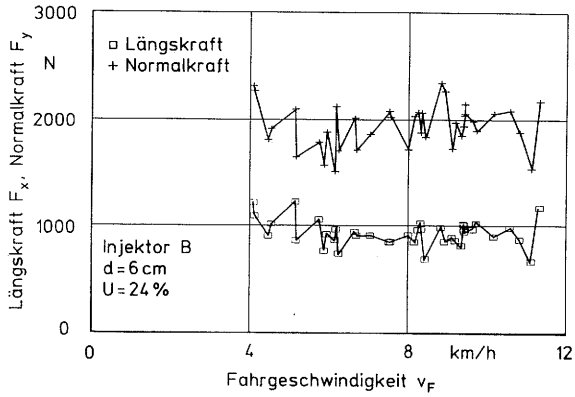
### 7.1.3 Einfluß der Fahrgeschwindigkeit

Die Versuche zum Fahrgeschwindigkeitseinfluß auf die Kräfte am Injektor wurden bei unterschiedlichen Bodenfeuchten auf einer Versuchsfläche durchgeführt, wodurch die Höhe der gemessenen Kräfte von den lokalen Bodeneigenschaften beeinflusst ist. Die Fahrgeschwindigkeit hat auf die am Injektor angreifenden Kräfte keinen Einfluß. Sowohl Längs- als auch Normalkräfte bleiben

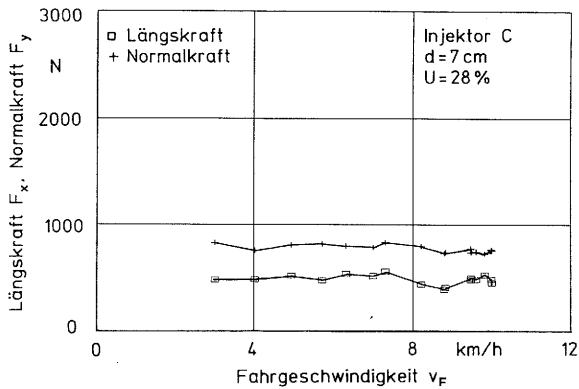
bei allen untersuchten Injektoren über einen weiten Geschwindigkeitsbereich gleich hoch (**Bild 38 bis 41**). Auch bei unterschiedlichen Bodenfeuchten blieben die Kräfte von der Arbeitsgeschwindigkeit unbeeinflusst. Ein sauberes Ziehen des Injektionsschlitzes bei trockeneren Bodenzuständen ist allerdings mit zu hohen Arbeitsgeschwindigkeiten nicht mehr möglich, vgl. Kap. 7.4. Da die Längskraft an den Injektoren nicht von der Fahrgeschwindigkeit abhängt, steigt der Zugleistungsbedarf für einen Gülleinjektor für Grünland linear mit der Fahrgeschwindigkeit an.



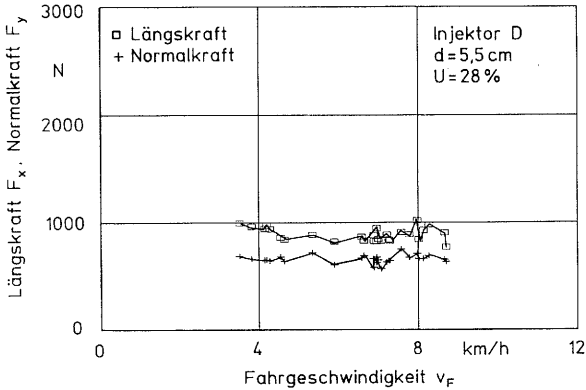
**Bild 38:** Längs- und Normalkraft am Injektor A in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.



**Bild 39:** Längs- und Normalkraft am Injektor B in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.



**Bild 40:** Längs- und Normalkraft am Injektor C in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.



**Bild 41:** Längs- und Normalkraft am Injektor D in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.

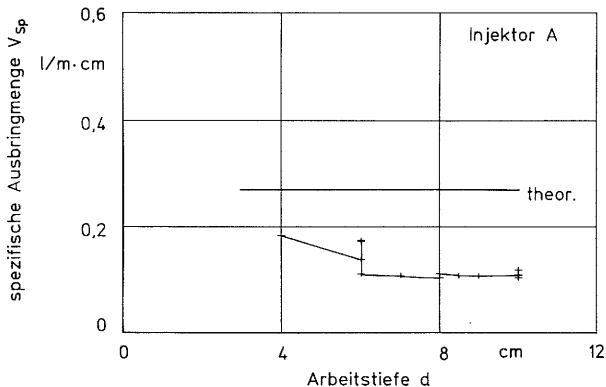
## 7.2 Ausbringbare Flüssigmistmenge

Die maximal ausbringbare Güllemenge richtet sich nach dem Volumen der Injektionsschlitze. Das vollständige Anfüllen der Schlitze muß angestrebt werden, um nicht unnötig tief und daher mit zu hohem Kraftaufwand zu arbeiten. Das Volumen des Schlitzes läßt sich theoretisch aus den geometrischen Abmessungen des Injektionsschaars berechnen. In der Praxis wird dieses Volumen durch das elastische Verhalten des Bodens, das bei Flachinjektoren zusätzlich durch die Schließeinrichtung unterstützt wird, verkleinert. Da sich dieses Verhalten nicht exakt rechnerisch beschreiben läßt, wurde ein linearer Zusammenhang zwischen maximal möglicher Ausbringmenge und der Arbeitstiefe des Injektors angenommen. Mit dieser Vorgehensweise läßt sich für jeden Injektor eine spezifische Ausbringmenge angeben. Diese Kenngröße gibt das auf die Arbeitstiefe und die Länge des Injektionsschlitzes bezogene Flüssigmistvolumen an, das ordnungsgemäß in die Grünlandnarbe eingebracht werden kann.



Im Versuch wurde die maximale Ausbringmenge als die Ausbringmenge bestimmt, bei der die Gülle gerade noch nicht aus dem Injektionsschlitz überläuft. Dieser Punkt wurde visuell bestimmt.

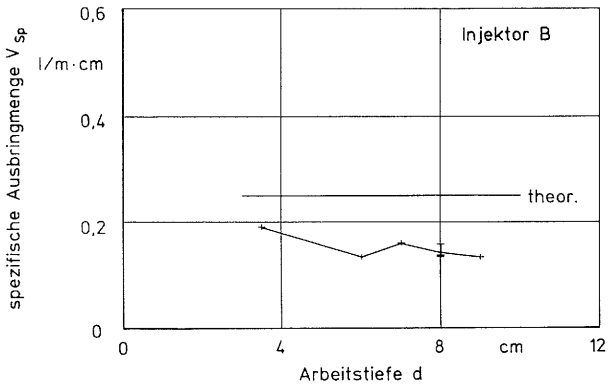
In den **Bildern 42 bis 45** ist zu sehen, daß der lineare Ansatz zutreffend ist. Dennoch bleiben die in der Praxis erzielbaren Werte zum Teil deutlich hinter den theoretischen zurück. Die spezifische Ausbringmenge erreicht bei den Flachinjektoren A und B lediglich 46 % bzw. 59 % der theoretischen spezifischen Ausbringmenge, während dieser Wert beim Einfachinjektor D 71 % beträgt. Die Schwankungen in den Werten der einzelnen Injektoren werden durch die unterschiedlichen Trockensubstanzgehalte der ausgebrachten Güllen (2,2 bis 7 % TS) und die unterschiedlichen Bodenfeuchten verursacht.



**Bild 42:** Spezifische Ausbringmengen für den Injektor A.

Die Injektoren A, B und C unterscheiden sich in ihrer spezifischen Ausbringmenge kaum (**Bild 42, 43 und 44**). Der Grund dafür, daß der Einfachinjektor C keine höheren Ausbringmengen erreicht als die beiden Flachinjektoren, liegt an dem sehr kleinen Injektionsschlitz den dieser Injektor ausformt. Die kleine Querschnittsfläche, die im Boden freigeräumt wird ist

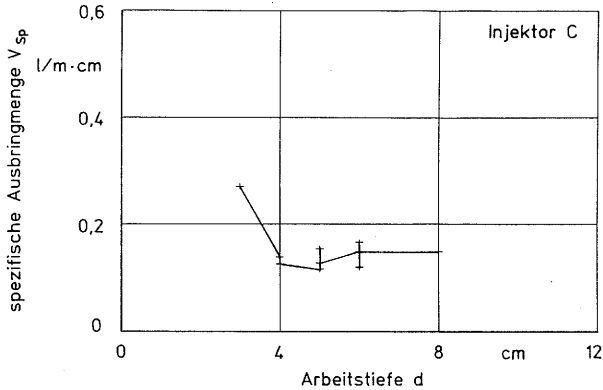
möglicherweise auch dafür mitverantwortlich, daß die Kräfte an diesem Injektor relativ gering sind. Die Querschnittsfläche des Injektionsschlitzes ist bei Injektor C nicht nur von der Arbeitstiefe, sondern auch von der Einfederung des Injektors abhängig. Durch das Einfedern verändert sich die Geometrie des Schlitzes so stark, daß keine theoretische spezifische Ausbringungsmenge angegeben werden kann. Aus dem selben Grund stellt auch die Querschnittsfläche des Injektionsschlitzes kein auf der Spitze stehendes gleichschenkliges Dreieck dar, so daß für diesen Injektor die theoretische Ausbringungsmenge nicht nach Gl. 4 berechnet werden kann.



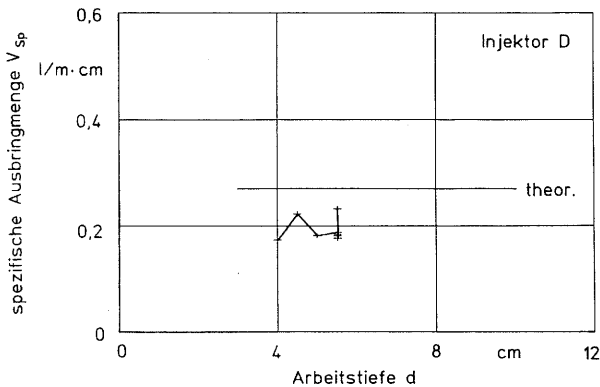
**Bild 43:** Spezifische Ausbringungsmengen für den Injektor B.

Vergleicht man die Ausbringungsmengen der Injektoren A und B dagegen mit der des Injektors D (**Bild 45**), der einen vergleichbaren Injektionsschlitz öffnet, so ist zu erkennen, daß die spezifischen Ausbringungsmengen bei der Flachinjektion geringer sind als bei der Einfachinjektion. Der Eindruck, daß bei geringen Arbeitstiefen größere spezifische Ausbringungsmengen möglich sind, wie dies aus **Bild 42** und **Bild 44** abgeleitet werden könnte ist nicht zutreffend. Die visuelle Bestimmung der maximalen Ausbringungsmenge ist gerade bei geringen Arbeitstiefen und einer dickflüssigen Gulle sehr schwierig. Hier fließt die

Gülle nicht über die Schlitzkanten in das Grünland über, sondern es werden hochgewölbte Güllestränge in einen nur flachen Injektionsschlitz abgelegt. Die Arbeitsqualität ist dann mit der eines Schleppfußverteilers vergleichbar. Durch dieses Auf-türmen des Flüssigmistes über dem Injektionsschlitz wird die spezifische Ausbringung zu hoch beurteilt.



**Bild 44:** Spezifische Ausbringungen für den Injektor C.

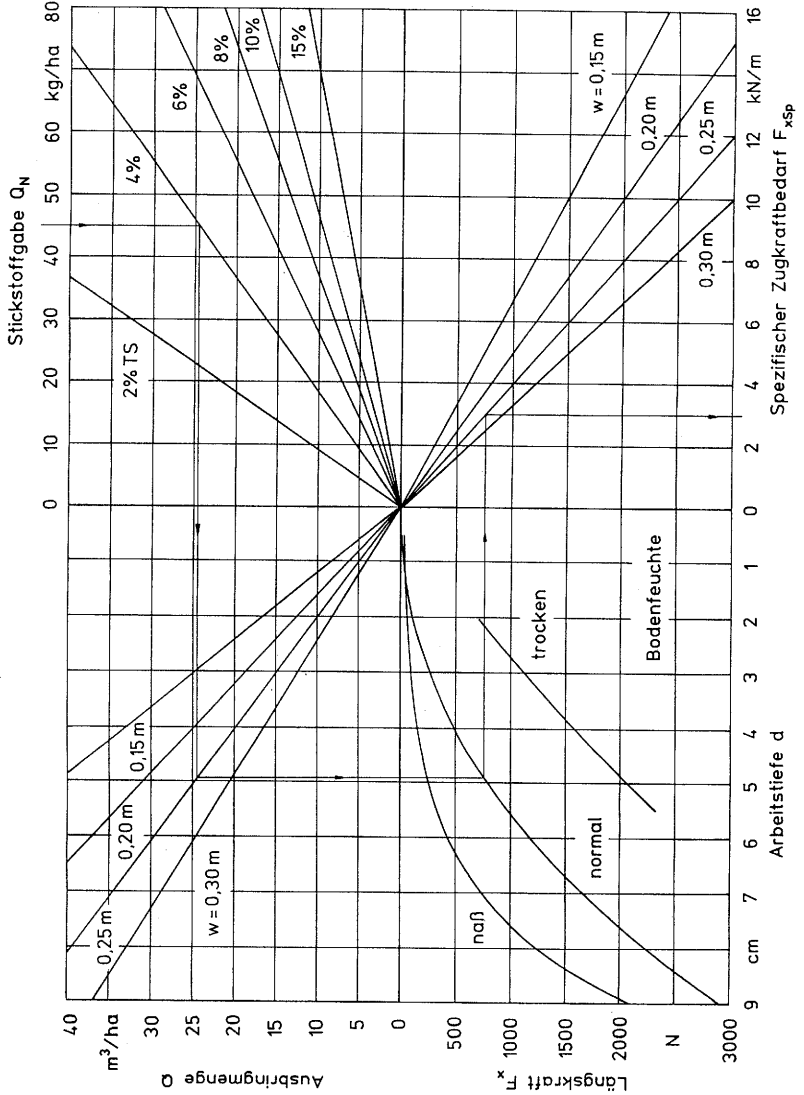


**Bild 45:** Spezifische Ausbringungen für den Injektor D.

Die hier angegebenen Ausbringmengen stellen für den praktischen Einsatz die absoluten Obergrenzen dar. Werden sie überschritten, so gelangt Gülle auf die Grünlandoberfläche. Dadurch steigen die Ammoniakemissionen an, und unmittelbar an den Injektionsschlitzen erstickt der Bewuchs unter der Güllekruste. Trotz des hohen Aufwandes, der für die Injektion erforderlich ist, treten keine positiven Wirkungen auf die Futtermerschmutzung und eventuelle Kontamination des Futters mit Krankheitserregern ein.

### 7.3 Spezifischer Zugkraftbedarf

Da der in Kap. 5.3 beschriebene Rechenvorgang zur Bestimmung des Zugleistungsbedarfs für einen Gülleinjektor relativ aufwendig ist und die Kenntnis spezieller Parameter voraussetzt, wurde die Berechnung für den Injektor A exemplarisch durchgeführt. Als auszubringende Gülle wird Rindergülle mit den Kenndaten nach Tabelle 1 angenommen. Die Ergebnisse der Berechnung lassen sich in Form eines Nomogramms darstellen (**Bild 46**). Ausgehend von der angestrebten Stickstoffgabe  $Q_N$  erhält man den spezifischen Zugkraftbedarf  $F_{xsp}$ , aus dem nach Gleichung 9 der Zugleistungsbedarf für den Gülleinjektor berechnet werden kann. In der Darstellung der Zusammenhänge in der Form eines Nomogramms tritt die Abhängigkeit des spezifischen Zugkraftbedarfs vom Reihenabstand deutlich in Erscheinung.



**Bild 46:** Nomogramm zur Ermittlung des spezifischen Zugkraftbedarfs für den Injektor A.

#### 7.4 Ergebnisse zur Arbeitsqualität

Für eine wirksame Reduktion der Ammoniakemission mit Hilfe der Direkteinbringung von Gülle ist eine gute Arbeitsqualität unabdingbar. Das heißt, die ausgebrachte Güllemenge muß im Injektionsschlitz Platz finden und darf nicht etwa daraus überlaufen. Dazu ist die Ausbringmenge auf die Arbeitstiefe abzustimmen, vgl. Kap. 7.3. Aber auch die konstruktive Gestaltung des Injektors wirkt sich auf die exakte Ablage der Gülle im Schlitz aus. Die gülleführenden Bauteile müssen so abgedichtet sein, daß der Flüssigmist nur durch die dazu vorgesehene Auslauföffnung austritt. Diese Auslauföffnung sollte sich am besten im Injektionsschlitz befinden. Um dies unter allen Bedingungen zu gewährleisten, müssen gefederte Injektoren bodenparallel höhenbeweglich sein. Injektor C, bei dem die Höhenbewegung nicht bodenparallel erfolgt, weicht insbesondere bei trockenen Bodenbedingungen so weit nach oben aus, daß der hinten am Injektor sitzende Gülleauslauf 6 cm über der Grünlandoberfläche bleibt. Die frei zur Erde fallende Gülle wird dann nicht vollständig in den Injektionsschlitz eingebracht, sondern bleibt auch in Streifen links und rechts des Schlitzes auf der Grünlandnarbe liegen. Die Auslauföffnung selbst muß einen ausreichenden Querschnitt haben, so daß sich auch bei den maximal möglichen Ausbringmengen kein Druck in der Gülle aufbaut. Injektor B hat einen Gülleauslauf mit sehr kleinem Querschnitt. Bei Arbeitstiefen von mehr als 7 cm war es nicht möglich, den Injektionsschlitz vollständig mit Gülle auszufüllen. An der Gummitülle baut sich bei den geforderten Ausbringmengen ein Druck auf, so daß die Gülle in den Injektionsschlitz eingespritzt wird. Dadurch wird wieder Flüssigmist aus dem Schlitz nach oben gepreßt und gelangt auf die Grasnarbe. Begünstigt wird dieses Herausschleudern von Gülle durch die Injektionsscheibe, die sehr nahe am Gülleauslauf sitzt. Am Umfang der Scheibe wird zusätzlich Gülle aus dem Schlitz nach oben gefördert und gelangt auf die Grünlandoberfläche.

Eine gute Arbeitsqualität zeigt sich überdies in Injektionsschlitzen, die so beschaffen sind, daß sie innerhalb kürzester Zeit wieder zuwachsen können. Zur Beurteilung des Verhaltens der Injektionsschlitze nach der Gülleausbringung stehen keine Meßverfahren zur Verfügung. Die im folgenden gemachten Aussagen beruhen auf der ständigen Beobachtung der Versuchsfelder und stellen somit nur qualitative Ergebnisse dar:

Zum Ziehen eines scharf eingeschnittenen **Injektionsschlitzes**, was Voraussetzung für ein rasches Zuwachsen ist, sollte die Arbeitstiefe 8 cm nicht überschreiten. Auch die Fahrgeschwindigkeit muß den Gegebenheiten angepaßt werden. Je trockener der Boden ist, um so niedriger muß die Arbeitsgeschwindigkeit gewählt werden. Mit 8 km/h kann, abgesehen von extrem trockenen Bodenzuständen, im allgemeinen problemlos gearbeitet werden. Fahrgeschwindigkeiten von über 12 km/h waren bei gleichzeitig scharf eingeschnittenen Injektionsschlitzen nur mit Injektor C unter idealen Bedingungen möglich.

Hohe **Bodenfeuchten** sind hinsichtlich der am Injektor wirkenden Kräfte günstig. Unter diesen Gegebenheiten steigt aber die Gefahr von Narbenschäden durch das Befahren, und die Seitenwände der Injektionsschlitze verschmieren. Dadurch wird die Infiltration der Gülle in den Boden erschwert und in hängigen Lagen ein Abfließen der Gülle hangabwärts begünstigt. Beim Abtrocknen des Bodens entstehen äußerst harte Schlitzränder, die sich nur sehr zögernd wieder schließen. Wird unter zu feuchten Bodenbedingungen injiziert, können die Injektionsschlitze ein halbes Jahr lang sichtbar sein. Sind die Bodenbedingungen dagegen nur so feucht, daß der Boden gerade nicht mehr schmiert, so schließen sich die Injektionsschlitze in etwa einer Woche.

Einen weiteren Einfluß auf das Zuwachsen der Injektionsschlitze hat die Beschaffenheit der **Grünlandnarbe**. Sehr dichte, grasreiche Bestände fördern das Schließen des Schlitzes durch intensive Wurzeltätigkeit. An unbewachsenen oder von

breitblättrigen Kräutern bewachsenen Stellen bleiben die Injektionsschlitze wesentlich länger offen stehen. Hier kann sich der Injektionsschlitz im wesentlichen nur durch Quell- und Schrumpfvorgänge im Boden zuziehen.

Neben Boden- und Grünlandbeschaffenheit spielt auch die Zusammensetzung der ausgebrachten **Gülle** eine Rolle für das Zuwachsen der Injektionsschlitze. Trockensubstanzreiche Güllen weisen in der Regel höhere Nährstoffkonzentrationen auf als trockensubstanzarme Flüssigmiste. Dadurch kann die Ausbringung reduziert werden, was eine flachere Arbeitstiefe ermöglicht. Die damit verbundene Senkung der erforderlichen Zugkraft mindert die Gefahr von Narbenschäden durch das Befahren. In Hanglagen ist das talwärts Fließen des Flüssigmistes in den Injektionsschlitzen bei dickflüssigen Güllen nicht so stark ausgeprägt. Nach der Infiltration der Gülle in den Boden bleiben die Faser- und Strukturanteile des Flüssigmistes im Injektionsschlitz zurück. Bei Güllen mit einem Trockensubstanzgehalt von mindestens 7 % bleibt nach dem Abtrocknen so viel torfartige Substanz zurück, daß der Schlitz dadurch geschlossen ist. Diese Abdeckung der Injektionsschlitze verhindert ein Austrocknen des Bodens. Durch diese Konservierung der Bodenfeuchte bleibt die Wurzelaktivität erhalten und die Injektionsschlitze wachsen schneller zu. Wird Gülle mit einem Trockensubstanzgehalt von weniger als 5 % ausgebracht, so bleibt nach der Infiltration ein tiefer, offen stehender Schlitz zurück. Durch die Einstrahlung trocknet der Boden gerade in diesen Bereichen verstärkt ab, wodurch das Zuwachsen der Injektionsschlitze erschwert ist.

Diese unerwünschte Austrocknung des Bodens um den Injektionsschlitz wird durch eine **Lockerung des Bodens** in diesem Bereich gefördert. Hier zeigen sich Unterschiede zwischen den einzelnen Injektoren. Eine gewisse lockernde Wirkung haben die Injektoren A und B. Besonders die dicke Injektionsscheibe zieht beim Herauslaufen aus dem Boden die Schnittkanten etwas nach oben mit. Sehr viel stärker ausgeprägt ist dieser Effekt



beim Injektor C, da die sich aufwärts bewegenden hinteren Scheibenbereiche zusätzlich seitlich auf die Schlitzwand drücken. Beim Injektor D ist keine Bodenlockerung zu beobachten, da keine aufwärts gerichteten Kräfte auf die Schnittkanten wirken. Wie stark sich diese bodenlockernden Effekte auswirken, ist von der Bodenfeuchte abhängig. Bei nassen Böden ist sie kaum ausgeprägt, während bei den sehr trockenen Bedingungen nur noch Injektor D in der Lage war, einen sauber geschnittenen Injektionsschlitz durch das Grünland zu ziehen. Unter solchen Bedingungen kann die Bodenlockerung dadurch etwas verringert werden, daß mit der Fahrgeschwindigkeit zurückgegangen wird. Die bodenlockernde Wirkung der sich drehenden Injektionswerkzeuge kann durch Schleifkufen, die den Boden niederhalten, gemindert werden. Um ein sicheres Andrücken des Bodens auf der unebenen Grünlandoberfläche zu gewährleisten muß sehr stark auf den Injektor gedrückt werden, so daß die Kufe unmittelbar auf der Grasnarbe aufsitzt. Die dabei auftretenden Reibkräfte sind so hoch, daß sie den Zugkraftbedarf spürbar ansteigen lassen [56]. Auch eine Schädigung der Pflanzen unter der Schleifkufe kann dann nicht ausgeschlossen werden.

Die genannten Faktoren Bodenfeuchte, Narbendichte und Güllezusammensetzung haben auf das Schließen der Injektionsschlitze wesentlich stärkeren Einfluß als die an Flachinjektoren vorhandenen **Schließeinrichtungen**. Bei höheren Arbeitsgeschwindigkeiten geraten die Schließscheiben, bedingt durch die Unebenheiten der Grünlandnarbe, ins Springen. Dadurch wird der Injektionsschlitz nicht nur ungleichmäßig geschlossen, sondern es besteht die Gefahr von Narbenschäden durch die auf den Boden aufschlagende Schließeinrichtung. Die Schließeinrichtungen der im Versuch eingesetzten Injektoren sind im Anpreßdruck nicht einstellbar. Dadurch war ein vollständiges Schließen des Schlitzes, das heißt ein Zudrücken der obersten Zentimeter, auf den lehmigen Böden nicht möglich. Hier wurde eher die gesamte Schlitzwand leicht nach innen gebogen. Wird eine Schließeinrichtung eingesetzt, so muß sie sehr exakt über dem

Injektionsschlitz geführt werden. Ist sie nur leicht seitlich versetzt oder seitenbeweglich, so kann eine SchlieÙscheibe in den gullegefüllten Injektionsschlitz eintauchen und die Gülle auf die Grünlandoberfläche herausfördern. Neben dem Problem der exakten Einstellung der SchlieÙeinrichtung ist ein weiterer Gesichtspunkt von Bedeutung. Die SchlieÙeinrichtung reduziert die Querschnittsfläche des Injektionsschlitzes. Daher müssen Flachinjektoren bei der Ausbringung gleicher Güllemengen tiefer arbeiten als vergleichbare Einfachinjektoren.

Gülleinjektoren für Grünland müssen für die Arbeit an **Längs- und Seitenhang** geeignet sein. Dies betrifft zum einen den Verteiler, der auch unter diesen Bedingungen die Gülle gleichmäßig auf die einzelnen Injektionsschare verteilen muß, zum anderen die Injektoren selbst. Auf einer Grünlandfläche mit einer Steigung von 12 % wurden erste Versuche zum Hangeinsatz von Injektoren durchgeführt. Bei der Arbeit am Seitenhang waren die Bedingungen nahezu gleich denen in der Ebene. Injektoren mit kurzer Baulänge zeigen hier Vorteile, da sich ein eventueller seitlicher Versatz der hintereinander angeordneten Elemente nicht so stark auswirkt. Wenn eine SchlieÙeinrichtung exakt über dem Injektionsschlitz geführt wird, kann sie die talseitig stärker aufgewölbte Schnittkante wieder zurückschieben, wodurch sich ein gefälligeres Arbeitsbild ergibt. Die Ausbringmengen können so hoch liegen wie bei der Arbeit in der Ebene. Seitenbewegliche Injektoren schwenken beim Ausheben zur Talseite hin. Dabei werden unter Umständen Stücke der Grünlandnarbe abgerissen. Wird die Injektion dagegen längs des Hanges vorgenommen, so muß die Ausbringmenge sehr deutlich zurückgenommen werden. Die im Versuch eingesetzte Gülle wies einen Trockensubstanzgehalt von lediglich 3,5 % auf und floß in den Injektionsschlitz talwärts. Diese Notwendigkeit zur Reduktion der Ausbringmenge wird beim Bergabfahren deutlicher, da sich hier die talwärts fließende Gülle am Injektor staut und auf die Grünlandoberfläche austritt. Wird hangaufwärts injiziert, so ist unmittelbar am Injektor kein Überlaufen des Injektionsschlitzes festzustellen. Der Flüssigmist tritt viel-

mehr an Stellen aus dem Schlitz aus, an denen der Injektions-  
schlitz durch Steine o.ä. verengt ist. Es scheint so, als ob  
Schließeinrichtungen das Abfließen der Gülle verlangsamen kön-  
nen. Zum Einsatz von Grünlandinjektoren am Hang besteht aber  
noch ein großer Forschungsbedarf, zumal Längs- und Seitenhang  
in der Praxis oft gemeinsam vorliegen. Auch das Verhalten  
trockensubstanzreicher Gülle nach der Ausbringung am Hang ist  
noch zu klären.

## 8 AUSBLICK

Die Direkteinbringung von Flüssigmist in Grünland ist technisch machbar. Es stehen auch Erkenntnisse über die konstruktive Gestaltung von Injektoren und ihre Auswirkung auf Arbeitsqualität und Zugkraftbedarf zur Verfügung. In diesem Bereich kann durch gezielte Veränderungen an bestimmten Punkten versucht werden, einen Injektor zu entwickeln, der auch unter suboptimalen Randbedingungen eine gute Arbeitsqualität bei gleichzeitig minimalem Zugkraftbedarf garantiert. Denkbar sind hier zum Beispiel federbelastete Druckräder, die anstelle der starren Schleifkufen das Hochziehen der Grünlandnarbe an umlaufenden Injektionswerkzeugen verhindern. Die einzelnen Bauteile eines Injektors sind zu diesem Zweck getrennt auf ihren Arbeitseffekt, sowie auf die an ihnen wirkenden Kräfte zu untersuchen. Dies ist im Rahmen von Feldversuchen praktisch nicht durchführbar und muß daher in einer Bodenrinne vorgenommen werden.

Über den Einsatz von Gülleinjektoren am Hang liegen noch keine detaillierten Erkenntnisse vor, obwohl dieser Bereich für einen Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis von großer Bedeutung ist.

Für eine genaue Einordnung des Verfahrens der Gülleinjektion auf Grünland sind darüberhinaus weitere Fragestellungen zu bearbeiten, die über den rein technischen Ansatz hinausgehen. Durch die drastische Reduzierung der Ammoniakemissionen kommt im Vergleich zur oberflächigen Gülleausbringung deutlich mehr pflanzenverfügbare Stickstoff in den Boden. Hier ist zu klären, ob dieser Ammoniumstickstoff in erster Linie direkt von den Pflanzen verwertet wird, oder ob er nitrifiziert wird, was die Gefahr einer Nitratauswaschung ins Grundwasser erhöhen kann. Auch Denitrifikationsvorgänge müssen in diesem Zusammenhang beachtet werden, da hier außer elementarem Stickstoff auch Distickstoffoxid ( $N_2O$ , "Lachgas") entstehen kann. Distickstoffoxid ist ein Gas, das stark zur Erwärmung der Erd-

atmosphäre beiträgt und das Gleichgewicht zwischen Ozonabbau und -neubildung beeinflusst.

Die Auswirkungen eines Einsatzes von Gülleinjektoren auf das Grünland sind unter pflanzenbaulichen Gesichtspunkten zu beobachten. Insbesondere eine langjährige und häufige Anwendung dieses Verfahrens ist dabei zu berücksichtigen. Die Reaktion des Grünlandstandortes und die Artenzusammensetzung des Bestandes müssen erfaßt werden. Aus der Kenntnis dieser Zusammenhänge können möglicherweise Kulturmaßnahmen abgeleitet werden, die eine dauernde Anwendung der Gülleinjektion ohne nachteilige Auswirkungen auf das Grünland ermöglichen.

In diesem Zusammenhang ist auch der pflanzenbaulich optimale Abstand zwischen den Injektionsschlitzten von Bedeutung. Dieser Abstand ist auf seine Auswirkungen auf die Höhe der Ammoniakemissionen und auf den erforderlichen Zugleistungsbedarf hin zu überprüfen.

## 9 ZUSAMMENFASSUNG

Die unangenehmsten Geruchsbelästigungen, die von Tierhaltungsbetrieben ausgehen, entstehen bei der Flüssigmistausbringung. In jüngster Zeit finden darüber hinaus Ammoniakemissionen ein wachsendes Interesse, da sie an der Ausbildung komplexer Umweltschäden beteiligt sind. Die Gülleausbringung stellt die stärkste Emissionsquelle für Ammoniak dar.

Auf Grünland ist der Emissionsdruck nach der Flüssigmistausbringung besonders hoch, da die Gülle auf einer großen Pflanzenoberfläche verteilt wird und nicht sofort mit dem Boden in Kontakt kommt. Eine direkte Einarbeitung des ausgebrachten Flüssigmistes, die das Emissionsgeschehen drastisch reduziert, war hier bisher nicht möglich.

Heute stehen Maschinen zur Verfügung, mit denen die Gülle in schmalen Schlitzen streifenförmig in die Grünlandnarbe eingebracht wird. Diese Gülleinjektoren arbeiten 4 bis 8 cm tief. Werden die Schlitze mit geeigneten Schließeinrichtungen wieder geschlossen, handelt es sich um Flachinjektoren. Beim Einfachinjektionsverfahren bleiben die Injektionsschlitze dagegen offen stehen. Beide Injektionsverfahren erlauben eine geruchsfreie und nahezu ammoniakemissionsfreie Gülleausbringung auf Grünland. Sie wirken sich darüber hinaus günstig auf die Futterschmutzung und auf die mögliche Kontamination des aufwachsenden Futters mit Krankheitserregern oder Parasiten aus.

Das Einbringen der Gülle in die Wurzelzone der Grünlandnarbe kann mit unterschiedlichen Werkzeugen verwirklicht werden. Es wurden vier verschiedene Injektorbauarten, jeweils zwei Einfach- und zwei Flachinjektoren, im Feldversuch untersucht. Mit einer neu entwickelten Versuchseinrichtung konnten dabei die zwischen Boden und Injektor wirkenden Längs- und Normalkräfte, sowie das am Injektionswerkzeug angreifende Moment gemessen werden. Parallel dazu wurden Arbeitstiefe, Fahrgeschwindigkeit und ausgebrachte Güllemenge ermittelt. Die Arbeitsqualität der

Injektoren wurde durch Beobachtung der Arbeitsweise während des Versuches, sowie durch Beobachtung der Grünlandfläche nach der Injektion qualitativ bestimmt.

Den entscheidenden Einfluß auf die Höhe der am Injektor wirkenden Kräfte hat die Arbeitstiefe. Sowohl Längs- als auch Normalkräfte steigen mit zunehmender Arbeitstiefe stetig an. Die absolute Höhe der Kräfte ist dabei stark von der Bauart des Injektors abhängig. Injektoren mit Scheibensech und stromlinienförmigem Injektionsschar bewirken mittlere Längskräfte, die stark vom Bodenfeuchtegehalt abhängig sind. Die Normalkräfte sind dagegen niedrig und kaum von der Bodenfeuchte beeinflusst.

Injektoren mit einer dicken Injektionsscheibe, die sowohl die Grünlandnarbe durchschneidet als auch den Injektionsschlitz ausformt, rufen etwa gleich hohe Längskräfte hervor wie die zuvor geschilderte Bauform. Die an der Injektionsscheibe angreifenden Normalkräfte sind dagegen sehr hoch. Bei geringen Bodenfeuchten steigen auch hier die Längskräfte deutlich an. Auch die Normalkraft nimmt, besonders bei geringen Arbeitstiefen, bei trockeneren Bodenzuständen stark zu.

Injektoren mit zwei V-förmig angestellten Scheibensechen bewirken nur geringe Längskräfte, die zudem nur wenig von der Bodenfeuchte abhängig sind. Bei dieser Bauart treten hohe Normalkräfte auf, die zudem deutlich von der Bodenfeuchte beeinflusst werden.

An Injektoren mit festem Messersech wirken die höchsten Längskräfte. Die Normalkräfte sind hier niedrig, wobei mit diesem Injektor aufgrund seiner Konstruktion keine großen Arbeitstiefen möglich waren. Die Bodenfeuchte wirkt sich hier nur in geringem Umfang auf die Längskräfte aus.

Die Fahrgeschwindigkeit wirkt sich bei allen Injektoren nicht auf die Höhe der auftretenden Kräfte aus. Dies gilt bei allen

Bodenfeuchten sowohl für die Längs- als auch für die Normalkräfte.

Die maximal ausbringbare Güllemenge eines Injektors richtet sich nach der Querschnittsfläche des Injektionsschlitzes, den dieser im Boden freiräumt. Dieser Querschnitt wird durch eine Schließeinrichtung wieder verengt, wodurch Flachinjektoren geringere spezifische Ausbringmengen aufweisen als Einfachinjektoren.

Eine gute Arbeitsqualität zeigt sich dadurch, daß die Schäden an der Grünlandnarbe minimal sind und die Injektionsschlitzte innerhalb kürzester Zeit wieder zuwachsen. Dieses Schließen der Injektionsschlitzte wird weniger von der Schließeinrichtung beeinflußt als von den Rahmenbedingungen. Dichte, grasreiche Grünlandnarben, trockensubstanzreiche Güllen und eine Bodenfeuchte, bei der der Boden noch nicht schmiert, sind die besten Voraussetzungen dafür, daß die Injektionsschlitzte bereits nach wenigen Tagen kaum noch sichtbar sind.



10 LITERATUR

- [1] KUTZBACH, H. D.: Direkteinbringung von Gülle auf Grünland und Versuchseinrichtungen für grundlegende Untersuchungen an Injektoren. Proceedings of the International Scientific Conference "Trends in Agricultural Engineering", Prag, 15.-18.09.1992, Vol. II, S. 659 - 664.
- [2] LOMMATZSCH, R.: Die Fließeigenschaften von Rindergülle. Deutsche Agrartechnik 19 (1969) H. 7, S. 318 - 321.
- [3] STRAUCH, D., BAADER, W. und C. TIETJEN: Abfälle aus der Tierhaltung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1977.
- [4] VETTER, H. und G. STEFFENS: Wirtschaftseigene Düngung. DLG-Verlag, Frankfurt, 1986.
- [5] RÜPRICH, W.: Geruchsfreie Gülle. DLG-Verlag, Frankfurt, 1980.
- [6] EDER, G.: Der Einfluß steigender Güllegaben auf den Boden, den Pflanzenenertrag, die Futterqualität und das Sickerwasser. Tagung der Arbeitsgruppe 5 des FAO-Verbundsystems "Animal Waste Utilization", Gumpenstein, 1985, S. 1 - 19.
- [7] MÜLLER, W.: Hygiene landwirtschaftlicher und kommunaler Abfallbeseitigungssysteme. Hohenheimer Arbeiten Bd. 69, Verlag Eugen Ulmer, 1973.
- [8] SCHECHTNER, G.: Nährstoffwirkung und Sonderwirkungen der Gülle auf dem Grünland. Bericht über die 7. Arbeitstagung "Fragen der Güllerei", Gumpenstein, 1981, S. 135 - 196.
- [9] KOWALEWSKY, H.-H.: Messen und Bewerten von Geruchsimmissionen. KTBL-Schrift 260, 1981.
- [10] N. N.: Emissionen von Ammoniak. Arbeitsmaterialien des Bundesamtes für Ernährung und Forstwirtschaft, Frankfurt, 1989.

- [11] N. N.: Ammoniak in der Umwelt. Tagungsband VDI-/KTBL-Symposium, 10.-12.10.1990, Braunschweig.
- [12] ISERMANN, K.: Ammoniakemissionen der Landwirtschaft als Bestandteil ihrer Stickstoffbilanz und Lösungsansätze zur hinreichenden Minderung. VDI-/KTBL-Symposium "Ammoniak in der Umwelt", 10.-12.10.1990, Braunschweig, S. 1.1 - 1.76.
- [13] MÖLLER, D. und H. SCHIEFERDECKER: Ammoniakbilanz für das Gebiet der DDR. VDI-/KTBL-Symposium "Ammoniak in der Umwelt", 10.-12.10.1990, Braunschweig, S. 5.1 - 5.11.
- [14] OOSTHOEK, J., KROODSMA, W. und P. HOEKSMa: Betriebliche Maßnahmen zur Minderung von Ammoniakemissionen aus Ställen. VDI-/KTBL-Symposium "Ammoniak in der Umwelt", 10.-12.10.1990, Braunschweig, S. 29.1 - 29.23.
- [15] DE BODE, M. J. C.: Vergleich der Ammoniakemissionen aus verschiedenen Flüssigmistlagersystemen. VDI-/KTBL-Symposium "Ammoniak in der Umwelt", 10.-12.10.1990, Braunschweig, S. 34.1 - 34.13.
- [16] DIENST LANDBOUW VOORLICHTING: Nieuwe Systemen bij Mest-Aanwending. DLV brochure R2, 1990.
- [17] ROBERTSON, A. M.: Farm wastes handbook. The Scottish Farm Buildings Investigation Unit, Aberdeen, 1977.
- [18] REED, C. H.: Disposal of poultry manure by plow-furrow-cover method. ASAE Publication No. SP-0366, St. Joseph, Michigan, 1966, S. 52 - 53.
- [19] GOLD, R. C., SMITH, J. L. und R. D. HALL: Development of an organic waste slurry injector. ASAE-Paper Nr. 73-4529, 1973.
- [20] HODGSON, J. H.: Development of a liquid manure spreading and injection system. ASAE-Paper Nr. 76-1585, 1976.

- [21] NEGI, S. C., MCKYES, E., GODWIN, R. J. und J. R. OGILVIE:  
Design and performance of a liquid manure injector. Transactions of the ASAE Vol. 21 (1978) Nr. 5, S. 963 - 966, 971.
- [22] ROSS, I. J., SIZEMORE, S., BOWDEN, J. P. und C. T. HAAN:  
Quality of runoff from land receiving surface application and injection of liquid dairy manure. Transactions of the ASAE Vol. 22 (1979) Nr. 6, S. 1058 - 1062.
- [23] TRAULSEN, H.: Verfahren zur Beseitigung tierischer Exkremente. KTBL Berichte über Landtechnik Nr. 147, 1971.
- [24] FORSTER, A. G.: Maßnahmen gegen die Geruchsentwicklung bei der Flüssigmistausbringung. Landtechnik Bd. 26 (1971) Nr. 5, S. 122 - 125.
- [25] KRAUSE, R.: Transport, Verteilen und Einbringen. Deutsche landwirtschaftliche Presse, 96 (1973), Nr. 1, S. 9 - 10.
- [26] KRAUSE, R. und M. ZACH: Technische Grenzen bei der Rückführung von Flüssigmist in den Boden. Landtechnik Bd. 29 (1974) Nr. 5, S. 205 - 209.
- [27] KRAUSE, R.: Verfahren zur Landanwendung von Flüssigmist. Landbauforschung Völkenrode 24 (1974), H. 1, S. 49 - 54.
- [28] ZEISIG, H. D. und G. LANGENEGGER: Geruchsbeseitigung bei der Förderung, Lagerung und Ausbringung von Flüssigmist. Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan, 1975.
- [29] LANGENEGGER, G. und H. D. ZEISIG: Zwingt uns der Umweltschutz den Güllegrubber auf? dlz 26 (1975) H. 3, S. 183 - 186.
- [30] BLANKEN, G.: So kann Gülle nicht mehr stinken. top-agrar (1974) H. 7, S. 38 - 40.

- [31] CLEMENS, P.: Gölledrill: am ehesten auf leichtem Boden und ebenem Gelände. top-agrar (1975) H. 11, S. 36 - 39.
- [32] VOGT, C.: Den Mief mit in den Boden bringen. top-agrar (1979) H. 8, S. 60 - 64.
- [33] BANK, G.: Den Umweltansprüchen Rechnung tragen. WWL/BWL 157 (1990) H. 3, S. 17 - 18.
- [34] DÖHLER, H.: Stickstoffverluste beim Göllelen in Grenzen halten. dlz 41 (1990) H. 4, S. 30 - 34.
- [35] NOREN, O.: Swedish experiences with soil injection. Odour prevention and control of organic sludges and livestock farming. Proceedings of FAO/EEC Workshop, NIAE, Silsoe, April 1985.
- [36] LARSEN, K. E.: Injection of cattle slurry to barley, beet, grass and maize. DAM KOFOED, A., WILLIAMS, J. H. und P. L'HERMITE (ed.): Efficient land use of sludge and manure. London, Elsevier Applied Science Publishers, 1986, S. 73 - 77.
- [37] KEMPPAINEN, E.: Effect of cattle slurry injection on the quantity and quality of barley and grass yield. DAM KOFOED, A., WILLIAMS, J. H. und P. L'HERMITE (ed.): Efficient land use of sludge and manure. London, Elsevier Applied Science Publishers, 1986, S. 64 - 72.
- [38] PAIN, B. F. und D. M. BROOM: The effects of injected and surface-spread slurry on the intake and grazing behaviour of dairy cows. Animal Production, 1978, 26, S. 75 - 83.
- [39] TUNNEY, H. und S. P. MOLLOY: Comparison of grass production with soil injected and surface spread cattle slurry. DAM KOFOED, A., WILLIAMS, J. H. und P. L'HERMITE (ed.): Efficient land use of sludge and manure. London, Elsevier Applied Science Publishers, 1986, S. 90 - 98.

- [40] HALL, J. E.: Soil injection research in the UK. DAM KO-FOED, A., WILLIAMS, J. H. und P. L'HERMITE (ed.): Efficient land use of sludge and manure. London, Elsevier Applied Science Publishers, 1986, S. 78 - 89.
- [41] WARNER, N. L. und R. J. GODWIN: An experimental investigation into factors influencing the soil injection of sewage sludge. J. agric. Engng. Res. 39 (1988) 39, S. 287 - 300.
- [42] GODWIN, R. J., WARNER, N. L. und M. J. HANN: The reduction of odour during slurry disposal: Evaluation and Improvement of Soil Injection Techniques. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Contract No. CSA 1054, Sept. 1989.
- [43] BOSMA, A. H.: Het injecteren van mengmest. Bedrijfsontwikkeling 6 (1975) 12, S. 999 - 1001.
- [44] BOSMA, A. H., CAPPON, A. und J. VAN KLARENBEEK: Ontwikkeling van een onderzoek aan een zelfrijdende mestinjecteur. Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen (IMAG) Wageningen, Publicatie 87, 1977.
- [45] KOLENBRANDER, G. J.: Effect of injection of animal waste on ammonia losses by volatilization on arable land and grassland. BROGAN, J. C. (ed.): Nitrogen losses and surface run off from landspreading of manures. Nijhoff/Junk, the Hague 1981, S. 425 - 430.
- [46] BUITINK, W. J.: De ontwikkeling van een praktijkmachine voor het injecteren van mengmest. Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen (IMAG) Wageningen, Publicatie 214, 1985.
- [47] BUITINK, W. J.: Persönl. Mitteilung, 1990.
- [48] MINISTERIE VAN LANDBOUW, NATURBEHEER EN VISSERIJ: Demoproject Mestaanwending met minimale Ammoniakemissie, Eindrapport, Ede, 1990.

- [49] FALK, R.: Meßverfahren zur Beurteilung von Emissionen nach der Flüssigmistausbringung. Dissertation Universität Hohenheim, in Vorbereitung.
- [50] GODWIN, R.J.: An Extended Octagonal Ring Transducer for Use in Tillage Studies. J. agric. Engng. Res. Bd. 20 (1975), S. 347 - 352.
- [51] COOK, N.H. und E. RABINOWICZ: Physical Measurement and Analysis. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1963.
- [52] HEINE, A.: Experimenteller Beitrag zum Schräglauf- und Lenkmomentverhalten rollender Reifen landwirtschaftlicher Fahrzeuge auf starrer und nachgiebiger Fahrbahn. Dissertation Universität Stuttgart, 1991.
- [53] WEIS, G. B.: Persönl. Mitteilung, Institut für Pflanzenbau und Grünlandlehre der Universität Hohenheim, 1991.
- [54] HENNING, I.: Persönl. Mitteilung, Institut für Physik der Universität Hohenheim, 1992.
- [55] CLEMENS, G.: Persönl. Mitteilung, Institut für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim, 1992.
- [56] HUIJSMANS, J. F. M. und J. G. L. HENDRIKS: Persönl. Mitteilung, Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen, Wageningen, NL, 1992.



ISSN 0931-6264